

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GUILHERME REIS LEITE

**Análise comparativa do dimensionamento de filtros em material geotêxtil não tecido
usando duas fontes de dados de abertura de filtração**

MACEIÓ

2020

GUILHERME REIS LEITE

**Análise comparativa do dimensionamento de filtros em material geotêxtil não tecido
usando duas fontes de dados de abertura de filtração**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Viviane Carrilho Leão Ramos.

Coorientadora: Eng.^a MSc. Ana Beatriz Araújo Nobre Dias.

MACEIÓ

2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

L533a Leite, Guilherme Reis.

 Análise comparativa do dimensionamento de filtros em material
 geotêxtil não tecido usando duas fontes de dados de abertura de filtração /
 Guilherme Reis Leite. – 2020.

 58 f. : il., figs. e tabs. color.

 Orientadora: Viviane Carrilho Leão Ramos.

 Coorientadora: Ana Beatriz Araújo Nobre Dias.

 Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil)
 – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2020.

 Bibliografia: f. 56-57.

 Anexo: f. 58.

 1. Geotêxtil não tecido. 2. Dimensionamento de filtros. 3. Abertura de
 filtração. 4. Ponto de bolha. I. Título.

CDU: 624.138



Universidade Federal de Alagoas
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia
Curso de Engenharia Civil

Av. Lourival de Melo Mota – Tabuleiro do Martins Maceió –
AL, CEP: 57072-970, Tel: (82) 3214-1281



**ENCAMINHAMENTO DA VERSÃO FINAL DO TRABALHO DE
CONCLUSÃO DE CURSO**

Declaro que a Monografia de Conclusão de Curso intitulada *Análise comparativa do dimensionamento de filtros em material geotêxtil não tecido usando duas fontes de dados de abertura de filtração*, de autoria de Guilherme Reis Leite, foi revisada de acordo com as sugestões dadas pela banca examinadora no exame de defesa, estando apta a ser depositada em sua versão final.

Viviane Carrilho Leão Ramos
Orientador(a) do Trabalho de Conclusão de Curso

Maceió, 03/11/2020

RESUMO

Leite, G. R. **Análise comparativa do dimensionamento de filtros em material geotêxtil não tecido usando duas fontes de dados de abertura de filtração.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2020.

Por serem uma tecnologia relativamente recente, os geotêxteis (em especial os não tecidos em aplicações em sistemas filtrantes) ainda estão passando por aprimoramentos em seu processo de dimensionamento. Os métodos mais usados atualmente para medir a informação mais importante dessa etapa, a abertura de filtração, ainda possuem pouca precisão. O presente trabalho analisou a aplicação do método de Christopher e Holtz (1985) em um caso particular com duas fontes de dados de abertura de filtração: uma com os dados fornecidos pelo fabricante obtidos por medições convencionais menos precisas; e outra por meio do Teste do Ponto de Bolha, ou *Bubble Point Test* (BBP), processo mais moderno e preciso. A UnB é referência no tema e as dissertações de mestrado de Silva (2014), Trejos Galvis (2016), Melo (2018), Moraes Filho (2018) e Dias (2019) serviram como base teórica e de dados para a elaboração deste trabalho, além de livros e publicações nacionais e internacionais sobre o assunto. O trabalho visou trazer insumos para aumentar a viabilidade à utilização do produto, evitando a elaboração de projetos demasiadamente conservadores. Na análise dos resultados, foi observada a tendência de economia, aumento de segurança ou aumento no leque de opções aptas em determinados cenários a partir da adoção dos dados fornecidos pelo *Bubble Point Test*, o que confirmou a hipótese de que é benéfica a substituição da fonte de dados atual por esta. Também ficou clara a necessidade da elaboração de mais trabalhos de levantamento da influência da sobrecarga em outros modelos para dar mais base às análises.

Palavras-chave: Geossintético; Geotêxtil Não Tecido; Dimensionamento de Filtros; Abertura de Filtração; Teste de Ponto de Bolha.

ABSTRACT

For being a relatively recent technology, geotextiles (especially the non-woven models used in filtering systems) are still undergoing improvements in their design process. The currently most used methods to measure the most important information of this stage, the filtrations opening size, are still less accurate than the ideal. This work analyzed the application of the method by Christopher and Holtz (1985), in a specific case with two sources of filtration opening size data: the first one using data provided by the manufacturer obtained through less accurate measurements; and another through the *Bubble Point Test* (BBP), a more modern and accurate process. UnB is a reference on this topic and the master's theses by Silva (2014), Trejos Galvis (2016), Melo (2018), Moraes Filho (2018) and Dias (2019) were used as a theoretical and data source for preparation of this work, in addition to national and international books and publications on the subject. The work aimed to bring inputs to increase the viability of using the product, avoiding the elaboration of overly conservative projects. In the analysis of the results, it was observed the tendency of economy, increase of security or increase in the range of options suitable in certain scenarios from the adoption of the data provided by the *Bubble Point Test*, which confirmed the hypothesis that the substitution of the source is beneficial of current data for this. It was also clear that there was a need for more academic works to survey the influence of overload on other models in order to provide more basis for the analyzes.

Keywords: Geosynthetic; Nonwoven Geotextiles; Filter Sizing; Filtration Opening Size; Bubble Point Test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Imagens ampliadas de (A) geotêxtil tecido e (B) geotêxtil não tecido.	11
Figura 2: Trecho de um Ziggurat.	13
Figura 3: Aplicação de manta de GTN.	15
Figura 4: Monômero do polietileno.	16
Figura 5: Monômero do polipropileno.	16
Figura 6: Monômero do policloreto de vinila.	17
Figura 7: Monômero do poliéster.	17
Figura 8: Comparação entre a mesma obra com filtro granular (a) e filtro em geotêxtil (b). ..	20
Figura 9: Formação do pré-filtro no sistema filtrante.	21
Figura 10: Mecanismos de colmatção em filtros geotêxteis: cegamento (A), bloqueamento (B) e obstrução interna (C).	24
Figura 11: esquematização do ensaio hidrodinâmico (a) e úmido (b) de peneiramento.	26
Figura 12: Conjunto de equipamentos do ensaio de ponto de bolha da UnB.	27
Figura 13: Vista externa da célula de ensaio.	27
Figura 14: Vista interna da célula de ensaio.	28
Figura 15: Vazão de ar versus pressão aplicada – Calibração com tela metálica #170.	28
Figura 16: Curvas de distribuição de poros de cinco telas metálicas #170.	30
Figura 17: Representação de cargas adotadas.	33
Figura 18: Distribuição granulométrica da jazida J7A.	35
Figura 19: Distribuição granulométrica da jazida J5.	36
Figura 20 - Dimensionamento sob os critérios de retenção e resistência ao entupimento.	41
Figura 21: Comparação gráfica para o modelo RT 10.	47
Figura 22: Comparação gráfica para o modelo RT 16.	48
Figura 23: Comparação gráfica para o modelo RT 31.	49

Figura 24: Tensão acima da coincidência com critério de resistência ao entupimento como decisivo.....	51
Figura 25: Tensão acima da coincidência com critério de retenção como decisivo.....	51
Figura 26: Distribuição granulométrica de um solo argiloso.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critérios de retenção dos principais métodos de dimensionamento.	22
Tabela 2: Dados do subleito.....	34
Tabela 3: Dados das jazidas.....	35
Tabela 4: Dados dos modelos de GTN disponíveis.....	36
Tabela 5: Dados das jazidas selecionadas.....	37
Tabela 6: Abertura estimada em mm de cada modelo para a tensão confinante na situação. ..	43
Tabela 7: Resultado de cada modelo por critério (J5, fabricante).	44
Tabela 8: Resultado de cada modelo por critério (J7A, fabricante).	44
Tabela 9: Resultado de cada modelo por critério (J5, BBP).....	44
Tabela 10: Resultado de cada modelo por critério (J7A, BBP).....	44
Tabela 11: Valor de cada modelo por metro quadrado.	45
Tabela 12: Comparação percentual para o modelo RT 10.....	47
Tabela 13: Comparação percentual para o modelo RT 16.....	48
Tabela 14: Comparação percentual para o modelo RT 31	49
Tabela 15: Resultado de cada modelo por critério (J5, fabricante).	53
Tabela 16: Resultado de cada modelo por critério (J5, BBP).....	53

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
AOS	Apparent opening size
ASTM	America Society of Testing Materials
BBP	Bubble Point Test
Cu	Coeficiente de uniformidade
D10	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 10% passante
D15	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 15% passante
D60	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 60% passante
D85	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 85% passante
Di	Diâmetro das partículas de solo correspondente a i% passante
FHWA	Federal Highway Administration
GT	Geotêxtil
GTK	Geotêxtil tricotado
GTN	Geotêxtil não tecido
GTW	Geotêxtil tecido
NBR	Norma Brasileira
O15	Abertura do poro que 15% 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
Of	Abertura de filtração
PE	Polietileno
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinila

RT 10	Modelo de GTN com resistência à tração de 10kN/m
RT 16	Modelo de GTN com resistência à tração de 16 kN/m
RT 31	Modelo de GTN com resistência à tração de 31 kN/m

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Comentários iniciais.....	10
1.2	Justificativa	11
1.3	Objetivo Geral	12
1.4	Objetivos específicos	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Geossintético	13
2.2	Polímeros.....	15
2.3	Geotêxtil	17
2.4	Filtros.....	19
2.4.1	Filtro em GTN	20
2.5	Crítérios de projeto do GTN usado como filtro.....	21
2.5.1	Critério de retenção.....	21
2.5.2	Critério de permeabilidade	23
2.5.3	Critério anticolmatação (resistência ao entupimento)	23
2.5.4	Critério de sobrevivência e durabilidade	24
2.6	Abertura de filtração	24
2.6.1	Peneiramento	25
2.6.2	Análise de imagens	26
2.6.3	Intrusão de mercúrio	26
2.6.4	Ensaio de ponto de bolha (BBP).....	26
2.7	Estudos anteriores	30
2.8	Consequências de falha.....	31
3	METODOLOGIA.....	32

3.1	Apresentação do caso estudado.....	32
3.2	Escolha da base de dados dos geotêxteis	33
3.3	Obtenção de dados do solo.....	34
3.4	Descrição do método de dimensionamento	36
3.4.1	Do geotêxtil	36
3.4.2	Do solo.....	37
3.5	Crítérios.....	37
3.5.1	Crítério de retenção.....	37
3.5.2	Crítério de permeabilidade	39
3.5.3	Crítério de permissividade	39
3.5.4	Crítério de resistência ao entupimento	40
3.5.5	Resumo processo de dimensionamento	40
3.6	Etapas de verificação adicionais	42
3.6.1	Análise comparativa para casos gerais	42
3.6.2	Caso hipotético adaptado	42
4	RESULTADOS.....	43
4.1	Cálculo do orçamento	45
4.1.1	Análise dos resultados	45
4.2	Análise comparativa para casos gerais.....	47
4.3	Caso hipotético adaptado	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
	REFERÊNCIAS	56
	ANEXO A – Geometria em corte da via abordada no trabalho.....	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Comentários iniciais

Motivada por pressões de clientes, de concorrência, ambientais, entre outras; a engenharia vê a necessidade de proporcionar aos seus usuários melhorias em rendimento e eficiência do produto final. Essas mudanças são viabilizadas pelo surgimento de novas tecnologias: instrumentos, métodos e técnicas.

O solo é um dos grandes objetos de trabalho da engenharia. Nele, essas inovações se dão, entre outros tópicos, pelo surgimento e disseminação dos geossintéticos, que são materiais compostos por polímeros sintéticos (plásticos), naturais (como a fibra de coco) ou ainda em associação dos dois tipos, embora o primeiro seja o mais comumente utilizado, principalmente quando se visa uma maior vida útil no projeto (PALMEIRA, 2018).

A finalidade da aplicação é melhorar alguma característica do solo onde será aplicado para que este se torne apto a resistir a uma determinada sollicitação que, em condição natural, não seria capaz. A NBR 12.553 traz os seguintes tipos como principais (tipo – terminologia):

- Controle de erosão superficial – E;
- Drenagem – D;
- Impermeabilização – B;
- Proteção – P;
- Reforço – R;
- Separação – S;
- Filtração – F.

Na aplicação em filtração, os materiais são em geral denominados geotêxteis (GT), sendo aplicados em obras como barragens e de pavimentação para evitar problemas de perda e movimentação de grãos dentro da estrutura do solo. Ele funciona como filtro de um sistema drenante (semelhante aos filtros granulares convencionais), podendo também ser usado como elemento filtrante para redução de potencial de poluentes (PALMEIRA, 2018).

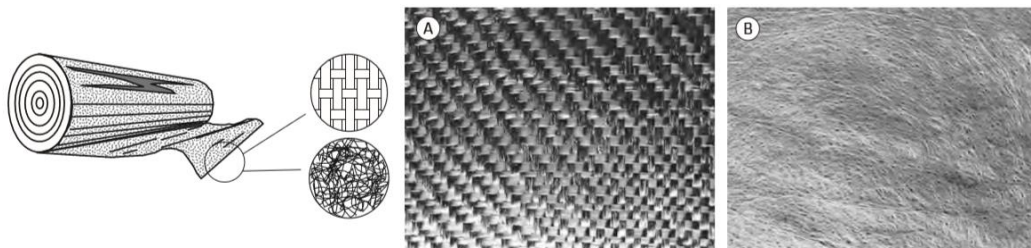
Os geotêxteis podem ser divididos em três grupos de acordo com o processo de manufatura:

- Geotêxtil tecido (GTW): Resultante do entrelaçamento dos fios de maneira ordenada em direções preferenciais, denominadas trama e urdume, no sentido transversal e longitudinal, respectivamente;
- Geotêxtil tricotado (GTK): Obtido pelo tricotamento dos fios;

- Geotêxtil não tecido (GTN): Composto por fibras distribuídas de forma aleatória, tendo uma estrutura mais complexa. É o objeto principal de estudo do presente trabalho.

As malhas dos dois modelos mais mencionados em Palmeira (2018) e Vertematti (2004) estão mostradas em detalhes na Figura 1 a seguir:

Figura 1: Imagens ampliadas de (A) geotêxtil tecido e (B) geotêxtil não tecido.



Fonte: Palmeira (2018)

No GTN, uma das principais características físicas para o processo de dimensionamento é o tamanho desses poros, dado pela equivalência ao diâmetro de um círculo de mesma área (ASTM D6767/16) e denominado abertura de filtração. A mesma varia de O_{100} (maior abertura) até O_0 (menor abertura).

Seu princípio de funcionamento é permitir a passagem da água pelos seus poros ao mesmo tempo em que eles retêm os grãos constituintes do solo, mantendo sua estabilidade. Essas capacidades de retenção e de permeabilidade são antagônicas, o que aumenta a necessidade de um processo produtivo e de dimensionamento adequados, e por isso os métodos de dimensionamento em geral impõem faixas ideais de tamanho de abertura de filtração para conciliar as duas funções citadas.

1.2 Justificativa

Tanto o geotêxtil tecido quanto o não tecido podem ser empregados na função de filtração. Apesar da maior complexidade da estrutura interna em relação a outras opções (como GTW e GTK), o uso do GTN predomina nessas aplicações. Essa preferência se deve principalmente aos seguintes fatores: maior estabilidade da abertura de filtração e menor sensibilidade aos danos mecânicos que ocorrem durante a instalação do material (PALMEIRA, 2018).

Apesar de ser um produto com esses destaques perante os demais com mesma função, o GTN ainda precisa de aperfeiçoamentos em sua cadeia produtiva para se tornar mais rentável. Uma das etapas que carece de melhorias para trazer mais eficiência ao uso desse material é o processo de dimensionamento, pois ele impacta na otimização de gastos e eficácia, levando o cliente a optar pelo produto com mais facilidade e confiança.

Esse processo deve prever as solicitações às quais o material estará exposto durante o uso para avaliar sua resposta por meio de ensaios e determinar as especificações do GTN usado. O método atualmente mais utilizado para se determinar a abertura de filtração (peneiramento com microesferas de vidro) é simples, mas não reproduz fielmente essas condições, podendo levar a projetos com custos de aquisição e implementação maiores que o necessário (SILVA, 2014). O Teste do Ponto de Bolha (*Bubble Point Test*) surge como uma alternativa mais eficiente, mas que necessita de um aparato tecnológico um pouco mais específico.

A indústria e o mercado do GTN ainda não dispõem de uma comparação financeira entre os dois métodos que possa atestar qual é mais eficiente: o primeiro, apesar do sobredimensionamento que pode causar, ou o segundo, apesar de sua maior exigência tecnológica. Essa comparação foi feita neste trabalho em um caso particular e sua análise foi feita extrapolando os resultados para outras situações.

1.3 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo fazer uma comparação entre o dimensionamento do geotêxtil não tecido usando a abertura de filtração fornecida pelo fabricante do material (peneiramento de microesferas de vidro ou areia) e a abertura fornecida pelo Ensaio de Ponto de Bolha, por meio do método de Christopher e Holtz (1985).

1.4 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral citado, o trabalho também foca nos seguintes objetivos específicos:

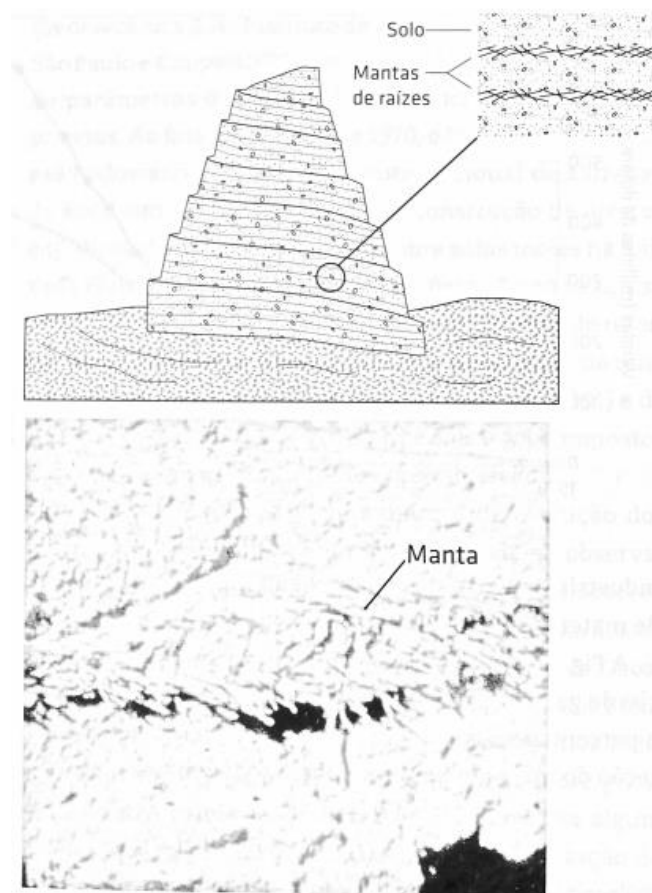
- Levantar os custos que compõem uma aplicação em um caso hipotético de GTN dimensionado tanto sob o método de peneiramento quanto sob o método BBP, comparando-os;
- Investigar consequências gerais da adoção de dados obtidos via BBP em cenários além do caso hipotético abordado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Geossintético

Apesar de serem materiais modernos e tecnológicos, o princípio de funcionamento para melhoria das características do solo de forma arcaica dos geossintéticos têm registros de 3000 a.C. Desde então, fibras vegetais vêm sendo utilizadas com essa função sem muitas alterações (VERTEMATTI, 2004). A Figura 2 traz um exemplo de uso desse princípio: as Muralhas de Ziggurat de Agar Quf, ainda na Mesopotâmia, edificadas em 1400 a.C, onde o reforço foi feito com a aplicação de mantas de raízes sobrepostas e intercaladas com solo.

Figura 2: Trecho de um Ziggurat.



Fonte: Palmeira (2018).

O cenário começa a mudar com a fabricação dos primeiros polímeros artificiais, iniciada com a produção da borracha sintética ao final dos anos 1930 em decorrência da escassez de borracha natural causada pela Segunda Guerra Mundial, impulsionando o surgimento dos geossintéticos (PALMEIRA, 2018).

As primeiras grandes obras a usarem geossintéticos (particularmente geotêxteis) aconteceram na década de 1950, nas quais foram usados como elementos filtrantes para combate à erosão em obras hidráulicas. Um importante exemplo foi o Projeto Delta, executado após uma inundação do Mar Norte em 1953 na Holanda (país com parte do seu território abaixo do nível do mar) que ocasionou a morte de 1850 pessoas. Para evitar que outras catástrofes do tipo ocorressem, o ambicioso projeto usou 10 milhões de metros quadrados do material (VERTEMATTI, 2004).

Na década de 1970, a gama de funções dos geossintéticos se diversificou, sendo aplicados em aterros rodoviários sobre solo de baixa capacidade de suporte, muros em solo reforçado, associações entre geotêxteis e geomembranas e geotêxteis espessos como elementos drenantes de túneis. Também começaram a ser usados como parte do sistema filtrante de grandes barragens, como a Frauenau Dam, na Alemanha, e da Hans Strydom Dam, na África do Sul (VERTEMATTI, 2004).

Foi nessa década que o Brasil executou suas primeiras obras com aplicação de geotêxtil. A mais revolucionária delas foi a obra de drenagem da Rodovia dos Bandeirantes, que liga a cidade de São Paulo a Campinas. Ela foi executada em 1978 e usou o material na drenagem profunda da via em toda a sua extensão, consumindo aproximadamente um milhão de metros quadrados de geotêxtil. Por se tratar de uma via que conecta duas cidades importantes, a mesma sofreu um intenso desgaste e necessitou de um reparo em 1991. Nesta fase, foram construídos os drenos laterais de pavimento, também utilizando geotêxteis como filtro entre o dreno e a camada drenante, consumindo mais 374.000 metros quadrados do material (BIDIM, 1991). Parte da obra está retratada na Figura 3:

Figura 3: Aplicação de manta de GTN.



Fonte: Bidim (1991)

2.2 Polímeros

Os polímeros, do grego *poli* (muitas) e *meros* (partes), são macromoléculas orgânicas formadas por unidades de repetição, chamadas de monômeros. Diversas substâncias naturais são englobadas nessa classificação, tais como carboidratos, proteínas, ácidos nucleicos e a borracha natural. Esta última foi precursora dos polímeros de uso industrial, sendo utilizada até hoje em produtos como pneus, pisos, revestimentos e materiais de impermeabilização por conta de suas propriedades adequadas às aplicações e menor energia necessária para sua produção (inferior a um sexto do polímero equivalente sintético) (RIPPEL, 2009).

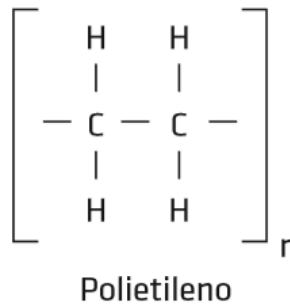
Apesar de terem sido produzidos inicialmente para substituir a função da borracha natural, os polímeros artificiais se diversificaram, atendendo a diversas outras finalidades. Segundo Vertematti (2014), estima-se que atualmente já existem dezenas de milhares de patentes de polímeros artificiais, porém apenas uma pequena parte é explorada comercialmente. Versáteis, essas substâncias dão origem a inúmeros materiais, incluindo os geossintéticos.

O uso de polímeros para esse fim se popularizou na década de 1960, porém os primeiros registros datam do ano de 1933, quando geossintéticos de PVC foram usados no revestimento de piscinas (VERTEMATTI, 2004). Para a produção do referido produto atualmente, são listados os seguintes polímeros como alguns dos mais populares:

- Polietileno (PE): É uma classificação que engloba diversos polímeros formados pela polimerização de compostos que contém ligações insaturadas entre dois átomos de

carbono. Os mais comuns são o polietileno de baixa densidade (PEBD); polietileno linear de baixa densidade (PELBD), que possui maior rigidez que o anterior; e o polietileno de alta densidade (PEAD), mais cristalino e resistente que os demais. Começou a ser produzido em larga escala em 1943, sendo empregado atualmente na confecção de geomembranas, geogrelhas, geocélulas, georredes, geotubos e geocompostos (PALMEIRA, 2018). A Figura 4 a seguir mostra a estrutura do monômero do polietileno:

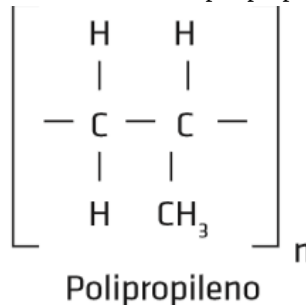
Figura 4: Monômero do polietileno.



Fonte: Palmeira (2018).

- **Polipropileno (PP):** É o polímero termoplástico menos denso usado na fabricação de geossintéticos. Mesmo assim, se destaca pela sua resistência mecânica, rigidez, resistência à fadiga e ao ataque químico (quando devidamente tratado com aditivos, estabilizantes e antioxidantes). Usado na confecção de geotêxteis, geogrelhas, geomembranas e geocompostos (VERTEMATTI, 2004). A Figura 5 a seguir mostra a estrutura do monômero do polipropileno:

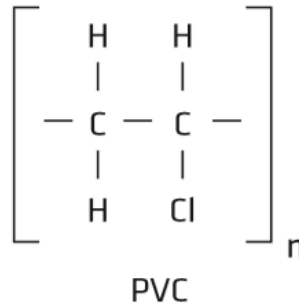
Figura 5: Monômero do polipropileno.



Fonte: Palmeira (2018).

- **Policloreto de vinila (PVC):** É muito usado na confecção de alguns geossintéticos, como geotubos, geomembranas e geocompostos. Está disponível nas formas rígida e flexível, a depender da adição ou não de aditivos na fabricação (PALMEIRA, 2018). A Figura 6 a seguir mostra a estrutura do monômero do policloreto de vinila:

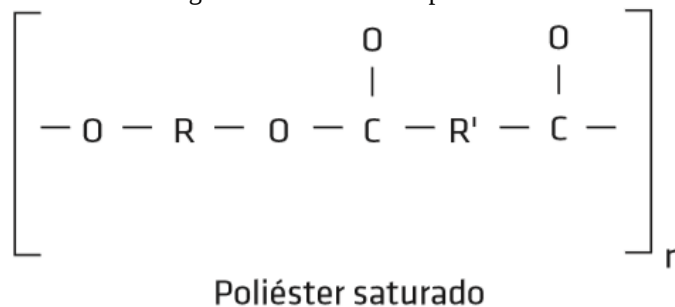
Figura 6: Monômero do policloreto de vinila.



Fonte: Palmeira (2018).

- **Poliéster (PET):** Pode ser produzido de forma termoplástica ou termofílica. A primeira gera o poliéster saturado, que é extremamente cristalino e apresenta maior dureza, resistência mecânica e à abrasão. Quando o geotêxtil a ser fabricado necessita de alta resistência à tração, pode ser fabricado com elevado peso molecular. Além de aplicações mais conhecidas como a produção de garrafas PET, o poliéster é usado na fabricação de geotêxteis e geogrelhas. Sob ação de pH extremo, pode sofrer hidrólise, o que inspira cuidados na hora da escolha do produto. (VERTEMATTI, 2004). Todos os três tipos geotêxteis utilizados no presente trabalho são compostos 100% por esse material. A Figura 7 a seguir mostra a estrutura do monômero do poliéster:

Figura 7: Monômero do poliéster



Fonte: Palmeira (2018).

2.3 Geotêxtil

Segundo a norma NBR 12.553 (2003), o geotêxtil pode ser definido por:

Produto têxtil bidimensional, permeável, composto de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas ou hidráulicas permitem que desempenhem várias funções numa obra geotécnica.

Um modo de classificar os diferentes tipos desse material é pelo processo de manufatura pelo qual foram produzidos. Neste trabalho, destaca-se o geotêxtil não tecido (GTN), composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos de forma aleatória. Cabe ainda observar o modo de interligação das fibras, que, ainda conforme a NBR 12.553 da ABNT, (2003), são divididos em:

- Geotêxtil não tecido agulhado: fibras interligadas mecanicamente, por processo de agulhagem. Exemplo: geotêxtil não tecido, agulhado, preto, utilizado com diversas funções em vários tipos de obras de engenharia;
- Geotêxtil não tecido termoligado: fibras interligadas por fusão parcial obtida por aquecimento. Exemplo: geotêxtil não tecido termoligado, cinza, utilizado com diversas funções em vários tipos de obras de engenharia;
- Geotêxtil não tecido resinado: fibras interligadas por meio de produtos químicos.

Uma importante característica do geotêxtil é a gramatura, que mede o quanto de massa o geotêxtil possui por unidade de área. Geralmente, essa informação é dada em gramas por metro quadrado (g/m^2).

Segundo Palmeira (2018), os geotêxteis podem ser altamente anisotrópicos em algumas de suas propriedades de engenharia, como os coeficientes permeabilidade nas direções normal ao plano e ao longo do plano. Essa característica indica sua vocação maior para usos como material filtrante do que como drenante.

2.4 Filtros

Obras que durante seu funcionamento têm um fluxo de água previsto no interior do solo requerem cuidados com as consequências dessa movimentação em sua estrutura. Para combater esses efeitos, muitas vezes é necessário utilizar um sistema filtrante. O mesmo deve ser permeável, permitindo a livre passagem de água, ao mesmo tempo em que retém as partículas de solo, mantendo a estabilidade da estrutura, mas é natural que uma parte das partículas mais finas atravesse total ou parcialmente o filtro (VERTEMATTI, 2004).

Os problemas de mau funcionamento desses sistemas geralmente estão associados à erosão interna, baixa permeabilidade do filtro e à sua colmatação (entupimento por partículas finas de solo) (TREJOS GALVIS, 2016).

Nesse uso, é bastante comum haver confusão entre drenagem e filtração. Apesar de estarem intimamente relacionadas, a drenagem se refere à coleta do fluido e sua condução por meio do seu corpo na direção paralela à estrutura do geossintético usado (NBR 12.553 2003). Com isso, a principal característica hidráulica de um material usado para esse fim é a transmissividade (ou capacidade de escoamento no plano) do mesmo (VERTEMATTI, 2004).

Já na filtragem, o intuito é impedir a passagem das partículas do solo ao mesmo tempo em que se libera o fluxo de água, evitando assim o acúmulo de cargas hidrostáticas na estrutura e a ocorrência de erosão interna. (VERTEMATTI, 2004). É importante destacar que os geotêxteis (especialmente os não tecidos) podem ser usados em ambas as aplicações, mas a ênfase é maior como componente de filtração do sistema de drenagem, pois a eficiência destes é menor em termos de capacidade de descarga ao longo do plano. Para este uso, é recomendado o uso de geocompostos (PALMEIRA, 2018).

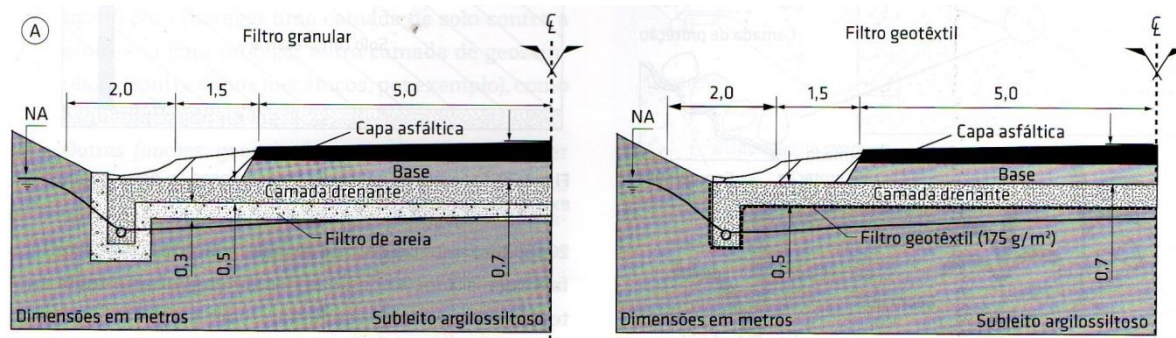
2.4.1 Filtro em GTN

O fato de ser um material industrial põe o geotêxtil em uma posição privilegiada de praticidade e economia de recursos em comparação aos filtros granulares convencionais. Segundo Vertematti (2004), outras vantagens que o material apresenta são:

- Menor espessura;
- Características controladas e regulares;
- Continuidade da estrutura filtrante (mesmo em caso de recalques);
- Facilidade de instalação e menor custo.

Associados com a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, esses fatores são grandes propulsores de seu uso em diversos países (SILVA, 2014). A Figura 8 indica a maior praticidade do filtro geotêxtil em comparação com o filtro granular convencional:

Figura 8: Comparação entre a mesma obra com filtro granular (a) e filtro em geotêxtil (b).



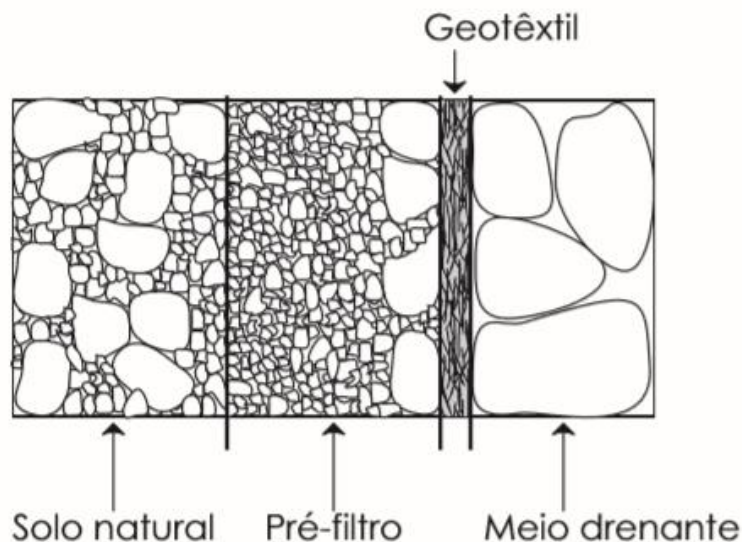
Fonte: Palmeira (2018)

Nesse exemplo, a opção pelo produto industrializado pôde gerar uma redução de aproximadamente 85% dos impactos ambientais que seriam causados por um filtro feito de areia convencional ao levar em consideração a emissão de gases nocivos, o consumo de água, eutrofização e consumo de energia, o que indica um excelente resultado em termos de preservação ambiental (PALMEIRA, 2018).

Quando esse material é usado como filtro, a manta retém as partículas mais grossas do solo. Porém, se as partículas mais finas também ficarem retidas em grande quantidade, podem provocar o entupimento dos poros. Desse modo, os poros devem ser largos o suficiente para permitirem a passagem dessas partículas, evitando a colmatação interna do filtro. Desse modo, o GTN atua como o catalisador para a formação de um filtro natural no solo, como indica a Figura 9, formando um pré-filtro entre a camada de geotêxtil e o solo natural. Para que isso ocorra, o geotêxtil deve apresentar inicialmente uma permeabilidade maior que a do solo. Mesmo que o filtro perca parte dessa permeabilidade em longo prazo, essa relação deve se manter, significando que a estrutura do solo está sendo mantida estável, mesmo que partículas

finas em suspensão no fluxo permanente de água ainda estejam passando pelo filtro (VERTEMATTI, 2004).

Figura 9: Formação do pré-filtro no sistema filtrante.



Fonte: Vertematti (2004)

2.5 Critérios de projeto do GTN usado como filtro

Há uma série de métodos de dimensionamento disponíveis para a execução de projeto de filtro em manta geotêxtil. Na maioria deles, são levados em consideração os seguintes critérios para o bom funcionamento do sistema: retenção, permeabilidade, anticolmatação, e sobrevivência e durabilidade ou variações destes. A seguir, os critérios são explicados de forma geral, sem as particularidades dos métodos:

2.5.1 Critério de retenção

Este critério é tido como o mais importante, e tem como função garantir que as partículas de solo serão em geral retidas pela manta geotêxtil, evitando a passagem de quantidade significativa delas. Desse modo, o fenômeno da erosão interna (*piping*) é evitado. Há uma série de critérios de retenção sugeridos pela literatura, que basicamente representam uma relação entre um tamanho representativo da partícula do solo em questão e as dimensões da abertura de filtração do GTN. Também podem ser encontrados critérios com base em soluções probabilísticas, mas os mesmos têm aplicação mais restrita por conta da maior complexidade de aplicação (PALMEIRA, 2018). Na Tabela 1 a seguir, estão dispostos alguns deles:

Tabela 1: Critérios de retenção dos principais métodos de dimensionamento.

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

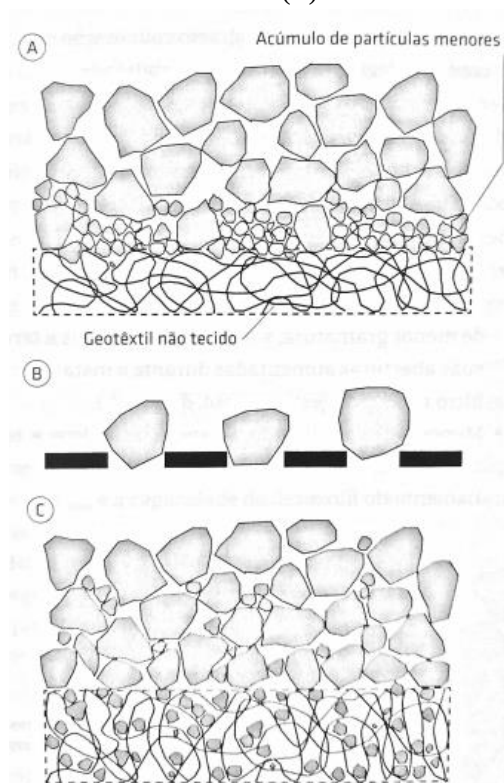
2.5.2 Critério de permeabilidade

Visa garantir que o geotêxtil mantenha um coeficiente de permeabilidade maior que o solo em contato e condizente com as características do fluxo de água e da obra em questão. Os critérios de permeabilidade disponíveis levam em conta o coeficiente de permeabilidade do GTN, que deve ser obtido em condições de tensão próximas às esperadas na obra (PALMEIRA, 2018). Em função do tipo de solo e da aplicação do filtro, deverá ser considerado um fator de segurança (FS) (VERTEMATTI, 2004).

2.5.3 Critério anticolmatação (resistência ao entupimento)

Visa garantir que as aberturas do geotêxtil não serão obstruídas pela acumulação de partículas do solo por meio dos mecanismos de colmatação: cegamento, no qual há um acúmulo de partículas de dimensão menor que a abertura de filtração, formando uma camada de baixa permeabilidade; bloqueamento, onde partículas maiores que a abertura de filtração bloqueiam a passagem de água, mais comum no GTW); e obstrução interna, na qual as partículas menores entram nos poros do geotêxtil, podendo formar colônias de bactérias ou precipitação de compostos químicos (PALMEIRA, 2018). Os tipos de colmatação que podem acometer o GTN estão ilustrados na Figura 10 a seguir:

Figura 10: Mecanismos de colmatção em filtros geotêxteis: cegamento (A), bloqueamento (B) e obstrução interna (C).



Fonte: Palmeira (2018)

2.5.4 Critério de sobrevivência e durabilidade

Tem como finalidade garantir que o GTN tenha propriedades mecânicas suficientes para resistir às solicitações e danos provocados durante seu manuseio e instalação na obra, além de garantir que o material tenha uma durabilidade compatível com a vida útil para qual a obra foi planejada (PALMEIRA, 2018).

Segundo Vertematti (2004), esses critérios são:

- Resistência a perfurações dinâmicas;
- Energia de deformação absorvida;
- Flexibilidade;
- Resistência à passagem de água;
- Sensibilidade aos solos finos em suspensão;
- Resistência à agressividade do meio ambiente.

2.6 Abertura de filtração

Como a distribuição dos filamentos é aleatória no GTN, o tamanho dos poros é bastante variável. Para fins de dimensionamento, é necessário aproximar essa abertura como sendo um

círculo de diâmetro definido, de modo que é possível traçar uma curva de distribuição dessas dimensões (ASTM D6767/16).

A abertura de filtração, assim como o tamanho da maior partícula capaz de atravessar o geotêxtil, são dados especialmente importantes para o critério de retenção (PALMEIRA & FANNIN, 1998). Apesar da relevância dessas informações, elas são propriedades difíceis de medir. Os valores obtidos experimentalmente são dependentes da técnica de medição, mas nenhuma delas é universalmente aceita (Bhatia & Smith, 1996a).

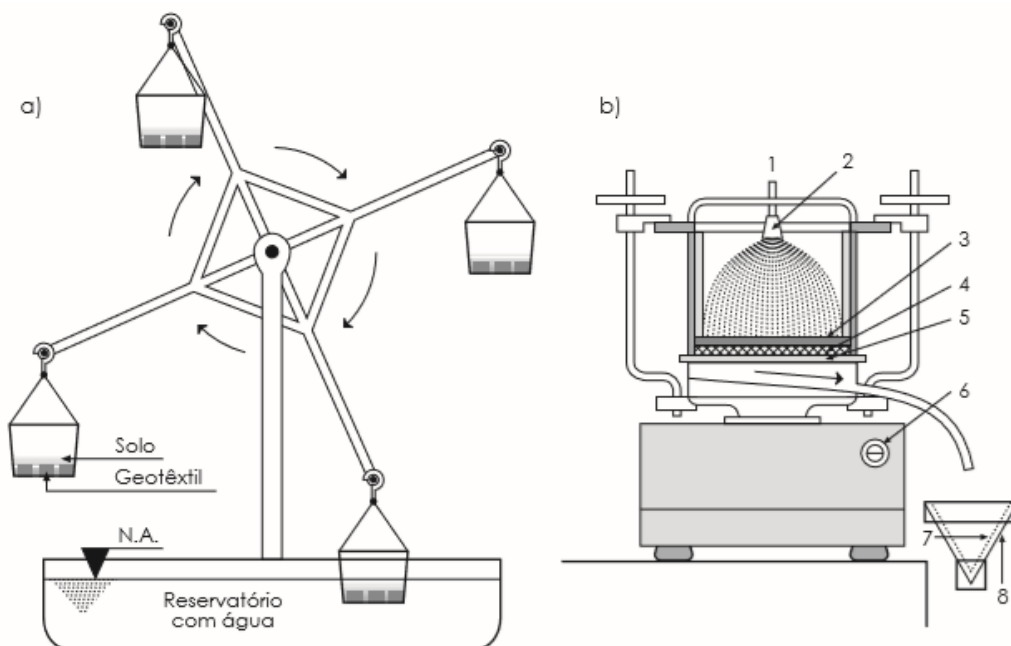
Por ser um valor variável, a abertura de filtração é dada por O_f , onde f é a porcentagem dos poros que são superados em tamanho por tal abertura. Segundo Palmeira e Galvis (2016) valores mais comumente usados nos estudos da área são O_{95} e O_{98} .

Há diversos ensaios aplicados para a obtenção desta informação. Dentre eles, se destacam peneiramento, análise de imagens, intrusão de mercúrio e ensaio de ponto de bolha (BBP), que são descritos a seguir:

2.6.1 Peneiramento

É um método direto que consiste no peneiramento pelo geotêxtil de esferas de vidro ou de areia graduada, ambas com granulometria conhecida. O ensaio pode ser realizado em estado seco, úmido ou hidrodinâmico, mimetizando as condições de fluxo que se estabelecem durante a vida útil do geotêxtil. A Figura 11 mostra os dois modos de realização deste método (1: entrada de água; 2: dispersor; 3: solo padrão; 4: amostra de geotêxtil; 5: tela para suporte do geotêxtil; 6: ajuste de frequência de vibração; 7: papel filtro; 8, funil):

Figura 11: esquematização do ensaio hidrodinâmico (a) e úmido (b) de peneiramento.



Fonte: Vertematti (2004).

2.6.2 Análise de imagens

É uma técnica de medição direta para medir os poros de geotêxtil em sua seção transversal. Nela, a distribuição de poros com espessura superior a 1,5 mm pode ser obtida com auxílio de um analisador de imagens. (BHATIA & SMITH, 1996b).

2.6.3 Intrusão de mercúrio

O método relaciona a pressão necessária para expulsar um fluido não molhante (neste caso, o mercúrio) dos poros de uma amostra de GTN. Essa relação é possível pelo fato do mercúrio não entrar na amostra por ação capilar, permitindo que haja uma relação entre o tamanho dos poros e a pressão aplicada neles para a saída do fluido. (BATHIA & SMITH, 1996b).

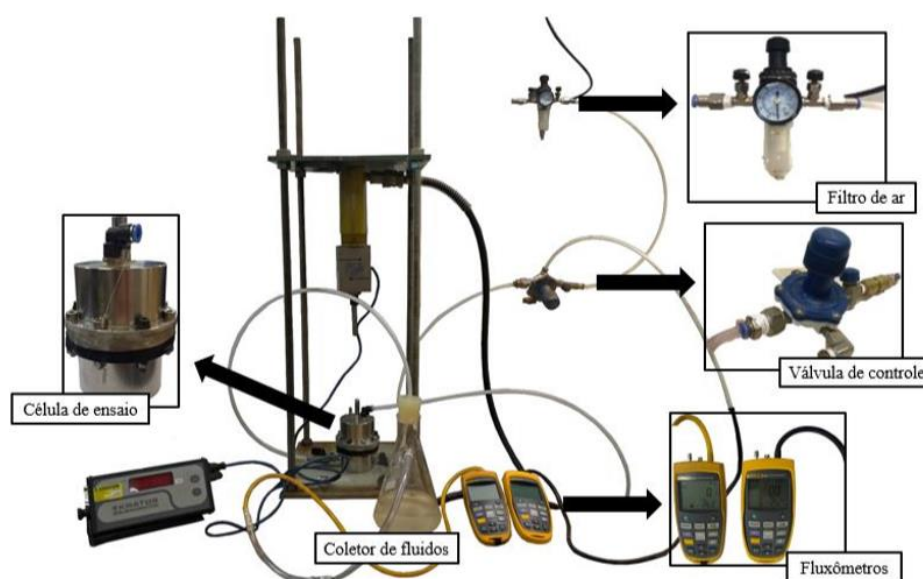
2.6.4 Ensaio de ponto de bolha (BBP)

É baseado na inserção de um líquido que satura rapidamente a amostra de GTN (em oposição à intrusão de mercúrio) através da capilaridade e da tensão superficial do fluido. Uma vez saturada a amostra, um fluxo de ar pressurizado é aplicado para forçar a saída deste fluido dos poros. Esta pressão é dada em função das aberturas de filtração. Este ensaio tem

recomendações de procedimentos e análise de resultados estabelecidos pela norma ASTM D6767/14.

O equipamento no qual foram executados os ensaios de *Bubble Point Test* que forneceram os dados para Silva (2014), Galvis (2016), Moraes Filho (2018), Melo (2018) e Dias (2019) foi desenvolvido na Universidade de Brasília (UnB) onde os trabalhos foram conduzidos e suas peças são mostradas na Figura 12:

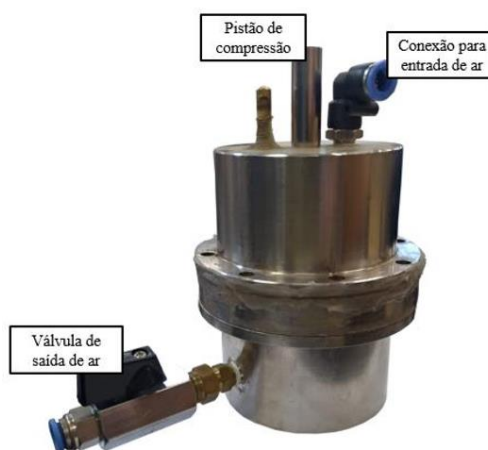
Figura 12: Conjunto de equipamentos do ensaio de ponto de bolha da UnB



Fonte: Dias (2019)

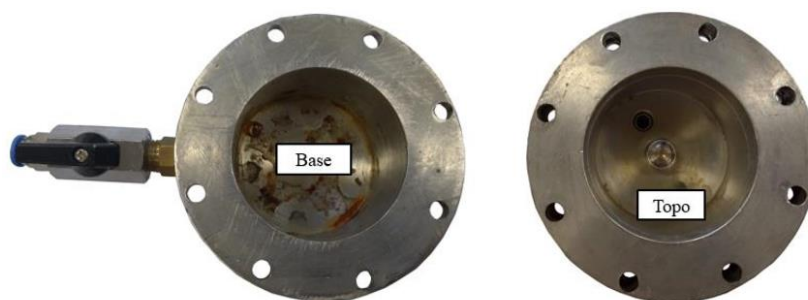
O componente onde ocorre a passagem de ar pelo geotêxtil é a célula, detalhada a seguir nas Figuras 13 e 14:

Figura 13: Vista externa da célula de ensaio



Fonte: Dias (2019)

Figura 14: Vista interna da célula de ensaio

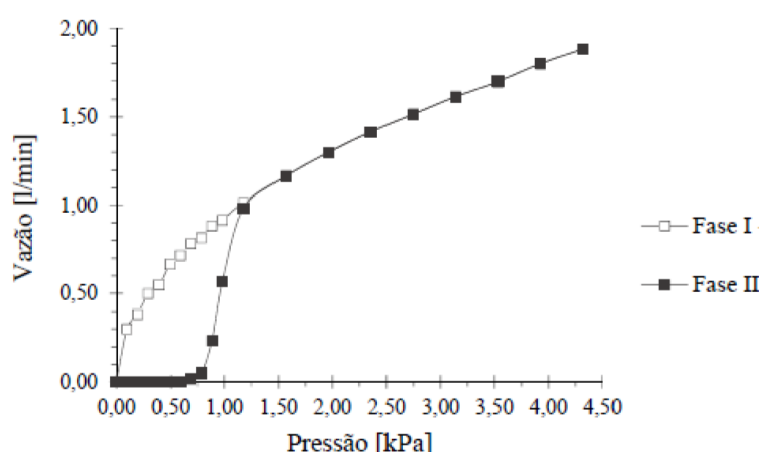


Fonte: Dias (2019)

O ensaio é avaliado como de excelente repetibilidade (BHATIA & SMITH, 1996a) e permite o traçado de uma curva de distribuição do tamanho dos poros da amostra de GTN. Ele é dividido em duas etapas: na primeira, a amostra é submetida em estado seco a um fluxo de ar pressurizado, no qual são registradas pressão e vazão. Na segunda, a amostra é saturada com o fluido utilizado (a ASTM D6767/14 sugere o uso de etanol anidro), no qual são registradas pressão, vazão e temperatura.

Estes procedimentos permitem a obtenção das curvas de vazão de ar de saída *versus* pressão de entrada de ar, exemplificada na Figura 15, na qual a fase I corresponde à etapa seca e a fase II à etapa úmida do teste.

Figura 15: Vazão de ar versus pressão aplicada – Calibração com tela metálica #170



Fonte: Melo, (2018).

ASTM D6767 (2011) descreve como se dá a interpretação dos dados obtidos no experimento: a vazão de ar e a pressão são relacionadas, possibilitando a determinação da área

dos poros. Ao assumir que estes são circulares, é possível determinar o diâmetro de todos eles. A norma traz a fórmula descrita na Equação 1 para descrever a condição de equilíbrio do poro:

$$\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot B \cdot \cos \theta = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot P \quad (1)$$

Sendo:

d = diâmetro do poro (mm);

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

B = constante capilar igual a 0.715;

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

P = pressão (Pa).

Esta equação consiste na igualdade entre a força aplicada ao líquido no poro pelo fluxo de ar (parte à direita) e a força resistiva que surge pelo contato do líquido com as paredes do poro (parte à esquerda). Ao isolar o diâmetro, temos a Equação 2:

$$d = (4 \cdot \sigma \cdot B \cdot \cos \theta) / P \quad (2)$$

Assumindo o ângulo de contato entre o líquido e o poro do material aproximadamente igual a zero, temos a Equação 3:

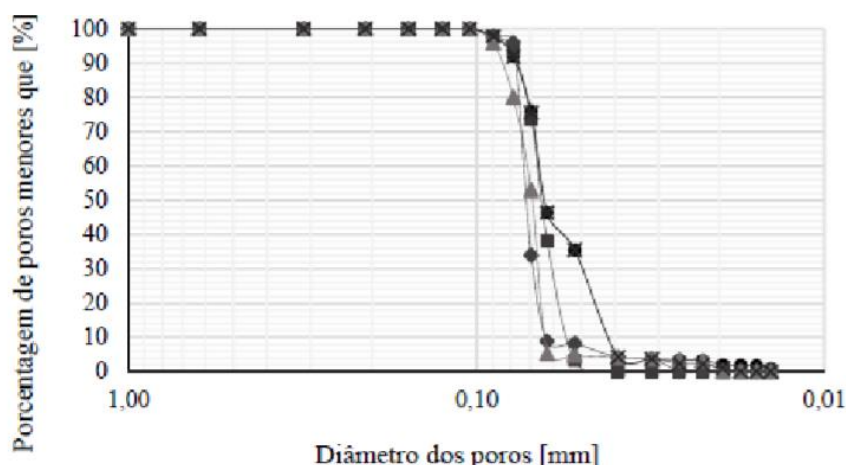
$$d = 4 \cdot \sigma \cdot B / P \quad (3)$$

Realizando a conversão da pressão e acrescentando o valor da constante capilar, temos a Equação 4:

$$d = 2860 \cdot \sigma / P \quad (4)$$

Na Equação 4, pode-se observar que valores de pressão maiores resultam em um tamanho de poro menor. Ao determinar o tamanho dos poros a cada valor de tensão registrado, o BBP fornece a distribuição de poros completa da amostra, como mostrado no exemplo da Figura 16 (MELO, 2018):

Figura 16 Curvas de distribuição de poros de cinco telas metálicas #170



Fonte: Melo, (2018).

Com esse último gráfico, é possível conhecer qualquer valor de abertura com mais precisão, sejam os mais usuais como O_{90} e O_{95} , ou outros como O_{50} e O_{15} , facilitando o processo de dimensionamento independentemente do método escolhido.

2.7 Estudos anteriores

A Universidade de Brasília tem grande relevância nacional em relação aos materiais geossintéticos, desenvolvendo diversos estudos sobre o tema. Muitos deles são focados em aprimorar a determinação da abertura de filtração dos modelos de geotêxtil não tecidos RT 10, RT 16 e RT 31 usando o *Bubble Point Test*, adicionando ao processo situações que serão enfrentadas pelo material durante sua vida útil.

Silva (2014) realizou estudos de natureza experimental que tratam do comportamento da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos de poliéster sob diferentes tensões confinantes. O objetivo foi permitir uma escolha mais adequada de modelo de GTN para cada tipo de solo e tensão submetida. No trabalho, os principais valores foram de 10, 100, 400 e 1000 kPa, e os resultados atestaram que o aumento dessa tensão diminuiu consideravelmente o valor das aberturas.

Trejos Galvis (2016) estudou a influência da colmatação parcial visando tornar as condições ainda mais realistas. Para isso, comparou o desempenho de amostras virgens com amostras impregnadas em vários níveis com microesferas de vidro, ambas sob tensões normais entre 10 kPa e 1000 kPa. Foi observada uma redução de até 38% no tamanho das aberturas de filtração.

Melo (2018) e Moraes Filho (2018) simularam condições de deformação do GTN após sua aplicação devido a movimentações de terra juntamente com o confinamento. Para tal, foram aplicadas deformações de tração de até 20% em um ou nas duas direções. Moraes Filho (2018) constatou que o tracionamento leva a um aumento na abertura de filtração, principalmente quando aplicada em duas direções. Melo (2018) concluiu que, para deformações de até 10%, o tracionamento não precisa ser levado em consideração.

Dias (2019) adicionou ao processo o comportamento do GTN quando aplicado em contato com materiais granulares sub e sobrejacente expostos ao confinamento, utilizando brita com diâmetros entre 9,5 e 1,2 mm. Os modelos RT 10 e RT 31, apresentaram um pico de aumento na abertura durante a aplicação da tensão de 100kPa, provavelmente por conta do rearranjo das britas dentro da célula. O modelo RT 16 apresentou comportamento diferenciado dos outros dois, mas semelhante aos ensaios realizados em estudos anteriores.

2.8 Consequências de falha

Em qualquer tipo de aplicação, o uso do geotêxtil se dá abaixo do nível final do solo após a conclusão da obra. Desse modo, erros na escolha do geotêxtil adequado podem trazer grandes transtornos e que uma possível correção seria trabalhosa e custosa.

É com esse raciocínio que Christopher e Holtz (1985) citam que especialmente para projetos em condições críticas, a possibilidade de falha do sistema de filtragem deve ser uma consideração importante na escolha do GTN apropriado. Nesses casos, coeficientes mais conservadores devem ser usados na concepção do projeto.

Geralmente os gastos com o geotêxtil são os menores entre os componentes do sistema de filtragem, o que pode gerar escolhas precipitadas. Por isso, ainda segundo Christopher e Holtz (1985), o custo não deve ser o único critério para a seleção do geotêxtil, assim como a economia ao pular etapas de análise dos materiais em laboratório não deve ser cogitada.

As consequências de um sobredimensionamento, apesar de não justificarem uma substituição por si só, também são prejudiciais, principalmente para o desenvolvimento do setor. Segundo Vertematti (2014), os custos de elaboração de um sistema filtrante em GTN são menores que um sistema em filtro granular convencional, mas com uma margem considerada pequena pelo autor. Desse modo, a economia gerada pela escolha de um modelo otimizado de GTN para cada obra é essencial para manter a competitividade da tecnologia.

3 METODOLOGIA

3.1 Apresentação do caso estudado

Para aproximar o trabalho de condições reais, foi aplicado o método de Christopher e Holtz (1985) hipoteticamente em um caso real de obra de pavimentação, com algumas adaptações para viabilizar esse processo.

O projeto executivo de pavimentação em questão refere-se a um trecho na divisa entre Pernambuco e Alagoas. Algumas informações sobre o projeto pertinentes ao trabalho estão dispostas a seguir:

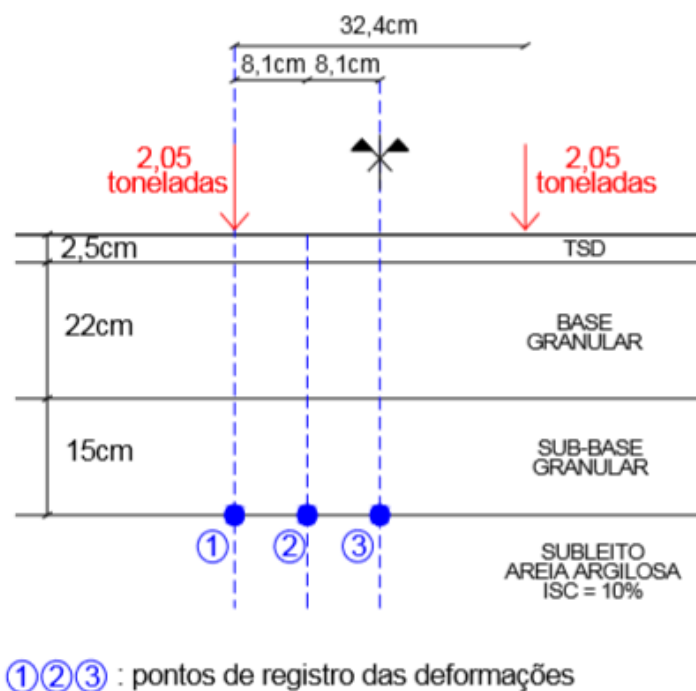
- Rodovia: BR-316/AL;
- Subtrecho: DIV. PE/AL – Canapi – Entr. BR-423/AL (Carié);
- Segmento: Km 37,2 – Km 49,76;
- Extensão: 12,56 km.

Os dados utilizados foram cedidos pela Prof.^a MSc. Aline Calheiros Espíndola, que disponibilizou os Volumes 2 e 3 integrantes do projeto executivo da obra. Esses materiais forneceram dados do projeto de pavimentação, memória de cálculo de tensões e informações geotécnicas do local de execução da obra e das jazidas de empréstimo.

Ao longo do traçado da pista, há trechos em aterro, em corte e mistos, mas o uso do geotêxtil se mantém fixo independentemente do tipo. As camadas pavimento em questão foram dimensionadas considerando um período de projeto de 10 anos. Uma seção transversal em corte é mostrada no Anexo A.

Uma das etapas do dimensionamento do pavimento constituiu-se no cálculo das tensões na interface entre a sub-base e o subleito para fins de estimativa das deformações que o pavimento sofrerá ao longo da vida útil. A tensão atuante sobre as camadas de um pavimento é variável por conta da passagem dos veículos. Para se chegar a um valor intermediário representativo na camada de aplicação da manta (39,5 cm de profundidade), os projetistas utilizaram o programa de análise de tensões e deformações ELSYM5 conforme a configuração mostrada na Figura 17:

Figura 17: Representação de cargas adotadas.



Fonte: DNIT (2017).

O valor encontrado para tensão na camada de aplicação foi de 52,66 kPa.

3.2 Escolha da base de dados dos geotêxteis

Para a escolha dos dados de abertura de filtração, foram analisados cinco trabalhos produzidos na Universidade de Brasília. Cada trabalho trata sobre as influências de diversos fatores sobre as aberturas do GTN (usando os mesmos modelos estudados neste trabalho), como mostrado a seguir: (publicação - fator estudado):

- Silva (2014) - Confinamento;
- Trejos Galvis (2016) - Confinamento e colmatação parcial;
- Melo (2018) - Confinamento e tracionamento;
- Moraes Filho (2018) - Confinamento e tracionamento;
- Dias (2019) – Confinamento em material granular.

O presente trabalho trata do uso de GTN em pavimentação. Neste tipo de aplicação, a tração na malha é considerada pequena. Segundo Melo (2018), baixos valores de tração (que geram deformações inferiores a 10%) são irrelevantes para o uso do GTN como filtro. Além disso, a análise desenvolvida nesse trabalho analisa o dimensionamento por meio de um método

que já aborda o critério de resistência ao entupimento, não sendo necessário usar dados da influência da colmatação parcial.

Com isso, os resultados expostos no trabalho Silva (2014) foram considerados mais adequados para a realidade deste TCC e serviram de base para a concepção dos cálculos. Não se excluiu, porém, a utilização dos demais trabalhos como base teórica e como fonte de informações de cálculo adicionais exigidas pelo método de dimensionamento.

A outra base de dados foi a da própria empresa fabricante do material por meio de um catálogo. A empresa também forneceu dados de custo por metro quadrado de cada modelo de geotêxtil estudado.

3.3 Obtenção de dados do solo

Na situação hipotética abordada, a manta geotêxtil foi instalada entre a sub-base e o subleito do pavimento. Este último é composto pelo solo natural presente no ambiente e tem aspecto areno-argiloso, apresentando a distribuição granulométrica mostrada na Tabela 2, configurando o solo como uma areia argilosa:

Tabela 2: Dados do subleito.

Características Geotécnicas - Valores médios											
Energia de compactação	% passante nas peneiras							ISC (X _{mín})	Exp. (X _{máx})	LL (X _{máx})	IP (X _{máx})
	# 2"	# 3/4"	# 3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200				
P. Intermediário	-	100	93	84	68	36	12	14%	0,28%	NL	NP

Fonte: DNIT (2017).

Por se tratar de um solo predominantemente granular, com greide corrigido e por conta dos cuidados para evitar excesso de escavações, o pavimento não precisou de colchões drenantes na maioria dos trechos. Nos locais em que o mesmo foi adicionado, foi feito um rebaixamento de 40 cm para a aplicação do material granular em substituição ao material de 3ª categoria (DNIT, 2017)

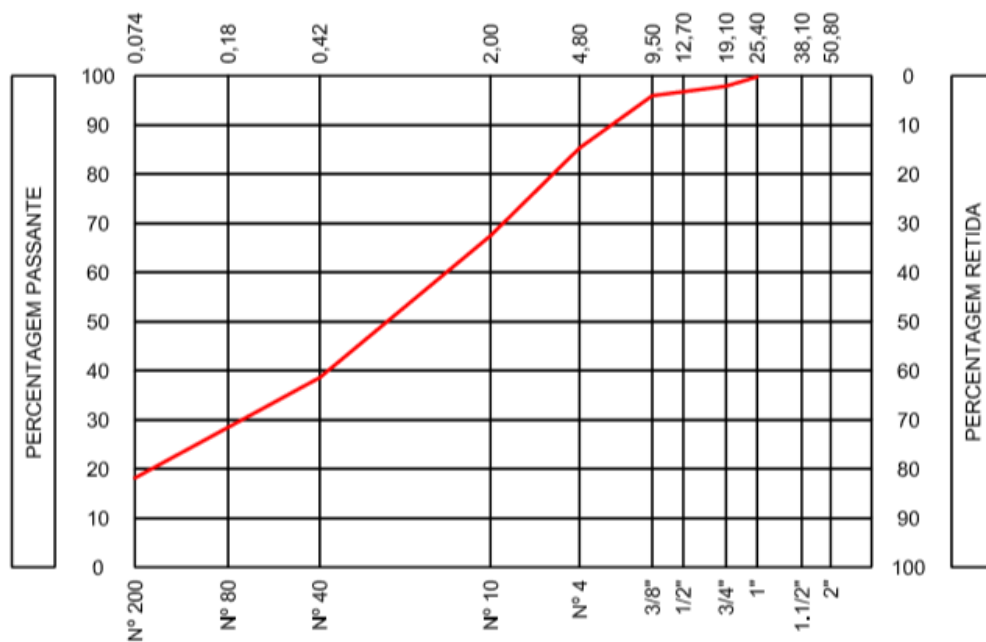
Já o material de sub-base foi retirado de jazidas escolhidas de acordo com as necessidades da camada e as características dos solos disponíveis. Três jazidas foram cogitadas: J5, J7A e J4A, e as duas primeiras foram escolhidas pelos projetistas. A Tabela 3 e as Figuras 18 e 19 indicam as características granulométricas das jazidas escolhidas:

Tabela 3: Dados das jazidas.

Jazida	LL	LP	Granulometria (% passante)							W _{OT} (%)	γ _d MÁX (g/cm³)
			# 2"	# 1"	# 3/8"	# N° 4	# N° 10	# N° 40	# N° 200		
Jazidas para camada de base:											
J8	NL	NP	100	99	90	80	61	36	16	7,2	2,097
J6	NL	NP	100	99	86	73	54	29	16	7,7	2,103
Jazidas para camada de sub-base:											
J5	NL	NP	100	100	97	87	71	51	26	9,9	1,972
J7A	NL	NP	100	100	96	85	67	39	18	8,2	1,987
J4A	NL	NP	100	98	87	78	63	42	22	7,9	2,055

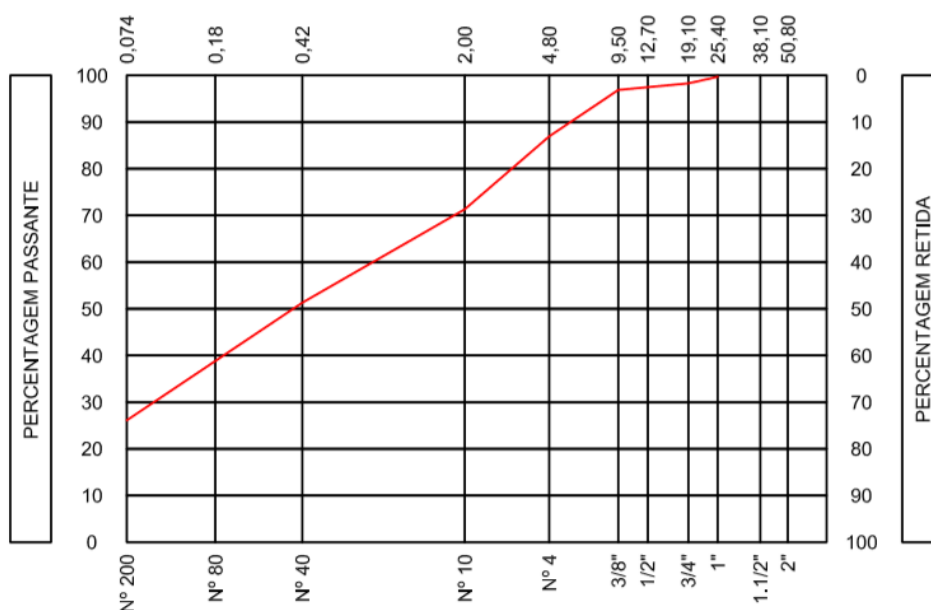
Fonte: DNIT (2017).

Figura 18: Distribuição granulométrica da jazida J7A.



Fonte: DNIT (2017).

Figura 19: Distribuição granulométrica da jazida J5



Fonte: DNIT (2017).

3.4 Descrição do método de dimensionamento

O método de Christopher e Holtz (1985) relaciona dados do GTN e do solo a montante do fluxo para atender aos critérios de dimensionamento. Os seguintes dados são requisitados ou são considerados importantes para outras etapas da análise feita neste trabalho:

3.4.1 Do geotêxtil

A Tabela 4 mostra os dados dos três modelos de GTN que foram estudados neste trabalho:

Tabela 4: Dados dos modelos de GTN disponíveis

Modelo	Permeabilidade K (m/s)	Permissividade ϕ (s ⁻¹)	O ₉₅ (mm)	Espessura nominal (mm)	Gramatura (g)
RT 10	0,30	2,00	0,108	2,9	200
RT 16	0,26	1,50	0,098	3,3	300
RT 31	0,20	0,90	0,088	3,8	500

Fonte: MODIFICADO de SILVA (2014) e BIDIM (2009)

As aberturas de filtração levando em consideração a tensão da camada e os dados de Silva (2014) foram calculadas e são mostradas na sessão de resultados. Os dados das três primeiras colunas foram obtidos com informações da empresa fabricante, os demais foram

obtidos por meio de Silva (2014). A permeabilidade é dada em m/s, a permissividade em s^{-1} , a abertura de filtração (O_{95}) e a espessura nominal (sob uma tensão de 2 kPa) em mm e a gramatura em g.

3.4.2 Do solo

A Tabela 5 mostra os dados do solo das duas jazidas disponíveis para a utilização na obra de pavimentação utilizada:

Tabela 5: Dados das jazidas selecionadas.

Jazida	D ₈₅ (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₁₅ (mm)	D ₁₀ (mm)	Permeabilidade (m/s)
J5	4,397	0,793	0,035	0,026	1,66E-05
J7A	5,227	1,157	0,077	0,057	1,66E-05

Fonte: DNIT (2017).

Os diâmetros D_i (dados em mm) foram calculados por meio de uma aproximação de modelo exponencial com uma correlação superior a 0,99 em ambas as jazidas. O coeficiente de permeabilidade não era mencionado no material com as informações sobre o projeto de pavimentação. Com isso, foi necessário buscar estudos com estimativas que pudessem servir neste caso: Santos *et al.* (2015) concluíram que a permeabilidade pode variar entre 6 a 21 cm/h para solos de textura arenosa. O valor utilizado neste trabalho foi de 6 cm/h ou 1,66E-05 m/s (o que configura a pior situação no intervalo dado) para ambas as jazidas.

3.5 Critérios

A seguir, os principais critérios segundo Christopher e Holtz (1985) são descritos resumidamente. Foi dada ênfase aos critérios de retenção e de resistência ao entupimento por serem mais relacionados à temática do presente trabalho, os de permeabilidade e permissividade foram citados rapidamente, e o de durabilidade foi suprimido por não ser expressamente decisivo nem ter os dados requisitados disponíveis com precisão.

3.5.1 Critério de retenção

Este critério segue a lógica de que aberturas menores serão mais eficientes para impedir a perda de grãos junto com o fluxo de água. Desse modo, ele impõe um valor máximo de abertura que permita a água passar sem carrear essas partículas. A Equação 5 é aplicada:

$$O_{95} < B * D_{85} \quad (5)$$

Onde B é um coeficiente que varia de 0,5 (valor mais conservador, aplicado em condições menos favoráveis) a 2 (valor menos conservador, aplicado em condições mais favoráveis).

Para situações de fluxo dinâmico, B recebe o valor fixo de 0,5 em qualquer tipo solo. Já para situações de fluxo estacionário, há algumas diferenças conforme a granulometria. Para argilas (com mais de 50% passando na peneira de 0,075 mm), B = 1,8. Já para areias (incluindo areias siltsas, argilosas e pedregulhosas com menos de 50% passando na peneira de 0,075 mm), o resultado depende do Coeficiente de Uniformidade (Cu) do solo:

$$Cu \leq 2 \text{ ou } Cu \geq 8 \rightarrow B = 1 \quad (6)$$

$$4 < Cu < 8 \rightarrow B = 8/Cu \quad (7)$$

$$2 \leq Cu \leq 4 \rightarrow B = 0,5 * Cu \quad (8)$$

As cargas pulsantes presentes na rotina de uso do pavimento podem gerar gradientes agressivos, levando a situações de fluxo dinâmico, na qual o B deve ser mais conservador. Segundo Christopher e Holtz (1985), para reverter esse problema, deve haver uma sobrecarga suficiente agindo sobre o GTN. No caso estudado, a carga será de 52,66 KPa aplicados a 39,5 cm de profundidade. Essa carga foi considerada suficiente para a neutralização do efeito *inflow-outflow* nas consultas de orientação e a situação explorada foi considerada de fluxo estacionário.

O critério de retenção presume a existência de solos estáveis internamente, que não vão sofrer o fenômeno de *pipping*. Segundo o método, solos com coeficiente de uniformidade superior a 20 e com concavidade para cima no gráfico de distribuição granulométrica tendem a ser instáveis internamente, e com isso precisam de testes a mais que fogem do escopo do presente trabalho.

Como é possível observar na Figura 18, o solo da jazida J7A apresenta curvatura levemente voltada para cima. Seu coeficiente de uniformidade foi calculado segundo a Equação 9 a seguir:

$$Cu = D_{60}/D_{10} \quad (9)$$

$$Cu = 1,157 / 0,057 \quad (10)$$

$$Cu = 20,298 \quad (11)$$

Já a J5 apresenta curvatura voltada para baixo e coeficiente de uniformidade obtido aplicando novamente a Equação 9:

$$Cu = 0,793 / 0,026 \quad (12)$$

$$Cu = 30,50 \quad (13)$$

Em relação à distribuição granulométrica, ambas as jazidas apresentam curvaturas bastante discretas, o que não foi considerado fator decisivo para caracterização como um solo instável. Já em relação ao Cu, ambas superam o valor limite de 20. Com isso, foi necessário fazer uma pequena adaptação na distribuição granulométrica da jazida J5 para torná-la apta à aplicação do método, enquanto que na J7A o acréscimo em relação ao limite foi considerado irrelevante (novamente aplicando a Equação 9):

$$Cu = 0,520 / 0,026 \quad (14)$$

$$Cu = 20 \quad (15)$$

Deste modo, em ambas será usado o $B = 1$.

3.5.2 Critério de permeabilidade

Para analisar a permeabilidade do solo (K_s) em relação à do modelo de GTN (K_G), é aplicado o Fator de Segurança FS, que é 1 para condições menos críticas e 10 em condições críticas, sendo aplicado à seguinte inequação:

$$K_G \geq FS \times K_s \quad (16)$$

O material em questão não dispunha o valor do coeficiente de permeabilidade do solo, com isso, foram usados valores encontrados em um experimento publicado em artigo com solo de textura parecida com a da jazida em questão. Segundo Santos (2015), esse valor fica entre 6 e 21 cm/h. Foi usado o valor de 21 cm/h (0,005 cm/s), que configura a situação mais desfavorável perante a inequação apresentada pelo método. A permeabilidade K_G dos modelos RT 10, RT 16 e RT 31 são respectivamente de 0,30, 0,26 e 0,20, segundo os dados do fabricante.

3.5.3 Critério de permissividade

- $\phi \geq 0,5$ /s para < 15% passando na peneira de 0,075 mm;
- $\phi \geq 0,2$ /s para 15% a 50% ;
- $\phi \geq 0,1$ /s para > 50%;

A permissividade dos modelos RT 10, RT 16 e RT 31 são respectivamente de 2,00, 1,5 e 0,9, segundo os dados do fabricante.

3.5.4 Critério de resistência ao entupimento

O critério de resistência ao entupimento segue a lógica de que aberturas maiores são menos propensas a serem entupidas durante a formação da ponte de grãos, onde os menores grãos devem passar livremente pela malha até que o pré-filtro esteja formado. Desse modo, ele impõe um valor mínimo de abertura que permita que esses grãos passem inicialmente sem ficarem presos no poro.

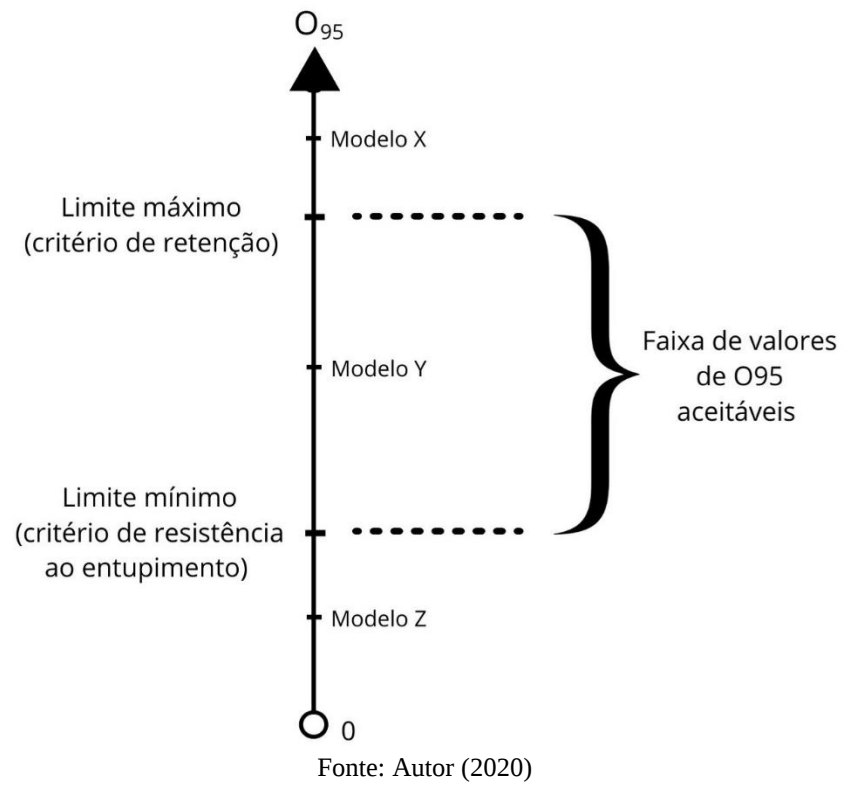
A presente aplicação foi considerada dentro da normalidade, onde o entupimento não é uma ameaça considerável. Nesses casos, o método determina que:

$$O_{95} > 3 * D_{15} \quad (17)$$

3.5.5 Resumo processo de dimensionamento

Pode-se considerar que os critérios de retenção e de resistência ao entupimento são os mais importantes, do ponto de vista da análise proposta neste trabalho (já que os demais são plenamente atendidos). Deste modo, a lógica do processo de dimensionamento sob esses critérios está representada na Figura 20 a seguir, onde foi exemplificada uma situação com três modelos aleatoriamente nomeados X, Y e Z, onde o modelo X tem um tamanho de abertura de filtração maior que o limite máximo, sendo reprovado no critério de retenção; o modelo Z tem um tamanho de abertura de filtração menor que o limite mínimo, sendo reprovado no critério de resistência ao entupimento; e o modelo Y tem um tamanho de abertura de filtração entre os limites máximo e mínimo, sendo aprovado no processo de dimensionamento sob a ótica desses dois critérios:

Figura 20 - Dimensionamento sob os critérios de retenção e resistência ao entupimento



3.6 Etapas de verificação adicionais

Além do caso programado inicialmente, foram feitas mais duas etapas de verificação da hipótese de geração de economia ao se utilizar dados vindos do Bubble Point Test:

3.6.1 Análise comparativa para casos gerais

A primeira teve foco em analisar essa alteração em casos de diversos cenários de tensão e de critério decisivo, a fim de observar as tendências causadas nesse processo.

Para isso, os dados discretos de O_{95} obtidos por Silva (2014) nas tensões de 10, 100, 400 e 1000 kPa foram dispostos em gráfico com aproximação (para observar os dados em uma curva contínua) e em tabela (para observar as discrepâncias de forma percentual).

3.6.2 Caso hipotético adaptado

Uma distribuição granulométrica com características mais adequadas ao problema foi utilizada para repetir a análise de custo da aplicação do GTN pelos dois métodos de obtenção de dados de abertura, a fim de mostrar uma situação em que o efeito de economia é evidenciado. Apenas a granulometria foi alterada, sendo mantidos os demais dados.

4 RESULTADOS

A primeira etapa dos cálculos consistiu na aproximação dos dados de abertura de filtração levando em conta a atuação da tensão confinante na camada de aplicação do GTN. Para isso, os dados de Silva (2014) foram interpolados, chegando aos resultados mostrados na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6: Abertura estimada em mm de cada modelo para a tensão confinante na situação.

Tensão (kPa)	RT 10 (mm)	RT 16 (mm)	RT 31 (mm)
52,66	0,106	0,079	0,062

Fonte: Autor (2020)

Como ilustrado na Figura 19, o critério de retenção fornece um valor máximo aceitável de O_{95} (Equação 1), enquanto o de resistência ao entupimento dá mínimo (Equação 13). As fórmulas de ambos dependem apenas do solo em questão. Com isso, as faixas de valores aceitáveis de O_{95} para cada jazida foram determinadas com os cálculos que seguem:

Aplicando o critério de retenção na jazida J5:

$$O_{95} < 1 * 4,397 \quad (18)$$

$$O_{95} < 4,397 \text{ mm} \quad (19)$$

Aplicando o critério de resistência ao entupimento na jazida J5:

$$O_{95} > 3 * 0,035 \quad (20)$$

$$O_{95} > 0,105 \text{ mm} \quad (21)$$

Aplicando o critério de retenção na jazida J7A:

$$O_{95} < 1 * 5,227 \quad (22)$$

$$O_{95} < 5,227 \text{ mm} \quad (23)$$

Aplicando o critério de resistência ao entupimento na jazida J7A:

$$O_{95} > 3 * 0,077 \quad (24)$$

$$O_{95} > 0,231 \text{ mm} \quad (25)$$

Logo, a faixa de valores para a abertura de filtração na jazida J5 é de 0,105 mm a 4,397 mm; e na J7A vai de 0,231 mm a 5,227 mm. Aplicando esse intervalo aos dados da Tabela 4 (abertura conforme a fabricante) e da Tabela 6 (abertura conforme Silva (2014)), temos nas Tabelas 7, 8, 9 e 10 a seguir a situação de aprovação ou reprovação dos modelos nas jazidas:

Tabela 7: Resultado de cada modelo por critério (J5, fabricante).

	Modelo		
Critério	RT 10	RT 16	RT 31
Retenção	✓	✓	✓
Permeabilidade	✓	✓	✓
Permissividade	✓	✓	✓
Entupimento	✓	✗	✗

Fonte: Autor (2020)

Tabela 8: Resultado de cada modelo por critério (J7A, fabricante).

	Modelo		
Critério	RT 10	RT 16	RT 31
Retenção	✓	✓	✓
Permeabilidade	✓	✓	✓
Permissividade	✓	✓	✓
Entupimento	✗	✗	✗

Fonte: Autor (2020)

Tabela 9: Resultado de cada modelo por critério (J5, BBP).

	Modelo		
Critério	RT 10	RT 16	RT 31
Retenção	✓	✓	✓
Permeabilidade	✓	✓	✓
Permissividade	✓	✓	✓
Entupimento	✓	✗	✗

Fonte: Autor (2020)

Tabela 10: Resultado de cada modelo por critério (J7A, BBP).

	Modelo		
Critério	RT 10	RT 16	RT 31
Retenção	✓	✓	✓
Permeabilidade	✓	✓	✓
Permissividade	✓	✓	✓
Entupimento	✗	✗	✗

Fonte: Autor (2020)

Tanto com os dados do fabricante quanto com os dados oriundos do BBP, nenhum modelo de GTN entre os analisados se adequa às necessidades do solo presente na jazida J7A, visto que nenhum deles atendeu o critério de resistência ao entupimento. Deste modo, a mesma foi excluída das análises.

Na jazida J5, em ambas as fontes de dados, apenas o modelo RT 10 consegue suprir as necessidades do solo em questão, enquanto os outros modelos foram reprovados no critério de resistência ao entupimento.

4.1 Cálculo do orçamento

A fabricante disponibilizou os valores de cada um dos modelos estudados conforme mostrado na Tabela 11:

Tabela 11: Valor de cada modelo por metro quadrado.

Modelo	Valor (R\$/m²)
RT 10	2,60
RT 16	3,40
RT 31	7,36

Fonte: Autor (2020)

A via a ser construída possui uma extensão (E) de 47,76 Km, na qual o GTN será aplicado em sua totalidade. A largura da via na camada onde a manta será aplicada (L) é de 14,99 m, totalizando uma área de 715.922,40 m² de material. O modelo escolhido no dimensionamento foi o RT 10, cujo metro quadrado custa R\$2,60. Na instalação do material há sobreposições nas junções, mas como a área de cada manta é grande (2,3m x 200m), estas foram consideradas desprezíveis.

Com isso, temos as informações suficientes para o cálculo do valor total da aquisição do material:

$$\text{Valor total} = E \times L \times \text{Valor m}^2 \quad (26)$$

$$\text{Valor total} = 47,76 \text{ km} * 1000 \text{ m/km} * 14,99 \text{ m} * 2,60 \text{ R\$/m}^2 \quad (27)$$

$$\text{Valor total} = \text{R\$ } 1.861.398,24 \quad (28)$$

4.1.1 Análise dos resultados

O resultado do dimensionamento aplicado aos solos em questão pelas duas fontes de dados mostrou que nesse caso, a maior acurácia na obtenção da abertura de filtração não influenciou na escolha do modelo de geotêxtil mais econômico.

Foram levantados dois pontos que justificam esse resultado. O primeiro é que apenas três modelos de GTN tiveram os dados necessários para a execução deste trabalho levantados por Silva (2014). Deste modo, não houve uma margem significativa para os modelos competirem em eficácia e economia entre si. Caso houvesse uma quantidade maior de modelos

com esses dados disponíveis, é provável que a cada solo estudado pudesse ser aplicado mais de um modelo, o que permitiria a escolha do mais econômico.

O segundo ponto observado foi o do critério decisivo. Como descrito no capítulo da metodologia, o critério de retenção segue a lógica de que o modelo é mais eficiente quanto menor for a sua abertura de filtração, impondo assim um valor máximo para a mesma. Já o critério de resistência ao entupimento funciona do modo oposto, fornecendo um valor mínimo. Essas duas condições geram uma faixa aceitável de valores de O_{95} .

No caso explorado, ambos os solos são de textura arenosa, com tamanhos elevados de D_{85} (4,39 mm na J5 e 5,23 mm na J7A). Como a inequação do critério de retenção (Equação 5) relaciona esse valor (multiplicado pelo coeficiente $B = 1$) com um valor máximo de O_{95} , o resultado superou significativamente as aberturas dos geotêxteis disponíveis. Desse modo, a diferença de valor da abertura pelo método BBP e pelo fabricante não fez diferença para a escolha do modelo, pois as aberturas de filtração de todos os modelos mostradas na Tabela 6 atenderam o critério em questão com bastante folga.

No critério de resistência ao entupimento, o valor da abertura de filtração se relaciona com o triplo do valor de D_{15} (Equação 4), que deu um resultado próximo aos valores de abertura dos modelos disponíveis, tornando esse o critério decisivo na situação em questão.

O cálculo resultou no valor mínimo de 0,105 mm para a abertura de filtração, que é inferior aos do modelo RT 10 tanto pela fabricante (0,108 mm) quanto pelo método BBP (0,106 mm). Desse modo, o uso dos dados de ambas as fontes aprovou o mesmo modelo.

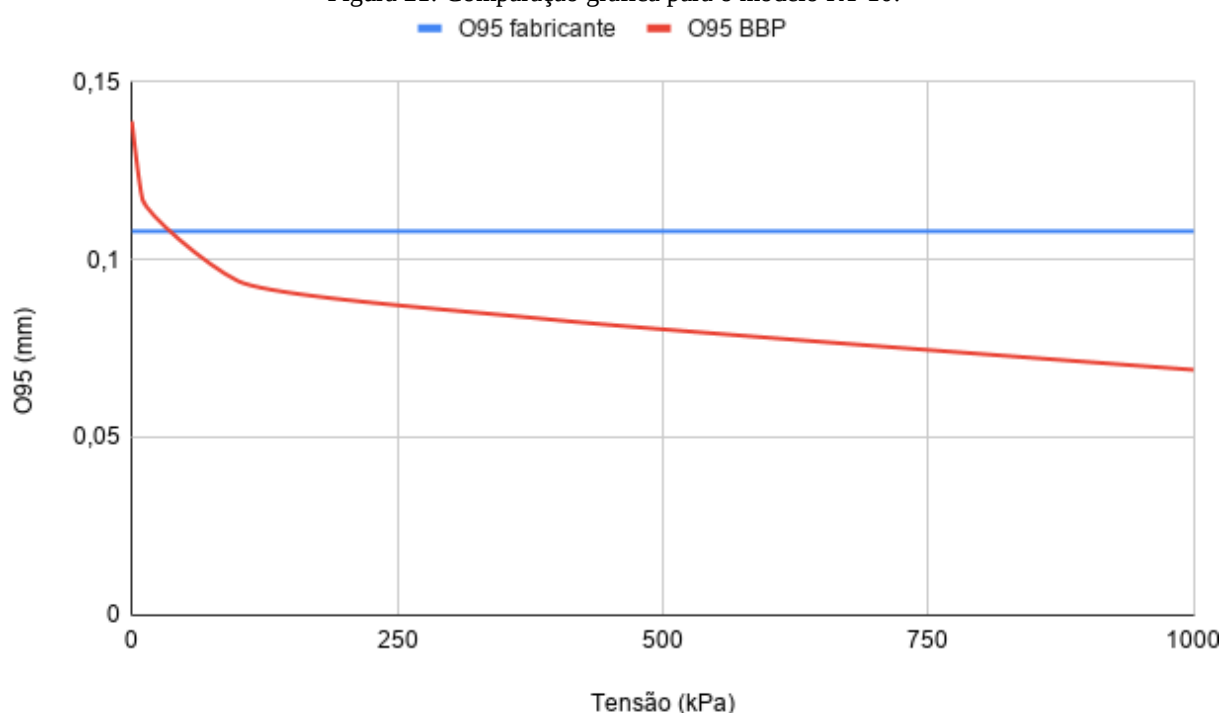
Para que houvesse uma diferença, o valor mínimo dado pelo critério de resistência deveria ser intermediário aos valores das duas fontes, o que levaria a uma reprovação do modelo pelo método do BBP, obrigando a optar por um modelo com abertura maior (de menor gramatura e valor). Além disso, retoma-se o primeiro ponto levantado: dentre os poucos modelos de GTN estudados, não há outro cujo valor de abertura de filtração seja maior que o do RT 10, inviabilizando o surgimento de economia nesse caso.

4.2 Análise comparativa para casos gerais

Mesmo não indicando resultado prático de economia na seção anterior, os valores de O_{95} obtidos por Silva (2014) quando comparados com os dados fornecidos pelo fabricante (que são fixos, sem abordar da influência da tensão) apresentam bastante disparidade.

Visando ampliar a análise para além do caso particular estudado, foi feita a comparação percentual entre os valores provenientes dos dois modos de obtenção de dados em cada modelo de GTN ao longo de uma série de tensões nas Figuras 21, 22 e 23 e nas Tabelas 12, 13 e 14:

Figura 21: Comparação gráfica para o modelo RT 10.



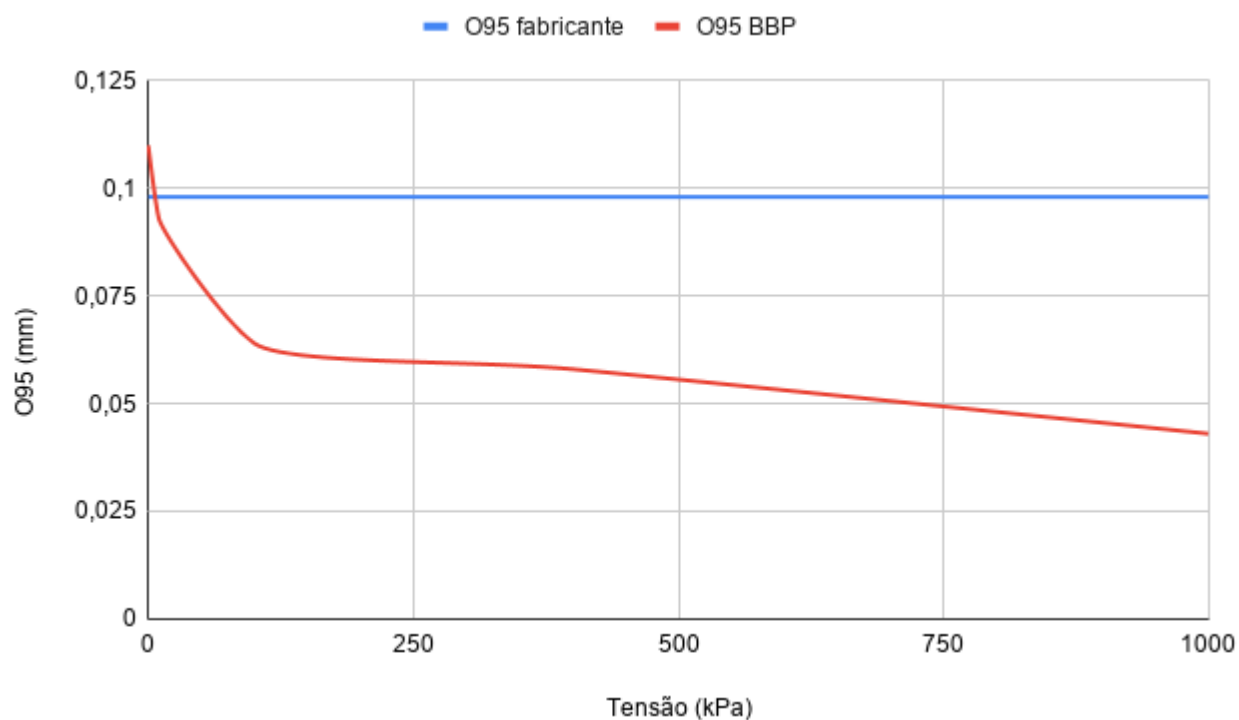
Fonte: MODIFICADO de Silva (2014)

Tabela 12: Comparação percentual para o modelo RT 10.

Tensão (kPa)	O ₉₅ fabricante (mm)	O ₉₅ BBP (mm)	Comparação
0	0,108	0,139	77%
10	0,108	0,117	92%
100	0,108	0,094	114%
400	0,108	0,083	130%
1000	0,108	0,069	156%

Fonte: MODIFICADO de Silva (2014)

Figura 22: Comparação gráfica para o modelo RT 16.



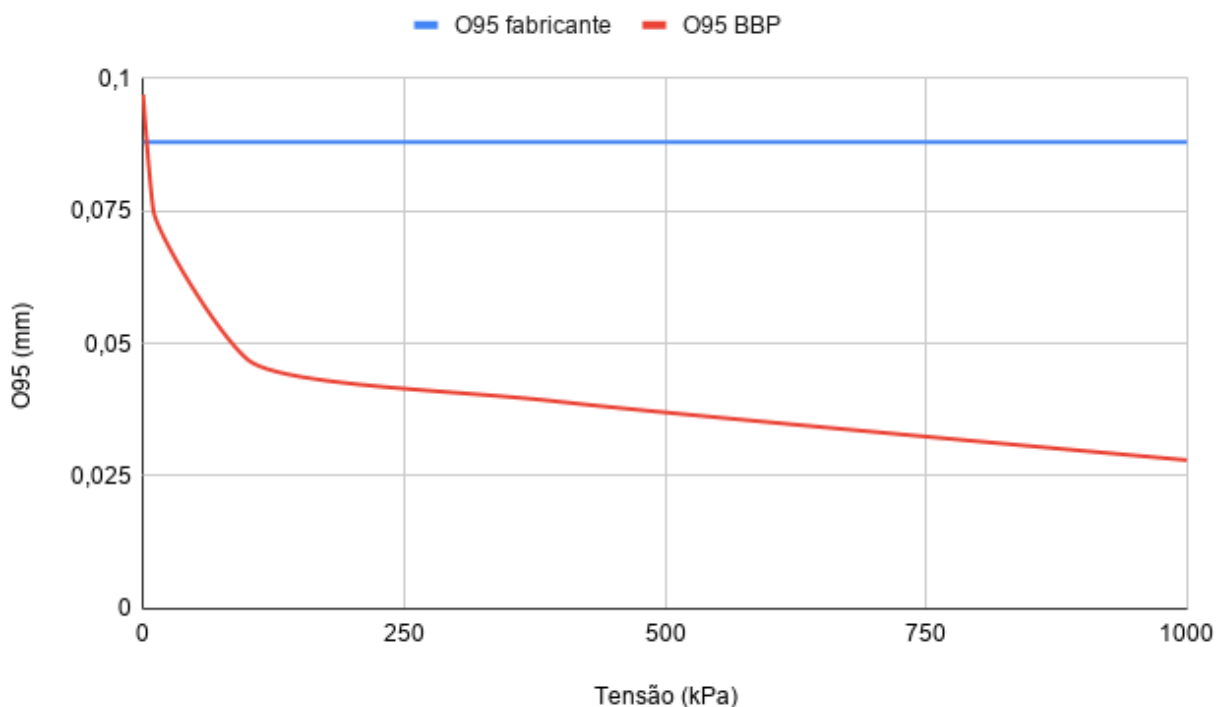
Fonte: MODIFICADO de Silva (2014)

Tabela 13: Comparação percentual para o modelo RT 16.

Tensão (kPa)	O95 fabricante (mm)	O95 BBP (mm)	Comparação
0	0,098	0,110	89%
10	0,098	0,093	105%
100	0,098	0,064	152%
400	0,098	0,058	168%
1000	0,098	0,043	227%

Fonte: MODIFICADO de Silva (2014)

Figura 23: Comparação gráfica para o modelo RT 31.



Fonte: MODIFICADO de Silva (2014)

Tabela 14: Comparação percentual para o modelo RT 31

Tensão (kPa)	O95 fabricante (mm)	O95 BBP (mm)	Comparação
0	0,088	0,097	90%
10	0,088	0,075	117%
100	0,088	0,047	186%
400	0,088	0,039	224%
1000	0,088	0,028	313%

Fonte: MODIFICADO de Silva (2014)

A coincidência das duas fontes de dados ocorreu em aproximadamente 10 kPa. A divergência nos valores afastados deste foi bastante significativa, principalmente em tensões mais elevadas, nas quais os valores via BBP são menores que os da fabricante.

Nessas tensões, a própria sobrecarga é capaz de tornar os poros mais finos, aumentando a eficiência no critério de retenção. Assim, o uso dos dados da fabricante tende a gerar um sobredimensionamento na escolha do modelo de GTN quando este critério é decisivo, e a substituição pelos dados via BBP permite a escolha de modelos de menor gramatura e consequentemente, menor valor.

Já para tensões abaixo da coincidência citada (ainda tendo o critério de retenção como decisivo), os valores obtidos via BBP são maiores que os fornecidos pela fabricante. Com isso,

os poros permitem a passagem de mais partículas junto com o fluxo de água, o que implica numa tendência de tornar o sistema filtrante subdimensionado. Desse modo, os dados via BBP direcionam para a escolha de modelos de maior gramatura (e maior preço), porém mais seguros.

No critério de resistência ao entupimento, também surgem mudanças: para tensões abaixo da coincidência, o valor de abertura fornecido pela fabricante é menor que o real. Como este critério impõe um valor mínimo de abertura, usar os dados mais precisos do BBP pode levar mais modelos para a faixa aceitável, mas estes serão mais caros e provavelmente não serão escolhidos. Pode-se então considerar que nessa condição, a influência será neutra.

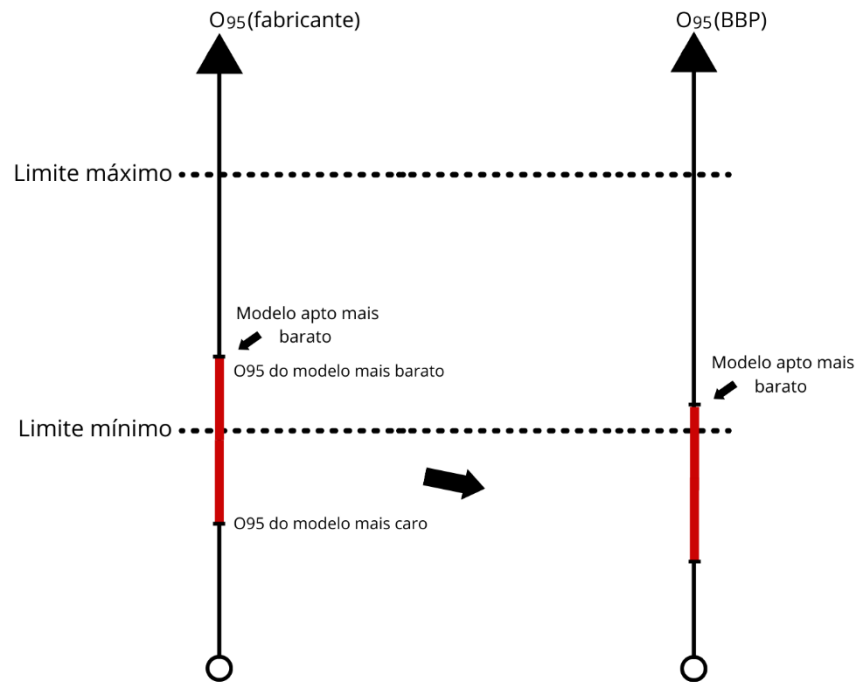
Já para tensões maiores, o valor de abertura fornecido pela fabricante é maior que o real. Com isso, usar os dados da fabricante pode gerar um subdimensionamento, permitindo o uso de modelos com abertura menor que o ideal. Desse modo, o uso dos dados via BBP dá mais segurança à aplicação ao excluir do leque modelos que estavam erroneamente classificados como aptos ao usar os dados da fabricante.

O uso dos dados via BBP mostra ser recomendável nesses quatro cenários, gerando escolhas mais econômicas, seguras ou amplas. Em resumo, as tendências em cada cenário são as seguintes:

1. Tensão abaixo da coincidência e critério de retenção como decisivo:
 - a. Maior custo de aquisição e exclusão de modelos indevidos.
2. Tensão abaixo da coincidência e critério de resistência ao entupimento como decisivo:
 - a. Mesmo custo de aquisição e aumento no número de modelos aptos.
3. Tensão acima da coincidência e critério de retenção como decisivo:
 - a. Menor custo de aquisição e aumento no número de modelos aptos.
4. Tensão acima da coincidência e critério de resistência ao entupimento como decisivo:
 - a. Mesmo custo de aquisição e exclusão de modelos indevidos.

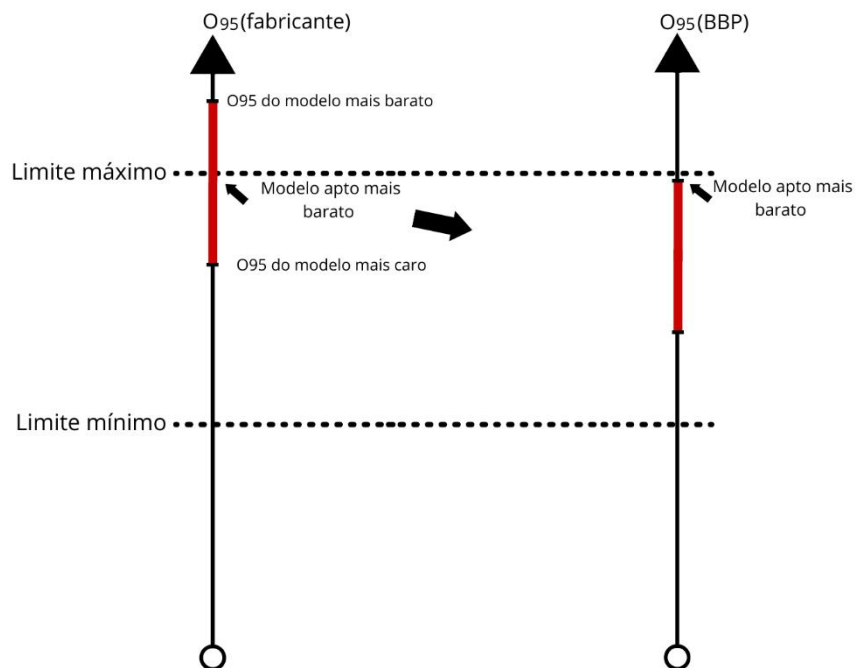
A lógica dessas tendências para cenários de tensões maiores que as de coincidência, como a que ocorre no caso estudado, pode ser constatada visualmente nas Figuras 24 e 25. Elas seguem o modelo da Figura 20, adicionando uma barra vermelha para demonstrar a faixa de valores de abertura de filtração e seu deslocamento no gráfico quando a tensão é alterada:

Figura 24: Tensão acima da coincidência com critério de resistência ao entupimento como decisivo.



Fonte: Autor (2020)

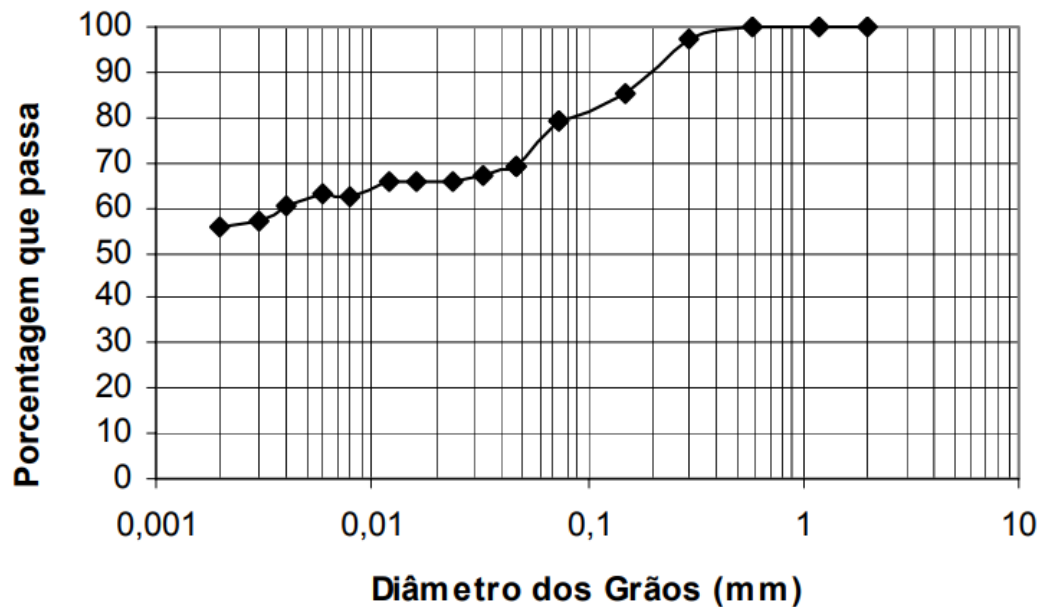
Figura 25: Tensão acima da coincidência com critério de retenção como decisivo.



4.3 Caso hipotético adaptado

Uma das causas apontadas para a não efetividade foi o alto valor de D_{85} . Na Figura 26 está representado um exemplo de granulometria conveniente para observar melhor o efeito positivo do uso de dados do BBP:

Figura 26: Distribuição granulométrica de um solo argiloso.



Fonte: Santos (2003)

O solo em questão possui D_{85} aproximado de 0,18 mm e o fluxo do caso em questão será alterado para dinâmico. Nessa condição, o método sugere $B = 0,5$. Foi considerada a mesma tensão do caso original. Desse modo, ao aplicar a Equação 1, temos que:

$$O_{95} = 0,5 * 0,18 \quad (29)$$

$$O_{95} = 0,09 \text{ mm} \quad (30)$$

A informação sobre o D_{15} , necessária para o cálculo do critério de resistência ao entupimento, não está disponível na distribuição. Porém, como este é um solo mais fino, podemos presumir que o valor dessa variável é menor que no caso principal estudado. Logo, todos os modelos são aprovados nesse critério.

Nesse novo cenário, os resultados de aprovação ou reprovação dos modelos está representado nas Tabelas 15 e 16:

Tabela 15: Resultado de cada modelo por critério (J5, fabricante).

Critério	Modelo		
	RT 10	RT 16	RT 31
Retenção	✗	✗	✓
Permeabilidade	✓	✓	✓
Permissividade	✓	✓	✓
Entupimento	✓	✓	✓

Fonte: Autor (2020)

Tabela 16: Resultado de cada modelo por critério (J5, BBP).

Critério	Modelo		
	RT 10	RT 16	RT 31
Retenção	✗	✓	✓
Permeabilidade	✓	✓	✓
Permissividade	✓	✓	✓
Entupimento	✓	✓	✓

Fonte: Autor (2020)

O valor máximo de abertura dado pelo critério de retenção foi intermediário aos valores de abertura dado pelas duas fontes, o que reverteu a reprovação do RT 16 (usando a informação dada pela fabricante) em sua aprovação ao usar o dado via BBP. Nesse caso, podemos observar que o critério decisivo foi o de retenção e a tensão é superior à de coincidência, um cenário em que o uso dos dados via BBP favorece a economia (vide Tabela 14).

Confrontando a Tabela 10 com as Tabelas 16 e 17 (acima), podemos notar que usando os dados da fabricante, o modelo mais barato que passou em todos os critérios foi o RT 31, cujo m² custa R\$7,36, totalizando R\$ 5.269.188,86 (cálculo similar ao feito no exemplo original, alterando apenas o valor do m²).

Já usando os dados obtidos via BBP, o modelo mais econômico aprovado foi o RT 16, cujo m² custa R\$3,40, totalizando R\$ 2.425.981,60. Como esperado, o uso dos dados mais precisos e seguros gerou uma economia, que por sua vez totalizou R\$2.843.207,26, 53,9% do valor quando o dado de abertura fornecido pela empresa foi usado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os geotêxteis não tecidos vêm se destacando em aplicações de filtração em diversas obras, e seu processo de dimensionamento está passando por adaptações em algumas etapas para torná-lo ainda mais eficiente. Uma delas é a de obtenção da abertura de filtração, que tem reflexos importantes em todo o processo. O ensaio de ponto de bolha está sendo estudado como fonte dessa informação e mostra acurácia superior às fontes convencionais.

Visando encorajar o uso desses dados, foi feita neste trabalho uma comparação financeira entre o dimensionamento pelo mesmo método usando as duas fontes diferentes, no qual foram levantados os custos para a aplicação deste material como componente do sistema filtrante em uma obra hipotética baseada em um caso real. O caso analisado não evidenciou a possibilidade de gerar uma economia na escolha do material, e foram levantados dois motivos para tal: O critério decisivo para escolha do modelo foi o de resistência ao entupimento e não o de retenção, que por suas características, gera melhores resultados no quesito economia. Além disso, foi levantado o fato de que apenas três modelos têm disponíveis os dados necessários para o estudo, o que levou a uma baixa competição entre os mesmos.

Para melhor visualizar a vantagem do uso desses dados, foi feita uma comparação entre as duas fontes para tensões diferentes da estudada no caso principal. Foram observadas diferenças significativas, chegando até 313% na tensão de 1000 kPa.

Com essa comparação, foram analisados os quatro cenários possíveis mesclando o critério decisivo (retenção ou resistência ao entupimento) e a tensão (abaixo ou acima da coincidência) quanto à influência que os mesmos trazem ao processo de dimensionamento quando se usa os dados via BBP. As influências foram de aumento de segurança, geração de economia ou aumento do leque de modelos aptos, todas positivas para o processo. Isso mostra que o uso do BBP como fonte de dados de abertura de filtração é mais vantajoso que o dado fixo usado atualmente.

Por fim, para expor um caso em que o uso dessa fonte de dados gera economia, foi feita uma nova análise simplificada alterando a distribuição granulométrica do solo e as condições de fluxo e mantendo as demais características do caso hipotético abordado. Nessa adaptação, o uso dos dados de abertura via BBP gerou uma mudança no modelo de GTN escolhido, que resultou numa economia de R\$2.843.207,26 (53,9%) na aquisição do produto.

Em geral, essa adoção tende a ocasionar a escolha de modelos de menor gramatura e mais baratos pelo cliente. Para compensar a perda de receita, a empresa fabricante pode revisar

sua tabela de preços, de modo a encontrar valores equilibrados: mais atraentes para o cliente e rentáveis para a mesma.

Os métodos de dimensionamento foram concebidos empiricamente para receberem dados de aberturas obtidos por meios menos precisos, o que os torna mais conservadores por consequência. Com isso, é de grande valia o estudo para o aperfeiçoamento dos mesmos em trabalhos posteriores.

A principal dificuldade encontrada na metodologia deste trabalho foi a já citada baixa quantidade de modelos de GTN com a influência da tensão na abertura de filtração documentada em experimentos. Com isso, recomenda-se também o levantamento dessas informações em mais estudos como forma de melhoria no processo de dimensionamento de forma ampla.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6767/16**. Standard test method for pore size characteristics of geotextiles by capillary flow test. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 6 p.

BHATIA, S. K.; SMITH, J. L. (1996a). Geotextile characterization and pore-size distribution: part I. A Review of Manufacturing Processes. **Geosynthetics International**, St. Paul, Minnesota 55101, USA. v. 3, n. 1, p. 86–166. Jan. 1996.

BHATIA, S. K.; SMITH, J. L. (1996b) Geotextile characterization and pore-size distribution: part. II. A Review of Test Methods and Results. **Geosynthetics International**, St. Paul, Minnesota 55101, USA. v. 3, n. 2, p. 170. Abr. 1996.

DIAS, A. B. A. N. **Aberturas de filtração de geotêxteis confinados sobre material granular com uso do ensaio de ponto de bolha**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019. 75 f.

DNIT - **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. Superintendência Regional do Estado de Alagoas. Ministério dos Transportes. Alagoas, 2017, v. 2 e 3.

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA GEOTÊXTIL BIDIM. São José dos Campos – SP. **BIDIM**, 2009.

GALVIS, H. L. T. (2016) **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento e parcialmente colmatados**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016. 142 f.

MELO, D. L. A. **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob diferentes esforços solicitantes**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. 80 f.

MORAES FILHO, I. P. **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob diferentes condições de solicitação mecânica**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. 122 f.

PALMEIRA, E. M.. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente.**, São Paulo: Oficina de Textos, 2018. 294 p. Cap. 4. p. 3-90.

PALMEIRA, E. M.; FANNIN, R. J. (1998) A methodology for the evaluation of geotextile pore opening sizes under confining pressure. **Geosynthetics International**, Roseville, Minnesota 55113-4061, USA. v. 5, n. 3, p. 348. Jan. 1998.

PALMEIRA, E. M.; TREJOS GALVIS, H. L. (2016). Opening sizes and filtration behavior of nonwoven geotextiles under confined and partial clogging conditions. **Geosynthetics International**, P. 3. Ago. 2016.

RIPPEL, M M; BRAGANÇA, F. C. Borracha natural e nanocompósitos com argila. **Química Nova**, São Paulo - SP, v. 32, n. 3, 2009. DOI 10.1590/S0100-40422009000300024. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422009000300024&script=sci_arttext>. Acesso em: 11 Mar. 2020.

SANTOS, A. et al. Coeficiente de permeabilidade para fluídos em meio saturado (Ks): estimativa através de colunas de fluxo e potencial matricial variável. **Ambiência**, Guarapuava - PR, v. 12, n. 2, p. 599 - 613, 6 Nov. 2015. DOI 10.5935/ambiencia.2016.02.06. Disponível em: <<https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/download/3407/pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2020.

SANTOS, A. G. **Estudo do comportamento resiliente de três solos da região de campo grande-ms e de relações entre o módulo de resiliência e resultados de ensaios de compressão simples**. Orientador: Prof. Dr. Alexandre Benetti Parreira. Dissertação (Mestrado, Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2003, 140 p. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-06102009-093939/publico/4.pdf>>. Acesso em: 11 Mar. 2020.

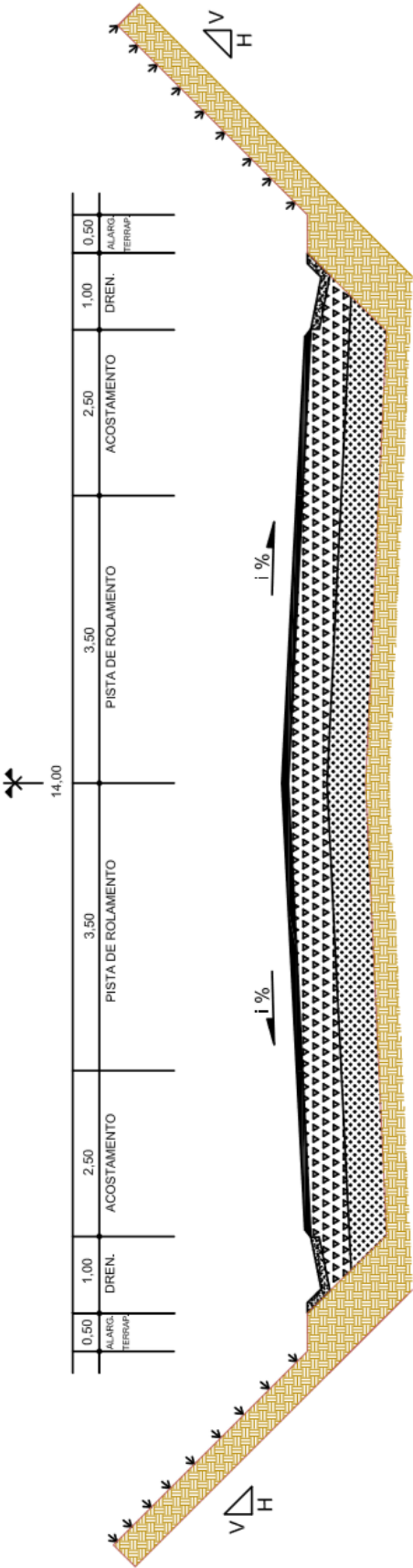
SILVA, A. M. **Abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. 129 f.

UTILIZAÇÃO DO GEOTÊXTIL BIDIM EM DRENAGEM DE PAVIMENTO. São José dos Campos – SP. **BIDIM**, 1991.

VERTEMATTI, J. C. **Manual brasileiro de geossintéticos**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2004. 413 p. Cap. 3 e 5. p. 43-181.

ANEXO A – Geometria em corte da via abordada no trabalho.

SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO I - SEÇÃO EM CORTE



Fonte: DNIT (2017).