

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

**AVALIAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DE
GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS SOB DIFERENTES ESFORÇOS
SOLICITANTES**

DÉBORA LOUYSE ALPES DE MELO

Orientador: **ENNIO MARQUES PALMEIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.DM – 310/18

BRASÍLIA – DF - JULHO DE 2018.

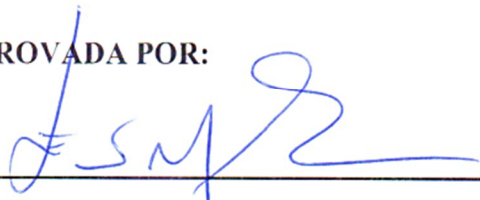
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA ABERTURA DE FILTRAÇÃO DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS
SOB DIFERENTES ESFORÇOS SOLICITANTES

DÉBORA LOUYSE ALPES DE MELO

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

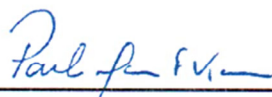
APROVADA POR:



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



LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



PAULO MÁRCIO FERNANDES VIANA, DSc (UEG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF – 13 de julho de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

MELO, DÉBORA LOUYSE ALPES DE;

Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob diferentes esforços solicitantes. [Distrito Federal] 2018.

xix, - 80p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Geotêxtil

2. *Bubble Point Test*

3. Condições

4. Deformação de tração

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MELO, D.L.A. (2018). **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob diferentes esforços solicitantes.** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-310/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: DÉBORA LOUYSE ALPES DE MELO.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob diferentes esforços solicitantes.**

GRAU / ANO: Mestre / 2018.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Débora Louyse Alpes de Melo

Rua Costa e Silva, 208 Apartamento 302 - IPSEP
51.190-120 – Recife/PE – Brasil

DEDICATÓRIA

*A minha família,
em especial aos meus pais, ao meu querido irmão e
ao meu tio Djalma, com todo o meu amor e gratidão.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jacyara e Djair, agradeço por todo o amor e carinho dedicados a mim. Ao meu querido irmão Diego, por todo o seu incentivo e apoio. Ao pequeno Otávio, saber que você chegou trouxe-me mais doçura e energia. Sei que com vocês posso contar, fazendo-me mais forte para continuar.

Ao meu tio Djalma por todo o incentivo aos estudos, mostrando-me que apesar de ardo este ainda é o nosso melhor caminho.

Ao Pedro Hamann, por seu companheirismo impecável estando ao meu lado, sendo paciente e incentivador. A Elizabete e Nilton, agradeço o apoio e cuidados que a mim dedicaram.

Ao prof. Eder Santos, agradeço todo o ensinamento trocado, sua dedicação e incentivo a carreira acadêmica, e que por teus incentivos almejei ainda mais. Agradeço também, ao prof. Alexandre Gusmão por compartilhar suas experiências e assim incentivar seus alunos a tentar fazer o melhor como engenheiros e pessoas, em especial por acreditar em mim.

Ao meu orientador, prof. Ennio Palmeira, agradeço imensamente toda a sua dedicação, paciência e disponibilidade. Seu cuidado em transmitir o ensinamento é encantador, fazendo dos contratempos intrínsecos ao trabalho experimental uma grande oportunidade de aprendizado. Confesso minha admiração e gratidão.

A minha turma de mestrado, agradeço a oportunidade de trabalhar com vocês, fazendo das nossas diferenças uma oportunidade de crescimento e colaboração. Ao Marcone, em especial pelo seu companheirismo e leveza fazendo dos estresses do nosso dia a dia menores.

A equipe do laboratório, muito obrigada. Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia agradeço por toda ajuda. Em especial agradeço a Ana Carolina por sua prestatividade, a Andressa por toda a sua alegria contagiante, ao Chan por sua disponibilidade e paciência, ao Isac por todas as dicas trocadas e apoio, a Luiza agradeço todo o incentivo e pelos cafés ao fim do dia, ao Michael toda a confiança e pelas palavras serenas que muito me encorajou. Muito obrigada a vocês.

Ao Programa de pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), aos professores por todo o conhecimento compartilhado. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço a Deus pelas oportunidades e por ser sempre presente em minha vida, guiando os meus passos e dando-me forças para continuar.

OBRIGADA.

Devido as atuais demandas ambientais e o maior nível de regulação, materiais granulares usualmente utilizados com função de filtros vêm dando espaço para novas alternativas com menor impacto ambiental e melhor custo-benefício, nesse cenário geotêxteis vêm ganhando atenção. Apesar de geotêxteis apresentarem bom desempenho na função de filtro, é necessário compreender o comportamento deste material quando solicitado em condições de campo. Tendo como base tal premissa, a presente dissertação teve como objetivo avaliar a abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob condições de confinamento e tracionamento, situações estas que podem ocorrer quando estes materiais são utilizados em aplicações de separação, tubos geotêxteis ou barreiras para sedimentos. Três geotêxteis não tecidos, de poliéster, agulhados e com três diferentes gramaturas (200, 300, 510 g/m²) foram ensaiados. Os esforços solicitantes foram aplicados ao geotêxtil em duas condições, normal ao plano e no plano do geotêxtil, para a avaliação dos efeitos de confinamento e tracionamento, respectivamente. Foram aplicadas deformações de tração de até 20% para simular condições de deformação plana e deformações biaxiais assimétricas. Dentre os resultados obtidos no presente estudo, as aberturas de filtração foram reduzidas pelo confinamento, entretanto, para as condições de deformações de tração foram observadas mudanças na abertura de filtração, as quais não apresentaram tendência definida. Para o geotêxtil não tecido de 200g/m² a aplicação de esforços de tração mostrou aumento da abertura de filtração. A aplicação de deformações de tração no geotêxtil de 510g/m² sugere uma redução nas dimensões dos poros. Entretanto, para o geotêxtil não tecido de 300g/m² o efeito dos esforços de tração sob a abertura de filtração foi variado, ocorrendo ampliações e/ou reduções. O aumento ou diminuição da abertura de filtração está associado à distribuição dos filamentos do geotêxtil e à orientação da solicitação de tração em relação a esta distribuição. Deve-se notar que, no que se refere ao efeito do tracionamento, a variação entre a condição sem tracionamento e as condições sob tracionamento situou na faixa de +20% e -15%. Os resultados obtidos sugerem que em aplicações onde baixas deformações de tração são esperadas, como em aplicações de separação, o tracionamento do geotêxtil sob condições usuais (deformações menores que 10%), associado ao confinamento, não seria relevante para o seu comportamento como filtro, a menos de danos mecânicos localizados. Já em aplicações sem confinamento (tubos geotêxteis e barreiras de sedimentos) onde maiores deformações de tração são esperadas, o efeito do tracionamento sobre as características filtrantes do geotêxtil pode ser mais relevante.

Due to the current environmental demands and the higher level of regulation, granular materials usually used as filters have given way to new alternatives with less environmental impact and better cost-benefit. In this scenario geotextiles have been gaining attention. Although geotextiles perform well as filters, it is necessary to better understand the behavior of this material under field conditions. Based on this condition, the present work had as objective to evaluate the filtration opening size of nonwoven geotextiles under conditions of confinement and tension, which can take place in application of such materials in separation, geotextile tubes or silt fences. Three nonwoven polyester needle-punched geotextiles with different masses per unit area (200, 300, 510 g/m²) were tested. Loads were applied to the geotextile specimens under two conditions, normal to the plane and in the geotextile plane, in order to evaluate the influences of confinement and tension, respectively. Geotextile deformations of up to 20% were applied under plane strain and biaxial asymmetric strains conditions. It was observed in the present study that the filtration opening sizes were reduced by confinement. However, for the conditions of tensile strains, changes in the filtration opening sizes were observed, which did not present a definite trend. For the nonwoven geotextile of 200g / m² the application of tensile stresses showed an increase of the filtration opening size. The application of tensile deformations to the 510g / m² geotextile suggests a reduction in pore sizes. However, for the 300g / m² nonwoven geotextile the effect of tensile stresses on the filtration opening size showed increases or reductions. The increase or reduction of geotextile filtration opening size depends on the distribution of fibers and the orientation of the tensile load with respect to that distribution. However, it should be noted that with regard to the effects of tensile strains, in comparison of unstressed sample with stressed sample, the results typically varied in the range + 20% and -15%. The results obtained suggest that in application where low strain levels are expected, such as in separation, the tensile strains expected (typically less than 10%), associated with confinement, would not be relevant to filter performance, unless localized mechanical damages take place. On the other hand, in applications where larger tensile strains are expected (geotextile tubes and silt fences) the influence of the tensile strain on the geotextile filter properties may be relevant.

CAPÍTULO 01	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação da Pesquisa.....	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo Geral	2
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Estrutura da Dissertação	3
CAPÍTULO 02	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Uso de Geossintéticos como Elemento de Filtração.....	4
2.2. Filtros Geotêxteis Não Tecidos.....	6
2.2.1. Formação da Malha e Disposição dos Elementos Estruturais.....	6
2.2.2. Fixação dos Elementos Estruturais	7
2.2.3. Estrutura dos geotêxteis não tecidos	8
2.3. Abertura de filtração (O_f).....	9
2.4. Critérios de Dimensionamento	10
2.4.1. Critério Anti-Colmatação	10
2.4.2. Critério de Sobrevivência.....	11
2.4.3. Critério de Permeabilidade.....	11
2.4.4. Critério de Retenção.....	13
2.5. Métodos de Avaliação de Filtros Geotêxteis	15
2.5.1. Métodos Teóricos	16
2.5.2. Peneiramento	17
2.5.3. Análise de Imagens	18
2.5.4. Intrusão de Mercúrio	18

2.5.5.	<i>Bubble Point</i> (BBP).....	19
2.6.	Esforços Aplicados a Filtros Geotêxteis	21
2.6.1.	Esforços Confinantes.....	22
2.6.2.	Esforços de Tração	24
CAPÍTULO 03		26
3.	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	26
3.1.	Materiais	26
3.1.1.	Geotêxteis Não Tecidos	26
3.1.2.	Líquido de Saturação.....	26
3.2.	Equipamentos.....	27
3.2.1.	Prensa de Tração Uniaxial.....	27
3.2.2.	Prensa de Tração Biaxial.....	28
3.2.3.	Moldura de Fixação do GTN	29
3.2.4.	Fluxômetro – Fluke 922	29
3.2.5.	Equipamento de Ponto de Bolha (<i>Bubble Point Test</i>).....	29
3.2.6.	Sistema de Aplicação do Confinamento	31
3.2.7.	Sistema de Aquisição de Dados	32
CAPÍTULO 04		33
4.	METODOLOGIA	33
4.1.	Preparação das Amostras	33
4.2.	Avaliação da Gramatura	34
4.3.	Avaliação da Resistência à Tração Uniaxial.....	35
4.4.	Programa de Ensaios.....	35
4.5.	Procedimentos para o Tracionamento das Amostras	36
4.6.	Procedimentos para Confinamento da Amostra	39
4.7.	Procedimentos Para o Ensaio de Ponto de Bolha (BBP)	39
4.8.	Determinação da Curva de Distribuição das Dimensões dos Poros	44

4.9.	Ensaio Preliminares e Calibração.....	44
4.9.1.	Ensaio de Gramatura.....	44
4.9.2.	Ensaio de Resistência à Tração em Faixa Larga	46
4.9.3.	Ensaio de BBP: Calibração e Repetibilidade.....	48
CAPÍTULO 05		50
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	50
5.1.	Avaliação dos Geotêxteis Não Tecidos: Condição de Referência.....	50
5.2.	Influência da Solicitação de Tração na Curva de Distribuição dos Poros - Condição não Confinada	51
5.2.1.	Ensaio Assimétricos.....	52
5.2.2.	Ensaio de Deformação Plana	56
5.3.	Influência do confinamento na curva de distribuição dos poros.....	60
5.4.	Sobreposição dos efeitos dos esforços solicitantes na curva de distribuição de poros	63
5.4.1.	Ensaio de Deformação Assimétrica sob confinamento	63
5.4.2.	Ensaio de Deformação Plana sob confinamento	67
5.4.3.	Comentários finais	72
CAPÍTULO 06		75
6.	CONCLUSÃO E SUGESTÕES	75
6.1.	Conclusões	75
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		78
7.	Referências Bibliográficas	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Métodos de dimensionamento de filtros geotêxteis quanto ao critério de permeabilidade (MODIFICADO de Palmeira & Gardoni, 2000b).....	12
Tabela 2.2: Valores típicos de gradientes hidráulicos no solo próximo ao filtro (Giroud, 2010)..	12
Tabela 2.3: Alguns critérios de retenção para dimensionamento de filtros geotêxteis (Palmeira e Gardoni, 2000).	14
Tabela 2.4: Características dos diferentes métodos de avaliação das dimensões dos poros (MODIFICADO de Fischer et al. (1996)).....	16
Tabela 3.1: Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos fornecidas pelo fabricante (MODIFICADO de – Moraes Filho (2018)).....	26
Tabela 4.1: Deformações de tração aplicadas aos espécimes de geotêxtil.....	36
Tabela 4.2: Valores médios de resistência à tração e suas respectivas deformações.....	46
Tabela 4.3: Valores de rigidez à tração sob diferentes níveis de deformação.....	47
Tabela 5.1: Principais diâmetros para dimensionamento de filtros geotêxteis.	51
Tabela 5.2: Deformações impostas ao espécime e suas respectivas deformações medidas no centro do espécime de geotêxtil.	51
Tabela 5.3: Deformações impostas no centro do espécime e suas respectivas deformações medidas em todo o espécime de geotêxtil.	52
Tabela 5.4: Aberturas dos geotêxteis tracionados não confinados, obtidas a partir da curva de distribuição de poros, para o dimensionamento de filtros – O_{98} , O_{95} e O_{90}	55
Tabela 5.5: Valores de aberturas obtidas a partir da curva de distribuição de poros – O_{50} , O_{30} e O_{10}	56
Tabela 5.6: Aberturas dos geotêxteis tracionados não confinados, obtidas a partir da curva de distribuição de poros, para o dimensionamento de filtros – O_{98} , O_{95} e O_{90}	59
Tabela 5.7: Valores de aberturas obtidas a partir da curva de distribuição de poros – O_{50} , O_{30} e O_{10}	60
Tabela 5.8: Aberturas dos geotêxteis confinados não tracionados, obtidas a partir da curva de distribuição de poros, para o dimensionamento de filtros – O_{98} , O_{95} e O_{90}	62
Tabela 5.9: Aberturas obtidas a partir da curva de distribuição de poros para o dimensionamento de filtros – O_{50} , O_{30} e O_{10}	62
Tabela 5.10: Valores de O_{98} , O_{95} e O_{90} sob diferentes condições de solicitações.....	73
Tabela 5.11: Valores de O_{50} , O_{30} e O_{10} sob diferentes condições de solicitações.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplo de geotêxteis como elemento filtrante (Giroud, 1981).....	5
Figura 2.2: Representação da agulha utilizada no processo de fixação mecânica (Agulhagem) (MODIFICADO de Koerner, 2012).....	7
Figura 2.3: Processo de fixação da malha por jatos d'água (Pourdeyhimi & Maze, 2008).	8
Figura 2.4: Representação da delimitação dos canais de vazios que formam os poros (MODIFICADO de Fischer et al., 1996).	9
Figura 2.5: Modelo para avaliação da dimensão de poros de um geotêxtil não tecido (Faure et al., 1990).....	17
Figura 2.6: Curvas de distribuição de diâmetros de poros obtidas por diferentes tipos de peneiramentos - para geotêxtil não tecido de filamentos contínuos e agulhados (MODIFICADO de Bhatia et al., 1996).....	18
Figura 2.7: Vazão de ar versus pressão – Geotêxtil de polipropileno com 200 g/m ² (Trejos Galvis, 2016).	20
Figura 2.8: Típica curva de distribuição de poros por meio do método de ponto de bolha (Trejos Galvis, 2016).	20
Figura 2.9: Variação de propriedades hidráulicas de geotêxteis sob confinamento. (A) Permeabilidade e (B) Permissividade.	23
Figura 2.10: Curvas de distribuição de poros obtidas para um geotêxtil não tecido agulhado de filamentos contínuos de poliéster a diferentes níveis de confinamento (Palmeira & Trejos Galvis, 2017).	23
Figura 2.11: Variação de O_{98} e O_{95} com a tensão normal para diferentes geotêxteis não tecidos. (A) O_{95}/d_f e (B) O_{98}/d_f (Palmeira & Trejos Galvis, 2017).	24
Figura 3.1: Equipamento de tração uniaxial EMIC, Linha DL 2000.	27
Figura 3.2: Equipamento de tração biaxial.....	28
Figura 3.3: Moldura metálica: (A) Dimensões (Moraes Filho, 2018) e (B) Vista.	29
Figura 3.4: Equipamento para ensaios pelo método do ponto de bolha (Moraes Filho, 2018).	30
Figura 3.5: Célula adaptada para ensaio de ponto de bolha com espécimes sob confinamento.	30
Figura 3.6: Componentes da célula de BBP. (A) Vista superior da base da célula (B) Prato perfurado para aplicação do confinamento (C) Encaixe superior da célula.....	31

Figura 3.7: Sistema de confinamento de espécimes na célula de BBP.....	31
Figura 3.8: Sistema de aquisição de dados.....	32
Figura 4.1: Traçado da malha para recorte dos espécimes com 300 x 300mm.....	34
Figura 4.2: Espécime 300 x 300mm com referência (100mm) no centro da amostra.	39
Figura 4.3: Valores médios e desvio padrão da gramatura GTN ₂₀₀	45
Figura 4.4: Valores médios e desvio padrão da gramatura GTN ₃₀₀	45
Figura 4.5: Valores médios e desvio padrão da gramatura GTN ₅₀₀	45
Figura 4.6: Curvas de tensão vs deformação na direção de fabricação (DF) e na direção transversal à de fabricação (DT). (A) GTN ₂₀₀ – DF, (B) GTN ₂₀₀ – DT, (C) GTN ₃₀₀ – DF, (D) GTN ₃₀₀ – DT.....	47
Figura 4.7: Curvas de tensão vs deformação na direção de fabricação (DF) e na direção transversal à de fabricação (DT). (A) GTN ₅₀₀ – DF e (B) GTN ₅₀₀ – DT.....	48
Figura 4.8: Vazão de ar versus pressão aplicada – Amostra de peneira #170.	49
Figura 4.9: Curvas de distribuição de poros para os cinco espécimes avaliados da peneira #170.	49
Figura 5.1: Curva de distribuição dos poros dos geotêxteis não tecidos sem a aplicação das deformações de solitação.....	50
Figura 5.2: Curva de distribuição dos poros do GTN ₂₀₀ – para ensaios não confinados sob deformações assimétricas.....	52
Figura 5.3: Curva de distribuição dos poros do GTN ₃₀₀ – para ensaios não confinados sob deformações assimétricas.....	53
Figura 5.4: Curva de distribuição dos poros do GTN ₅₀₀ – para ensaios não confinados sob deformações assimétricas.....	53
Figura 5.5: Comparação dos valores de O ₉₈ , O ₉₅ e O ₉₀ para o GTN ₂₀₀ não confinado sob deformações de tração assimétricas.	54
Figura 5.6: Comparação dos valores de O ₉₈ , O ₉₅ e O ₉₀ para o GTN ₃₀₀ não confinado sob deformações de tração assimétricas.	54
Figura 5.7: Comparação dos valores de O ₉₈ , O ₉₅ e O ₉₀ para o GTN ₅₀₀ não confinado sob deformações de tração assimétricas.	55
Figura 5.8: Curva de distribuição dos poros do GTN ₂₀₀ – para ensaios não confinados sob deformações planas.	56
Figura 5.9: Curva de distribuição dos poros do GTN ₃₀₀ – para ensaios não confinados sob deformações planas.	57

Figura 5.10: Curva de distribuição dos poros do GTN ₅₀₀ – para ensaios não confinados sob deformações planas.	57
Figura 5.11: Comparação dos valores de O ₉₈ , O ₉₅ e O ₉₀ para o GTN ₂₀₀ não confinado sob deformações planas de tração.....	58
Figura 5.12: Comparação dos valores de O ₉₈ , O ₉₅ e O ₉₀ para o GTN ₅₀₀ não confinado sob deformações planas de tração.....	58
Figura 5.13: Comparação dos valores de O ₉₈ , O ₉₅ e O ₉₀ para o GTN ₃₀₀ não confinado sob deformações planas de tração.....	59
Figura 5.14: Curva de distribuição dos poros sob diferentes níveis de confinamento e sem aplicação das deformações de tração, GTN ₂₀₀	60
Figura 5.15: Curva de distribuição dos poros sob diferentes níveis de confinamento e sem aplicação das deformações de tração, GTN ₃₀₀	61
Figura 5.16: Curva de distribuição dos poros sob diferentes níveis de confinamento e sem aplicação das deformações de tração, GTN ₅₀₀	61
Figura 5.17: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₂₀₀ tracionado a 10% e 4% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.	63
Figura 5.18: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₂₀₀ tracionado 18% e 9% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.	64
Figura 5.19: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₃₀₀ tracionado 10% e 4,5% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.	64
Figura 5.20: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₃₀₀ tracionado 20% e 3% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.	64
Figura 5.21: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₅₀₀ tracionado 20% e 2% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.	65
Figura 5.22: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₅₀₀ tracionado 20% e 5% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.	65
Figura 5.23: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN ₂₀₀ : (A) O ₉₈ e (B) O ₉₅	66

Figura 5.24: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN ₃₀₀ : (A) O ₉₈ e (B) O ₉₅	66
Figura 5.25: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN ₅₀₀ : (A) O ₉₈ e (B) O ₉₅	67
Figura 5.26: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₂₀₀ tracionado 5% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.....	67
Figura 5.27: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₂₀₀ tracionado 10% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.....	68
Figura 5.28: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₂₀₀ tracionado 20% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.....	68
Figura 5.29: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₃₀₀ tracionado 5% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.....	68
Figura 5.30: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₃₀₀ tracionado 10% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.....	69
Figura 5.31: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₃₀₀ tracionado 20% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.....	69
Figura 5.32: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₅₀₀ tracionado 5% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.....	69
Figura 5.33: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₅₀₀ tracionado 10% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.....	70
Figura 5.34: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN ₅₀₀ tracionado 20% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.....	70
Figura 5.35: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN ₂₀₀ para as aberturas de dimensionamento: (A) O ₉₈ e (B) O ₉₅	71

Figura 5.36: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN ₃₀₀ para os parâmetros de dimensionamento: (A) O ₉₈ e (B) O ₉₅	71
Figura 5.37: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN ₅₀₀ para os parâmetros de dimensionamento: (A) O ₉₈ e (B) O ₉₅	72

LISTA DE SÍMBOLOS

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	Largura do espécime
Cc	Coefficiente de Curvatura
Cu	Coefficiente de uniformidade
d	Diâmetro do poro
d _f	Diâmetro do filamento
D15	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 15% passante em peso
D30	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 30% passante em peso
D50	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 50% passante em peso
D85.....	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 85% passante em peso
D90	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 90% passante em peso
Di	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 30% passante em peso
D _R	Densidade relativa
EOS	<i>Equivalent Opening Size</i>
F	Força aplicada
FOS	<i>Filtration Opening Size</i>
GT	Geotêxtil tecido
GTN	Geotêxtil não tecido
i _s	Gradiente hidráulico no solo
J _{sec}	Rigidez secante
K _s	Permeabilidade do filtro
K _f	Permeabilidade do solo
NBR	Norma Brasileira
O _f	Abertura de Filtração
O10	Abertura do poro que 10% dos poros são menores
O30	Abertura do poro que 30% dos poros são menores
O50	Abertura do poro que 50% dos poros são menores
O90	Abertura do poro que 90% dos poros são menores
O95	Abertura do poro que 95% dos poros são menores

O98	Abertura do poro que 98% dos poros são menores
PET	Poliéster
PSD	<i>Pore Size Distribution</i>
T	Temperatura
t _{GT}	Espessura do geotêxtil
ε	Deformação
ψ	Permissividade
σ	Tensão superficial
θ	Ângulo de contato entre o fluido e o geotêxtil, para o BBP

1. INTRODUÇÃO

Geossintéticos são materiais de engenharia cada vez mais comuns e essenciais à boa prática das engenharias geotécnica e ambiental. Dentre os geossintéticos pode-se destacar o geotêxtil como material que reúne a maioria das funcionalidades, sendo elas: reforço, proteção, separação, drenagem, filtração, entre outras funções. Sua classificação varia de acordo com a disposição das fibras; quando ordenadas são denominados tecidos e quando dispostas aleatoriamente recebem a denominação não tecido. Os geotêxteis não tecidos distinguem-se de acordo com o processo de fabricação, termo-fixados, agulhados, resinados ou tricotados; as suas fibras podem ser naturais ou sintéticas (NBR 12553/91).

Os filtros geotêxteis foram introduzidos e inicialmente foram reportados pela denominação de filtros têxteis, sendo sua aplicação e utilização conhecidas há mais de 50 anos (Koerner & Koerner, 2015). Neste meio século de experiência os geotêxteis desenvolveram bem a função de filtro, e aqueles autores ressaltam que o bom desempenho apresentado não impede que alguns filtros geotêxteis falhem, ou seja, não desempenhem de maneira eficiente a função de filtro. Dentre as falhas reportadas, destaca-se o erro no dimensionamento por escolha inadequada de produtos sem os requisitos necessários para os solos que estarão em contato.

Os filtros geotêxteis devem apresentar abertura de filtração capaz de reter partículas tão pequenas quanto se desejar e, concomitantemente, garantir o fluxo do fluido que o atravessará. Devido à disposição aleatória das fibras dos geotêxteis não tecidos, há grande variabilidade da forma e dimensões dos poros. A menor abertura em um canal de fluxo que atravesse um geotêxtil é denominada constrição. Conforme destacado por Aydilek *et al.* (2005), as constrições são importantes para o desempenho do filtro, sendo fundamental determina-las antes da aplicação dos critérios de filtro.

Dentre as diferentes metodologias empregadas para a determinação da abertura de filtração, pode-se destacar o método do Ponto de Bolha (*Bubble Point*), que permite avaliar a distribuição das constrições de forma contínua. A metodologia convencional, descrita pela ASTM (2011)

D6767, pode ser estendida, permitindo a avaliação da distribuição das restrições sob confinamento do geotêxtil, sob condições similares às esperadas na obra. Além do confinamento, o filtro pode estar submetido a esforços de tração, esforços estes que tendem a alterar a geometria das restrições, modificando assim suas dimensões e afetando o desempenho do filtro.

1.1. Motivação da Pesquisa

Os filtros geotêxteis são dimensionados sob critérios que se baseiam em aberturas dos geotêxteis em condições diferentes das encontradas em campo, levando a possíveis falhas de dimensionamento. Koerner & Koerner (2015) reuniram casos de falhas em filtros geotêxteis onde é possível perceber que a adoção de características de porometria equivocadas podem levar a insucessos, seja por permitir a passagem ou por reter excessivamente as partículas de solo. As condições de campo impõem solicitações ao geotêxtil que modificam sua estrutura e alteram as aberturas a serem utilizadas na sua especificação.

Diante deste cenário, observa-se a necessidade de avaliação dos geotêxteis não tecidos submetidos a solicitações comuns durante sua utilização. Em concordância com os métodos utilizados no dimensionamento de filtros, faz-se necessário avaliar as alterações das aberturas de dimensionamento sob condições mais próximas possíveis das exigidas em campo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Tendo como base a necessidade de conhecer as características apresentadas pelos filtros geotêxteis em condições similares às condições de obras o presente trabalho tem por objetivo determinar a abertura de filtração de geotêxteis não tecidos quando submetido a esforços normais ao plano (confinamento) e a esforços no plano (tração) pela metodologia do ponto de bolha.

1.2.2. Objetivos Específicos

Avaliar experimentalmente:

- A variabilidade da abertura de filtração para diferentes geotêxteis não tecidos quando confinados;
- O efeito do confinamento na abertura de filtração;
- A influência dos esforços de tração e sua variabilidade na abertura de filtração do geotêxtil;

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em seis capítulos. Iniciando, o Capítulo 1 introduz sucintamente o tema, apresentando a motivação e os objetivos que embasam esta pesquisa. No Capítulo 2 apresenta-se uma breve revisão bibliográfica abordando os principais aspectos dos geotêxteis não tecidos que influenciam a dimensão dos poros, sendo contemplada a descrição dos tipos de geotêxteis, com ênfase nos geotêxteis não tecidos e influência dos processos de fabricação que mais delimitam as características dos poros. Apresentam-se alguns dos critérios de dimensionamento de filtros, observando-se as principais aberturas utilizadas para dimensionamento. Descreve-se brevemente os principais métodos de avaliação das aberturas de dimensionamento, obtidas a partir da avaliação das dimensões dos poros. Por fim, apresenta-se a influência dos esforços solicitantes nas aberturas dos poros.

No Capítulo 3 aborda-se os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa, os quais tornaram possível a avaliação das dimensões dos poros por meio do método de ponto de bolha. Os equipamentos utilizados permitiram a aplicação de esforços aos geotêxteis avaliados e a avaliação das aberturas de filtração sob as condições de solicitações impostas.

O Capítulo 4 descreve a metodologia empregada e os procedimentos de execução de ensaios, bem como os métodos de avaliação a partir dos dados obtidos. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nas diferentes configurações de ensaios, analisando cada um deles para avaliar a influência dos esforços solicitantes em diferentes geotêxteis não tecidos, bem como as comparações entre os resultados obtidos com os já apresentados na literatura. Por fim, o Capítulo 6, apresenta as conclusões do presente estudo e as sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Filtros são elementos construtivos empregados em obras geotécnicas e de proteção ambiental visando garantir a retenção de grãos de solo sem restringir fluxo do fluido que percola o meio. A utilização de filtros geotécnicos está normalmente associada a drenos, elementos que juntos formam o sistema filtro-drenante cuja finalidade é garantir a estabilidade e o bom desempenho das estruturas em que se inserem, tais como: contenções, aterros rodoviários, barragens, entre outras (Giroud, 1981).

Os filtros podem ser agrupados em duas classes: os granulares e os sintéticos, e podem ser empregados isolados ou em conjunto. Os filtros granulares são compostos por agregados naturais (areia e pedregulhos) e atualmente têm enfrentado maiores dificuldades de utilização devido às restrições ambientais (Gardoni & Palmeira, 2002). Os sintéticos, sendo mais conhecidos por geotêxteis na engenharia geotécnica, são compostos por fibras ou filamentos poliméricos oriundos de processo industrializado.

2.1. Uso de Geossintéticos como Elemento de Filtração

Geotêxteis são definidos pela ASTM D4439 (2017) como produto planar proveniente de processo manufaturado, sendo poliméricos (sintéticos ou naturais), permeáveis e compressíveis compostos exclusivamente por materiais têxteis. Os materiais têxteis correspondem aos elementos estruturais dos geotêxteis, que podem ser dispostos sob padronização ou aleatoriamente.

De acordo com a disposição dos elementos estruturais, pode-se agrupar os geotêxteis em duas categorias: tecido e não tecido. Os geotêxteis tecidos (GT) tem dois elementos estruturais dispostos em direções perpendiculares uns sobre os outros. Ao longo da direção de fabricação estes elementos são denominados urdumes e no sentido transversal à direção de fabricação os elementos são denominados de tramas. No geotêxtil não tecido (GTN) não há padronização na orientação das fibras ou filamentos. Ambos os geotêxteis podem ser fabricados com diferentes

polímeros, cuja fabricação pode incluir aditivos para o melhor desempenho dos produtos (Bhatia & Smith, 1996b).

A primeira obra de engenharia que reportou a utilização de geotêxtil como filtro ocorreu da década de 1950, sendo uma substituição de filtros granulares por mantas têxteis (Rankilor, 1981 *apud* Bhatia & Smith, 1996). Desde então, a utilização de geotêxteis em sistemas filtro-drenantes tem sido cada vez mais comum, sendo sua utilização viabilizada pelo bom desempenho, facilidade de aplicação e economicidade quando comparado com os filtros granulares (Carrol, 1983; Christopher & Fischer, 1992). Giroud (1981) exemplificou algumas das possíveis soluções de engenharia que podem utilizar geotêxteis que desempenham a função de filtro (Figura 2.1). No entanto, as aplicações atuais não se restringem às apresentadas pelo autor.

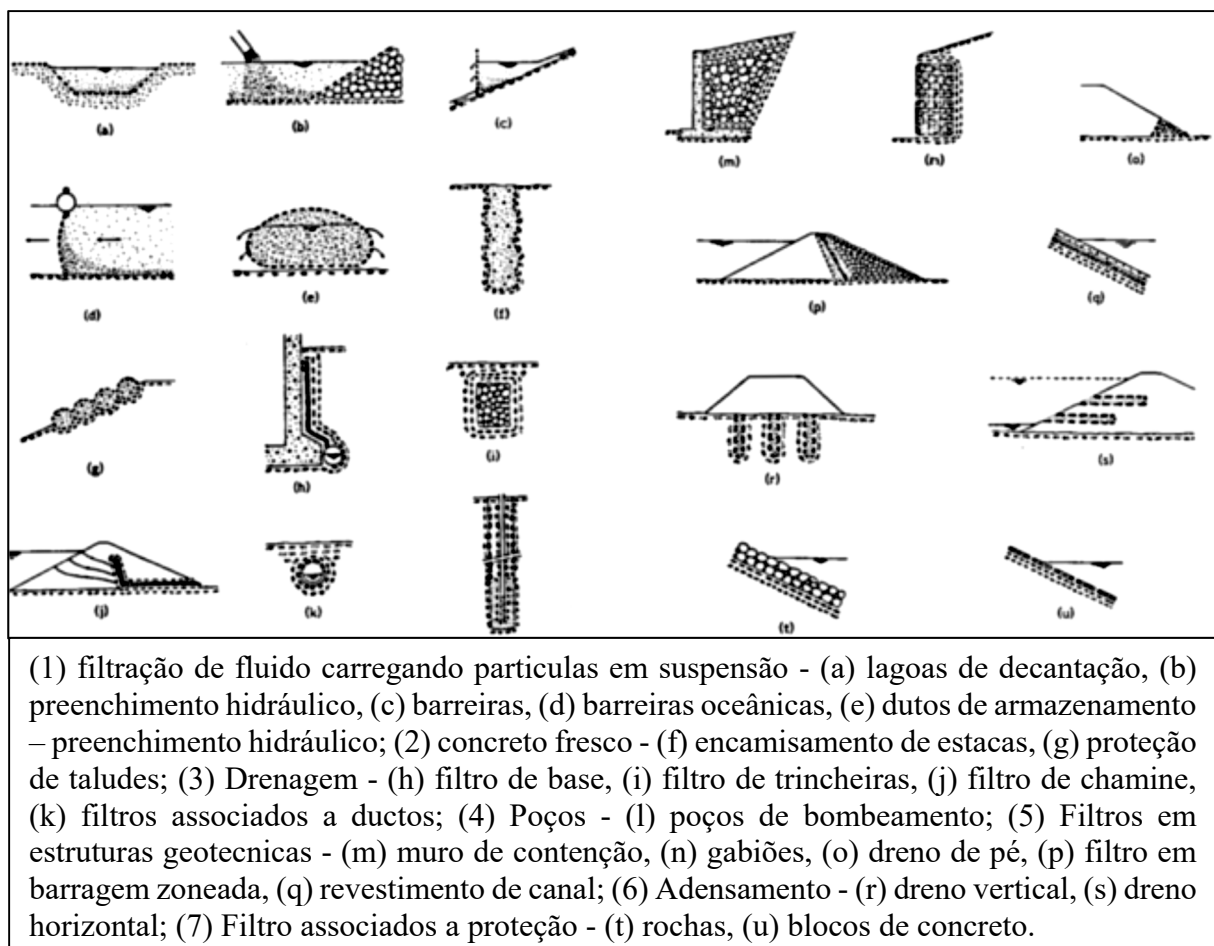


Figura 2.1: Exemplo de geotêxteis como elemento filtrante (Giroud, 1981).

Para utilização de geotêxteis na função de filtro é necessário que este atenda a alguns critérios, os mais destacados são: critério de retenção e de permeabilidade (Carrol, 1983; Giroud, 1981). Outros requisitos foram posteriormente incorporados a novos critérios, sendo eles os critérios de anti-colmatação, sobrevivência e durabilidade (Fannin *et al.*, 1994; Luettich *et al.*, 1992; Prapaharan *et al.*, 1989)

2.2. Filtros Geotêxteis Não Tecidos

Os geotêxteis não tecidos são materiais industrializados cujo processo de produção é sistêmico, com quatro etapas: preparação das fibras, formação da malha, fixação dos elementos estruturais e armazenamento em rolos. Apesar da fabricação ocorrer em quatro etapas, destacam-se os processos de formação e fixação da malha, pois estas etapas delineiam as características mais relevantes para o desempenho do GTN (Pourdeyhimi & Maze, 2008).

As principais variações dos geotêxteis não tecidos estão relacionadas com o polímero utilizado, a preparação das fibras (contínuas ou cortadas) e quanto ao processo de ligação (mecânico, térmico ou 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).

2.2.1. Formação da Malha e Disposição dos Elementos Estruturais

O geotêxtil não tecido é caracterizado pela aleatoriedade da distribuição de suas fibras durante o processo de fabricação, conforme destacado nos trabalhos de Faure *et al.* (1990) e Bhatia *et al.* (1996). No entanto, alguns estudos contrapõem esse conceito, definindo a disposição dos elementos estruturais como pseudoaleatória, pois apresentam orientações preferenciais quanto aos ângulos de disposição (Pourdeyhimi *et al.*, 1996). As fibras ou filamentos são a estrutura da rede de vazios. Sua disposição não ordenada impõe, assim, uma irregularidade ao poro e eleva a complexidade da rede de vazios.

O procedimento de disposição dos elementos estruturais dependerá da preparação das fibras e do mecanismo utilizado nesta etapa. Conforme apresentado por Pourdeyhimi & Maze (2008), os elementos estruturais são distribuídos de modo desordenado no plano de fabricação (eixos

x - y) por diferentes processos industriais. Ainda de acordo com os autores, observa-se que, apesar de aleatório o processo de disposição dos elementos, não há entrelaçamento das fibras ou filamentos e sua orientação varia apenas nas direções x e y , sendo mínima a disposição destes elementos na direção perpendicular ao plano de fabricação (eixo z). A diferenciação na disposição das fibras nos planos do geotêxtil impõe anisotropia ao regime do fluxo que percolará o material (Pourdeyhimi & Maze, 2008).

2.2.2. Fixação dos Elementos Estruturais

A consolidação da malha pode ocorrer por diferentes processos. Como destacado anteriormente, estes processos podem ser mecânicos, térmicos ou químicos. O procedimento de fixação mecânica mais difundido é o procedimento de agulhagem. Neste utiliza-se uma série de agulhas que possuem elementos laterais (Figura 2.2) que elevam ou rebaixam os filamentos (Bhatia & Smith, 1996a).

Pourdeyhimi & Maze (2008) observaram que a agulhagem orienta alguns elementos estruturais na direção z , ao longo da espessura. Mesmo não sendo uma orientação expressiva, é maior que as apresentadas nos demais processos de fixação. Devido à complexidade da formação da malha, os efeitos da agulhagem são pontos de ressalvas. Segundo Bhatia & Smith (1996), o processo de agulhagem promove o entrelace dos fios, diferente do que foi reportado por Pourdeyhimi & Maze (2008).

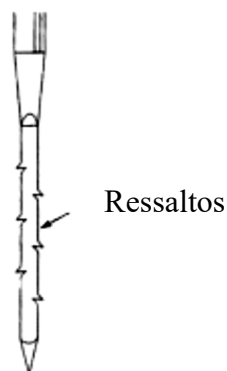


Figura 2.2: Representação da agulha utilizada no processo de fixação mecânica (Agulhagem) (MODIFICADO de Koerner, 2012).

Outro método de fixação mecânica é o emaranhamento hídrico. Neste procedimento são aplicados jatos de água em alta velocidade sobre a malha que promovem o deslocamento dos

elementos, fixando-os (Figura 2.3) (Pourdeyhimi & Maze, 2008). Este método também é conhecido por agulhas de água, sendo o geotêxtil não tecido considerado agulhado.

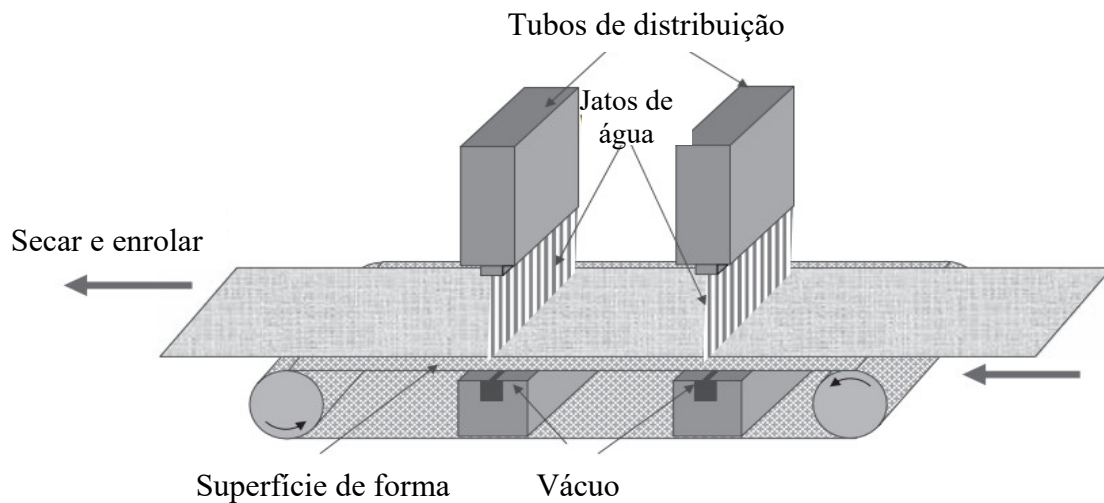


Figura 2.3: Processo de fixação da malha por jatos d'água (Pourdeyhimi & Maze, 2008).

Já o método de fixação térmica corresponde a aplicação de calor que fundirá os elementos estruturais fixando-os. Este processo impõe um incremento de rigidez à malha quando comparada com o processo de agulhagem (Bhatia & Smith, 1996a; Pourdeyhimi & Maze, 2008). A aplicação de calor pode ser em área, com auxílio de rolos aquecidos que aplicam o calor em toda a área do geotêxtil, ou em pontos localizados. Nesta segunda opção há duas variáveis no processo de fixação: a temperatura e a pressão (Bhatia & Smith, 1996a).

O método químico realiza a fixação dos elementos estruturais por adição de resina química ou contato do gás cloreto de hidrogênio. A resina química pode ser aplicada por imersão total do geotêxtil ou por aplicação da resina em *spray*. Já o gás cloreto de hidrogênio é passado pela malha tensionada e por reação química do gás com o polímero há a fixação dos elementos (Bhatia & Smith, 1996a).

2.2.3. Estrutura dos geotêxteis não tecidos

Geotêxteis não tecidos apresentam complexa estrutura, delineada pela formação e fixação da malha. Os elementos estruturais limitam as regiões de vazios, promovendo irregularidade nas áreas vazias, resultando em poros de formas irregulares cujo diâmetro varia ao longo do canal de fluxo e apresentando geometria altamente complexa (Faure *et al.*, 1990). A Figura 2.4

apresenta uma esquematização de um canal de fluxo onde é possível perceber a variação do diâmetro ao longo do canal.

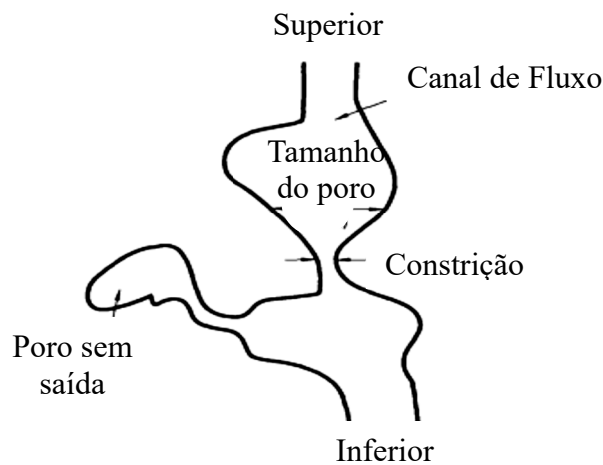


Figura 2.4: Representação da delimitação dos canais de vazios que formam os poros (MODIFICADO de Fischer *et al.*, 1996).

A menor abertura de um canal de fluxo é denominada *constricção*, denominação introduzida por Kenney *et al.* (1984) para filtros granulares. Por semelhança, estendeu-se essa denominação para filtros têxteis não tecidos. A *constricção* em um canal de poro é o limitador geométrico que permitirá a passagem de grãos menores que sua dimensão.

2.3. Abertura de filtração (O_f)

Os poros dos geotêxteis apresentam uma geometria complexa, variando a abertura do poro ao longo do canal. A denominação “*constricção*” é geralmente empregada devido a variação da seção do poro. A abertura de filtração corresponde ao valor da maior *constricção*. Na literatura pode-se encontrar diferentes nomenclaturas: abertura de filtração (FOS – *Filtration Opening Size*); abertura aparente (AOS – *Apparent Opening Size*) ou abertura equivalente (EOS – *Equivalent Opening Size*) (Blond, Veermersch & Diederich, 2015; Kenney *et al.*, 1985).

Os métodos que avaliam a abertura de filtração permitem, de modo geral, a obtenção da curva de distribuição das *constricções* (PSD – *Pore Size Distribution*). No entanto, a PSD não é única para um dado geotêxtil – esta é dependente do método de obtenção (Christopher e Fischer, 1992).

De forma geral, a abertura de filtração é simbolizada pela letra “O” acompanhada de um número subscrito que se refere ao percentual de restrições iguais ou menores que aquele valor. Christopher & Fischer (1992) apresentam as aberturas que são utilizadas em critérios de filtro: O₉₅, O₈₅, O₅₀ e O₁₅.

2.4. Critérios de Dimensionamento

O adequado dimensionamento de filtros visa garantir a retenção do material de base e a manutenção do fluxo do fluido percolante. Christopher & Fischer (1992) apresentam as características que os geotêxteis devem possuir para garantir a capacidade de retenção. Para isto, sugere-se que a maior abertura do GTN seja menor que a maior partícula do material filtrado, evitando-se assim o *piping*, fenômeno relativo à movimentação de partículas de solo, o que pode desencadear a instabilidade interna do maciço. Além disto, é necessário que a maioria das aberturas sejam suficientemente maiores que as menores partículas do material de base, evitando o processo de colmatação e cegamento do filtro. Por fim, as aberturas do geotêxtil devem ser suficientes para garantir um fluxo adequado durante toda vida útil da obra.

Deste modo, o geotêxtil deve atender, simultaneamente, aos critérios de retenção, permeabilidade, anti-colmatação e sobrevivência. Os três primeiros critérios estão intimamente relacionados com a estrutura porosa do material. Já o de sobrevivência relaciona-se mais com as propriedades de resistência dos elementos estruturais.

2.4.1. Critério Anti-Colmatação

Os filtros de areia e geotêxteis podem apresentar colmatação, ou seja, bloqueio dos seus poros por partículas do material em contato com o filtro. A colmatação parcial pode ocorrer durante o processo de execução da obra; por exemplo, durante a compactação da camada superior ao filtro em obras de pavimentação ou por carreamento de finos durante a vida útil do filtro. Palmeira & Gardoni (2000a) observaram que a presença de partículas dentro do geotêxtil reduz a compressibilidade e permissividade do material.

O processo de colmatação é resultado dos deslocamentos de pequenas partículas de solo que migram para o filtro. Esse processo pode ser facilitado caso a aplicação do filtro geotêxtil não

tenha sido realizada de maneira eficaz, deixando-se espaços vazios entre o filtro e o solo (Giroud, 2005). Ainda de acordo com o autor, a movimentação das pequenas partículas de solo pode ocorrer até a superfície do geotêxtil, promovendo cegamento do filtro. Caso as partículas obstruam as aberturas do filtro, esse mecanismo é denominado de bloqueamento. Por fim, se as partículas permanecerem aprisionadas no interior do filtro, elas irão colmatar o filtro, reduzindo a vazão capaz de atravessá-lo.

O processo de colmatação pode ocorrer devido a mecanismos físicos, químicos e biológicos. Deste modo, a colmatação dependerá principalmente do meio e das condições impostas (Christopher & Fischer, 1992). Sendo assim, a melhor maneira de garantir a não colmatação é avaliar o desempenho do filtro geotêxtil o mais próximo possível da condição de campo.

2.4.2. Critério de Sobrevivência

O filtro geotêxtil, além de atender as características descritas nos critérios de retenção, permeabilidade e anti-colmatação, deve atender a requisitos de resistência para as solicitações de campo. Estas solicitações podem ocorrer no processo de execução ou durante a vida útil da obra. Christopher & Fischer (1992) destacam que os geotêxteis devem apresentar resistência à tração, deformação e resistência ao puncionamento compatíveis com as solicitações da obra, bem como devem resistir a degradações por radiação ultravioleta e químicas, garantindo assim que a estrutura do geotêxtil seja preservada durante a vida útil da obra.

2.4.3. Critério de Permeabilidade

Os critérios de permeabilidade de filtros geotêxteis comparam o coeficiente de permeabilidade do filtro (k_f) com o coeficiente de permeabilidade do solo (k_s). Palmeira & Gardoni (2000b) reuniram algumas formulações de métodos de dimensionamento de filtro geotêxteis quanto ao critério de permeabilidade, sendo estes apresentados na Tabela 2.1. Giroud (2010) apresenta e discute critérios de filtros geotêxteis e granulares. Neste trabalho o autor ressalta que para atender ao critério de permeabilidade do filtro o geotêxtil deve garantir condições de pressão e intensidade de fluxo que evitem distúrbios no fluxo normal ao filtro. Para o autor, além dos coeficientes de permeabilidade do filtro e do solo, deve-se conhecer o gradiente hidráulico no

solo (i_s) na região próxima ao filtro. Valores típicos de gradientes hidráulicos são apresentados em função da aplicação na Tabela 2.2.

Tabela 2.1: Métodos de dimensionamento de filtros geotêxteis quanto ao critério de permeabilidade (MODIFICADO de Palmeira & Gardoni, 2000b)

Fonte	Critério	Aplicação
Calhoun (1972), Shober & Teindl (1979), Wates (1980), Carroll (1983), Christopher & Holtz (1985); e outros	$k_f \geq k_s$	Fluxo estacionário, aplicações não críticas e condições de solo não severas.
Carroll (1983); e Christopher & Holtz (1985)	$k_f \geq 10 k_s$	Aplicações críticas e condições severas de solo ou hidráulica.
Giroud (1982)	$k_f \geq k_s$	Sem fator de segurança.
CFGG (1986)	Baseado na ψ , com $\psi \geq 10^{3-5} k_s$	Situação crítica $10^5 k_s$; Situação menos crítica $10^4 k_s$; Areias limpas $10^3 k_s$.
Corbet (1993)	$k_f \geq 10 k_s$ $k_f \geq 100 k_s$	Tecidos e não tecidos finos ($t_{GT} \leq 2$ mm); Não tecidos espessos ($t_{GT} > 2$ mm).
Lafleur (1999)	$k_f \geq 20 k_s$	Solos não coesivos.
Giroud (2010)	$k_f \geq k_s$ e $k_f \geq i_s \times k_s$	Sem fator de segurança.

Tabela 2.2: Valores típicos de gradientes hidráulicos no solo próximo ao filtro (Giroud, 2010).

Aplicação	Gradiente Hidráulico
Trincheiras Drenantes	$\leq 1,0$
Drenos de muros verticais	1,5
Drenos longitudinais – rodoviários	$\leq 1,0$
Proteção de vias navegáveis	$\leq 1,0$
Camada drenante de aterros sanitários	1,5
Barragem - Dreno de pé	2,0
Barragem - Dreno de núcleo argiloso	> 3
Em reservatório de líquido com camada de argila impermeabilizante	> 10

2.4.4. Critério de Retenção

Dentre os critérios de dimensionamento de filtros, o de retenção é destacado como o mais complexo e importante para a função de filtro (Giroud, 2010). Devido à complexidade do processo de retenção, aquele autor agrupa os filtros em três categorias: retenção total, retenção ótima e filtros de retenção parcial.

Os filtros de retenção total são utilizados na prevenção de processos de *pipping* em grandes obras, buscando garantir a estabilidade interna da estrutura. Os filtros de retenção ótima são os mais comuns em obras geotécnicas. Estes não têm por objetivo reter todas as partículas do material e devem desenvolver a função de filtro por toda vida útil da estrutura a qual se aplica. Por fim, os filtros de retenção parcial são aplicados em condições de regimes de fluxo turbulento, intermitente e multidirecional.

Conforme dito anteriormente, o critério de retenção deve ser atendido simultaneamente ao critério de permeabilidade. Giroud (2005) destaca que filtros geotécnicos buscam garantir a estabilidade do solo base. Deste modo, o dimensionamento quanto ao critério de retenção não se baseia nas menores partículas do material a ser retido, mas na maioria das maiores partículas, assumindo-se o diâmetro correspondente a 85% (D_{85}) passando ensaios de granulometria como o representativo para análises de capacidade de retenção.

Diferentes métodos são apresentados na literatura para o dimensionamento de filtros quanto ao critério de retenção, considerando-se os filtros de retenção ótima. Palmeira & Gardoni (2000b) reúnem alguns destes critérios, (Tabela 2.3), podendo-se observar que alguns métodos utilizam diferentes diâmetros de construção, tais como O_{50} , O_{90} , O_{95} ou O_f (abertura de filtração).

Tabela 2.3: Alguns critérios de retenção para dimensionamento de filtros geotêxteis (Palmeira e Gardoni, 2000).

Fonte	Critério	Aplicação
Giroud (1988)	<p>Se $C_u \leq 3$:</p> $O_f \leq (C_u)^{0,3} \cdot D_{85}^*$ $O_f \leq 1,5 \cdot (C_u)^{0,3} \cdot D_{85}^{**}$ $O_f \leq 2 \cdot (C_u)^{0,3} \cdot D_{85}^{***}$ <p>Se $C_u \geq 3$:</p> $O_f \leq \frac{9 \cdot D_{85}}{(C_u)^{1,7}}^*$ $O_f \leq \frac{13,5 \cdot D_{85}}{(C_u)^{1,7}}^{**}$ $O_f \leq \frac{18 \cdot D_{85}}{(C_u)^{1,7}}^{***}$	<p>* Para solos fofos (Índice de densidade relativa (D_R): $D_R < 35\%$;</p> <p>** Para solos densidade média: D_R: 35% a 65%;</p> <p>*** Para solos densos: $D_R > 65\%$.</p>
Fischer, Christopher & Holtz (1990)	$O_{50}/D_{85} \leq 1,5$ $O_{50}/D_{85} \leq 1,8 - 7,0$ $O_{50}/D_{50} \leq 0,8 - 2,0$	Baseado na distribuição de poros do geotêxtil, depende do Coeficiente de Uniformidade (C_u) do solo.
Canadian Geotechnical Society – CGS (1992)	$O_f/D_{85} \leq 1,5$ $O_f/D_{85} \leq 3,0$	Solos uniformes; Solos bem graduados.
UK DTP – Murray and McGown (1992), a partir de Corbet (1993)	$O_{90}/D_{90} = 1,0$ a 3,0 $O_{90}/D_{90} \leq 1,0$ a 3,0 $O_{90}/D_{50} \leq 1,8$ a 6,0	<p>Solos com $1 \leq C_u \leq 5$, tecidos e não tecidos;</p> <p>Solos com $5 < C_u < 10$, tecidos e não tecidos finos ($t_{GT} \leq 2$ mm) – critério alternativo;</p> <p>Solos com $5 < C_u < 10$, tecidos e não tecidos espessos ($t_{GT} > 2$ mm) – critério alternativo.</p>
Fannin <i>et al.</i> (1994) – UBC	$O_f/D_{85} < 1,5$ e $O_f/D_{50} < 1,8$ $O_f/D_{85} < 0,2$; $O_f/D_{50} < 2,0$; $O_f/D_{50f} < 2,5$ e $O_f/D_{15} < 4,0$	<p>Não tecidos, $1 < C_u < 2$;</p> <p>Não tecidos, $3 < C_u < 7$.</p>
Bhatia and Huang (1995)	$O_{95}/D_{85} < 0,65 - 0,05 C_c$ $O_{95}/D_{85} < 2,71 - 0,36 C_c$ $O_{95} < D_{85}$	<p>$n_{GT} < 60\%$ e $C_c > 7$;</p> <p>$n_{GT} < 60\%$ e $C_c < 7$;</p> <p>$n_{GT} < 60\%$.</p>
Lafleur (1999)	$O_f/D_1 < 1,0$ $1,0 < O_f/D_1 < 5,0$	<p>Solos estáveis ($C_u \leq 6$ e $D_1 = D_{85}$ neste caso), solos com $C_u > 6$ mas linearmente graduados ($D_1 = D_{50}$, neste caso), mal graduado ($C_u > 6$) solos internamente estáveis ($D_1 = D_G$) e solos com $C_u > 6$ com curva granulométrica côncava para cima e internamente estáveis ($D_1 = D_{30}$);</p> <p>Solos instáveis: $D_1 = D_{30}$ para solo mal graduado internamente instável com curva granulométrica côncava para cima (risco de migração de finos). Critério desenvolvido para solos sem coesão.</p>

2.5. Métodos de Avaliação de Filtros Geotêxteis

Durante o dimensionamento de filtros geotêxteis é necessário atender aos critérios de retenção, permeabilidade, colmatação e sobrevivência. Os critérios de retenção e colmatação relacionam as dimensões dos poros do geotêxtil não tecido (GTN) e dos grãos do material em contato.

Os ensaios de desempenho visam avaliar o desempenho de um filtro geotêxtil sob condições próximas à de obra. Nesta condição o filtro geotêxtil é avaliado em contato com o material a ser utilizado. Portanto, ensaios de desempenho são indicados para avaliação de uma configuração específica. Neste caso, os ensaios comumente utilizados são: razão entre gradientes, filtração de longa duração (*long term filtration*) e ensaio de condutividade hidráulica (Bhatia & Smith, 1996a).

Em contrapartida aos ensaios de desempenho, os ensaios índices avaliam as características filtrantes dos geotêxteis independente do solo de base. Permitem avaliar a abertura de filtração, e, em alguns métodos, é possível determinar a distribuição das constrições. Quando comparados com os ensaios de desempenho, os ensaios índice são considerados de curta duração.

Há diversos métodos para a determinação das aberturas de geotêxteis e estes podem ser divididos em três grupos: teóricos, avaliação indireta (peneiramento e análise de imagens), avaliação direta (testes de capilaridade) (Bhatia & Smith, 1996b; Rawal & Saraswat, 2011). Nenhum dos métodos é universalmente aceito ou recomendado para a avaliação das aberturas de filtração (Bhatia & Smith, 1994); cada método possui suas restrições. Fischer *et al.* (1996) resumiam as principais diferenças dos métodos, como mostrado na Tabela 2.4.

Apesar de Fischer *et al.* (1996) apresentarem o peneiramento hidrodinâmico como método capaz de avaliar espécimes sob confinamento, espera-se que este confinamento não seja aplicado de forma constante ao espécime. Pois durante a execução do ensaio deve surgir força de empuxo que modificaram o confinamento.

Tabela 2.4: Características dos diferentes métodos de avaliação das dimensões dos poros (MODIFICADO de Fischer *et al.* (1996)).

Método	Tamanho do espécime*	Avaliação dos pequenos poros	Obtenção da CDP para espécime comprimidos	Duração do ensaio*	Custo*
Teóricos	N.A.	Sim	Sim	Rápido	Moderado
Peneiramento seco	Grande	Não	Não	Lento	Baixo
Peneiramento úmido	Grande	Não	Não	Lento	Baixo
Peneiramento hidrodinâmico	Grande	Não	Sim	Lento	Elevado
Análise de imagens	Pequeno	Sim	Sim	Lento	Elevado
Intrusão de mercúrio	Pequeno	Sim	Sim	Rápido	Elevado
Ponto de Bolha	Pequeno	Sim	Sim	Rápido	Moderado
N.A. - Não aplicável					
CDP - Curva de distribuição de poros					
* - Avaliação comparativa com os demais métodos					

2.5.1. Métodos Teóricos

Os métodos analíticos preveem as aberturas dos poros por meio de equações ou modelos probabilísticos (Rawal, 2010). Nos modelos probabilísticos avaliam-se as probabilidades da da passagem de partículas de solo pelos poros do filtro. Por meio da distribuição dos elementos estruturais, define-se um plano que representa a distribuição organizacional dos elementos e assim determina-se as formas dos vazios. As partículas de solo são admitidas como círculos circunscritos aos elementos estruturais (filamentos) e o diâmetro destes círculos equivale à abertura avaliada (Faure *et al.*, 1990)

Faure *et al.* (1990) desenvolveram um modelo teórico denominado Poliedros *Poissonianos*. Este modelo distribui retas paralelas de acordo com a lei de Poisson segundo determinada densidade e aleatoriedade nas direções destas retas. A Figura 2.5 apresenta um esquema do arranjo de filamentos a partir do qual é possível determinar o valor da abertura do maior poro. Com base neste tipo de arranjo, Faure et al. (1990) apresentam metodologia probabilística para a determinação da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos. Outras abordagens

probabilísticas podem ser encontradas na literatura (Lombard *et al.* (1989), Elsharief & Lovell (1996), Aydilek *et al.* (2005), entre outros).

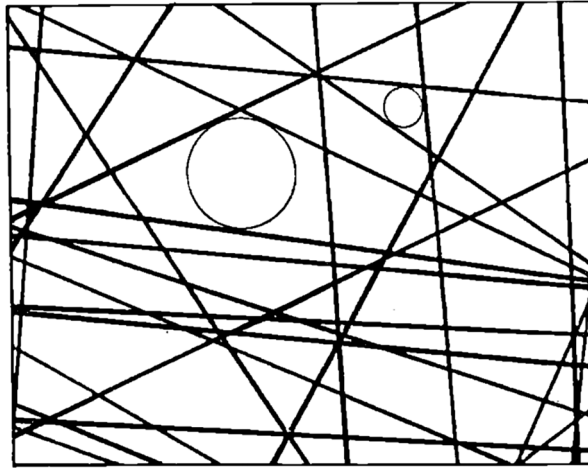


Figura 2.5: Modelo para avaliação da dimensão de poros de um geotêxtil não tecido (Faure *et al.*, 1990).

2.5.2. Peneiramento

A determinação das aberturas de filtração por peneiramento pode ser realizada por três métodos: peneiramento seco, úmido ou hidrodinâmico. Nas três configurações, é peneirado material granular com dimensões e massas predeterminadas através do corpo de prova de geotêxtil. No peneiramento seco pode haver o surgimento de forças eletrostáticas que podem dificultar a correta avaliação das dimensões dos poros (Bhatia & Smith, 1996b). No peneiramento hidrodinâmico a maior limitação é o tempo necessário de ensaio, pois estes ensaios podem apresentar durações maiores que 48 horas (Lombard, Rollin & Wolff, 1989).

Os três tipos de peneiramentos permitem a obtenção das curvas de distribuição de dimensões de poros. No entanto, as curvas obtidas pelos três peneiramentos não convergem para uma curva comum. Bhatia *et al.* (1996) avaliaram geotêxteis não tecidos agulhados de filamentos contínuos utilizando os três métodos de peneiramento. No trabalho apresentado pelos autores, é possível observar variações importantes nos valores de abertura de poros, a depender do método utilizado. Na Figura 2.6 são apresentadas algumas curvas de distribuição de diâmetro de poros. Segundo os autores, a variação entre os valores do O_{95} pode ser superior a 100%.

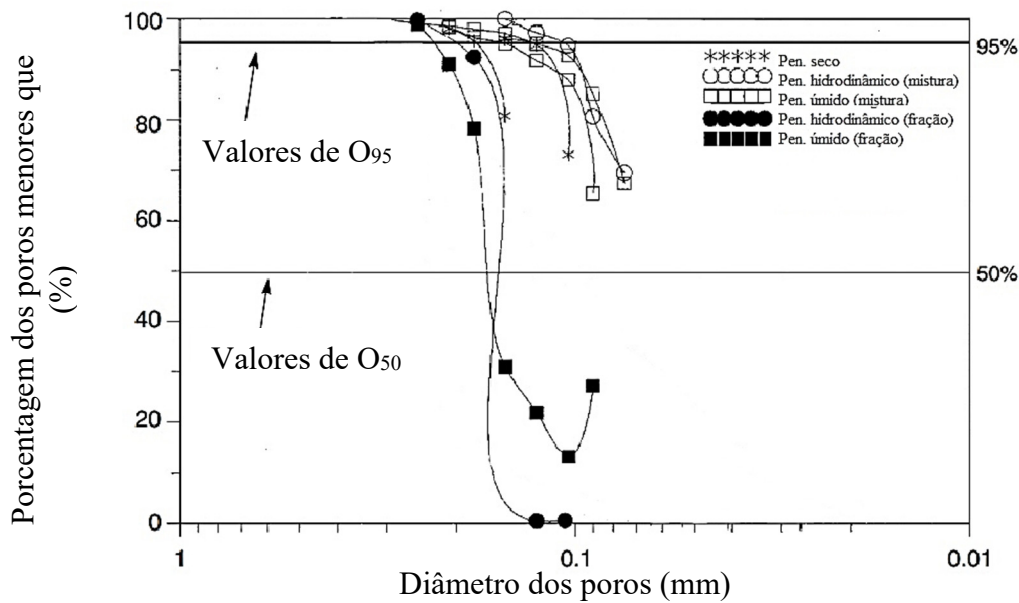


Figura 2.6: Curvas de distribuição de diâmetros de poros obtidas por diferentes tipos de peneiramentos - para geotêxtil não tecido de filamentos contínuos e agulhados (MODIFICADO de Bhatia *et al.*, 1996).

2.5.3. Análise de Imagens

A análise de imagens avalia as dimensões das constrições em secções planas do geotêxtil. A partir destes valores determina-se a abertura de filtração e a distribuição das constrições. É reportado como um método demorado e não aplicável a geotêxteis não tecidos com espessura inferior a 1,5 mm (Bhatia & Smith, 1996b). A avaliação das dimensões dos poros pelo método de análise de imagens é dependente do operador (Aydilek *et al.*, 2017).

Aydilek *et al.* (2017) destacam que a estrutura tridimensional dos geotêxteis não tecidos dificulta a passagem da luz emitida pelo microscópio. Para contornar esta situação, é necessário avaliar seções do geotêxtil, sendo elas planas ou perpendiculares à espessura do GTN.

2.5.4. Intrusão de Mercúrio

Os métodos anteriormente citados demandam tempo significativo para avaliação das aberturas dos poros, apresentando algumas limitações, como é o caso do peneiramento seco e úmido, que por surgimento de forças de atração ou repulsão, não permitem a boa determinação das menores aberturas dos poros dos geotêxteis. Evitando a necessidade de elevado tempo de observação, a

avaliação por intrusão de mercúrio mostra-se vantajosa, pois apresenta boa repetibilidade e demanda pouco tempo de análise (Bhatia & Smith, 1994).

A intrusão de mercúrio corresponde a indução de efeitos capilares, visto que, o mercúrio opõe-se a penetração dos poros dos geotêxteis. O mercúrio apresenta elevados ângulos de contato com os polímeros utilizados na fabricação do geotêxtil. Por exemplo, ângulo de contato do mercúrio com o poliéster é de $135,5^\circ$ (Prapaharan, Holtz & Luna, 1989). Durante o ensaio aplica-se pressão no mercúrio, promovendo a intrusão, até a saturação do geotêxtil. De maneira indireta, pode-se determinar a porosidade total dos poros (Bhatia & Smith, 1996b). Por meio de relações do fenômeno da capilaridade, é possível determinar os valores das aberturas dos poros conhecendo-se a pressão necessária para intrusão do mercúrio nos poros. Esta relação só é possível assumindo-se uma simplificação da forma do poro, considerando-o circular (Bhatia & Smith, 1994).

O processo de intrusão de mercúrio não é espontâneo e a sua penetração no geotêxtil só é possível com aplicação de elevadas pressões. Segundo Miller *et al.* (1986), o processo de indução sobre pressão pode modificar a estrutura do geotêxtil não tecido, deslocando seus filamentos, e assim a avaliação já não corresponderia ao material sob análise. Para os autores, a melhor avaliação da dimensão dos poros por métodos capilares é pelo processo de extrusão e para este tipo de ensaio o mercúrio é contraindicado.

2.5.5. Bubble Point (BBP)

O método do “*Bubble Point*” permite avaliar os diâmetros das constrições de forma direta e também baseia-se nos efeitos de capilaridade. Ao contrário do método de intrusão de mercúrio, o BBP utiliza um líquido que satura rápido e efetivamente a amostra de geotêxtil (Bhatia & Smith, 1996b). O ensaio tem recomendações de procedimentos e análise de resultados estabelecidos pela norma ASTM D6767-14.

O ensaio é dividido em duas etapas: na primeira etapa o corpo de prova seco é submetido fluxo de ar pressurizado, registrando-se a pressão e a vazão. Na segunda etapa o corpo de prova é saturado e submetido ao fluxo de ar pressurizado, registrando-se pressão, vazão e temperatura (Bhatia & Smith, 1996b). Estes procedimentos permitem a obtenção das curvas de vazões de

ar versus pressão e, a partir destas, é possível obter a curva de distribuição das constrições de forma contínua.

O BBP é reportado como ensaio de excelente repetibilidade, conforme apresentado por Bhatia & Smith (1996b) e Trejos Galvis (2016). Os resultados obtidos pelo *Bubble Point* permitem a determinação da curva de distribuição de poros. A Figura 2.7 apresenta um exemplo de curva do tipo vazão de ar versus pressão e a Figura 2.8 apresenta um exemplo de curvas de distribuição das dimensões dos poros do geotêxtil, ambas obtidas por Trejos Galvis (2016).

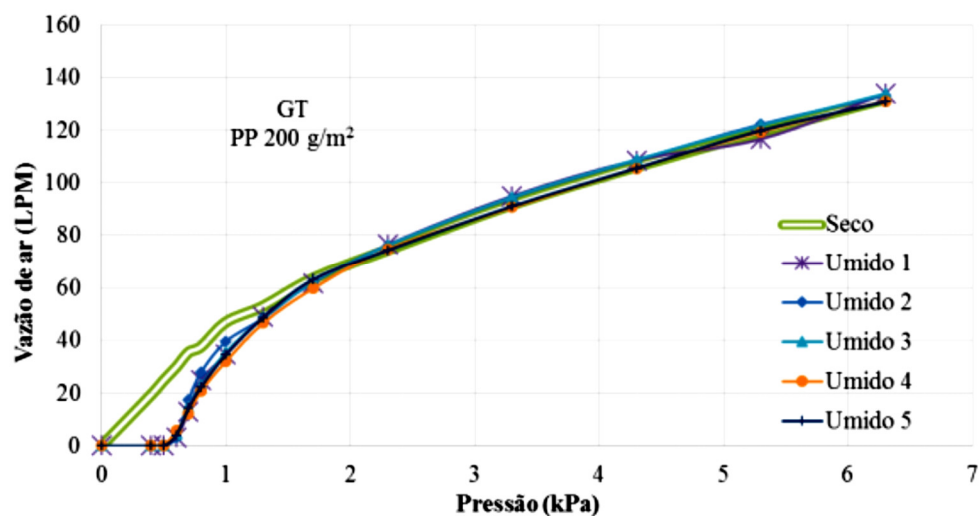


Figura 2.7: Vazão de ar versus pressão – Geotêxtil de polipropileno com 200 g/m² (Trejos Galvis, 2016).

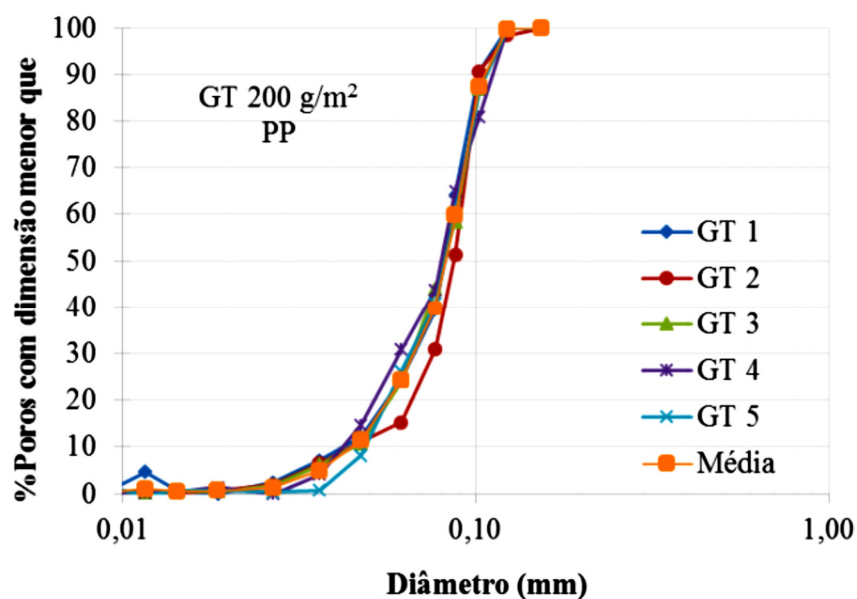


Figura 2.8: Típica curva de distribuição de poros por meio do método de ponto de bolha (Trejos Galvis, 2016).

2.6. Esforços Aplicados a Filtros Geotêxteis

Geotêxteis são compressíveis e geralmente empregados sob confinamento. No entanto, em obras de drenagem e filtração comumente são especificados com as características obtidas em testes sem aplicação de esforços solicitantes. Para os filtros geotêxteis não tecidos observa-se que o confinamento altera a sua espessura e a geometria dos vazios, provocando uma redução nas restrições, aumentando a retenção de material e provocando redução da permeabilidade do filtro (Palmeira & Fannin, 1998; Palmeira & Gardoni, 2002).

Além dos esforços normais promovendo o confinamento do geotêxtil, podem-se ter também esforços de tração no GTN, que alteram as características do material, reduzindo sua espessura, alterando a estrutura dos poros e assim modificando suas características filtrantes. Como exemplo de situações deste tipo, podem ser citados geotêxteis em tubos geotêxteis, barreiras de sedimentos e como elementos de separação em camadas de estradas pavimentadas ou não pavimentadas. A estrutura fibrosa do geotêxtil permite diferentes comportamentos quando solicitado.

Os esforços solicitantes podem promover deformações plásticas ou viscoelásticas, a depender do nível de solicitação e do arranjo das fibras solicitadas. Stepanovic *et al.* (2016) destacam que pequenos níveis de esforços podem promover deformações plásticas, sendo estas decorrentes da movimentação entre as fibras. O comportamento do GTN quando submetido a esforços solicitantes é mais influenciado por: orientações das fibras, gramatura e processo de fixação das fibras ou filamentos (Stepanovic et al., 2016).

De acordo com Fourie & Addis (1997), os geotêxteis são geralmente avaliados no estado não tensionado. Quando investigada a influência dos esforços, estes são, geralmente, aplicados normal ao plano do GTN. Portanto, esforços no plano (promovendo o tracionamento do filtro) são comumente ignorados e seus efeitos desconsiderados no dimensionamento de filtros geotêxteis.

O desempenho do geotêxtil não tecido é consequência do conjunto dos efeitos de todas as modificações que ocorrem em sua estrutura. Para melhor compreender o GTN agrupam-se as características em três escalas: micro, média e macro escala. A microescala corresponde as

características do elemento estrutural isoladamente, seja ele fibra ou filamento. A média escala seria um conjunto de alguns destes elementos, até dez centímetros, e a macro escala, que corresponde a manta têxtil de forma planar (malha com mais que dez centímetros quadrados) (Gautier *et al.*, 2007).

Os esforços modificam primeiramente a macro e média escalas, resultantes das movimentações dos elementos e, por fim, alteram o elemento estrutural (Gautier *et al.*, 2007). Os poros são definidos na média escala e correspondem aos limites formados pelas fibras ou filamentos. Portanto, a aplicação de esforços ao geotêxtil não tecido implica em alterações nas formas e dimensões dos vazios e assim alteram a abertura de filtração.

2.6.1. Esforços Confinantes

A função de filtro geralmente impõe ao geotêxtil uma condição confinada e o nível de confinamento dependerá do porte da obra. Palmeira & Gardoni (2002) apresentaram algumas das modificações resultantes da aplicação dos esforços normais em cinco geotêxteis não tecidos, agulhados, de poliéster. Estes materiais apresentaram reduções de espessura, porosidade, permeabilidade, transmissividade e diminuição nas constrições.

As alterações no geotêxtil não tecido devido aos esforços normais são variáveis com o nível de solicitação, ocorrendo de forma mais rápida durante a fase inicial do carregamento e posteriormente tornando-se gradativamente mais lenta. Estas alterações estão fortemente correlacionadas com a liberdade de movimentação dos elementos estruturais, movimentações estas que modificam as estruturas dos vazios (Palmeira & Gardoni, 2002).

Palmeira & Gardoni (2002) demonstraram, por meio de ensaios de permeabilidade e permissividade, que esforços normais ao plano do geotêxtil reduzem os valores de tais propriedades. O ensaio de permeabilidade avalia a capacidade do fluido percolar normal ao plano do geotêxtil, já a permissividade é a razão entre permeabilidade normal ao plano pela espessura do geotêxtil. A Figura 2.9 apresenta as variações da permeabilidade e da permissividade de geotêxteis não tecidos quando submetidos a esforços normais.

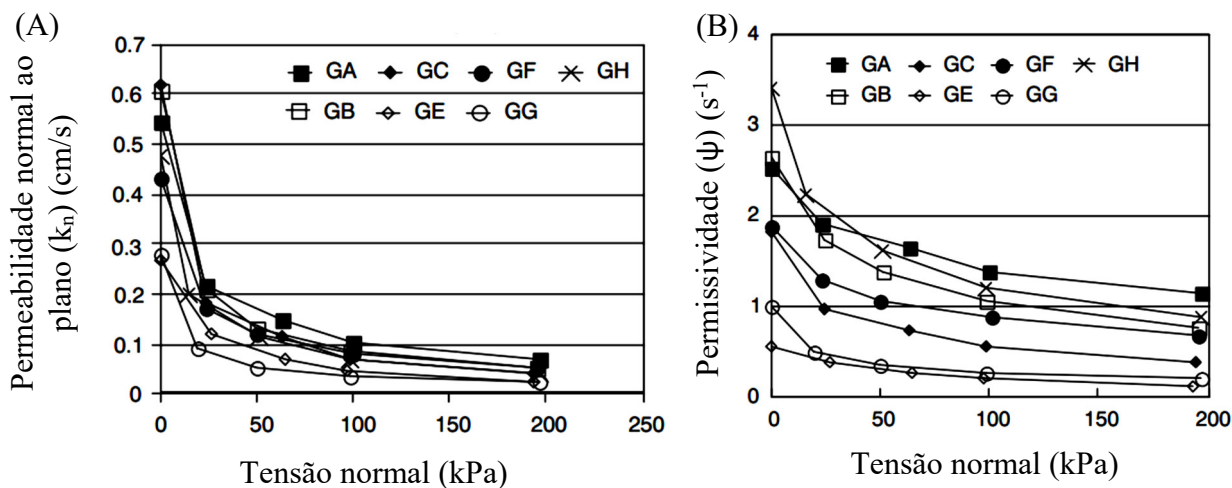


Figura 2.9: Variação de propriedades hidráulicas de geotêxteis sob confinamento. (A) Permeabilidade e (B) Permissividade.

O efeito do confinamento também pode ser observado em ensaios de ponto de bolha. Palmeira & Trejos Galvis (2017) avaliaram as aberturas dos geotêxteis não tecidos sob diferentes níveis de confinamento utilizando este tipo de ensaio. Na Figura 2.10 é possível observar a redução das aberturas à medida em que o confinamento aumenta. Com ensaios de ponto de bolha sob os cinco níveis de confinamento (0, 10, 100, 400 e 1000kPa), os autores avaliaram as alterações dos principais aberturas de dimensionamento de filtros obtidas pela curva de variação de diâmetros de poros, normalizando os valores em função do diâmetro do filamento (d_f), como mostra a Figura 2.11. Na avaliação de O_{95} e O_{98} é possível perceber que estes valores decrescem com o confinamento.

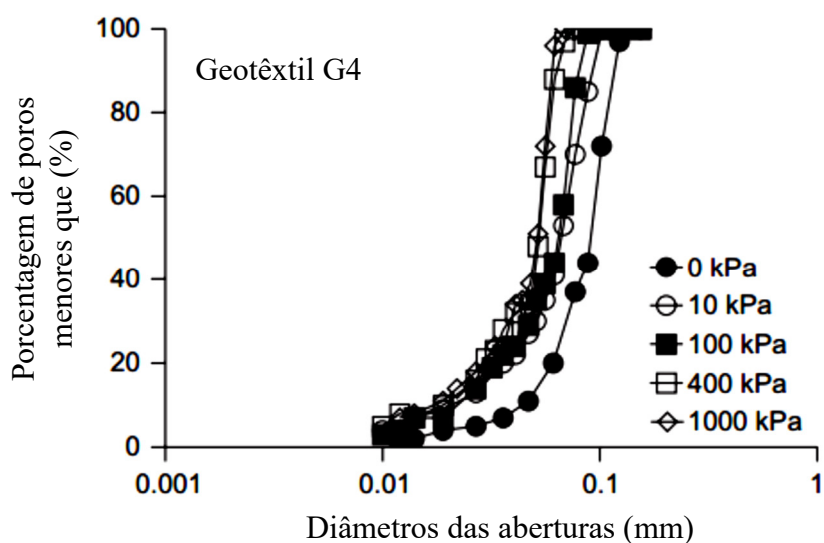


Figura 2.10: Curvas de distribuição de poros obtidas para um geotêxtil não tecido agulhado de filamentos contínuos de poliéster a diferentes níveis de confinamento (Palmeira & Trejos Galvis, 2017).

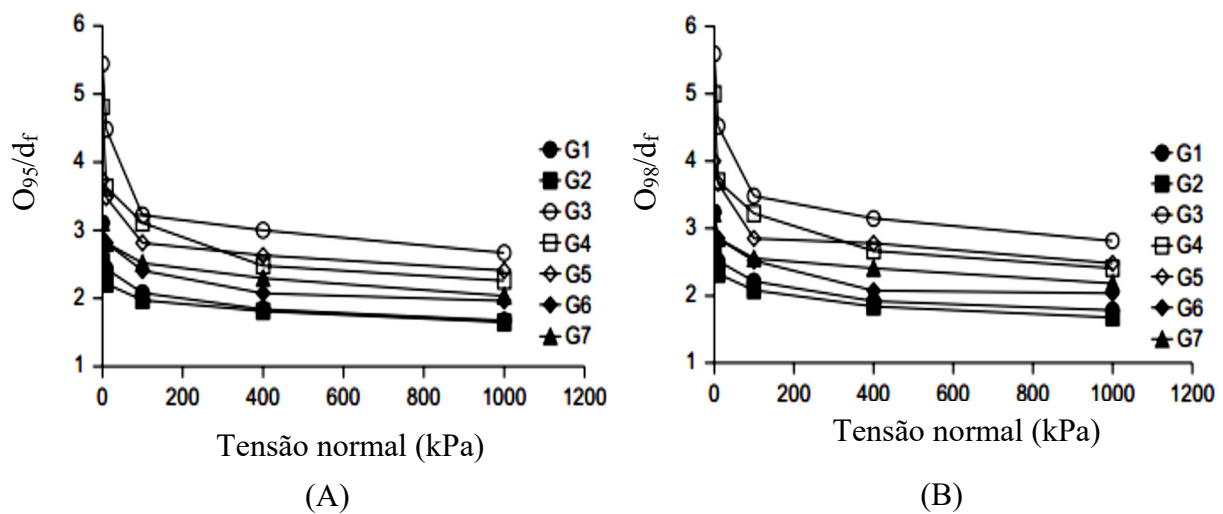


Figura 2.11: Variação de O_{98} e O_{95} com a tensão normal para diferentes geotêxteis não tecidos. (A) O_{95}/d_f e (B) O_{98}/d_f (Palmeira & Trejos Galvis, 2017).

A redução das aberturas dos poros com a aplicação dos esforços normais foi também observada nos trabalhos de Silva (2014) e Moraes Filho (2018). Ambos os autores observaram que os esforços normais aplicados a geotêxteis não tecidos do tipo agulhado, promoveram reduções nas aberturas dos poros.

2.6.2. Esforços de Tração

A complexa estrutura do geotêxtil não tecido promove complexas respostas quando sua estrutura é solicitada. Gautier *et al.* (2007) destacam que os efeitos das solicitações são variáveis não só com a intensidade dos esforços, sendo a forma do geotêxtil fator relevante nesta avaliação. Os autores avaliam que o processo de fixação por agulhagem induz uma leve anisotropia estrutural. Já os geotêxteis termo-fixados apresentam melhor isotropia estrutural.

Os efeitos dos esforços de tração nas aberturas de filtração, ao contrário dos esforços de confinamento, não são bem delineados. Fourie & Kuchena (1995) constaram, por meio de ensaios de permeabilidade, que os filtros tracionados em uma direção apresentam perda de solo, indicando falha na capacidade de retenção do filtro quando solicitado. Deste modo, a abertura de filtração do geotêxtil não tecido aumentou com a solicitação, permitindo assim a passagem de grãos que deveriam ficar retidos (na condição do dimensionamento). Contrapondo, Fourie

& Addis (1997) constataram, por peneiramento hidrodinâmico, uma diminuição da abertura de filtração para outro geotêxtil não tecido também tracionado em uma direção.

Além da avaliação em uma direção, Fourie & Addis (1997) investigaram a aplicação de esforços nas duas direções. Nesta segunda avaliação o comportamento não se mostrou bem definido quando observado o aumento dos esforços de tração e as correspondentes alterações nas aberturas de filtração. No entanto, todos os geotêxteis tracionados apresentaram aberturas de filtração menores que a condição não tracionada.

Ainda neste cenário de contradições, podem-se agrupar os estudos em duas vertentes. A primeira delas, em concordância com o intuitivo, sinaliza que a aplicação de esforços de tração aumenta as aberturas dos poros. A segunda vertente sugere que os esforços de tração promovem reduções nas aberturas de filtração.

Procedimentos similares para o tracionamento unidirecional das amostras de geotêxteis foram utilizados por Wu *et al.* (2008) e Moraes Filho (2018), tendo os trabalhos avaliados os geotêxteis sob os mesmos níveis de deformação de tração. Assim, o tracionamento bidirecional e simétrico foi similarmente aplicado às amostras nos trabalhos de Wu & Hong (2016) e Moraes Filho (2018). No entanto, as avaliações dos efeitos de tração nas aberturas dos poros foram avaliadas por metodologias distintas. No trabalho de Wu *et al.* (2008) e Wu & Hong (2016) os poros foram avaliados pelo método de peneiramento úmido. Já no trabalho de Moraes Filho (2018) o método utilizado foi o de ponto de bolha.

No trabalho realizado por Wu *et al.* (2008) é possível observar a ampliação das aberturas dos poros a medida que aumenta-se as deformações de tração, comportamento este também observado no trabalho de Moraes Filho (2018). Já a aplicação dos esforços bidirecionais por Wu & Hong (2016) e Moraes Filho (2018) não apresentaram concordância. Para os primeiros autores os esforços de tração bidirecionais promoveram redução das aberturas dos poros, aspecto este contraposto às observações do segundo trabalho.

3. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1. Materiais

3.1.1. Geotêxteis Não Tecidos

A fim de avaliar os efeitos dos esforços de tração em filtros geotêxteis, foram utilizados três geotêxteis não tecidos. Por questão de comparação foram selecionados GTNs manufaturados com filamentos contínuos de poliéster e seu processo de fixação por meio de agulhagem. A variação definida como critério de seleção do geotêxtil foi a gramatura: 200, 300 e 510 g/m², sendo os materiais identificados pelos códigos: GTN₂₀₀, GTN₃₀₀, GTN₅₀₀, respectivamente. As informações fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 3.1. Os GTNs ensaiados encontravam-se armazenados no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília e foram previamente avaliados por Silva (2014), Trejos Galvis (2016) e Moraes Filho (2018).

Tabela 3.1: Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos fornecidas pelo fabricante (MODIFICADO de – Moraes Filho (2018)).

Nome	Geotêxtil	Material	M_A (g/m²)	t_{GT} (mm)	O₉₅ (mm)	K_n (cm/s)	Ψ (s⁻¹)
GTN ₂₀₀	OP-20	PET	200	1,9	0,100	0,30	2,0
GTN ₃₀₀	OP-30	PET	300	2,3	0,090	0,26	1,5
GTN ₅₁₀	RT-31	PET	510	4,0	0,080	0,20	0,9

Notas: M_A = massa por unidade de área (gramatura), t_{GT} = espessura nominal (ABNT NBR 12569), O₉₅ = abertura de filtração, K_n = permeabilidade normal ao plano, Ψ = permissividade.

3.1.2. Líquido de Saturação

Conforme sugerido pela ASTM D6767 (2011), e indicado por Silva (2014), foi utilizado etanol anidro para realização do processo de saturação dos espécimes de geotêxtil. O etanol utilizado na pesquisa foi comprado em posto combustível.

3.2. Equipamentos

Todos os equipamentos utilizados nesta pesquisa pertencem ao Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília, e são descritos nos itens seguintes.

3.2.1. Prensa de Tração Uniaxial

A prensa de tração uniaxial modelo DL 2000 foi fabricada pela empresa EMIC (Figura 3.1) e foi utilizada em ensaios de tração nos geotêxteis. Por meio dos dados gerados por este equipamento é possível determinar a resistência máxima do corpo de prova e sua deformação quando atingida a ruptura segundo as recomendações da NBR 10319.

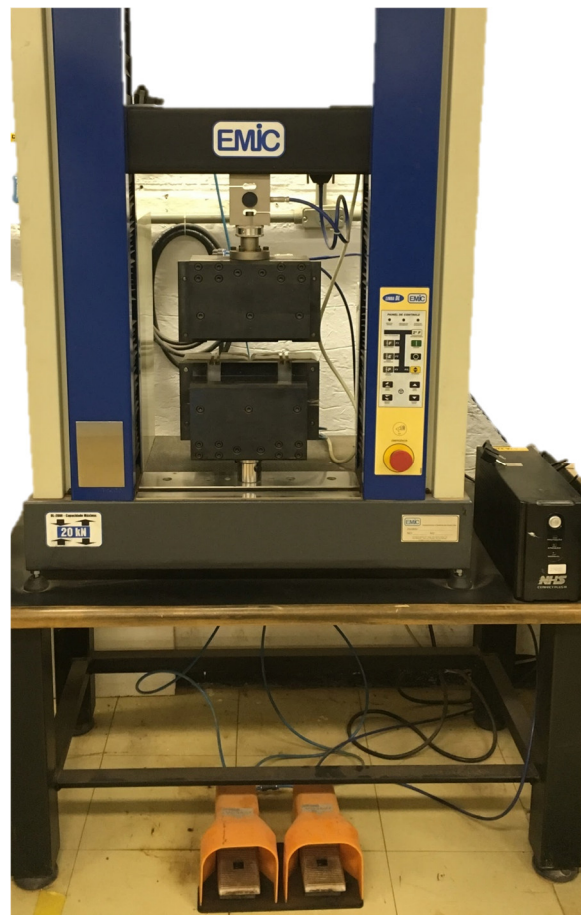


Figura 3.1: Equipamento de tração uniaxial EMIC, Linha DL 2000.

3.2.2. Prensa de Tração Biaxial

O equipamento de tração biaxial utilizado foi desenvolvido por Moraes Filho (2018) e adaptado nesta pesquisa. É composto por estrutura metálica de reação, dois cilindros hidráulicos de dupla ação (com capacidade de 20kN), duas bombas hidráulicas, quatro mangueiras hidráulicas (que permitiam o fluxo do óleo pelo sistema hidráulico), quatro garras e 24 conjuntos de parafusos tipo Allen ($\varnothing = 7/32''$), arruelas e porcas que garantiram a fixação e aplicação das deformações no espécime de geotêxtil. Conforme sugerido por Moraes Filho (2018), a células de carga montadas na versão original do equipamento foram substituídas por transdutores de deslocamento, visto que o trabalho foi definido em termo de deformação $\left[\frac{mm}{mm}\right]$ de tração. Uma vista superior do equipamento é apresentada na Figura 3.2.

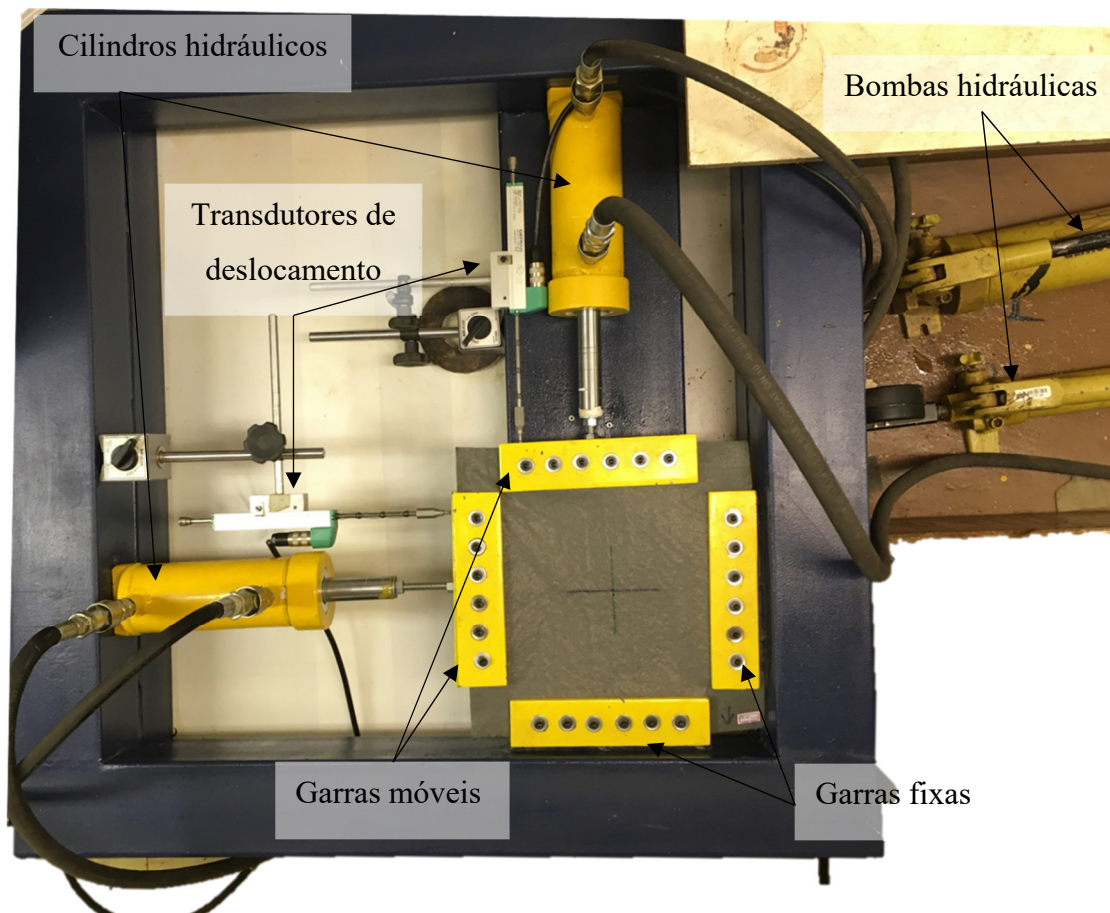


Figura 3.2: Equipamento de tração biaxial.

3.2.3. Moldura de Fixação do GTN

Para avaliação dos espécimes tracionados utilizou-se uma moldura metálica, de aço inoxidável conforme apresentada na Figura 3.3. Esta moldura permitia o travamento do espécime com as deformações impostas no equipamento de tração biaxial, tendo sido demonstrada a sua eficiência em manter tais deformações no trabalho de Moraes Filho (2018).

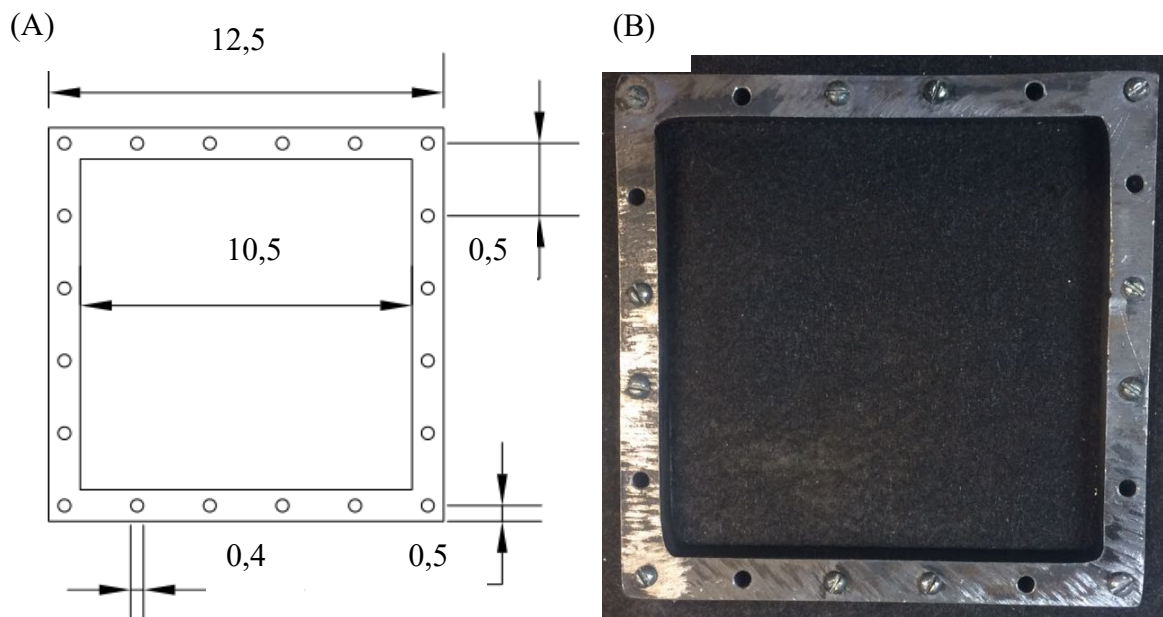


Figura 3.3: Moldura metálica: (A) Dimensões (Moraes Filho, 2018) e (B) Vista.

3.2.4. Fluxômetro – Fluke 922

Para aferição do volume de ar passante pelo geotêxtil, foi utilizado o fluxômetro digital. O fluxômetro é da marca Fluke, modelo 922. O aparelho permitia a medição da vazão de ar comprimido e da temperatura na tubulação.

3.2.5. Equipamento de Ponto de Bolha (*Bubble Point Test*)

O sistema de avaliação de porometria de geotêxteis pelo método de ponto de bolha disponível no laboratório foi inicialmente desenvolvido por Lima (2014), tendo sido alterado e empregado

em pesquisas posteriores (Silva, 2014; Trejos Galvis, 2016 e Moraes Filho, 2018). Uma vista geral do equipamento é apresentada na Figura 3.4. Para esta pesquisa foi necessário modificar a célula de armazenamento do espécime de geotêxtil (Figura 3.5), de modo a que o mesmo pudesse ser submetido a confinamento e saturação interna com vedação eficiente. Os detalhes da célula são apresentados na Figura 3.6.

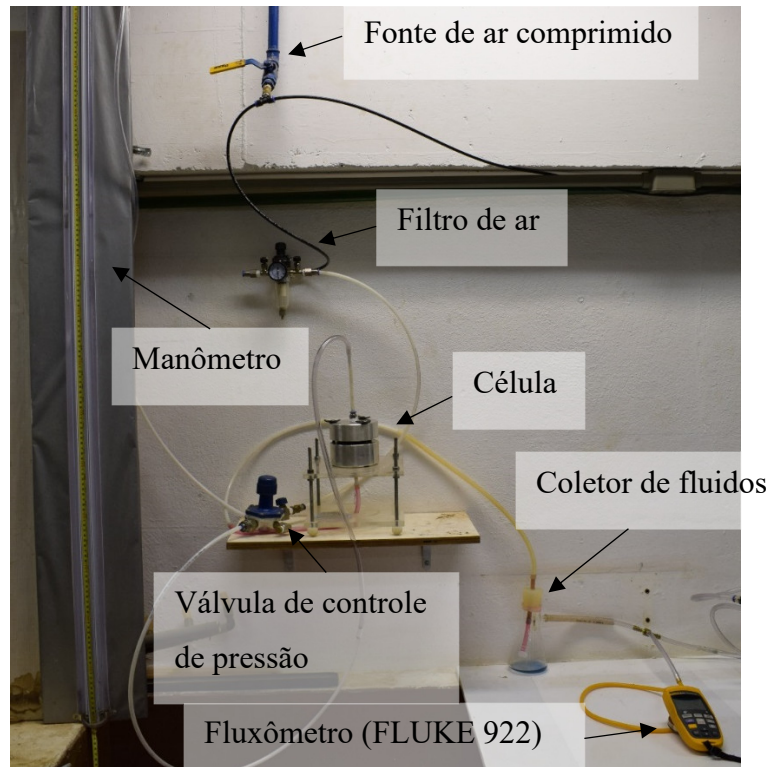


Figura 3.4: Equipamento para ensaios pelo método do ponto de bolha (Moraes Filho, 2018).

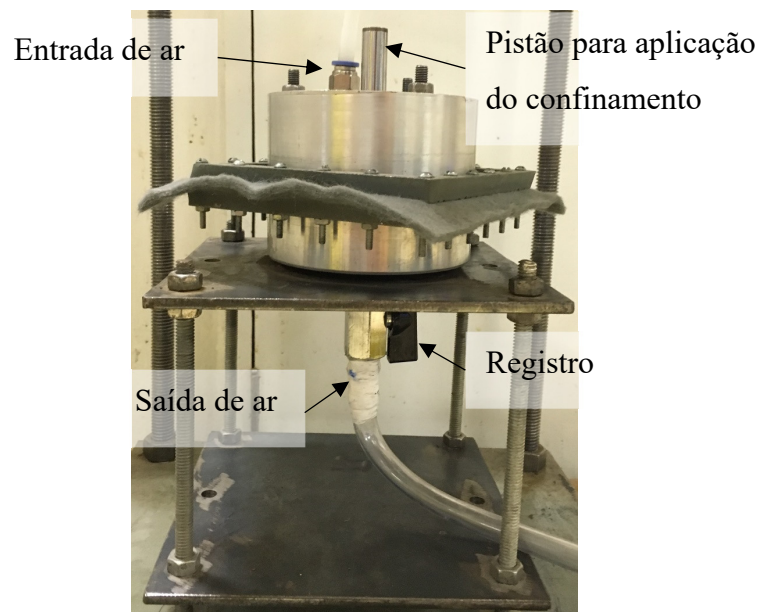


Figura 3.5: Célula adaptada para ensaio de ponto de bolha com espécimes sob confinamento.

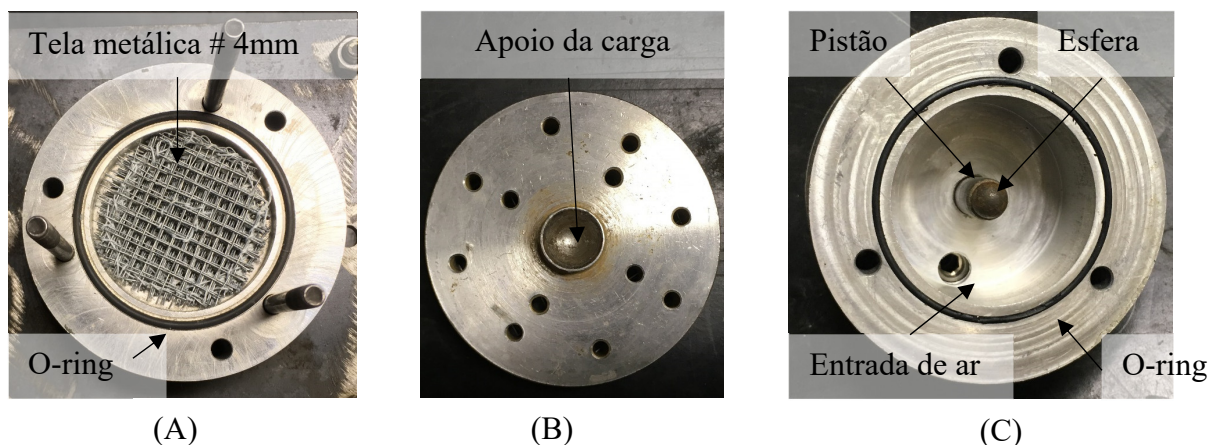


Figura 3.6: Componentes da célula de BBP. (A) Vista superior da base da célula (B) Prato perfurado para aplicação do confinamento (C) Encaixe superior da célula.

3.2.6. Sistema de Aplicação do Confinamento

A aplicação do confinamento foi realizada utilizando estrutura já disponível no laboratório, utilizada também por Moraes Filho (2018). O sistema é composto por estrutura de reação metálica, um cilindro hidráulico (fixado no topo desta estrutura), bomba hidráulica conectada ao cilindro, célula de carga fixada no pistão hidráulico e um pendural para aplicação das tensões de confinamento (Figura 3.7).



Figura 3.7: Sistema de confinamento de espécimes na célula de BBP.

3.2.7. Sistema de Aquisição de Dados

O aquisitor de dados utilizado foi o Spider-8, modelo SR55, da empresa HBM. Os dados foram adquiridos e processados pelo programa *Catman*, versão XXX para sistema operacional Windows. O sistema de aquisição de dados é apresentado na Figura 3.8.



Figura 3.8: Sistema de aquisição de dados.

4. METODOLOGIA

4.1. Preparação das Amostras

Os espécimes foram selecionados e preparados conforme especificações da norma ABNT (2013) e deveriam atender às dimensões do equipamento de tração biaxial. Deste modo, cada corpo de prova teve as seguintes dimensões: 300mm x 300mm.

Para os GTN₂₀₀ e GTN₃₀₀ foi necessário descartar as duas primeiras voltas do rolo, retirando assim amostras possivelmente alteradas pela exposição e manuseio do material. Descartado estes trechos, o procedimento a seguir foi seguido para todos os geotêxteis não tecidos avaliados.

- 1º. Cortou-se as mantas nas dimensões 2,10m x 1,10m, sendo a menor dimensão limitada pela largura da bancada disponível para acomodação das mesmas Figura 4.1. Foram obtidas duas mantas para cada GTN avaliado;
- 2º. Colocou-se a manta em uma superfície limpa e seca, deixando o material em repouso por 24 horas;
- 3º. Conforme recomendações da norma, a faixa com largura de 100 mm ao longo do perímetro da manta foi descartada. Definiu-se o número máximo de espécimes que caberiam em uma faixa de 2100 mm. Assim, foram seis (6) espécimes por faixa e três (3) faixas por malha, totalizando 18 espécimes por malha.
- 4º. Para traçar a malha foram utilizadas canetas permanentes, limitando nas bordas laterais uma faixa de 150 mm. Depois de limitadas as bordas, traçaram-se cinco verticais distando 300mm umas das outras. Por fim, traçaram-se 4 retas horizontais distando 300 mm entre si;

- 5°. Todos os espécimes foram identificados com um código e tiveram uma seta que indicava o sentido de fabricação. Apenas depois desta identificação e marcação foram recortados da malha;
- 6°. Todos os espécimes foram pesados e suas gramaturas equivalentes determinadas;
- 7°. A princípio, utilizou-se a escolha aleatória de espécimes, conforme empregado por pesquisas anteriores (Silva, 2014; Trejos Galvis, 2016; Moraes Filho, 2018). No entanto, durante a avaliação da gramatura realizada na área de um espécime de 300mm x 300mm observou-se que a variabilidade da gramatura já garantia a aleatoriedade desejada. Sendo assim, priorizaram-se os espécimes que apresentassem a gramatura igual e posteriormente os que apresentassem a menor variação ($\pm 10\%$) do valor especificado pelo fabricante (200 g/m², 300 g/m² e 510g/m²).



Figura 4.1: Traçado da malha para recorte dos espécimes com 300 x 300mm.

4.2. Avaliação da Gramatura

A conferência da gramatura foi realizada utilizando uma seleção randomizada de três espécimes dentre os preparados para o ensaio de BBP. Todo o espécime preparado apresentava dimensão 300mm x 300mm, resultando em nove (9) espécimes de 100 mm x 100 mm para o tracionamento, conforme especificado pela NBR – 9864 (ABNT 2013). Sendo avaliada a

gramatura apenas de 8 espécimes, pois um dos espécimes havia sido etiquetado previamente com as identificações do espécime de 300mm x 300mm. Portanto, cada geotêxtil teve 24 espécimes de gramatura avaliada.

4.3. Avaliação da Resistência à Tração Uniaxial

Para determinação da resistência máxima e das deformações máximas na ruptura, foram realizados os ensaios de tração uniaxial, segundo as recomendações da NBR 10319 (ABNT 2013). Por questão de tempo e limite de espécimes preparados, foram realizados três ensaios em cada direção do geotêxtil.

Pelos valores de esforços de tração e suas respectivas deformações, foi possível determinar a rigidez secante (J_{sec}) para as deformações impostas aos espécimes tracionados na análise de abertura de filtração. Os valores de rigidez à tração foram obtidos pela Equação 1.

$$J_{sec} = \frac{F \times 100}{\varepsilon \times B} \quad (1)$$

Onde,

J_{sec} : Rigidez secante a uma dada deformação (kN/m);

F: Força de tração para a deformação especificada, ε (kN);

ε : Deformação (%);

B: Largura do espécime (m).

4.4. Programa de Ensaio

Os três geotêxteis não tecidos foram avaliados sob diferentes níveis e formas de solicitações, sendo elas agrupadas em dois grupos: solicitações por esforços normais e por esforços no plano. O primeiro grupo de esforços promovia o confinamento da amostra. Por questões comparativas adotaram-se os mesmos níveis de tensões de trabalhos anteriores: 0, 10, 100, 400 e 1000 kPa (Silva, 2014; Trejos Galvis, 2016; Moraes Filho, 2018). O segundo grupo provocava

deformações de tração. O limite de deformação aplicado nestes materiais tomou como referência a avaliação feita anteriormente por (Moraes Filho, 2018), sendo as deformações impostas iguais a 5%, 10% e 20%.

Nesta pesquisa todas as solicitações foram bidirecionais, sendo reunidas em dois grupos: aplicação de deformações de tração assimétricas e tracionamento sob condições de deformação plana. No processo de deformação plana evitavam-se deformações perpendiculares ao sentido de fabricação. As combinações de deformações utilizadas nos ensaios são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Deformações de tração aplicadas aos espécimes de geotêxtil.

Deformações de tração assimétricas *		Deformação plana de tração **	
Sentido de fabricação	Sentido perpendicular à fabricação	Sentido de fabricação	Sentido perpendicular à fabricação
10	5	5	0
20	5	10	0
20	10	20	0

* avaliando o deslocamento das garras

** avaliando a deformação no centro da amostra

Todas as configurações quando combinadas resultaram em 35 ensaios para cada geotêxtil analisado, totalizando 105 curvas de distribuição de poros.

4.5. Procedimentos para o Tracionamento das Amostras

Inicialmente, as amostras foram submersas em água destilada por uma hora para atender as especificações do ensaio de ponto de bolha segundo a ASTM D6767 (2011). Em seguida, foram secas ao ar sob temperatura ambiente. Os espécimes foram armazenados e posteriormente selecionados para o tracionamento. Para aplicação do tracionamento levou-se o espécime para o equipamento de tração bidirecional e executaram-se as etapas descritas abaixo. O processo de tracionamento foi dividido em dois grupos, o primeiro deles denominado de deformações assimétricas e o segundo de deformação plana (sendo a deformação aplicada no sentido de fabricação). Os ensaios foram conduzidos em duas etapas, na primeira etapa impôs-se a deformação na garra até atingir os níveis desejados e na segunda foram impostas diferentes

deformações na garra afim de se obterem determinados níveis de deformação no centro da amostra

As deformações foram calculadas e determinadas tendo como critério o espécime posicionado entre as garras, com 200mm x 200mm. Por exemplo, para atingir o nível de deformação de 10% $\left[\frac{mm}{mm}\right]$ e 5% $\left[\frac{mm}{mm}\right]$ era necessário aplicar deslocamentos de 20mm e 10mm, respectivamente. As deformações foram aferidas utilizando as Equações 2 e 3, conforme descrita a seguir.

$$\varepsilon_{Total} = \frac{d_{garra}}{L_{espécime}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

ε_{Total} : Deformação em toda a amostra, (% mm/mm);

d_{garra} : Deslocamento da garra (mm);

$L_{espécime}$: Comprimento da amostra (mm).

$$\varepsilon_{Central} = \frac{L_{ref_final} - L_{ref_inicial}}{L_{ref_inicial}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$\varepsilon_{Central}$: Deformação no centro da amostra (% mm/mm);

$L_{ref_inicial}$: Comprimento inicial da referência (mm);

L_{ref_final} : Comprimento final da referência (mm).

Ambos os grupos seguiam o mesmo procedimento até a aplicação dos esforços de tração, o procedimento de aplicação dos esforços de tração foi realizado de forma diferente, sendo descrito em grupo distintos.

1º. Traçou-se no centro da amostra uma cruz de referência, com 100mm de comprimento, permitindo a medição das deformações no centro da amostra (Figura 4.2).

2°. Fixou-se o geotêxtil nas garras, utilizando-se os 24 conjuntos de parafusos, arruelas e porcas;

3°. Ajustaram-se as garras para garantir que o GTN não estivesse relaxado entre as garras;

- Para a situação de deformações assimétrica.

4°. Deslocou-se a garra posicionada na direção de fabricação 10 mm, distância essa equivalente a uma taxa de deformação de 5% (mm/mm).

5°. Deslocou-se a garra posicionada na direção perpendicular à fabricação 10 mm, distância essa equivalente a uma taxa de deformação de 5% (mm/mm).

6°. Repetiu-se os passos 4 e 5 até alcançar o deslocamento total das garras, afim de atingir a deformação de tração pretendida;

- Para a situação de deformações plana.

4°. Deslocou-se a garra posicionada na direção de fabricação até alcançar a distância equivalente a deformação pretendida;

5°. Mediu-se o tamanho dos traços que formam a cruz no centro da amostra. Se a deformação na direção perpendicular à aplicação do esforço fosse de contração, seguiu-se o passo 6. Caso a deformação tenha sido 0% (mm/mm), passou-se para o passo 7;

6°. Deslocou-se a garra posicionada na direção de perpendicular à de fabricação o mínimo necessário para que a cruz central apresentasse 0% de deformação no transversal;

Retornando os procedimentos comuns aos dois grupos de aplicação de deformações de tração, teve-se:

7°. Aferiu-se as dimensões dos traços que formam a cruz no centro do espécime, obtendo-se a deformação medida no centro da amostra por meio da Equação 3;

- 8°. Posicionou-se a moldura de fixação e manutenção das deformações no centro do espécime;
- 9°. Fixou-se a moldura utilizando-se 20 conjuntos de parafusos, arruelas e porcas;
- 10°. Soltou-se o espécime das garras, liberando a amostra do equipamento de tração bidirecional.

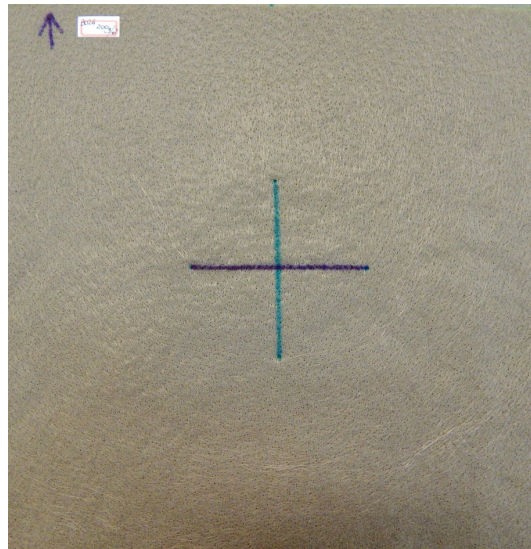


Figura 4.2: Espécime 300 x 300mm com referência (100mm) no centro da amostra.

4.6. Procedimentos para Confinamento da Amostra

O confinamento da amostra foi realizado na célula de BBP. O esforço normal foi transmitido ao GTN por meio de uma placa perfurada, a qual transmitia a carga aplicada pelo sistema hidráulico ao geotêxtil. Para atingir os níveis de confinamento desejados foi bombeado óleo do sistema hidráulico, utilizando-se uma bomba manual, até o momento que a célula de carga registrava a carga desejada sobre o geotêxtil. Depois de estabilizada a leitura da tensão de confinamento, cessava-se o bombeamento e concluía-se a etapa.

4.7. Procedimentos Para o Ensaio de Ponto de Bolha (BBP)

Os procedimentos seguidos nos ensaios de BBP são descritos a seguir, sendo agrupados em duas fases. Na primeira fase do ensaio o espécime estava seco e na segunda fase estava saturado.

Para a saturação do espécime foi utilizado como líquido de saturação o etanol, conforme recomendado pela ASTM D6767 (2011). Bhatia & Smith (1996b) reportaram que o tempo de saturação de uma amostra de geotêxtil não tecido utilizando-se o etanol como líquido de saturação era de 25 minutos, garantindo a saturação completa do geotêxtil não tecido. Para garantia desta saturação foram utilizados 60 minutos de saturação, sendo 50 minutos em reservatório com etanol e 10 minutos da célula do BBP.

- Passo a passo para o caso de espécime seco – Denominada de Fase I:

- 1º. Posicionou-se o espécime de geotêxtil sobre a parte inferior da célula;
- 2º. Colocou-se a parte superior da célula, fixando-a com os três conjuntos de parafusos e porcas;
- 3º. Verificou-se se o manômetro estava com os dois meniscos posicionados na altura de 1 m e a temperatura registrada no fluxômetro;
- 4º. Aplicou-se o ar comprimido com valores de pressão pré-definidas, uma a uma, até se atingir a pressão máxima, realizando as aferições de fluxo correspondente a cada valor de pressão aplicada utilizando-se o fluxômetro (Fluke 922);
- 5º. Transferiram-se os dados de fluxo aferidos para a ficha de ensaio;
- 6º. Desligou-se a aplicação de ar comprimido;
- 7º. Reduziu-se a pressão e removeu-se a parte superior da célula de BBP;
- 8º. Colocou-se a parte superior da célula, adicionando-se o prato perfurado e as malhas metálicas em seu interior, fixou-se as partes com os três conjuntos de parafusos e porcas;
- 9º. Aplicou-se o confinamento por meio do sistema hidráulico, até atingir o primeiro nível de confinamento desejado;
- 10º. Repetiram-se os passos do 3º ao 6º;

- 11°. Aplicou-se um incremento de tensão que garantisse o confinamento;
 - 12°. Repetiram-se os passos do 3° ao 6°;
 - 13°. Repetiram-se os procedimentos 11 e 12 até a aplicação de todo o confinamento na amostra.
- Passo a passo para o caso de espécime saturado – Denominada de Fase II:
 - 1°. Encheu-se a parte inferior da célula com etanol, garantindo o contato do espécime saturado com o etanol. Para isto era necessário fechar o registro posicionado no fundo da célula;
 - 2°. Posicionou-se o espécime de geotêxtil sobre a parte inferior da célula;
 - 3°. Colocou-se a parte superior da célula, fixando-a com os três conjuntos de parafusos e porcas;
 - 4°. Adicionou-se 5 mL de etanol, criando uma lâmina de etanol sobre o geotêxtil;
 - 5°. Verificou-se se o manômetro estava com os dois meniscos posicionados na altura de 1 m e a temperatura registrada no fluxômetro. Abriu-se o registro da célula, esperando a saída do etanol extra contido na célula;
 - 6°. Aplicou-se o ar comprimido com valores de pressão pré-definidas, uma a uma, até atingir a pressão máxima, realizando as medições de vazão correspondentes a cada valor de pressão aplicada utilizando-se o fluxômetro (Fluke 922);
 - 7°. Transferiram-se os dados de fluxo aferidos para a ficha de ensaio;
 - 8°. Desligou-se a aplicação de ar comprimido;
 - 9°. Reduziu-se da pressão e removeu-se da parte superior da célula de BBP;

- 10°. Transferiu-se o espécime de geotêxtil novamente para o recipiente com etanol, deixando-o em repouso por 50 minutos.
- 11°. Colocou-se a parte superior da célula adicionando-se o prato perfurado e a malha metálica em seu interior. Fixaram-se as partes com os três conjuntos de parafusos e porcas;
- 12°. Adicionou-se 5 mL de etanol, criando uma lâmina de etanol sobre o geotêxtil;
- 13°. Aplicou-se o confinamento por meio do sistema hidráulico até atingir o primeiro nível de confinamento e abriu-se o registro na base da célula, esperando-se a saída do etanol extra contido na célula;
- 14°. Repetiram-se os passos do 3° ao 10°;

Para cada avaliação de espécime saturado e confinado era necessário a retirada do espécime da célula de BBP, sem alterar a fixação na moldura, sua saturação em recipiente com etanol por 50 minutos e a repetição do processo até atingir o confinamento máximo desejado, 1000kPa.

A interpretação dos dados obtidos nos ensaios de ponto de bolha seguiu as recomendações sugeridas pela ASTM D6767 (2011). Os valores de vazão de ar e suas respectivas pressões são relacionada, de modo que é possível determinar a área do poro e, assumindo o poro circular, é possível determinar o valor do seu diâmetro.

De acordo com ASTM D6767 (2011), a condição de equilíbrio do fluido no interior do poro pode ser expressa por:

$$\pi \cdot d \cdot \sigma_1 \cdot B \cdot \cos \theta = \frac{\pi}{4} \cdot d \cdot P \quad (4)$$

Onde,

d = diâmetro do poro (mm);

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

B = constante capilar;

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

P = pressão (Pa).

A primeira parte da Equação 4 corresponde a força resistiva desenvolvida a partir da ação da tensão de superfície atuando entre o líquido e a estrutura do poro. A segunda parte da Equação 4 é a força motriz desenvolvida a partir da pressão aplicada multiplicada pela área da constrição. Afim de determinar o diâmetro da constrição do canal de fluxo, reescreve-se a Equação 4 isolando-se o diâmetro do poro em função dos outros parâmetros, obtendo-se, assim, a equação 5.

$$d = \frac{4 \cdot \sigma \cdot B \cdot \cos \theta}{P} \quad (5)$$

Onde,

d = diâmetro do poro para a pressão P;

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

B = constante capilar, igual a 0.715;

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

P = pressão (Pa).

Nesta pesquisa utilizou-se o etanol como líquido de saturação e assumindo-se que este apresenta $\theta \cong 0$, a Equação 5 pode ser reescrita como:

$$d = \frac{4 \cdot B \cdot \sigma}{P} \quad (6)$$

Substituindo fatores de conversão de pressão e a constante capilar (ASTM D6767, 2011), tem-se:

$$d = \frac{2860 \cdot \sigma}{P} \quad (7)$$

Onde,

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

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

P = pressão (Pa).

A tensão superficial do etanol, líquido de saturação, foi definida pela expressão apresentada no trabalho de Perez *et al.* (2010), sendo expressa por:

$$\sigma_{etanol} = 0,0244 \times e^{-0,0046 \cdot T} \quad (8)$$

Onde,

σ_{etanol} = tensão superficial do etanol (mN/m ou dynes/cm);

T = Temperatura (°C).

4.8. Determinação da Curva de Distribuição das Dimensões dos Poros

As curvas de distribuição de dimensão dos poros foram determinadas relacionando-se os diâmetros das constrições dos poros e as porcentagens, obtidas por meio da relação das vazões de ar na condição seca e saturada. Os diâmetros das constrições foram definidos conforme indicado no item anterior. A porcentagem foi definida de acordo com a Equação 9.

$$\text{Porcentagem de poros menores que} = \left(1 - \frac{Vazão_{fase\ II}}{Vazão_{fase\ I}}\right) \times 100\% \quad (9)$$

4.9. Ensaios Preliminares e Calibração

4.9.1. Ensaios de Gramatura

Os ensaios de gramatura mostraram a variabilidade da distribuição de massa de fibras na manta, apresentando regiões com densidades distintas, conforme já reportado em trabalhos anteriores (Pourdeyhimi & Maze, 2008). A avaliação da gramatura foi realizada a partir de amostras preparadas para o tracionamento, permitindo avaliar a variação da gramatura no espécime que possivelmente poderia ser utilizada no teste de ponto de bolha. A Figura 4.3 a 4.5, apresenta a média da gramatura na amostra e sua variabilidade para os três geotêxteis não tecido avaliados, sendo estes valores os resultados médios de oito ensaios de gramatura (100mm x 100mm).

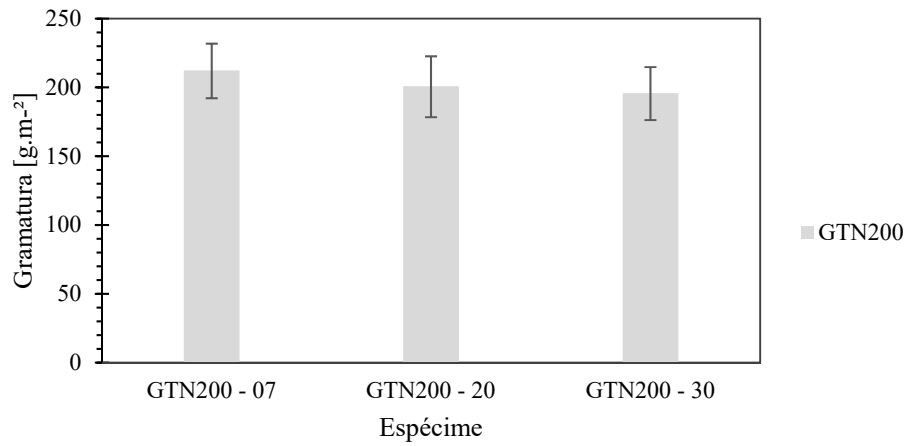


Figura 4.3: Valores médios e desvio padrão da gramatura GTN₂₀₀.

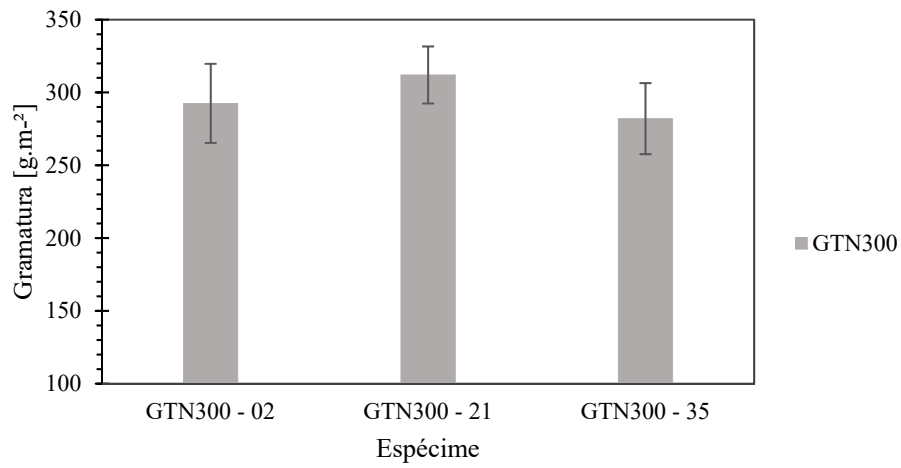


Figura 4.4: Valores médios e desvio padrão da gramatura GTN₃₀₀.

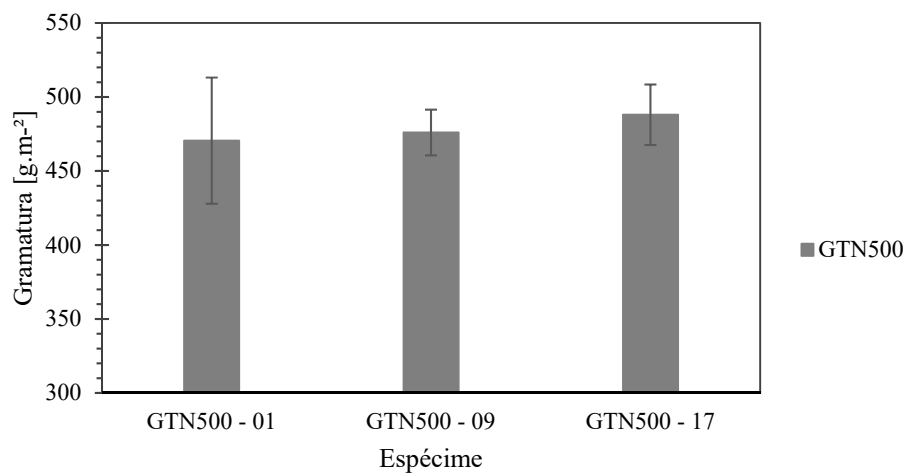


Figura 4.5: Valores médios e desvio padrão da gramatura GTN₅₀₀.

Com esta avaliação pode-se afirmar que os geotêxteis GTN₂₀₀ e GTN₃₀₀ apresentam valores médios em conformidade com o indicado pelo fabricante. Já o GTN₅₀₀ não apresenta convergência para o valor indicado. O GTN₂₀₀ apresenta a maior variabilidade, tendo um coeficiente de variação de $\pm 10\%$. O GTN₃₀₀ apresentou o coeficiente de variação de $\pm 7,7\%$ e, por fim, o GTN₅₀₀ apresentou o menor coeficiente de variação $\pm 5,6\%$ (quando comparado com a gramatura média obtida).

4.9.2. Ensaios de Resistência à Tração em Faixa Larga

Com os ensaios de tração uniaxial foi possível determinar a resistência à tração e sua correspondente deformação. Os resultados médios de resistência a tração e suas respectivas deformações são apresentados na Tabela 4.2. Os valores obtidos demonstram que a máxima deformação dos geotêxteis não tecidos avaliados nesta pesquisa são superiores a 45%. Portanto, os limites de deformações impostos nas amostras preparadas para avaliação das dimensões dos poros na condição tracionada foram inferiores a 50% da máxima deformação de ruptura.

Tabela 4.2: Valores médios de resistência à tração e suas respectivas deformações.

Sentido da avaliação	Geotêxtil	Resistência à tração (kN/m)	Deformação máxima na ruptura (%)
Direção de Fabricação (DF)	GTN ₂₀₀	10	56
	GTN ₃₀₀	16	55
	GTN ₅₀₀	25	48
Direção Transversal à Fabricação (DT)	GTN ₂₀₀	9	58
	GTN ₃₀₀	14	55
	GTN ₅₀₀	22	48

As curvas tensão-deformação obtidas em ensaios de tração são apresentadas nas Figuras 4.6 e 4.7, sendo os resultados agrupados por geotêxtil avaliado e o sentido da aplicação do esforço de tração. A partir destes ensaios foi possível determinar a rigidez à tração para as deformações aplicadas aos geotêxteis (5%, 10% e 20%), cujos os valores são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores de rigidez à tração sob diferentes níveis de deformação.

Sentido da avaliação	Geotêxtil	Rigidez secante a 5% (kN/m)	Rigidez secante a 10% (kN/m)	Rigidez secante a 20% (kN/m)
Direção de Fabricação (DF)	GTN ₂₀₀	14	16	19
	GTN ₃₀₀	27	29	33
	GTN ₅₀₀	38	54	59
Direção Transversal à Fabricação (DT)	GTN ₂₀₀	11	13	16
	GTN ₃₀₀	20	23	25
	GTN ₅₀₀	32	41	52

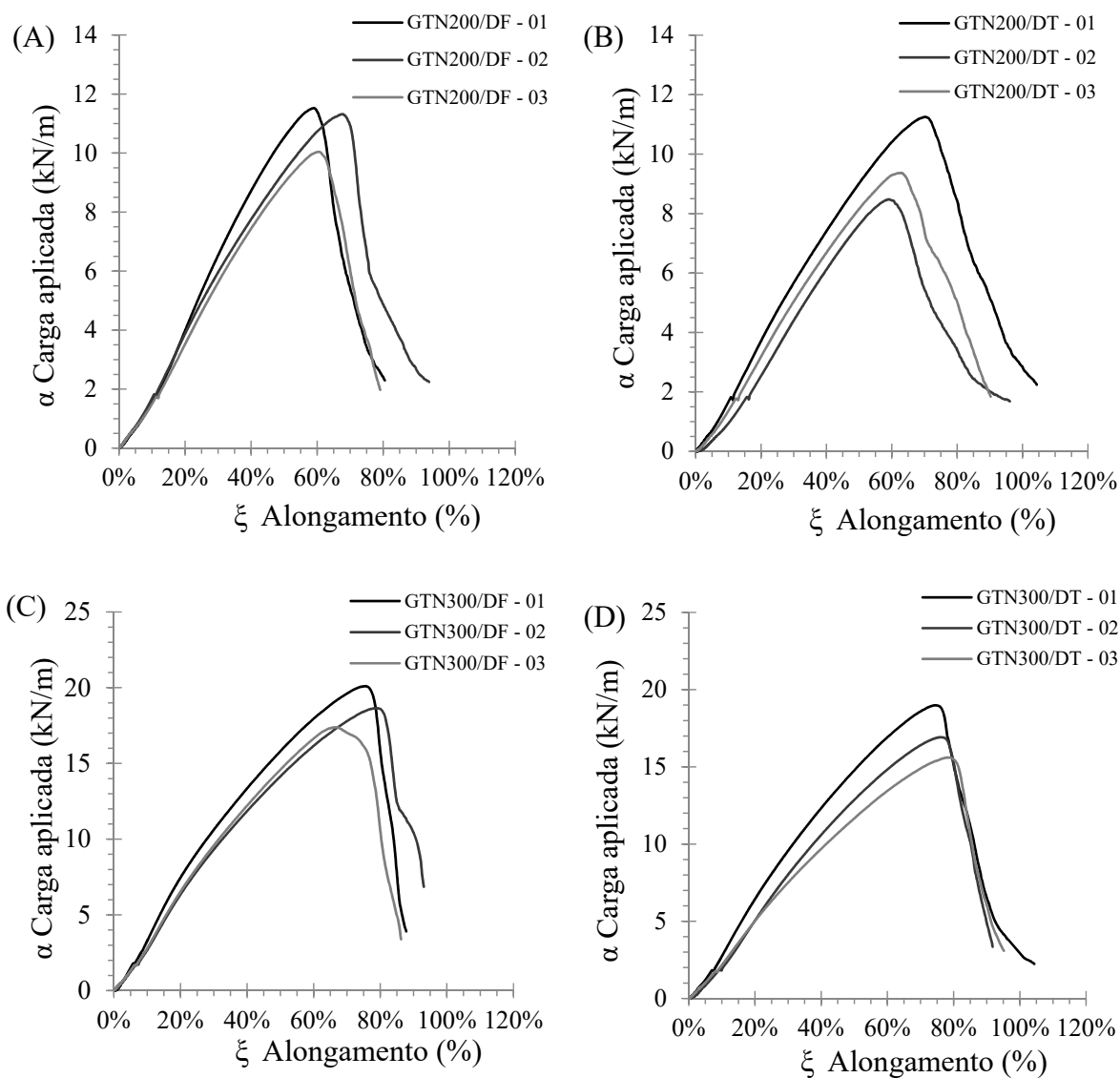


Figura 4.6: Curvas de tensão vs deformação na direção de fabricação (DF) e na direção transversal à de fabricação (DT). (A) GTN₂₀₀ – DF, (B) GTN₂₀₀ – DT, (C) GTN₃₀₀ – DF, (D) GTN₃₀₀ – DT.

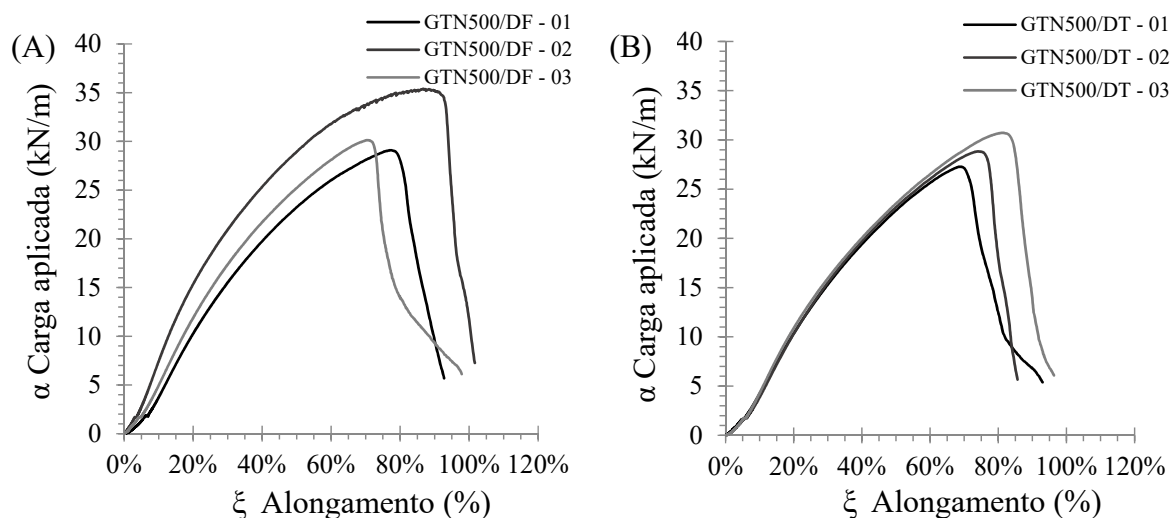


Figura 4.7: Curvas de tensão vs deformação na direção de fabricação (DF) e na direção transversal à de fabricação (DT). (A) GTN₅₀₀ – DF e (B) GTN₅₀₀ – DT.

4.9.3. Ensaios de BBP: Calibração e Repetibilidade

Como procedimento padrão, verificou-se o bom funcionamento de todo o sistema de ensaio. No entanto, nos ensaios iniciais para avaliação de repetibilidade de resultados foram observadas dificuldades de vedação do sistema, sendo indispensável adaptá-lo. Para transpor estas dificuldades foram necessárias algumas alterações no equipamento, tais como: troca dos tubos de conexão, substituição da parte superior da célula de BBP, colocação de registro no fundo da célula e a alteração na configuração do tubo que conduzia o ar para o fluxômetro.

Após todas as alterações realizou-se a avaliação de repetibilidade do sistema com sucesso. Nesta avaliação foi utilizada uma malha padrão para a confecção de peneiras, com malha #170 (abertura da malha equivalente a 0,09mm). Foram realizados cinco (5) ensaios de BBP com a malha metálica na mesma condição (sem confinamento e tracionamento), para verificar a calibração do sistema e a repetibilidade do ensaio.

Os gráficos obtidos com os dados dos ensaios de repetibilidade são apresentados nas Figura 4.8 e Figura 4.9, tendo como resultado a constatação do bom funcionamento do sistema e a baixa variabilidade na aferição. Os dados brutos obtidos pelo ensaio de ponto de bolha permitem a elaboração gráfica das curvas que relacionam vazão de ar com pressão aplicada, sendo uma das curvas para condição seca e a outra para condição saturada (Figura 4.8). Analisando os dados

obtidos no ensaio sob as recomendações da ASTM D6767 (2011), obteve-se as curvas de distribuição dos poros apresentadas na Figura 4.9.

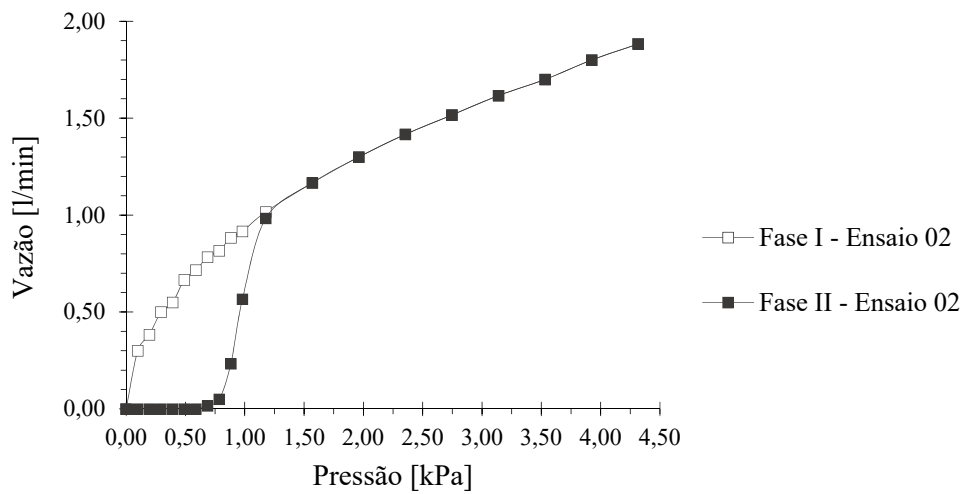


Figura 4.8: Vazão de ar versus pressão aplicada – Amostra de peneira #170.

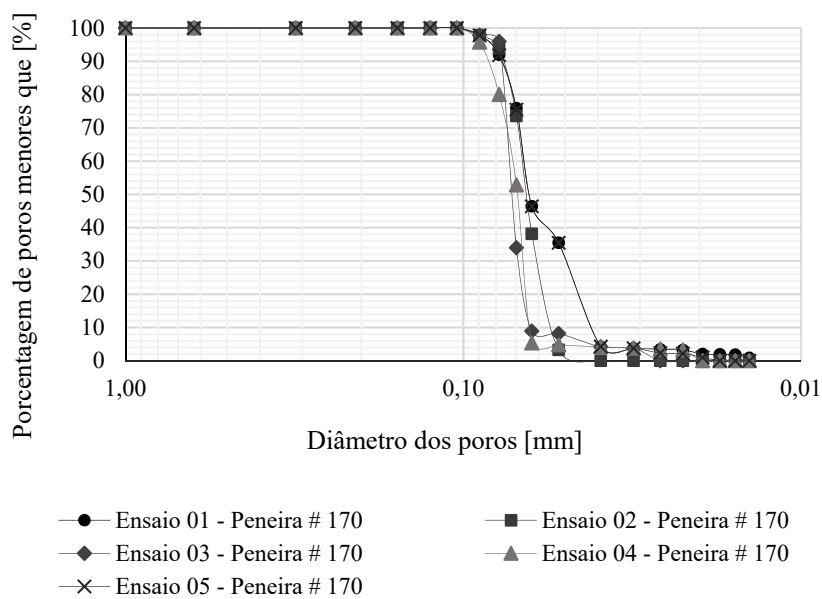


Figura 4.9: Curvas de distribuição de poros para os cinco espécimes avaliados da peneira #170.

Por estes ensaios foi possível obter o valor médio da abertura da malha da peneira foi de 0,090mm, tendo baixa variabilidade, e confirmando a boa acurácia do ensaio.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. Avaliação dos Geotêxteis Não Tecidos: Condição de Referência

A condição de referência para análise da influência dos esforços de solicitação foi aquela em que o geotêxtil não tecido não estava submetido a nenhum esforço, não havendo confinamento nem deformações de tração. A Figura 5.1 apresenta as curvas de distribuição dos poros para os três geotêxteis analisados sob tais condições. Por ela é possível perceber a influência da gramatura, ou da espessura, do geotêxtil nos resultados. As principais aberturas de dimensionamento de filtros são apresentadas na Tabela 5.1, mostrando a diminuição dos valores à medida que se eleva a gramatura, ou espessura, do geotêxtil.

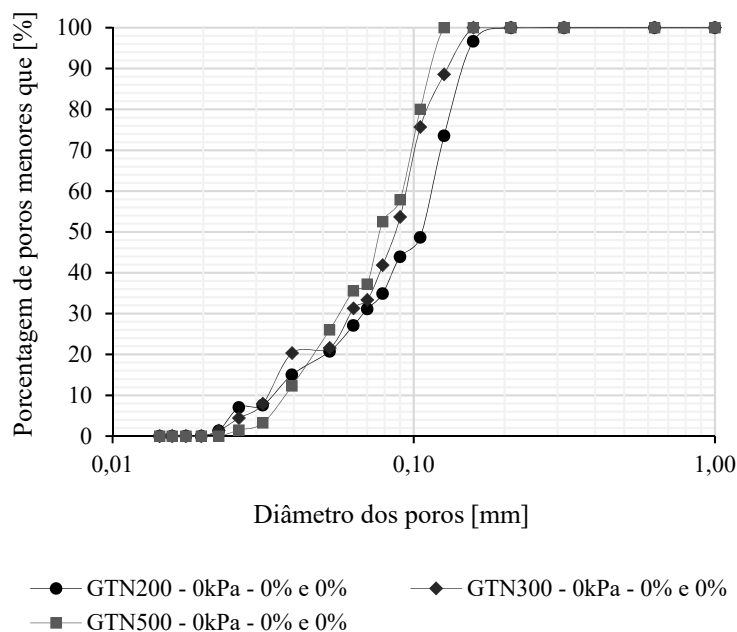


Figura 5.1: Curva de distribuição dos poros dos geotêxteis não tecidos sem a aplicação das deformações de solicitação.

Tabela 5.1: Principais diâmetros para dimensionamento de filtros geotêxteis.

Geotêxteis	Gramatura (g/m ²)	Diâmetro (mm)					
		O ₉₈	O ₉₅	O ₉₀	O ₅₀	O ₃₀	O ₁₀
GTN ₂₀₀	200	0,162	0,154	0,145	0,107	0,067	0,034
GTN ₃₀₀	300	0,148	0,140	0,129	0,087	0,062	0,033
GTN ₅₀₀	510	0,122	0,118	0,113	0,077	0,057	0,036

5.2. Influência da Solicitação de Tração na Curva de Distribuição dos Poros - Condição não Confinada

A estrutura dos geotêxteis não tecidos é complexa e a forma de distribuição dos filamentos e o processo de disposição destes dão origem a regiões estruturais diferentes. Pourdeyhimi & Maze (2008) destacam que solicitações de tração podem promover diferentes deformações na malha do GTN, comportamento este observado quando foram impostas as deformações de tração.

Como indicado no capítulo anterior, as deformações de tração foram definidas em termos de medidas de comprimento ($\frac{mm}{mm}$). A Tabela 5.2 apresenta os dados de deformações impostas em todo o espécime e as deformações aferidas no seu centro, primeira etapa de ensaios. Já a Tabela 5.3 apresenta as deformações no centro do espécime e suas respectivas deformações. Percebe-se que as deformações a partir dos deslocamentos das garras não necessariamente foram as medidas no centro do espécime.

Tabela 5.2: Deformações impostas ao espécime e suas respectivas deformações medidas no centro do espécime de geotêxtil.

Deformação de tração imposta ao espécime (%ε)		Deformação de tração aferida no centro do espécime (%ε)					
		GTN ₂₀₀		GTN ₃₀₀		GTN ₅₀₀	
DL	DT	DL	DT	DL	DT	DL	DT
10	5	10	4	10	4,5	10	0
20	5	20	0	20	0	20	2
20	10	18	9	20	3	20	5

DL: Direção longitudinal à fabricação do geotêxtil
DT: Direção transversal à fabricação do geotêxtil

Tabela 5.3: Deformações impostas no centro do espécime e suas respectivas deformações medidas em todo o espécime de geotêxtil.

Deformação de tração imposta no centro do espécime (%ε)		Deformação de tração aferida no espécime (%ε)					
DL	DT	GTN ₂₀₀		GTN ₃₀₀		GTN ₅₀₀	
		DL	DT	DL	DPF	DF	DL
5	0	5	0	5	0	5	2
10	0	10	2	10	0	10	5
20	0	20	5	20	5	20	7

DL: Direção longitudinal à fabricação do geotêxtil

DT: Direção transversal à fabricação do geotêxtil

Para melhor interpretar os efeitos das solicitações de tração, todas as avaliações serão apresentadas em termos de deformações de tração no centro do espécime. Esta opção foi escolhida por representar as condições de deformações na região ensaiada.

5.2.1. Ensaios Assimétricos

As solicitações biaxiais assimétricas apresentaram comportamentos distintos entre os geotêxteis não tecidos avaliados. O efeito das deformações de tração biaxiais assimétricas nas curvas de distribuição de dimensão dos poros mostrou-se bem irregular, não apresentando uma tendência bem definida. Os resultados destes ensaios são apresentados nas Figura 5.2 a 5.4.

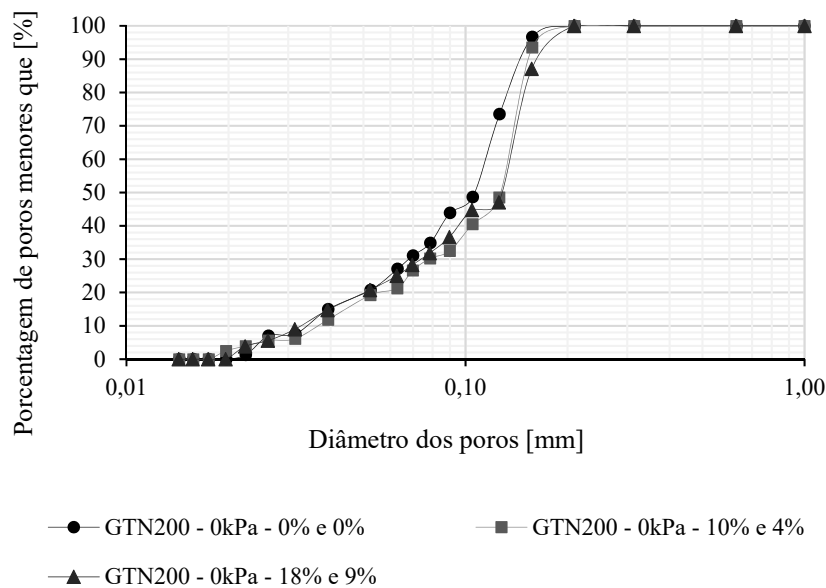


Figura 5.2: Curva de distribuição dos poros do GTN₂₀₀ – para ensaios não confinados sob deformações assimétricas.

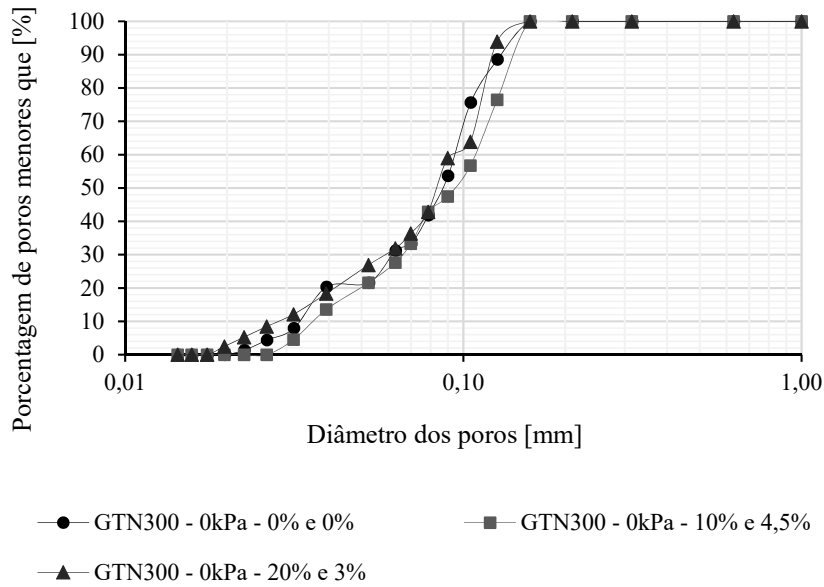


Figura 5.3: Curva de distribuição dos poros do GTN₃₀₀ – para ensaios não confinados sob deformações assimétricas.

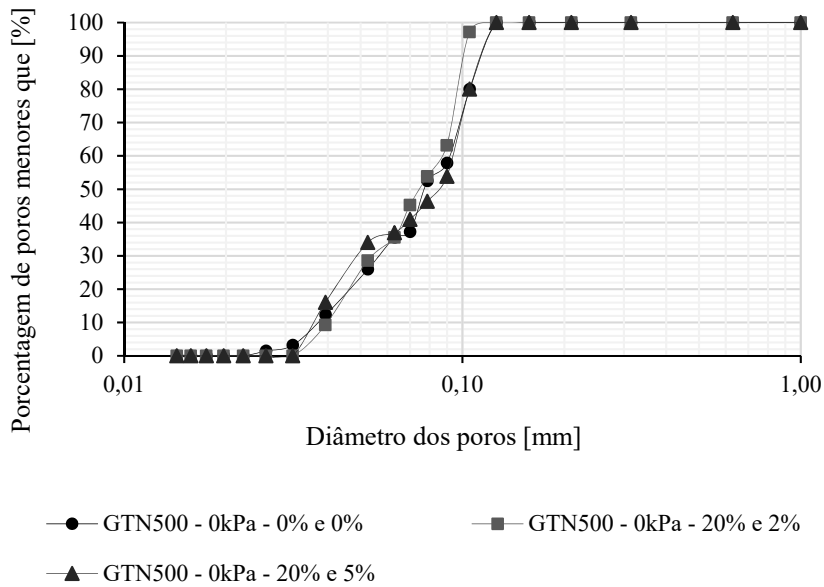


Figura 5.4: Curva de distribuição dos poros do GTN₅₀₀ – para ensaios não confinados sob deformações assimétricas.

Os efeitos das deformações assimétricas para os três geotêxteis não tecidos avaliados não mostraram-se bem definidos. O GTN₂₀₀ sugere aumentos dos poros (de até da ordem de 20% para O₉₈) com o aumento das solicitações de tração, Figura 5.5. Em contrapartida, os GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀ não demonstraram tendências definidas (Figura 5.5 a 5.7), embora as variações de

valores das aberturas se situem em, no máximo, +5% e - 35% em relação à situação de referência (sem confinamento e sem tração).

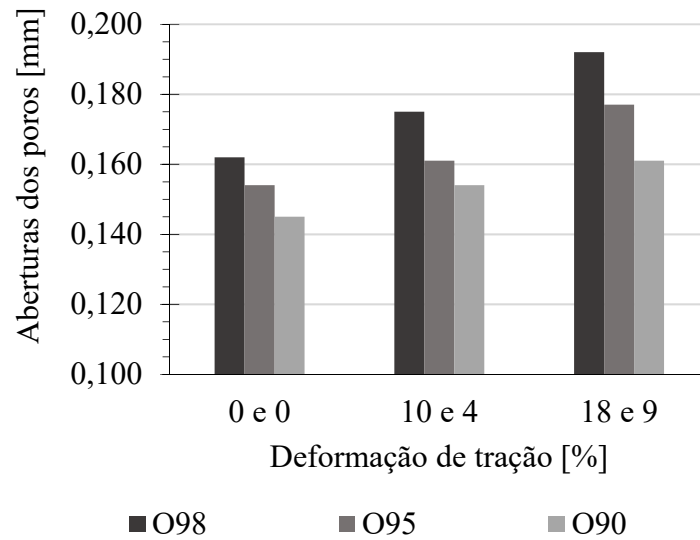


Figura 5.5: Comparação dos valores de O₉₈, O₉₅ e O₉₀ para o GTN₂₀₀ não confinado sob deformações de tração assimétricas.

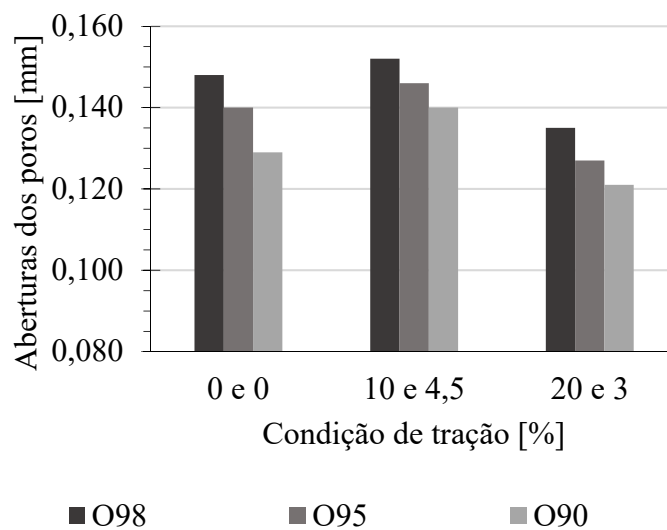


Figura 5.6: Comparação dos valores de O₉₈, O₉₅ e O₉₀ para o GTN₃₀₀ não confinado sob deformações de tração assimétricas.

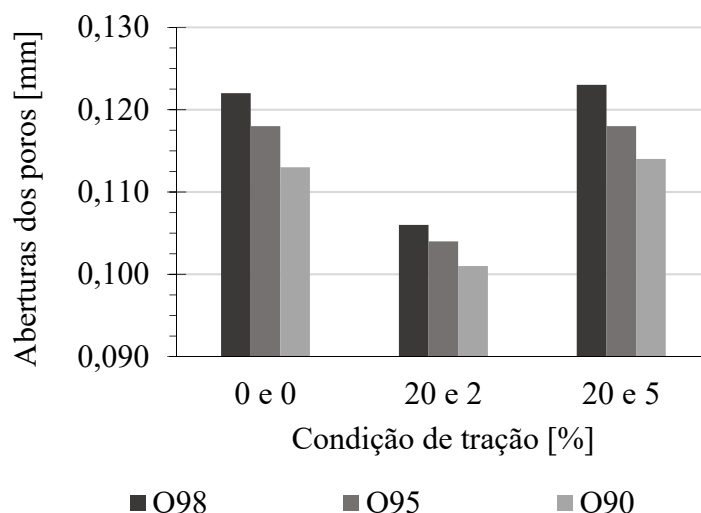


Figura 5.7: Comparação dos valores de O₉₈, O₉₅ e O₉₀ para o GTN₅₀₀ não confinado sob deformações de tração assimétricas.

As principais aberturas adotados no dimensionamento de filtros geotêxteis não tecido são apresentados nas Tabela 5.4 e Tabela 5.5. Em resumo, observou-se que os geotêxteis não tecidos GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀ avaliados apresentaram comportamento um tanto aleatório para solicitação de tração biaxial assimétrica. Estas variações na abertura dos poros podem proporcionar diminuição na capacidade de retenção, quando os poros aumentam para o caso do GTN₂₀₀, ou aumento na capacidade de retenção e diminuição da permeabilidade do material quando os poros diminuem para o caso do GTN₃₀₀. No entanto, não se pode descartar a possibilidade da influência de heterogeneidade na distribuição de filamentos e de condições microestruturais nos resultados obtidos para os geotêxteis GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀.

Tabela 5.4: Aberturas dos geotêxteis tracionados não confinados, obtidas a partir da curva de distribuição de poros, para o dimensionamento de filtros – O₉₈, O₉₅ e O₉₀.

Parâmetro	GTN ₂₀₀						GTN ₃₀₀						GTN ₅₀₀					
	Deformações de tração						Deformações de tração						Deformações de tração					
	DL	DT	DL	DT	DL	DT	DL	DT	DL	DT	DL	DT	DL	DT	DL	DT	DL	DT
	0	0	10	4	18	9	0	0	10	4,5	20	3	0	0	20	2	20	5
O ₉₈ [mm]	0,162		0,175		0,192		0,148		0,152		0,135		0,122		0,106		0,123	
O ₉₅ [mm]	0,154		0,161		0,177		0,140		0,146		0,127		0,118		0,104		0,118	
O ₉₀ [mm]	0,145		0,154		0,161		0,129		0,140		0,121		0,113		0,101		0,114	

DL = Direção longitudinal a fabricação DT = Direção transversal à fabricação

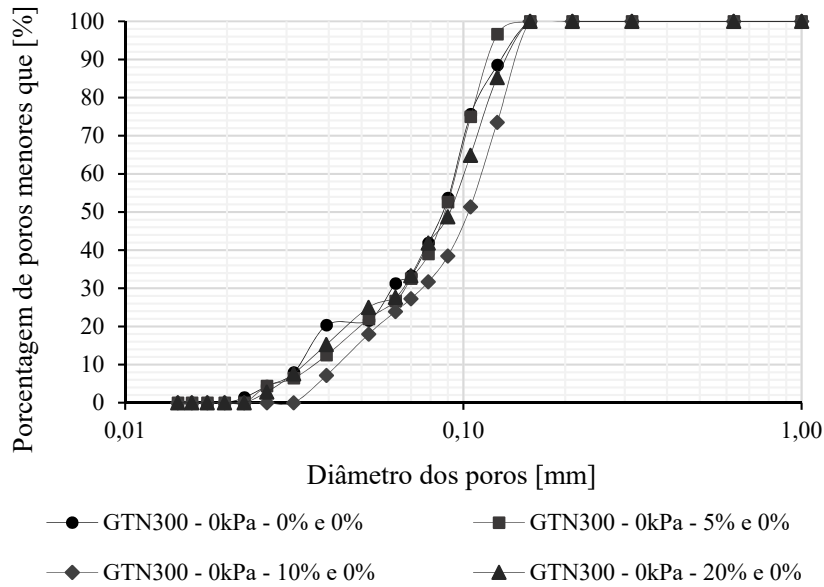


Figura 5.9: Curva de distribuição dos poros do GTN₃₀₀ – para ensaios não confinados sob deformações planas.

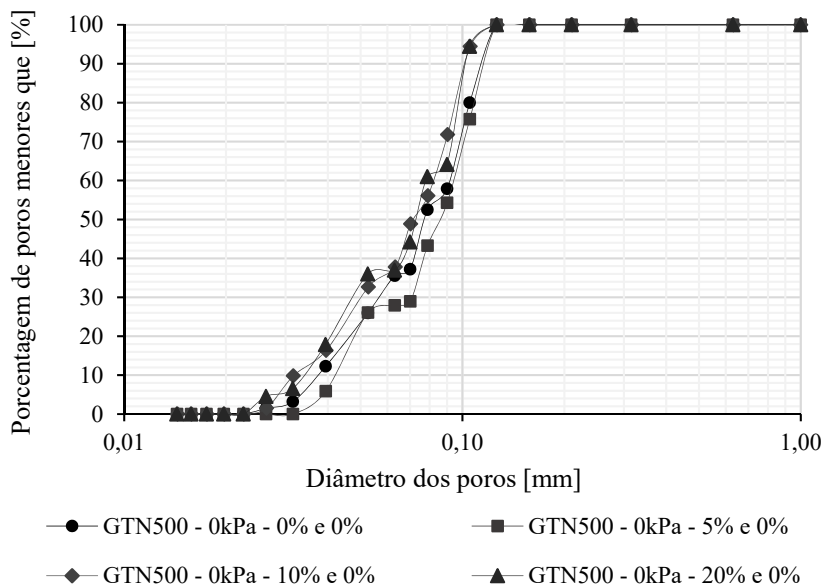


Figura 5.10: Curva de distribuição dos poros do GTN₅₀₀ – para ensaios não confinados sob deformações planas.

Os resultados para o GTN₂₀₀ sugerem aumento dos poros com o aumento das solicitações de tração, Figura 5.11 . Em contrapartida, para o GTN₅₀₀ os resultados indicam uma diminuição dos poros com o aumento das solicitações de tração, Figura 5.12. Já o GTN₃₀₀ apresentou

comportamento mais aleatório, dentre os geotêxteis avaliados, Figura 5.13. No entanto, a faixa de variação de resultados também entre +20% e -15%.

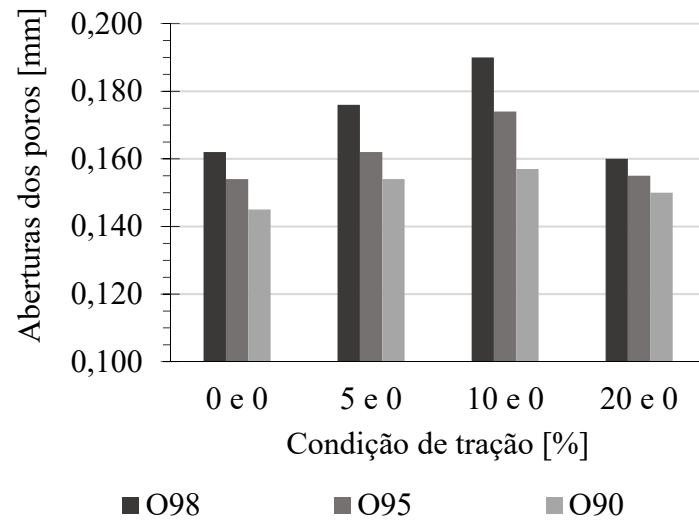


Figura 5.11: Comparação dos valores de O₉₈, O₉₅ e O₉₀ para o GTN₂₀₀ não confinado sob deformações planas de tração.

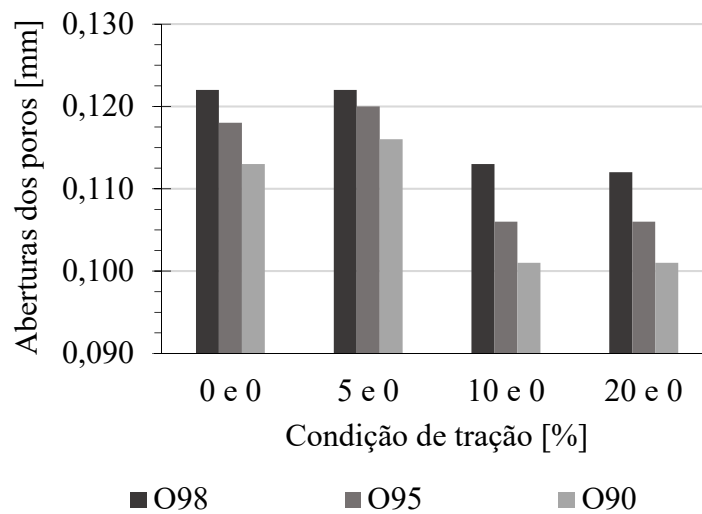


Figura 5.12: Comparação dos valores de O₉₈, O₉₅ e O₉₀ para o GTN₅₀₀ não confinado sob deformações planas de tração.

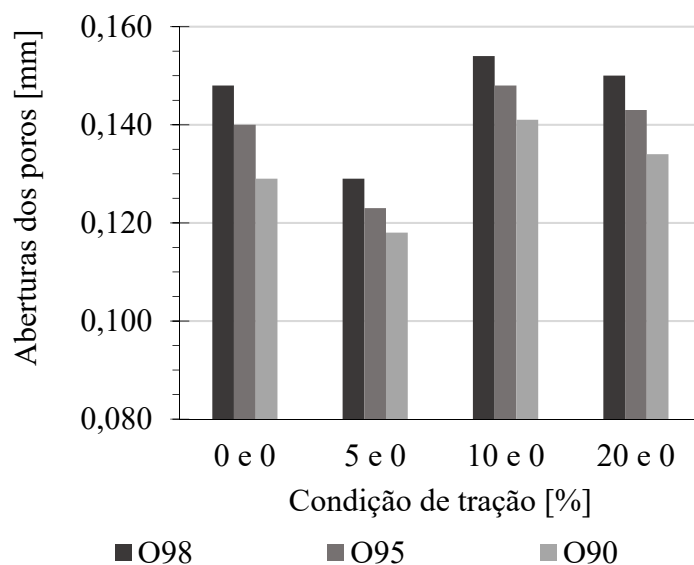


Figura 5.13: Comparação dos valores de O₉₈, O₉₅ e O₉₀ para o GTN₃₀₀ não confinado sob deformações planas de tração.

As principais aberturas adotadas no dimensionamento de filtros geotêxteis não tecidos são apresentadas nas Tabela 5.6 e Tabela 5.7. Observa-se que os efeitos das deformações planas de tração apresentam comportamentos menos disperso. De modo geral, percebe-se a alteração da abertura de filtração com aplicação das deformações de tração. Esta alteração modifica os valores das aberturas de projeto, podendo influenciar no desempenho do filtro geotêxtil.

Tabela 5.6: Aberturas dos geotêxteis tracionados não confinados, obtidas a partir da curva de distribuição de poros, para o dimensionamento de filtros – O₉₈, O₉₅ e O₉₀.

Deformação [%]		O ₉₈ [mm]			O ₉₅ [mm]			O ₉₀ [mm]		
DL	DT	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀
0	0	0,162	0,148	0,122	0,154	0,140	0,118	0,145	0,129	0,113
0	5	0,176	0,129	0,122	0,162	0,123	0,12	0,154	0,118	0,116
0	10	0,190	0,154	0,113	0,174	0,148	0,106	0,157	0,141	0,101
0	20	0,160	0,150	0,112	0,155	0,143	0,106	0,15	0,134	0,101

DL = Direção longitudinal a fabricação DT = Direção transversal à fabricação

Tabela 5.7: Valores de aberturas obtidas a partir da curva de distribuição de poros – O₅₀, O₃₀ e O₁₀.

Deformação [%]		O ₅₀ [mm]			O ₃₀ [mm]			O ₁₀ [mm]		
DL	DT	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀
0	0	0,107	0,087	0,077	0,067	0,062	0,057	0,034	0,033	0,036
0	5	0,130	0,088	0,087	0,094	0,067	0,071	0,033	0,036	0,042
0	10	0,107	0,103	0,071	0,068	0,076	0,05	0,039	0,042	0,031
0	20	0,128	0,091	0,073	0,085	0,066	0,047	0,058	0,034	0,034

DL = Direção longitudinal de fabricação DT = Direção transversal à fabricação

5.3. Influência do confinamento na curva de distribuição dos poros

Na avaliação dos efeitos de solicitação normais ao plano do geotêxtil não tecido foram aplicados cinco níveis de tensões de compressão, permitindo avaliar de maneira comparativa o desenvolvimento do efeito de confinamento. As Figura 5.14 a 5.16 apresentam as curvas de distribuição dos poros para os três GTNs avaliados sob os diferentes níveis de confinamento.

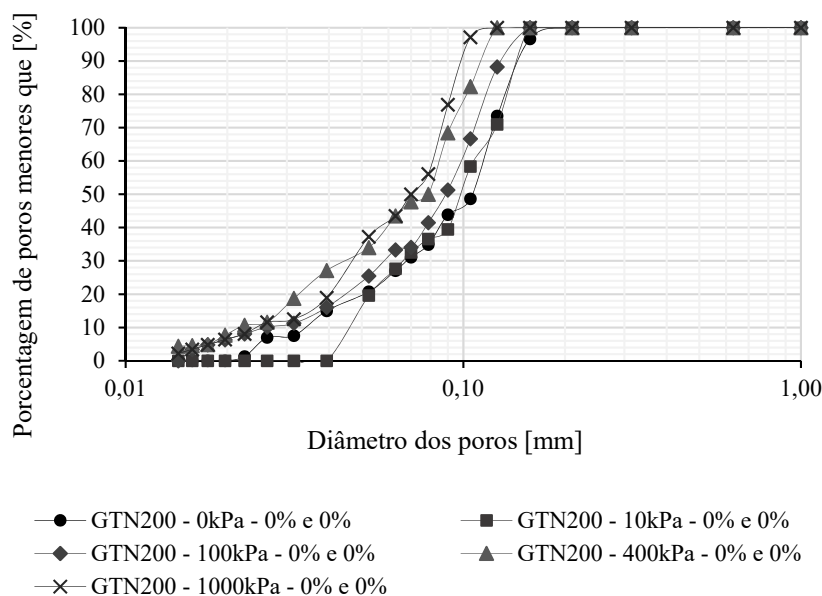


Figura 5.14: Curva de distribuição dos poros sob diferentes níveis de confinamento e sem aplicação das deformações de tração, GTN₂₀₀.

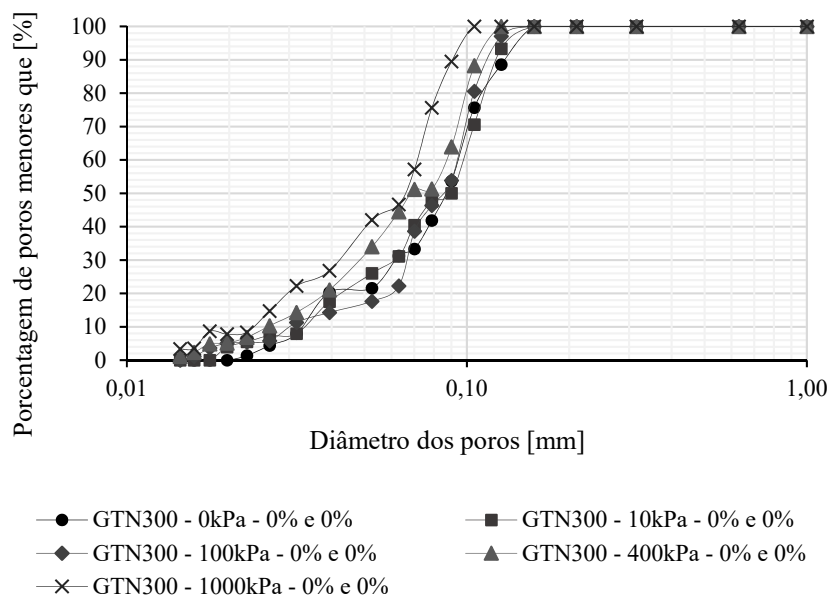


Figura 5.15: Curva de distribuição dos poros sob diferentes níveis de confinamento e sem aplicação das deformações de tração, GTN₃₀₀.

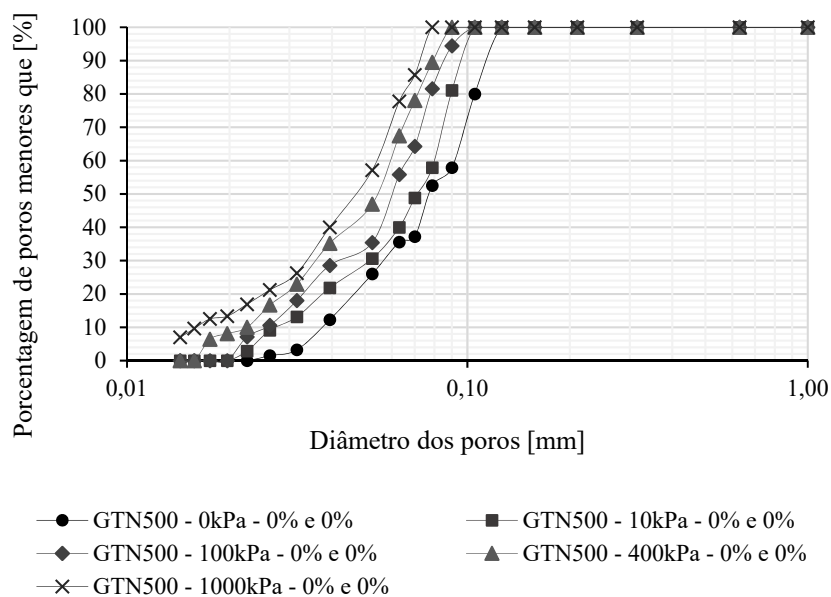


Figura 5.16: Curva de distribuição dos poros sob diferentes níveis de confinamento e sem aplicação das deformações de tração, GTN₅₀₀.

As principais aberturas de dimensionamento de filtros geotêxteis não tecidos são apresentadas na Tabela 5.8 e Tabela 5.9. Nestas tabelas é possível observar que diferentes geotêxteis podem apresentar o mesmo valor da abertura de poros, quando solicitados sob diferentes níveis de

confinamento. Por exemplo, o resultado obtido para o GTN₂₀₀ sob uma pressão de confinamento igual a 100kPa foi próximo ao do GTN₃₀₀ sem confinamento. O mesmo ocorreu para o GTN₂₀₀ confinado a 400kPa e o GTN₅₀₀ sem confinamento. Isto aponta para a importância da avaliação do confinamento, pois a prática da engenharia tem se baseado nos valores destas aberturas sem esta consideração.

Ao contrário dos esforços de tração, os esforços normais apresentam uma clara tendência. Quanto mais confinado o GTN está, menores serão seus valores de abertura de poros, conforme observado neste estudo e em estudos anteriores (Silva, 2014; Moraes Filho, 2018; Trejos Galvis, 2016).

Tabela 5.8: Aberturas dos geotêxteis confinados não tracionados, obtidas a partir da curva de distribuição de poros, para o dimensionamento de filtros – O₉₈, O₉₅ e O₉₀.

Confinamento (kPa)	O ₉₈ (mm)			O ₉₅ (mm)			O ₉₀ (mm)		
	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀
0	0,162	0,148	0,122	0,154	0,140	0,118	0,145	0,129	0,113
10	0,154	0,140	0,102	0,150	0,130	0,099	0,144	0,121	0,095
100	0,149	0,128	0,098	0,139	0,120	0,091	0,128	0,115	0,085
400	0,122	0,120	0,087	0,118	0,114	0,083	0,113	0,107	0,079
1000	0,107	0,101	0,077	0,102	0,096	0,075	0,098	0,090	0,072

Tabela 5.9: Aberturas obtidas a partir da curva de distribuição de poros para o dimensionamento de filtros – O₅₀, O₃₀ e O₁₀.

Confinamento (kPa)	O ₅₀ (mm)			O ₃₀ (mm)			O ₁₀ (mm)		
	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀
0	0,107	0,087	0,077	0,067	0,062	0,057	0,034	0,033	0,036
10	0,098	0,090	0,071	0,066	0,062	0,051	0,046	0,033	0,027
100	0,089	0,086	0,06	0,058	0,067	0,041	0,026	0,030	0,026
400	0,079	0,068	0,054	0,045	0,049	0,036	0,022	0,026	0,023
1000	0,070	0,066	0,047	0,04	0,042	0,034	0,024	0,024	0,017

5.4. Sobreposição dos efeitos dos esforços solicitantes na curva de distribuição de poros

As solicitações de confinamento e tração podem ocorrer simultaneamente, promovendo a sobreposição de efeitos. Nos ensaios realizados os espécimes de geotêxtil foram primeiramente deformados por esforços de tração e depois confinados. Deve-se notar que essa sequência de solicitações é mais desfavorável, uma vez que caso o confinamento do espécime tivesse precedido o tracionamento, para a mesma carga de tração a deformação seria menor devido ao aumento da rigidez à tração de geotêxteis não tecidos confinados. Os resultados obtidos são apresentados agrupando-se as curvas com mesmo nível de deformação de tração sob as diferentes condições de confinamento.

5.4.1. Ensaios de Deformação Assimétrica sob confinamento

Como observado anteriormente, os efeitos das deformações assimétricas na distribuição de poros foram bem irregulares quando os espécimes avaliados não estavam confinados. A irregularidade dos efeitos, devido as deformações de tração assimétricas, foi minimizada com a aplicação do confinamento. O confinamento sempre promoveu redução nas aberturas dos poros, como pode ser observado nas Figura 5.17 a 5.22.

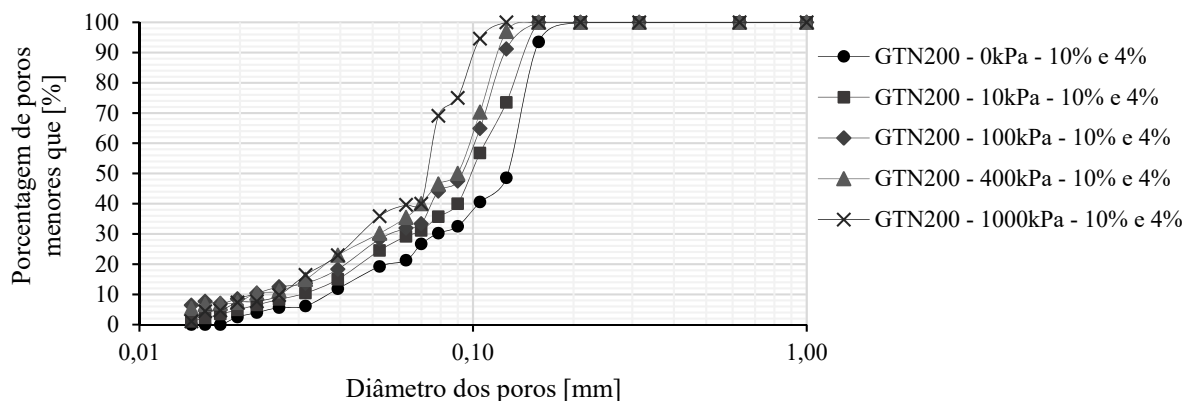


Figura 5.17: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₂₀₀ tracionado a 10% e 4% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

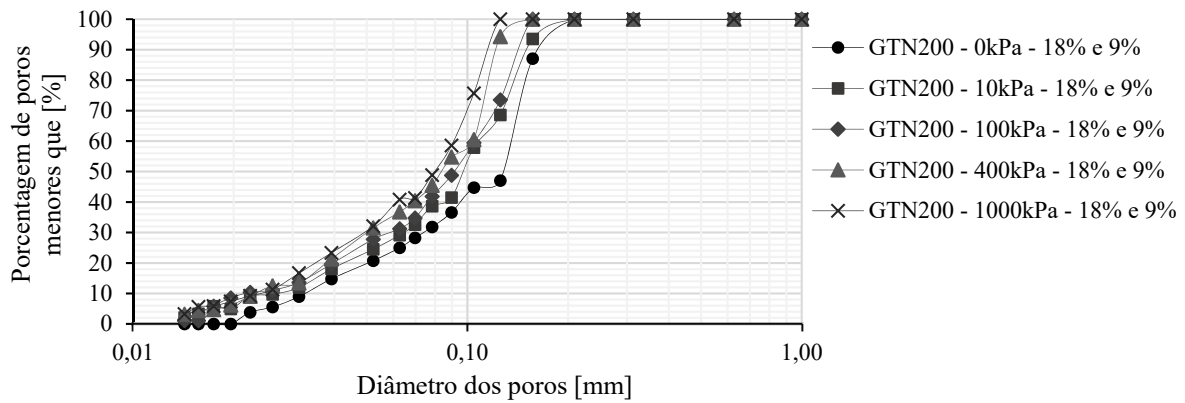


Figura 5.18: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₂₀₀ tracionado 18% e 9% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

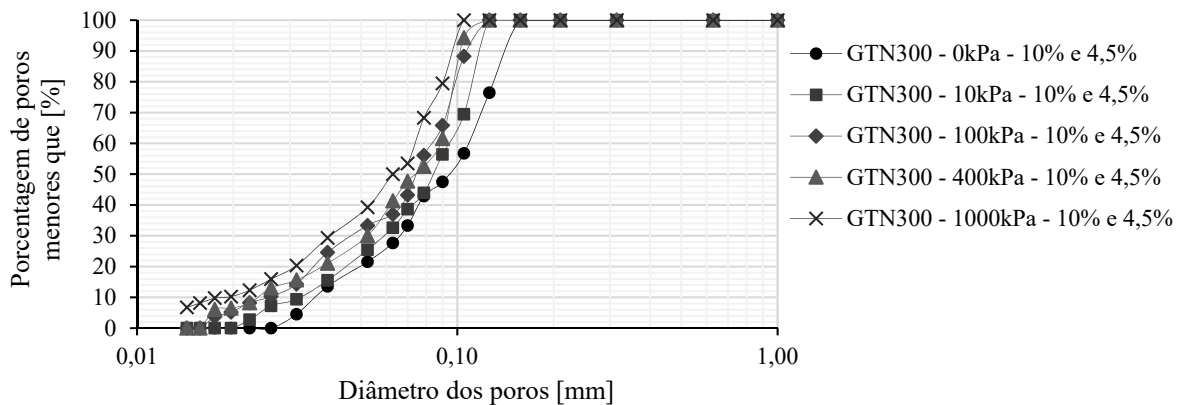


Figura 5.19: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₃₀₀ tracionado 10% e 4,5% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

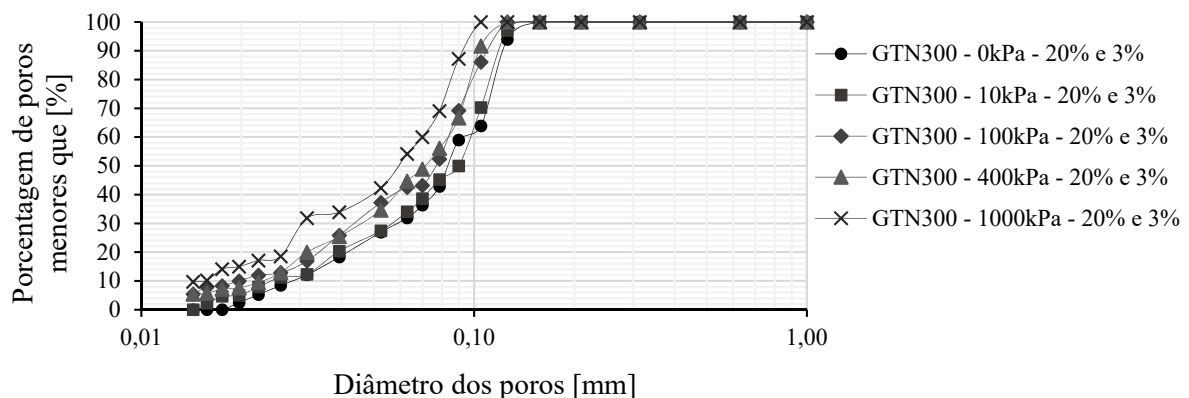


Figura 5.20: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₃₀₀ tracionado 20% e 3% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

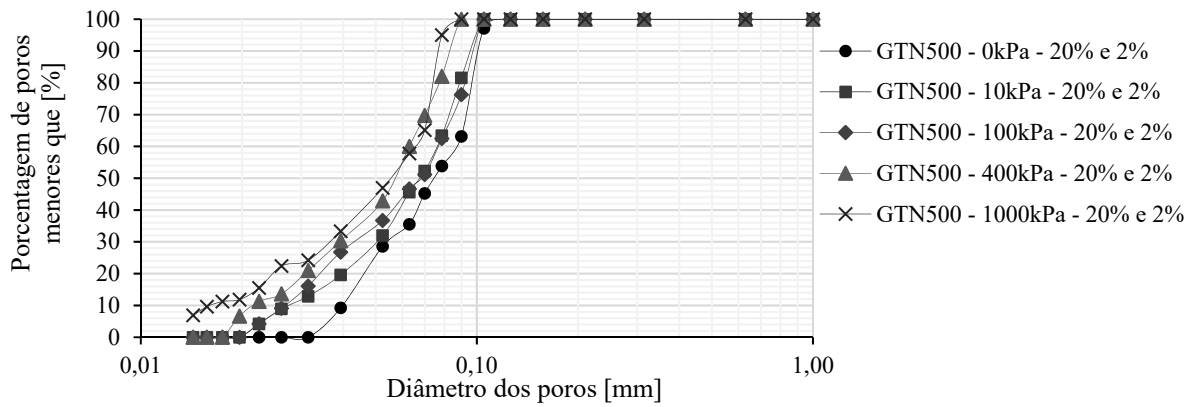


Figura 5.21: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₅₀₀ tracionado 20% e 2% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

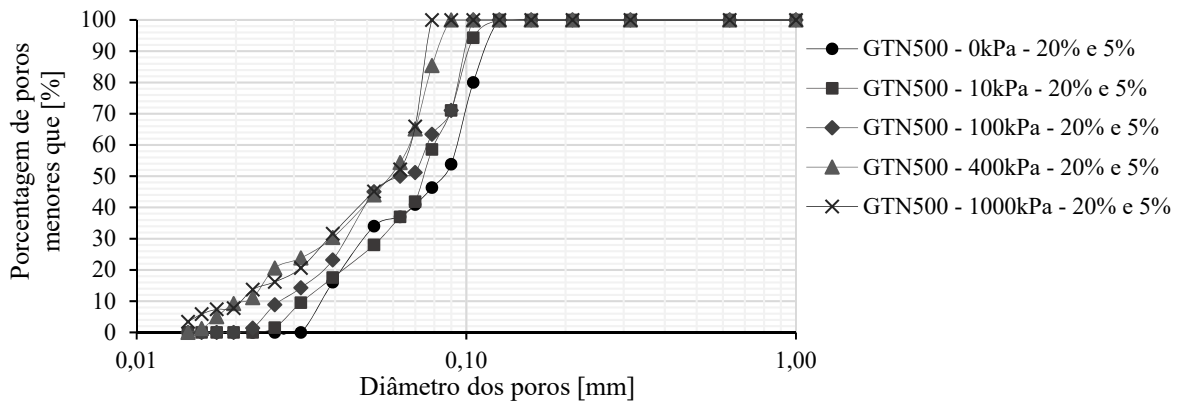


Figura 5.22: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₅₀₀ tracionado 20% e 5% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

Conforme reportado na literatura, resultados obtidos para solicitações bidirecionais simétricas têm sido contraditórios. Wu & Hong (2016) constataram uma diminuição nos valores das aberturas dos poros dos geotêxteis não tecido com o aumento de deformação simétrica de tração. Em contrapartida, Moraes Filho (2018) observou que o aumento das deformações de tração bidirecionais e simétricas induzem aumento da abertura dos poros. Ambos os estudos avaliaram geotêxteis não tecidos agulhados sob os níveis de deformação de 0, 5, 10 e 20%.

No presente trabalho aplicaram-se as mesmas deformações, no entanto a aplicação foi assimétrica. Nesta condição, os geotêxteis não apresentaram uma tendência comum, não sendo possível relacionar o aumento das deformações de tração com o aumento ou diminuição das

aberturas dos poros, como mostrado nas Figura 5.23 a 5.25, já que o efeito do confinamento foi predominante.

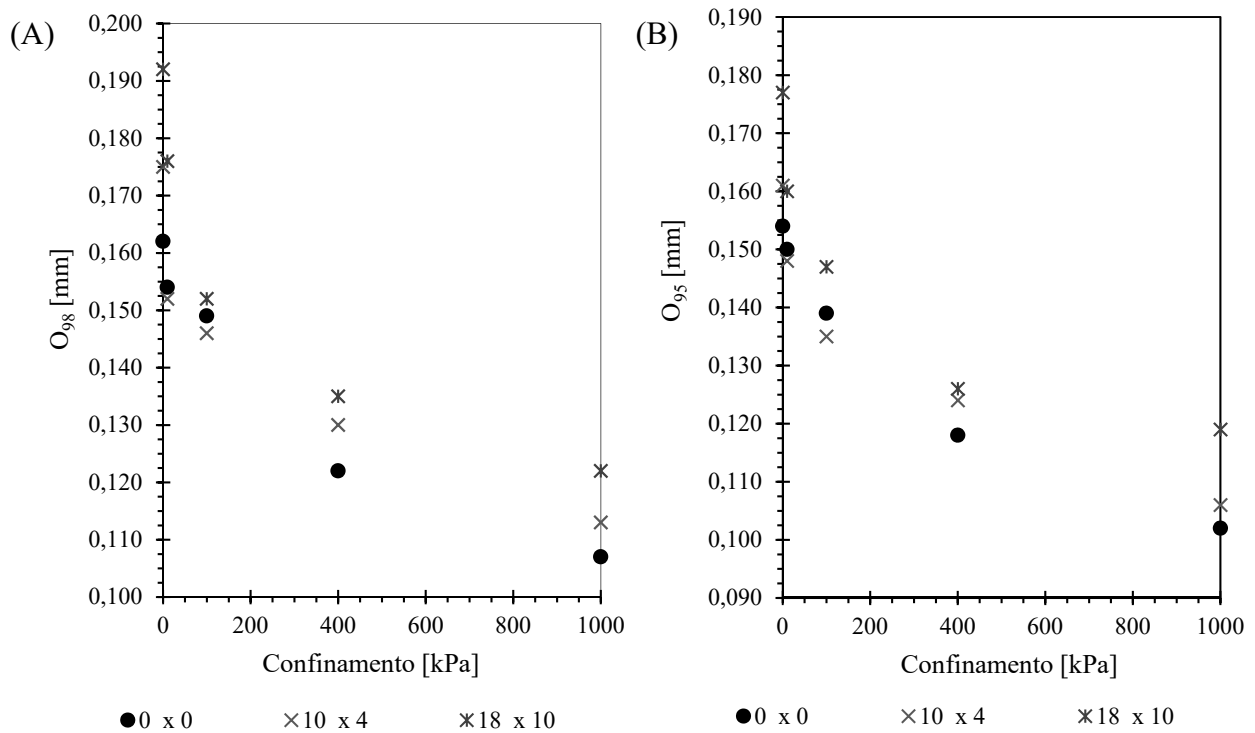


Figura 5.23: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN₂₀₀: (A) O₉₈ e (B) O₉₅.

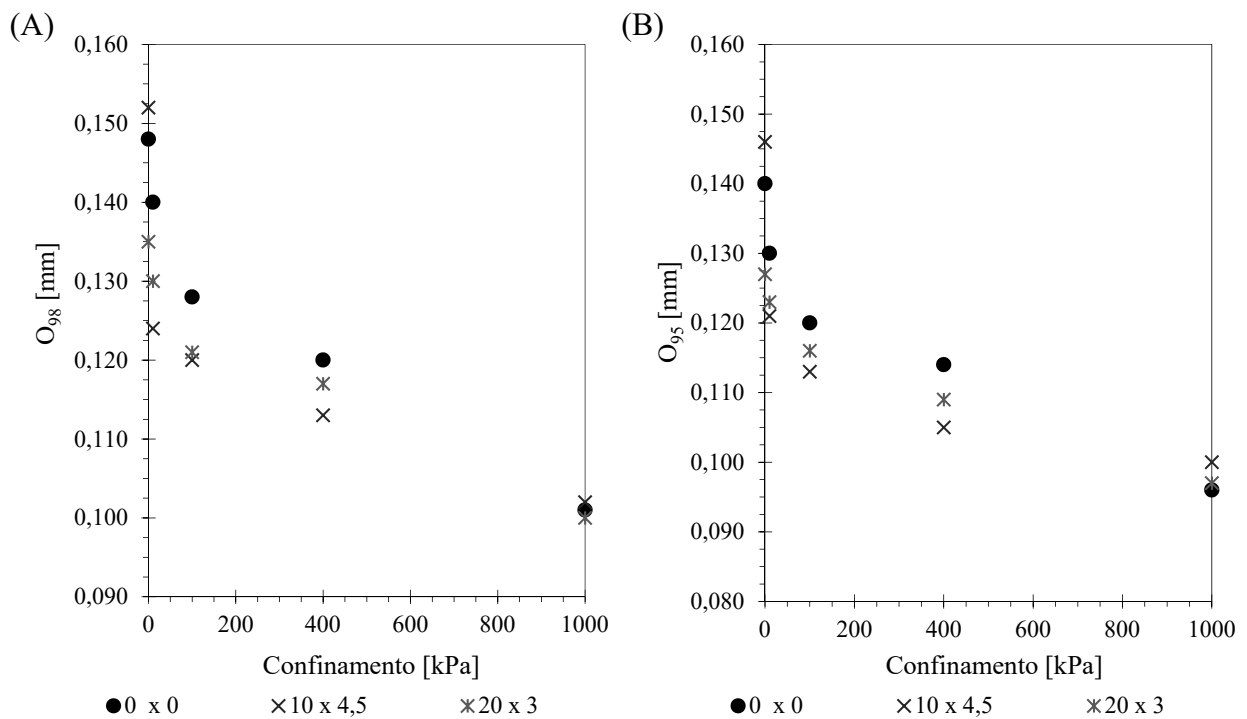


Figura 5.24: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN₃₀₀: (A) O₉₈ e (B) O₉₅.

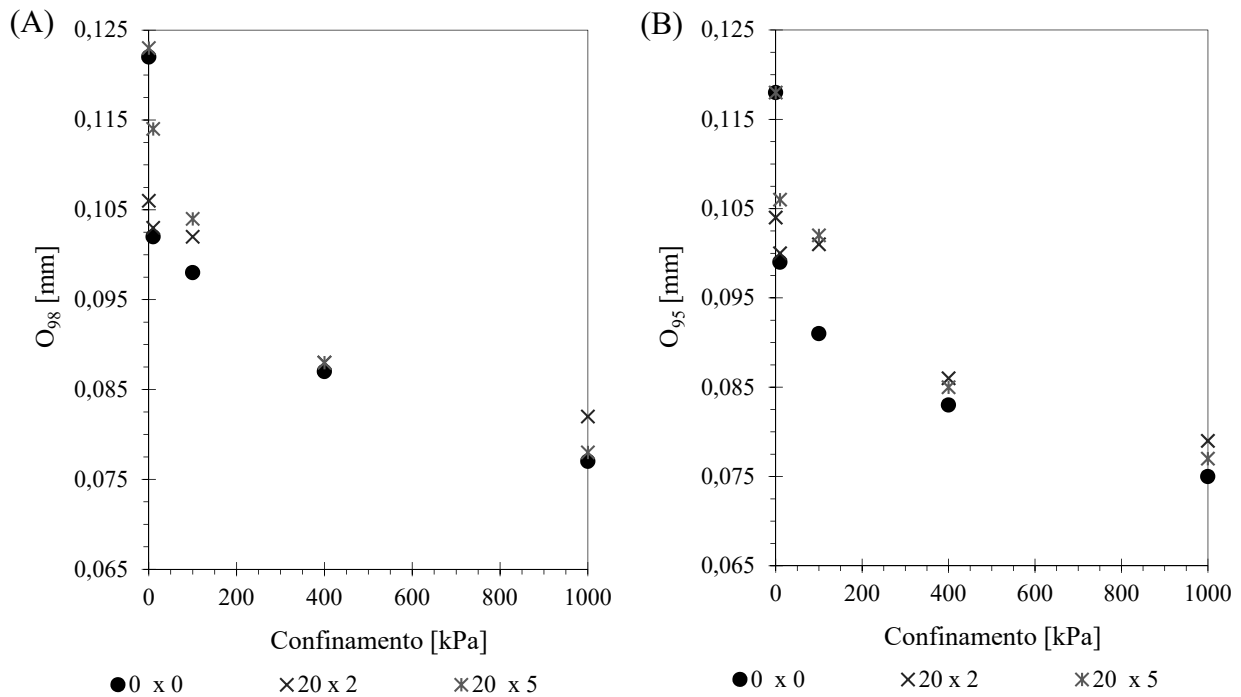


Figura 5.25: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN₅₀₀: (A) O_{98} e (B) O_{95} .

5.4.2. Ensaios de Deformação Plana sob confinamento

Assim como para condição confinada e tracionada assimetricamente, os espécimes tracionados sob condição de deformação plana e confinados apresentaram menor irregularidade de comportamento. O confinamento conduziu uma diminuição nas aberturas de poros para todos os geotêxteis analisados. As Figura 5.26 a 5.34 apresentam as curvas de distribuição dos poros para os geotêxteis analisados sob os diferentes níveis de deformação plana e confinamento.

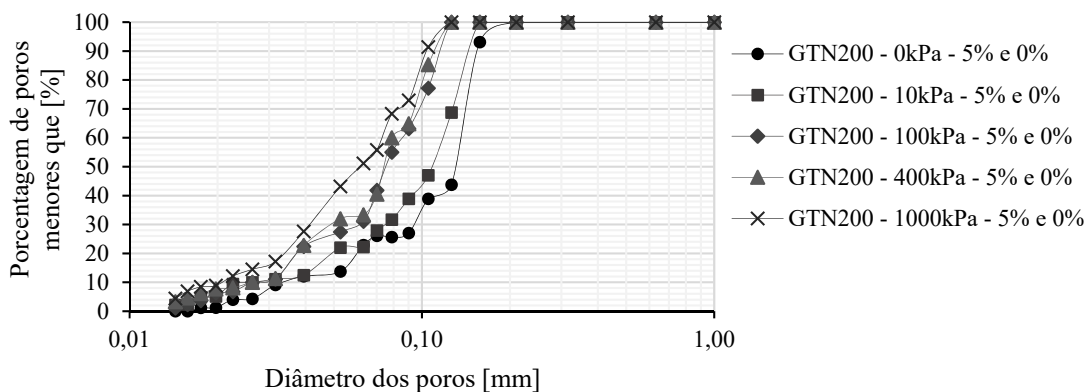


Figura 5.26: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₂₀₀ tracionado 5% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

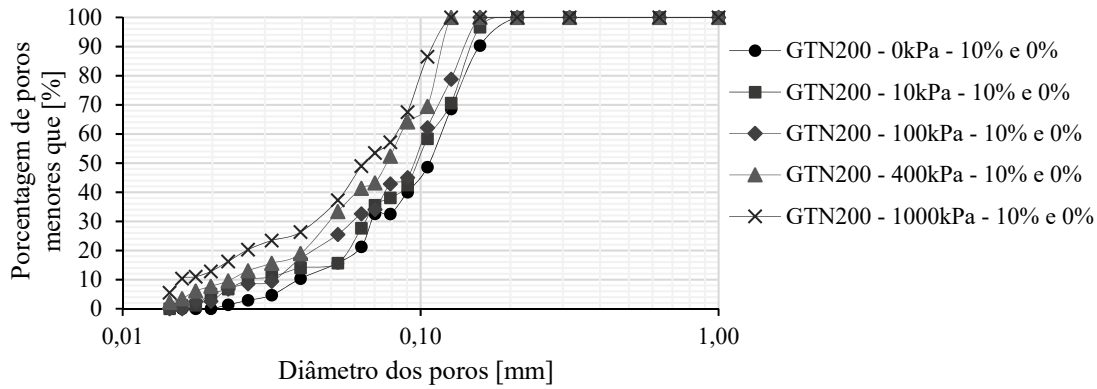


Figura 5.27: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₂₀₀ tracionado 10% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

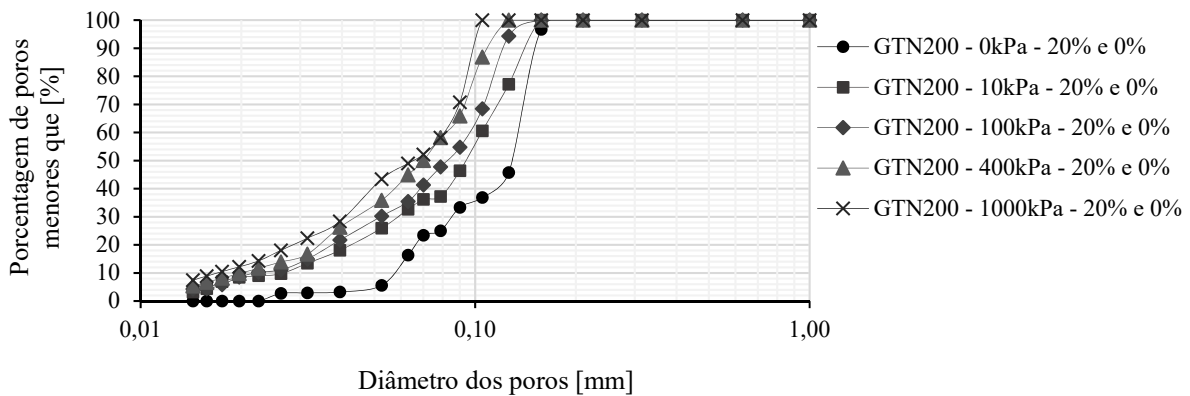


Figura 5.28: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₂₀₀ tracionado 20% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

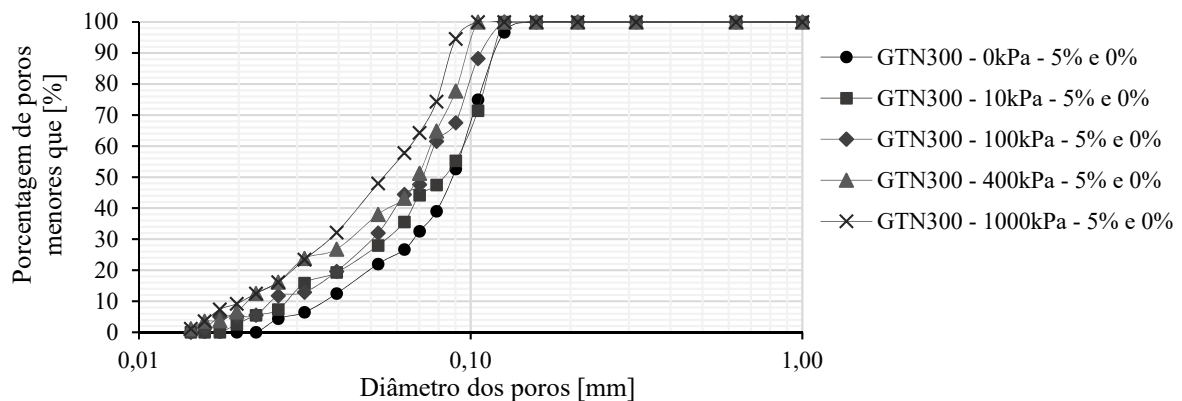


Figura 5.29: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₃₀₀ tracionado 5% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

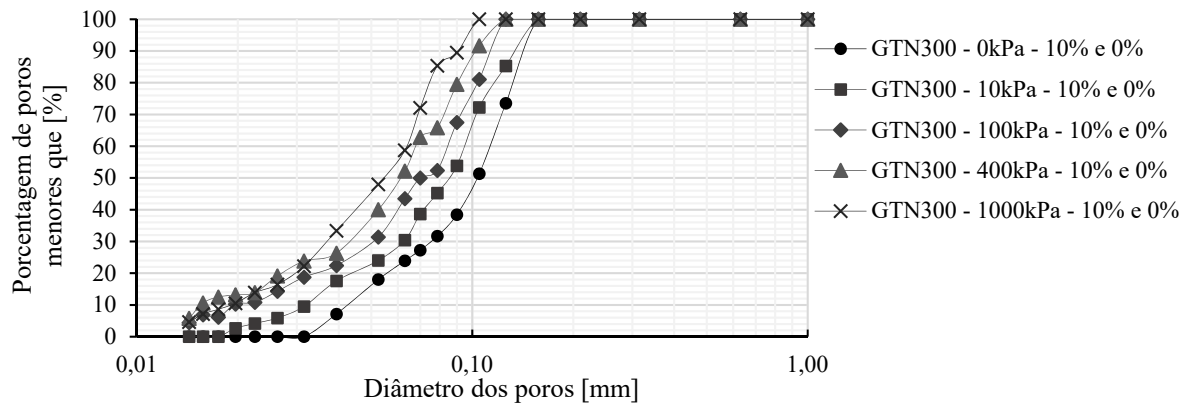


Figura 5.30: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₃₀₀ tracionado 10% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

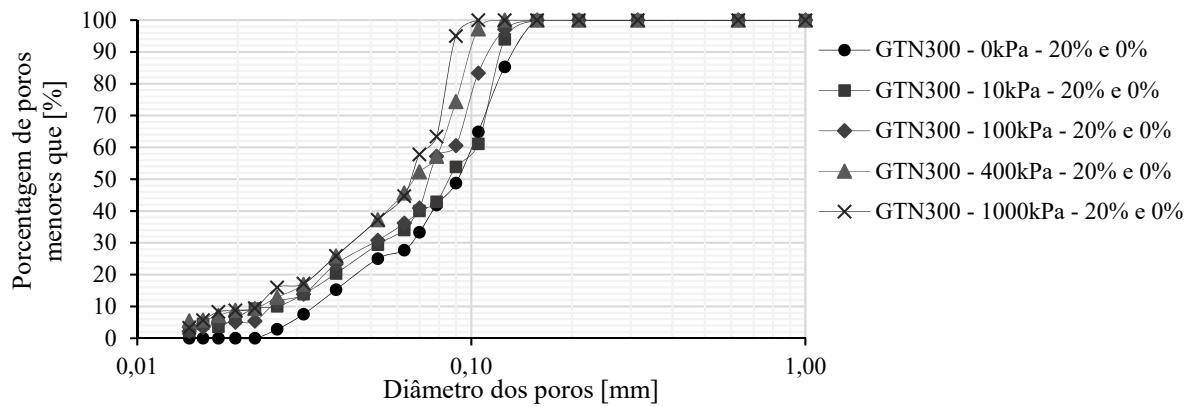


Figura 5.31: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₃₀₀ tracionado 20% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

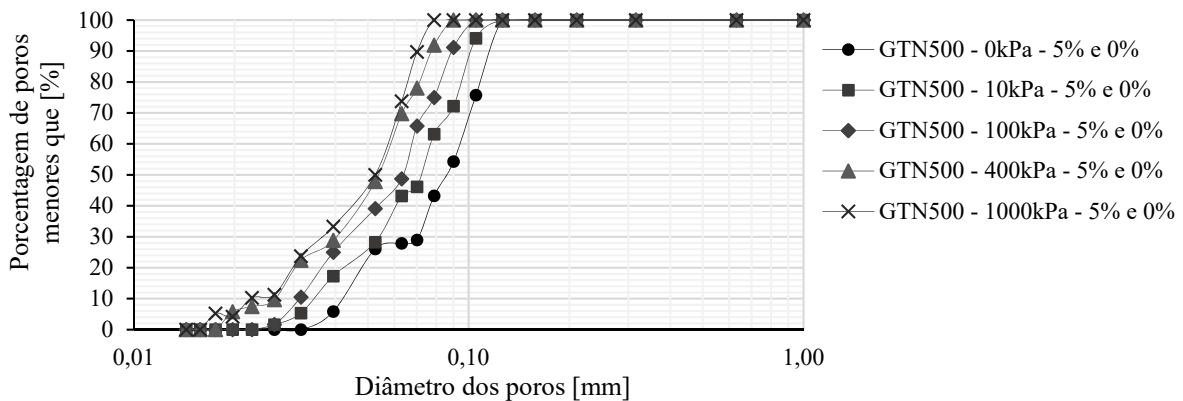


Figura 5.32: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₅₀₀ tracionado 5% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

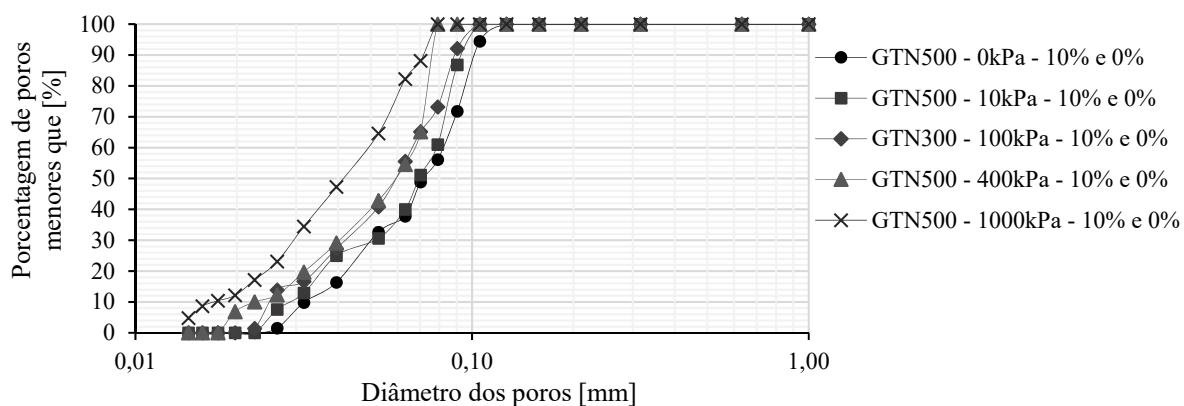


Figura 5.33: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₅₀₀ tracionado 10% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

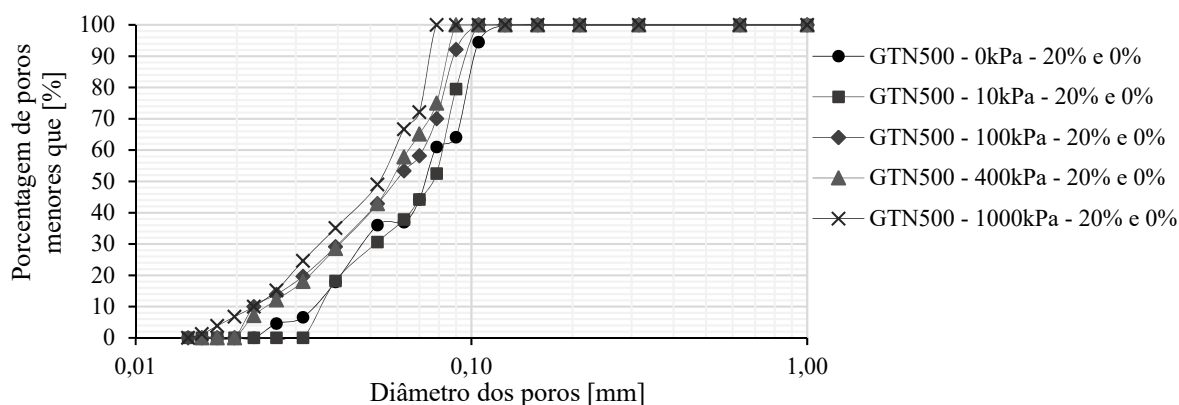


Figura 5.34: Curvas de distribuição dos poros para diferentes níveis de confinamento do GTN₅₀₀ tracionado 20% e 0% nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação, respectivamente.

Tendo como base o presente estudo, os valores obtidos de deformação não correspondem a nenhuma configuração apresentada em pesquisas anteriores, os resultados apresentados não mostraram tendências definidas, não podendo afirmar aumento ou diminuição das aberturas dos poros. Os resultados demonstram que incrementos de deformações de tração, planas ou assimétricas, e as aberturas dos poros não se relacionam bem. Este comportamento é melhor observado nos gráficos que apresentam os valores dos O_{98} e O_{95} , para os três geotêxteis avaliados, da Figura 5.35 a 5.37.

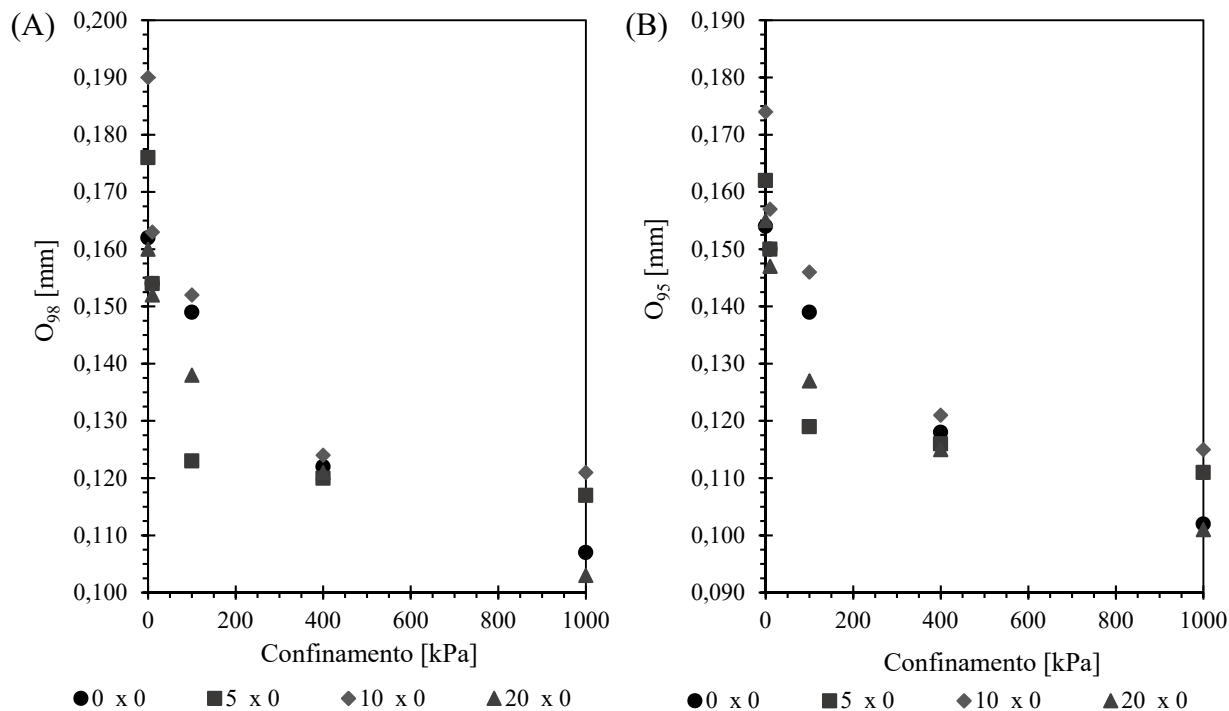


Figura 5.35: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN₂₀₀ para as aberturas de dimensionamento: (A) O₉₈ e (B) O₉₅.

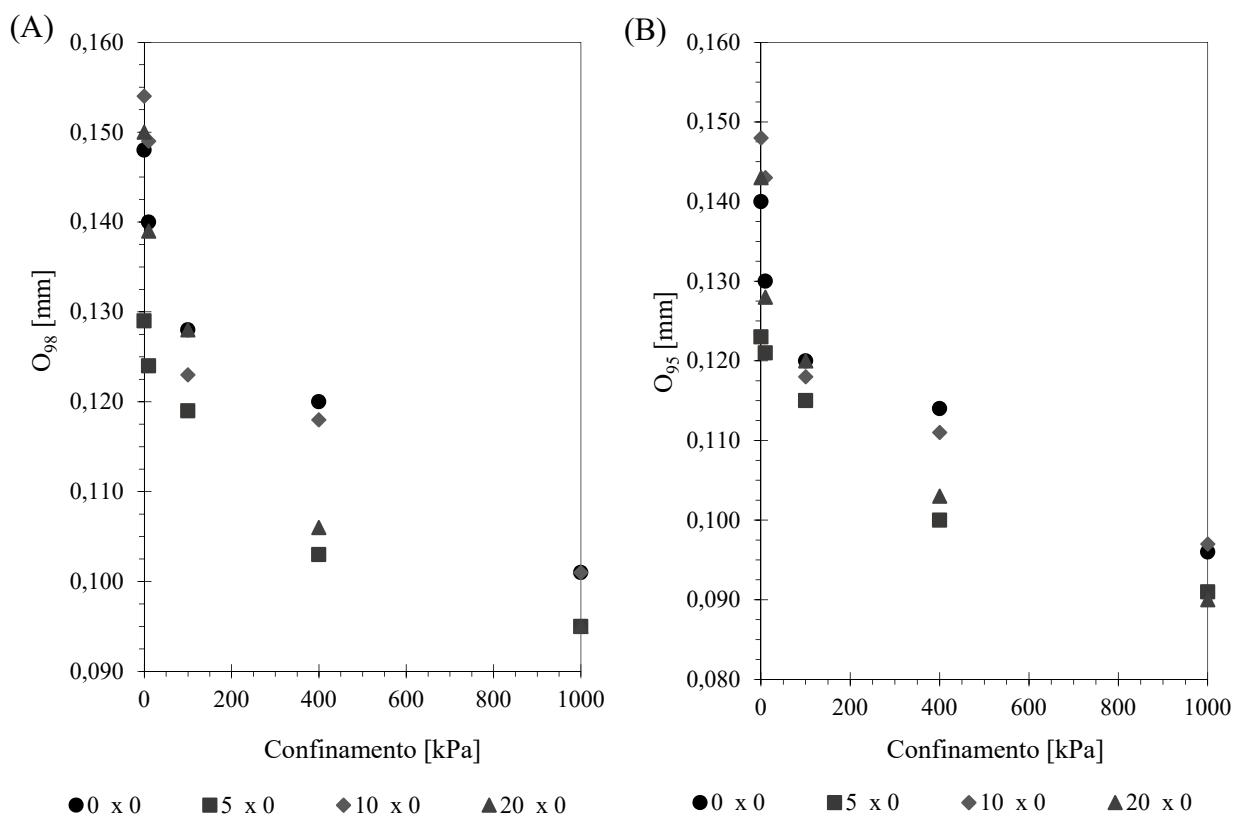


Figura 5.36: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN₃₀₀ para os parâmetros de dimensionamento: (A) O₉₈ e (B) O₉₅.

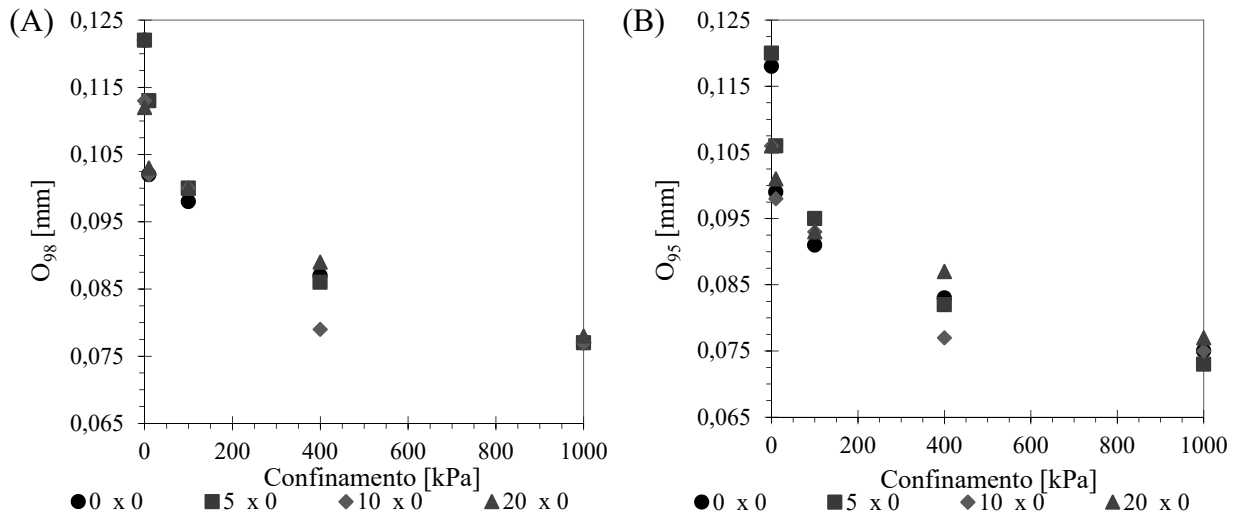


Figura 5.37: Influência das deformações de tração e confinamento no GTN₅₀₀ para os parâmetros de dimensionamento: (A) O₉₈ e (B) O₉₅.

5.4.3. Comentários finais

Sumariando a influência dos efeitos, em todas as avaliações o confinamento reduziu os valores das aberturas dos poros, assim como observado em trabalhos anteriores (Palmeira & Gardoni, 2000a; Silva, 2014; Trejos Galvis, 2016; Moraes Filho, 2018). Já os efeitos das deformações de tração não apresentaram comportamento claro quanto às alterações nas aberturas de filtração. De fato, observou-se alterações na distribuição de poros, no entanto a forma desta alteração não foi bem definida para alguns geotêxteis, embora as variações percentuais entre valores não tenham sido tão significativas (tipicamente menores que 20%). Para o GTN₂₀₀ observou-se uma tendência de aumento das aberturas com a deformação de tração. Já para o GTN₅₀₀ o comportamento sugerido foi de diminuição dos poros com o aumento das deformações de tração.

Os efeitos dos esforços solicitantes podem ser melhor observados nas Tabela 5.10 e 5.11, as quais apresentam os valores de O₉₈, O₉₅, O₉₀, O₅₀, O₃₀ e O₁₀ para os ensaios realizados nesta pesquisa. É possível observar nas tabelas que diferentes solicitações podem apresentar valores similares de abertura para diferentes geotêxteis. Sendo assim, é importante a boa compreensão das modificações estruturais de geotêxteis não tecidos sob condições similares as condições de campo, evitando possíveis falhas do filtro. Seja as falhas por dificuldade de retenção ou por permeabilidade inadequada.

Tabela 5.10: Valores de O_{98} , O_{95} e O_{90} sob diferentes condições de solicitações.

Conf. (kPa)	ε (%)		O_{98} (mm)			O_{95} (mm)			O_{90} (mm)		
	DL	DT	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀
0	0*	0*	0,162	0,148	0,122	0,154	0,140	0,118	0,145	0,129	0,113
	0*	5*	0,176	0,129	0,122	0,162	0,123	0,120	0,154	0,118	0,116
	0*	10*	0,190	0,154	0,113	0,174	0,148	0,106	0,157	0,141	0,101
	0*	20*	0,160	0,150	0,112	0,155	0,143	0,106	0,150	0,134	0,101
	5**	10**	0,175	0,152	0,113	0,161	0,146	0,106	0,154	0,140	0,101
	5**	20**	0,160	0,150	0,106	0,155	0,143	0,104	0,150	0,134	0,101
	10**	20**	0,192	0,135	0,123	0,177	0,127	0,118	0,161	0,121	0,114
10	0*	0*	0,154	0,140	0,102	0,150	0,130	0,099	0,144	0,121	0,095
	0*	5*	0,154	0,124	0,113	0,150	0,121	0,106	0,144	0,117	0,101
	0*	10*	0,163	0,149	0,102	0,157	0,143	0,098	0,146	0,134	0,092
	0*	20*	0,152	0,139	0,103	0,147	0,128	0,101	0,140	0,122	0,096
	5**	10**	0,152	0,124	0,102	0,148	0,121	0,098	0,142	0,117	0,092
	5**	20**	0,152	0,139	0,103	0,147	0,128	0,100	0,140	0,122	0,095
	10**	20**	0,176	0,130	0,114	0,160	0,123	0,106	0,150	0,119	0,101
100	0*	0*	0,149	0,128	0,098	0,139	0,120	0,091	0,128	0,115	0,085
	0*	5*	0,123	0,119	0,1	0,119	0,115	0,095	0,115	0,107	0,089
	0*	10*	0,152	0,123	0,1	0,146	0,118	0,093	0,139	0,113	0,089
	0*	20*	0,138	0,128	0,1	0,127	0,120	0,093	0,113	0,112	0,089
	5**	10**	0,146	0,120	0,1	0,135	0,113	0,093	0,124	0,107	0,089
	5**	20**	0,138	0,128	0,102	0,127	0,120	0,101	0,113	0,112	0,097
	10**	20**	0,152	0,121	0,104	0,147	0,116	0,102	0,142	0,109	0,099
400	0*	0*	0,122	0,120	0,087	0,118	0,114	0,083	0,113	0,107	0,079
	0*	5*	0,120	0,103	0,086	0,116	0,100	0,082	0,110	0,098	0,077
	0*	10*	0,124	0,118	0,079	0,121	0,111	0,077	0,118	0,103	0,076
	0*	20*	0,121	0,106	0,089	0,115	0,103	0,087	0,108	0,099	0,085
	5**	10**	0,130	0,113	0,079	0,124	0,105	0,077	0,118	0,102	0,076
	5**	20**	0,121	0,106	0,088	0,115	0,103	0,086	0,108	0,099	0,083
	10**	20**	0,135	0,117	0,088	0,126	0,109	0,085	0,121	0,102	0,081
1000	0*	0*	0,107	0,101	0,077	0,102	0,096	0,075	0,098	0,090	0,072
	0*	5*	0,117	0,095	0,077	0,111	0,091	0,073	0,104	0,086	0,07
	0*	10*	0,121	0,101	0,077	0,115	0,097	0,075	0,109	0,091	0,072
	0*	20*	0,103	0,095	0,078	0,101	0,090	0,077	0,099	0,087	0,075
	5**	10**	0,113	0,102	0,077	0,106	0,100	0,075	0,100	0,097	0,072
	5**	20**	0,103	0,095	0,082	0,101	0,090	0,079	0,099	0,087	0,077
	10**	20**	0,122	0,100	0,078	0,119	0,097	0,077	0,114	0,092	0,076

Conf. = Confinamento

ε = Deformação de tração

DL = Direção longitudinal de fabricação

DT = Direção transversal à fabricação

* Deformações medidas no centro do espécime

** Deformações impostas a todo o espécime

Tabela 5.11: Valores de O_{50} , O_{30} e O_{10} sob diferentes condições de solicitações.

Conf. (kPa)	ε (%)		O_{50} (mm)			O_{30} (mm)			O_{10} (mm)		
	DL	DT	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀	GTN ₂₀₀	GTN ₃₀₀	GTN ₅₀₀
0	0*	0*	0,107	0,087	0,077	0,067	0,087	0,057	0,034	0,033	0,036
	0*	5*	0,130	0,088	0,087	0,094	0,088	0,071	0,033	0,036	0,042
	0*	10*	0,107	0,103	0,071	0,068	0,103	0,05	0,039	0,042	0,031
	0*	20*	0,128	0,091	0,073	0,085	0,091	0,047	0,058	0,034	0,034
	5**	10**	0,127	0,094	0,071	0,077	0,094	0,05	0,037	0,036	0,031
	5**	20**	0,128	0,091	0,075	0,085	0,091	0,054	0,058	0,034	0,04
	10**	20**	0,128	0,083	0,086	0,075	0,083	0,049	0,033	0,028	0,036
10	0*	0*	0,098	0,090	0,071	0,066	0,090	0,051	0,046	0,033	0,027
	0*	5*	0,108	0,083	0,072	0,075	0,083	0,054	0,023	0,028	0,035
	0*	10*	0,097	0,086	0,069	0,065	0,086	0,052	0,026	0,032	0,029
	0*	20*	0,094	0,086	0,076	0,059	0,086	0,051	0,026	0,026	0,036
	5**	10**	0,099	0,084	0,069	0,065	0,084	0,052	0,031	0,032	0,029
	5**	20**	0,094	0,086	0,068	0,059	0,086	0,051	0,026	0,026	0,027
	10**	20**	0,097	0,090	0,08	0,065	0,090	0,055	0,026	0,024	0,032
100	0*	0*	0,089	0,086	0,06	0,058	0,086	0,041	0,026	0,030	0,026
	0*	5*	0,089	0,072	0,064	0,062	0,072	0,043	0,026	0,025	0,031
	0*	10*	0,095	0,070	0,059	0,059	0,070	0,042	0,032	0,020	0,025
	0*	20*	0,082	0,074	0,060	0,052	0,074	0,04	0,026	0,025	0,022
	5**	10**	0,093	0,075	0,059	0,056	0,075	0,042	0,022	0,026	0,025
	5**	20**	0,082	0,074	0,069	0,052	0,074	0,043	0,026	0,025	0,027
	10**	20**	0,091	0,077	0,063	0,059	0,077	0,043	0,022	0,020	0,027
400	0*	0*	0,079	0,068	0,054	0,045	0,068	0,036	0,022	0,026	0,023
	0*	5*	0,074	0,069	0,068	0,048	0,069	0,04	0,026	0,021	0,026
	0*	10*	0,077	0,061	0,060	0,049	0,061	0,041	0,023	0,015	0,023
	0*	20*	0,070	0,067	0,058	0,044	0,067	0,041	0,022	0,023	0,024
	5**	10**	0,090	0,073	0,060	0,052	0,073	0,041	0,022	0,024	0,023
	5**	20**	0,070	0,067	0,057	0,044	0,067	0,039	0,022	0,023	0,021
	10**	20**	0,083	0,071	0,059	0,050	0,071	0,039	0,022	0,023	0,021
1000	0*	0*	0,070	0,066	0,047	0,040	0,066	0,034	0,024	0,024	0,017
	0*	5*	0,062	0,054	0,053	0,041	0,054	0,036	0,021	0,020	0,022
	0*	10*	0,064	0,053	0,042	0,044	0,053	0,029	0,016	0,019	0,017
	0*	20*	0,066	0,066	0,053	0,041	0,066	0,035	0,017	0,023	0,023
	5**	10**	0,073	0,063	0,042	0,046	0,063	0,029	0,026	0,026	0,017
	5**	20**	0,066	0,066	0,055	0,041	0,066	0,037	0,017	0,023	0,016
	10**	20**	0,080	0,060	0,061	0,049	0,060	0,038	0,024	0,016	0,021

Conf. = Confinamento

ε = Deformação de tração

DL = Direção longitudinal de fabricação

DT = Direção transversal à fabricação

* Deformações medidas no centro do espécime

** Deformações impostas a todo o espécime

6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

6.1. Conclusões

No presente estudo foi possível avaliar o comportamento das aberturas dos poros de geotêxteis não tecidos sob influência de diferentes tipos de esforços solicitantes no ensaio de ponto de bolha. A seguir são apresentadas as principais conclusões obtidas.

Neste estudo foram avaliados geotêxteis não tecidos, de poliéster, agulhados, com diferentes gramaturas: $200\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, $300\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ e $510\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, denominados GTN₂₀₀, GTN₃₀₀ e GTN₅₀₀, respectivamente.

O equipamento utilizado para avaliação de ponto de bolha confeccionado para pesquisas anteriores e adaptado para a presente pesquisa apresentou bom funcionamento. A acurácia das medições foi aferida em ensaios em malhas padronizadas utilizadas na fabricação de peneiras, com abertura de 0,090mm.

Nos ensaios sem esforços solicitantes, quanto maior a gramatura do geotêxtil não tecido menor foi a sua a abertura de filtração. Pelas curvas de distribuição dos poros observou-se que as aberturas O_{30} e O_{10} não apresentaram alterações relevantes com a variação da gramatura, tendo O_{10} permanecido praticamente constante.

De forma geral, constatou-se que os esforços normais ao plano do geotêxtil alteram a abertura de filtração promovendo uma redução. Todas as configurações avaliadas mostraram que o incremento do confinamento causou uma redução das aberturas. As reduções das aberturas de filtração foram mais significativas para os níveis iniciais do confinamento, particularmente entre de 10 e 100kPa. Menores reduções adicionais forma observadas para tensões maiores que 400 kPa.

Observou-se que o comportamento da abertura de filtração para geotêxteis não tecidos sob deformações de tração assimétricas apresentou-se um tanto errático. Para o GTN₂₀₀ os dados sugerem um aumento da abertura de filtração com aumento das deformações. As dimensões das aberturas de filtração do GTN₃₀₀ nos diferentes níveis de deformação de tração mostraram-se erráticas e as do GTN₅₀₀ a diferentes níveis de deformação de tração indicaram que o aumento da tração promoveu uma redução nas aberturas de filtração. Tais variações de comportamento podem ser creditadas à influência da microestrutura e da distribuição espacial dos filamentos dos produtos testados. Entretanto, deve-se notar que a variação entre resultados se situou entre +20% e - 15%.

Quando houve superposição de solicitações (tração e confinamento), os resultados obtidos mostraram que a influência do confinamento foi predominante em relação às deformações de tração.

Os resultados obtidos sugerem que em aplicações onde baixas deformações de tração são esperadas, como em aplicações de separação, o tracionamento do geotêxtil sob condições usuais (deformações menores que 10%), associado ao confinamento, não seria relevante para o seu comportamento como filtro, a menos de danos mecânicos localizados. Já em aplicações sem confinamento (tubos geotêxteis e barreiras de sedimentos) onde maiores deformações de tração são esperadas, o efeito do tracionamento sobre as características filtrantes do geotêxtil pode ser mais relevante.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões para pesquisas futuras são apresentadas a seguir:

- Ampliar o sistema de aquisição de dados do equipamento de tração bidirecional, combinando células de carga e transdutores de deslocamento;
- Ensaiar outros produtos geotêxteis sob condições similares às empregadas nesta dissertação;
- Alterar a ordem de aplicação dos esforços, aplicando primeiro o confinamento da amostra e posteriormente induzir as deformações de tração;

- Comparações entre resultados obtidos com outras metodologias de ensaio para determinação de aberturas de filtração de geotêxteis;
- Comparações em entre resultados obtidos nos ensaios e previsões por métodos presentes na literatura;
- Avaliação microscópica da distribuição de filamentos dos geotêxteis e como esta pode influenciar as dimensões de aberturas sob condições de tração e confinamento;
- Avaliar o comportamento de geotêxteis impregnados, simulando uma situação de colmatção parcial.

7. Referências Bibliográficas

- ABNT (1991). Geotêxteis – Terminologia. NBR ISO 12553, ABNT, Rio de Janeiro, 2p.
- ABNT (2013). Geotêxteis – Amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios. NBR ISO 9862, ABNT, Rio de Janeiro, 4p.
- ABNT (2013). Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área. NBR ISO 9864. ABNT, São Paulo, 3p.
- ABNT (2013). Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga. NBR ISO 10319. ABNT, Rio de Janeiro, 11p.
- ASTM, (2011). Standard test method for pore size characteristics of geotextiles by capillary flow test. American Society for Testing and Materials D6767, 6p.
- ASTM, (2017). Standard Terminology for Geosynthetics1. American Society for Testing and Materials D 4439, 6p.
- AYDILEK, A. H., ASCE, M., OGUZ, S. H. & EDIL, T. B. (2005). Constriction size of geotextile filters. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(1), 28–38.
- AYDILEK, A. H., D'HONDT, D. & HOLTZ, R. D. (2017). Comparative evaluation of geotextile pore sizes using bubble point test and image analysis. *Geotechnical Testing Journal*, 30(3), 173–181.
- BHATIA, S. K. & SMITH, J. L. (1994). Comparative study of bubble point method and mercury intrusion porosimetry techniques for characterizing the pore-size distribution of geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 13(10), 679–702.
- 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.
- BHATIA, S. K., SMITH, J. L. & CHRISTOPHER, B. R. (1996). Geotextile characterization and pore size distribution: part iii. comparison of methods and application to design. *Geosynthetics International*, 3(3), 301–328.
- BLOND, E., VEERMERSCH, O. & DIEDERICH, R. (2015). A comprehensive analysis of the measurement techniques used to determine geotextile opening size: AOS, FOS, O90, and 'Bubble Point'. 2015 Geosynthetics Conference, Oregon, Estados Unidos, 1-10.
- CARROL, J. G. (1983). Geotextile filter criteria. *Transportation Research Record*, 916, 46–53.
- CHRISTOPHER, B. R. & FISCHER, G. R. (1992). Geotextile filtration principles, practices and problems. *Geotextiles and Geomembranes*, 11(1), 337–353.
- ELSHARIEF, A. M. & LOVELL, C. W. (1996). Determination and comparisons of the pore structure of nonwoven geotextiles. *Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites*. American Society for Testing and Materials, (1281) 35–53.
- FANNIN, J. R., VAID, Y. P. & SHI, Y. (1994). Filtration behaviour of nonwoven geotextiles. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(1988), 555–563.
- FAURE, Y., GOURC, J. & GENDRIN, P. (1990). Structural Study of Porometry and Filtration Opening Size of Geotextiles. *Geosynthetics: Microstructure and Performance*. American Society for Testing and Materials, (1079) 102–119.

- FISCHER, G. R., HOLTZ, R. D. & CHRISTOPHER, B. R. (1996). Evaluating geotextile pore structure. Recent developments in geotextile filters and prefabricated drainage geocomposites. American Society for Testing and Materials, (1281), 3–18.
- FOURIE, A. B. & ADDIS, P. (1997). The effect of in-plane tensile loads on the retention characteristics of geotextiles. *Geotechnical Testing Journal*, 20(2), 211–217.
- FOURIE, A. B. & KUCHENA, S. M. (1995). The influence of tensile stresses on the filtration characteristics of geotextiles. *Geosynthetics International*, 2(2), 455–471.
- GARDONI, M. G. & PALMEIRA, E. M. (2002). Microstructure and pore characteristics of synthetic filters under confinement. *Géotechnique*, 52(6), 405–418.
- GAUTIER, K. B., KOCHER, C. W. & DREAN, J. Y. (2007). Anisotropic mechanical behavior of nonwoven geotextiles stressed by uniaxial tension. *Textile Research Journal*, 77(1), 20–28.
- GIROUD, J. P. (1981). Designing with geotextiles. *Matériaux et Constructions*, 14(82), 257–272.
- GIROUD, J. P. (2005). Quantification of geosynthetic behavior. *Geosynthetics International*, 12(1), 2–27.
- GIROUD, J. P. (2010). Development of criteria for geotextile and granular filters. 9th International Conference on Geosynthetics, Guarujá, Brasil, 23–27.
- KENNEY, T. C., CHAHAL, R., CHIU, E., OFOEGBU, G. I., OMANGE, G. N. & UME, D. C. A. (1984). Controlling constriction sizes of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22, 32–43.
- KOERNER (2012). Overview of geotextile. Designing with geosynthetics, Xlibris Corporation, 1 vol., 508p.
- KOERNER, R. M. & KOERNER, G. R. (2015). Lessons learned from geotextile filter failures under challenging field conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(3), 272–281.
- LIMA, M. J. (2014). Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 128p.
- LOMBARD, G., ROLLIN, A., & WOLFF, C. (1989). Theoretical and experimental opening sizes of heat-bonded geotextiles. *Textile Research Journal*, 59(4), 208–217.
- LUETTICH, S. M., GIROUD, J. P., & BACHUS, R. C. (1992). Geotextile filter design guide. *Geotextiles and Geomembranes*, 11, 355–370.
- MILLER, B., TYOMKIN, I. & WEHNER, J. A. (1986). Quantifying the porous structure of fabrics for filtration applications. *Fluid filtration: gas*. American Society for Testing and Materials, 1, 97–106.
- MORAES FILHO, I. P. (2018). Avaliação da Abertura de Filtração de Geotêxteis sob Diferentes Condições de Solicitação Mecânica. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 122p.
- PALMEIRA, E. M. & FANNIN, R. J. (1998). A methodology for the evaluation of geotextile pore opening sizes under confining pressure. *Geosynthetics International*, 5(3), 447–357.
- PALMEIRA, E. M. & GARDONI, M. G. (2000a). The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems. *Geosynthetics International*, 7(4–6), 403–431.
- PALMEIRA, E.M. & GARDONI, M.G., (2000b). Geotextiles in filtration: a state-of-the-art review and remaining challenges. In: Mallek, A. (Ed.), *International Symposium on Geosynthetics in Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering*, in association with GeoEng2000, Melbourne, Australia, 85–110.
- PALMEIRA, E. M. & GARDONI, M. G. (2002). Drainage and filtration properties of nonwoven geotextiles under confinement using different experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(2), 97–115.

- PALMEIRA, E. M. & TREJOS GALVIS, H. L. (2017). Opening sizes and filtration behaviour of nonwoven geotextiles under confined and partial clogging conditions. *Geosynthetics International*, 24(2), 125–138.
- 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.
- POURDEYHIMI, B. & MAZE, B. (2008). Structure and mechanics of nonwovens. *Structure and mechanics of textile fiber assemblies*, Elsevier, 116-140.
- POURDEYHIMI, B., RAMANATHAN, R., & DENT, R. (1996). Measuring fiber orientation in nonwovens: part i: simulation. *Textile Research Journal*, 66(11), 713–722.
- PRAPAHARAN, S., HOLTZ, R. D., & LUNA, J. D. (1989). Pore size distribution of hybrid nonwoven geotextiles. *Geotechnical Testing Journal*, 12(4), 261–268.
- RAWAL, A. (2010). Structural analysis of pore size distribution of nonwovens †. *Journal of the Textile Institute*, 101(4), 350–359.
- RAWAL, A., & SARASWAT, H. (2011). Pore size distribution of hybrid nonwoven geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(3), 363–367.
- SILVA, A. M. da. (2014). Abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento. *Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil*, 129p.
- STEPANOVIC, J. M., TRAJKOVIC, D., STOJILJKOVIC, D., & DJORDJIC, D. (2016). Predicting the behavior of nonwoven geotextile materials made of polyester and polypropylene fibers. *Textile Research Journal*, 86(13), 1385–1397.
- 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, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil*, 142p.
- WU, C. S. & HONG, S. (2016). The influence of tensile strain on the pore size and flow capability of needle-punched nonwoven geotextiles. *Geosynthetics International*, 23(6), 422–434.
- WU, C. S., HONG, Y. S. & WANG, R. H. (2008). The influence of uniaxial tensile strain on the pore size and filtration characteristics of geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(3), 250–262.