

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

**GEOTÊXTIL COMO ELEMENTO DE SEPARAÇÃO EM PAVIMENTO  
FERROVIÁRIO**

**LUIZA NICOLATO**

**ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.**

**COORIENTADORA: MARIA DAS GRAÇAS GARDONI ALMEIDA, DSc.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-323/19**

**BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO/2019**

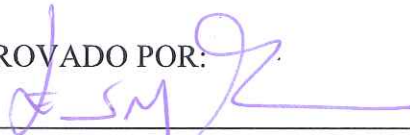
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**GEOTÊXTIL COMO ELEMENTO DE SEPARAÇÃO EM PAVIMENTO  
FERROVIÁRIO**

**LUIZA NICOLATO**

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

APROVADO POR:



Prof. Ennio Marques Palmeira, Ph.D. (UnB)

(ORIENTADOR)



Prof. Maria das Graças Gardoni Almeida, D.Sc. (UFMG)

(COORIENTADORA)



Prof. Luis Fernando Martins Ribeiro, D.Sc. (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)



Prof. Ivonne Alejandra Maria Gutiérrez Góngora, D.Sc. (Universidade Católica de Brasília)

(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 20/02/2019

## FICHA CATALOGRÁFICA

NICOLATO, LUIZA

Geotêxtil como elemento de separação em pavimento ferroviário [Distrito Federal] 2019  
xviii, 99 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2019)

- |                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| 1. Geossintéticos        | 2. Geotêxtil não tecido   |
| 3. Pavimento Ferroviário | 4. Separação de materiais |

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Nicolato, L. (2019). Geotêxtil como elemento de separação em pavimento ferroviário. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-323/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100 p.

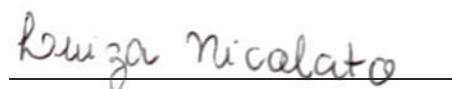
## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Luiza Nicolato

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Geotêxtil como elemento de separação em pavimento ferroviário.

GRAU / ANO: Mestre / 2019

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



Luiza Nicolato

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia. Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Prédio SG-12, Universidade de Brasília. CEP 70910-900 – Brasília, DF – Brasil.

nicolatol09@gmail.com

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais,  
com todo meu amor e gratidão.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar saúde e sempre abençoar o meu caminho colocando pessoas maravilhosas ao meu lado;

Aos meus pais, por todo amor e apoio de sempre. É impossível expressar com palavras minha gratidão e amor por vocês;

Ao meu orientador, Prof. Ennio Marques Palmeira, agradeço por toda dedicação, todos os ensinamentos e disponibilidade. É uma honra trabalhar com o senhor;

À minha coorientadora, Prof. Maria das Graças Gardoni, quem tanto me incentivou a fazer o mestrado, agradeço por me acompanhar desde o período da graduação;

Ao meu namorado, David, por me apoiar e ajudar diretamente nos ensaios. Obrigada por seu companheirismo e por compreender minha ausência durante os períodos mais intensos dedicados a este trabalho;

As amigas Daniela Toro e Virginie Queiroz, pelas inúmeras horas de estudos, as noites de vinho, as risadas e toda parceria durante os momentos mais difíceis do mestrado;

Aos amigos de todas as horas, Kathy e Mateus, obrigada por todo incentivo, por estarem sempre disponíveis em ajudar, pelas noites no Moranguinho e tantos outros momentos de alegria que passamos juntos. Em especial, agradeço enormemente ao apoio direto da Kathy nos ensaios e nos momentos finais desta dissertação;

A toda equipe do laboratório, muito obrigada! Em especial agradeço a Débora por sempre me ajudar com tudo o que precisei, tanto diretamente no laboratório como pensando nos procedimentos e discutindo os resultados. A Ana Carolina por estar sempre disponível e ter contribuído desde o início dos ensaios. Ao Michael pela ajuda na calibração dos piezômetros e pelo companheirismo. Ao Chan, agradeço por sempre emprestar os materiais, pela ajuda com os piezômetros e as palavras de apoio. E aos técnicos do laboratório, Rogério e Saimo, expressei os meus agradecimentos por toda ajuda;

Aos engenheiros Leonardo Rezende e Eduardo Vaz por estarem sempre disponíveis em sanar minhas dúvidas quantos aos projetos ferroviários;

À amiga Fernanda Taysa que mesmo longe, sempre me deu todo apoio e torceu pela minha conquista;

Às empresas Ober, MPE Engenharia e Metrô-DF pelo apoio à pesquisa;

Ao CNPQ pelo apoio financeiro;

Por fim, agradeço à Universidade de Brasília (UnB) e a todos do programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

## RESUMO

Por apresentar dimensões continentais e produzir grandes quantidades de commodities que necessitam ser escoadas, o modal ferroviário é indispensável para atender as demandas internas e externas do Brasil. Os serviços de manutenção são os responsáveis pela maior parte dos gastos durante o ciclo de vida de uma ferrovia. Dentre os materiais utilizados para aumentar a vida útil e reduzir as manutenções em pavimentos ferroviários, podem-se destacar os geossintéticos, em especial o geotêxtil não tecido. A inserção de um geotêxtil no pavimento ferroviário visa, simultaneamente, separar os materiais, reter as partículas e escoar a água. Assim, tem-se uma menor contaminação do lastro com os finos do subleito. Essa dissertação apresenta testes laboratoriais realizados com geotêxteis não tecidos com gramaturas de 400, 700 e 900 g/m<sup>2</sup>, inseridos entre um material granular e um solo fino em duas condições de compactação (umidade ótima e 3% acima da ótima). Para simular o tráfego ferroviário foi aplicado carregamento cíclico com frequência de 1 Hz por meio de um sistema hidráulico. Foram realizadas medições de deslocamentos e poropressões durante a fase de carregamento. Após os ensaios cíclicos, foram avaliados os danos mecânicos no geotêxtil, quebra dos grãos da camada granular, impregnação dos geotêxteis e da camada de lastro, além da penetração dos grãos de brita no solo. Os resultados obtidos evidenciaram a eficácia do geotêxtil não tecido de 400 g/m<sup>2</sup> e 700 g/m<sup>2</sup> como elemento de separação, evitando a contaminação do material granular, diminuindo os deslocamentos e estabilizando mais rapidamente as poropressões nos ensaios cujo solo do subleito foi compactado com umidade ótima. Para essa condição de ensaio, utilizando o geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup>, foram registrados maiores valores de poropressão, o que pode ter sido ocasionado pela retenção de partículas finas na face (cegamento) e no interior do espécime, ou seja, colmatação. Nos ensaios com solo do subleito compactado com umidade maior, teve-se maiores deslocamentos no ensaio com geotêxtil, o que pode ter ocorrido devido a maior permeabilidade desse material frente ao solo, levando ao aceleração do adensamento do solo do subleito. De forma geral, os geotêxteis não sofreram maiores danos com o carregamento, não tendo sido observados furos ou rasgos nos espécimes, porém a resistência à tração máxima diminuiu quando comparada às amostras ensaiadas no estado virgem. A quebra dos grãos, apesar de pequena devido à boa qualidade da brita, foi menor nos ensaios com a presença do elemento de separação. Quanto à impregnação dos geotêxteis, essa foi maior no ensaio com solo menos compacto e nos geotêxteis de menores gramaturas. Foi observado que a impregnação do lastro diminuiu com o aumento da gramatura dos geotêxteis, uma vez que quanto maior a gramatura, maior a capacidade de retenção do solo pelo espécime. Para todos

os ensaios os geotêxteis se mostraram eficientes na redução da penetração dos grãos de brita no solo de subleito.



## ABSTRACT

Brazil is a continental-sized country that has large commodity production and distribution. So, a well-established railway system is indispensable in order to meet internal and foreign demands. Maintenance services constitute the major component of a railway life cycle cost. Geosynthetics, especially non-woven geotextiles, can be used to increase railway life cycle and thus reduce maintenance expenditures. For instance, a non-woven geotextile can be inserted in a rail infrastructure to simultaneously separate material layers, retain fine particles, and also for drainage purposes. Therefore, fine particles from sub-grade layers are prevented to contaminate the ballast. This work presents a series of laboratorial tests performed on 400, 700 and 900 g/m<sup>2</sup> mass per unit area non-woven geotextiles previously placed between a fine soil layer and a granular layer. The fine soil layer was compacted under two moisture contents (optimum moisture content and 3% above optimum). A hydraulic system was utilized to apply a 1 Hz cyclic load and simulate the railway traffic. Displacement and pore pressure were measured during the loading stages. Several features were evaluated once the cyclic loading phase was completed, such as geotextile mechanical damage, ballast particles breakage, geotextile and ballast layer impregnation by fine particles, and penetration of ballast particles into the fine soil layer. Regarding the fine soil layer compacted at optimum moisture content, results obtained demonstrated the 400 g/m<sup>2</sup> and 700 g/m<sup>2</sup> non-woven geotextiles efficiency as separators, which avoided ballast layer contamination, reduced displacements and accelerated pore pressure stabilization. Blinding of the 900 m/g<sup>2</sup> mass per unit area non-woven geotextile samples may explain the greater pore pressure values registered under the same condition. Higher displacement values were measured in the tests performed when the fine-soil layer (sub-grade) was compacted with a higher moisture content. The geotextile is more permeable when compared to the fine soil layer, accelerating consolidation of the latter. Generally, the geotextiles did not suffer any significant damages and the specimens presented no tearing or puncturing after testing. However, tensile strength decreased when compared to tests performed on virgin specimens. It was observed less particle breakage when geotextiles were used as separation elements, even though granular material breakage was in general small due to its good quality. Geotextiles became more impregnated after testing with the less compacted subgrade soil and for smaller mass per unit area specimens. The granular material impregnation showed an inverse relation to geotextile mass per unit area, since bigger mass per unit area geotextiles presented better retention capability. Geotextiles proved to be efficient on preventing granular particle penetration on the subgrade soil layer in all tests performed.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	MOTIVAÇÃO .....	1
1.2	OBJETIVOS .....	2
1.2.1	OBJETIVO GERAL .....	2
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1	FERROVIAS .....	4
2.1.1	LASTRO .....	5
2.1.2	SUBLASTRO .....	8
2.1.3	SUBLEITO .....	9
2.1.4	ESFORÇOS NA VIA FÉRREA .....	9
2.2	GEOSSINTÉTICOS .....	10
2.3	GEOTÊXTEIS .....	12
2.4	GEOTÊXTEIS EM SEPARAÇÃO .....	13
2.4.1	ABERTURA DE FILTRAÇÃO .....	14
2.4.2	CRITÉRIOS DE RETENÇÃO DE FINOS .....	15
2.4.3	CRITÉRIOS DE PERMEABILIDADE .....	16
2.4.4	CRITÉRIO DE SOBREVIVÊNCIA .....	19
2.4.5	CRITÉRIOS ANTICOLMATAÇÃO .....	19
2.5	GEOSSINTÉTICOS EM PAVIMENTAÇÃO .....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	26
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS .....	26
3.1.1	LASTRO .....	26
3.1.2	SUBLEITO .....	29
3.1.3	ELEMENTOS DE SEPARAÇÃO .....	33
3.2	EQUIPAMENTOS .....	43
3.2.1	CILINDRO DE ENSAIO E ESTRUTURA DE REAÇÃO .....	44
3.2.2	SISTEMA HIDRÁULICO DE CARREGAMENTO CÍCLICO .....	45
3.3	INSTRUMENTAÇÃO .....	47
3.3.1	MEDIDORES DE DESLOCAMENTO LINEAR .....	47
3.3.2	TRANSDUTORES DE PRESSÃO .....	48
3.3.3	CÉLULA DE CARGA .....	50
3.3.4	POSICIONAMENTO DOS INSTRUMENTOS .....	51
3.3.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	51
3.4	METODOLOGIA DE ENSAIO .....	52
3.4.1	PROGRAMA DE ENSAIOS .....	52

3.4.2	PREPARAÇÃO DOS CILINDROS.....	53
3.4.3	PREPARAÇÃO DO LASTRO.....	53
3.4.4	PREPARAÇÃO DO SOLO DO SUBLEITO.....	55
3.4.5	PREPARAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS.....	56
3.4.6	CARREGAMENTO.....	58
3.4.7	FREQUÊNCIA DO CARREGAMENTO.....	58
3.4.8	PROCEDIMENTOS DURANTE A EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO CÍCLICO.....	58
3.4.9	PROCEDIMENTOS APÓS OS ENSAIOS DE CARREGAMENTO CÍCLICO.....	59
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	61
4.1	DESLOCAMENTOS VERTICAIS.....	61
4.1.1	DESLOCAMENTOS VERTICAIS NA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS – SUBLEITO COMPACTADO COM UMIDADE DE 24%.....	62
4.1.2	DESLOCAMENTOS VERTICAIS NA SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS – SUBLEITO COMPACTADO COM UMIDADE DE 27%.....	63
4.2	POROPRESSÕES.....	66
4.2.1	POROPRESSÕES NA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS – SUBLEITO COMPACTADO COM UMIDADE DE 24%.....	67
4.2.2	POROPRESSÕES NA SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS – SUBLEITO COMPACTADO COM UMIDADE DE 27%.....	72
4.3	INSPEÇÃO VISUAL DOS GEOTÊXTEIS APÓS ENSAIO.....	73
4.4	ÍNDICE DE IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL.....	75
4.5	PENETRAÇÃO DOS GRÃOS DE BRITA NO SOLO DO SUBLEITO.....	76
4.6	IMPREGNAÇÃO DAS BRITAS (CONTAMINAÇÃO DA CAMADA DE LASTRO).....	79
4.6.1	AVALIAÇÃO DA QUEBRA DE GRÃOS DO LASTRO.....	82
4.6.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS APÓS OS ENSAIOS DE CAREEGAMENTO CÍCLICO.....	83
4.6.3	RESUMO DOS RESULTADOS.....	88
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
5.1	CONCLUSÕES.....	89
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades do lastro pelas especificações brasileiras. ....	6
Tabela 2.2. Tipos de geossintéticos de produtos derivados e suas aplicações típicas (Palmeira, 2018).....	11
Tabela 2.3. Aplicações de geossintéticos em obras viárias (modificado - Fernandes, 2005)..	11
Tabela 2.4. Critérios de permeabilidade (Palmeira, 2018).....	17
Tabela 3.1 Análise Granulométrica do Lastro do Metrô de Brasília. ....	28
Tabela 3.2. Características do material granular e valores de referência. ....	29
Tabela 3.3. Propriedades e classificações do solo do campo experimental da Universidade de Brasília (Burgos Lopera, 2016). ....	31
Tabela 3.4. Resultados ISC e expansão.....	32
Tabela 3.5. Resultados BBP.....	37
Tabela 3.6. Resistência a tração máxima (valor médio). ....	43
Tabela 3.7. Variáveis em estudo. ....	52
Tabela 4.1. Deslocamentos totais - 1º etapa de ensaios. ....	63
Tabela 4.2. Deslocamentos desconsiderando os valores iniciais .....	63
Tabela 4.3. Valores utilizados no cálculo do coeficiente de permeabilidade (modificado – Trejos Galves, 2016). ....	69
Tabela 4.4. Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil de 900 g/m <sup>2</sup> calculada por soluções teóricas. ....	69
Tabela 4.5. Índice de impregnação dos geotêxteis.....	76
Tabela 4.6. Índice de quebra dos grãos das britas no final dos ensaios .....	83
Tabela 4.7. Resistência a tração máxima das amostras virgens e das submetidas a cargas cíclicas.....	86
Tabela 4.8. Limites máximos e mínimos de acordo com a distribuição t-Student para as amostras de geotêxtil virgem e comparação com as amostras submetidas aos ensaios cíclicos. ....	87
Tabela 4.9. Resumo dos resultados.....	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Pavimento ferroviário (Brina, 1979).....	4
Figura 2.2. Sistema de camadas no pavimento: (a) Rodoviário; (b) Ferroviário (Fernandes, 2005).....	5
Figura 2.3. Curvas granulométricas para o lastro – especificações brasileiras. ....	7
Figura 2.4. Vista plana de geotêxteis: (a) geotêxtil tecido (ampliado 8 vezes); (b) geotêxtil não tecido (ampliado 40 vezes) (Bathia & Smith, 1996). ....	12
Figura 2.5. Geossintético atuando na função de separação (Palmeira & Fonseca, 2015).....	13
Figura 2.6. Mecanismos de colmatação (modificado de Palmeira e Gardoni, 2000b): (a) Cegamento, (b) Bloqueamento, (c) Obstrução interna.....	20
Figura 2.7. Deslocamentos permanentes no final dos ensaios cíclicos (modificado de Henry <i>et al.</i> , 2013). ....	24
Figura 3.1. Esquema geral dos ensaios realizados. ....	26
Figura 3.2. Coleta realizada no pátio de estocagem do metrô de Brasília. ....	27
Figura 3.3. Homogeneização e quarteamento das britas.....	27
Figura 3.4. Curva granulométrica dos agregados coletados no pátio de armazenamento de agregados do metrô de Brasília e limites da especificação 80-EM-033a-58-8006 da VALEC e NBR 5564.....	28
Figura 3.5. Local de retirada da amostra do solo do subleito. (a) Visão geral; (b) Ponto da coleta. ....	30
Figura 3.6. Curvas granulométricas do solo do campo experimental (Burgos Lopera, 2016). 30	
Figura 3.7. Curvas de compactação e saturação.....	32
Figura 3.8. Geotêxteis utilizados na pesquisa. ....	33
Figura 3.9. Equipamento de adensamento usado para ensaios de compressão uniaxial (Trejos Galvis, 2016). ....	34
Figura 3.10. Variação da espessura dos geotêxteis com a tensão normal.....	34
Figura 3.11. (a) Equipamento do ensaio de BBP sem confinamento (Moraes Filho, 2018). (b) Detalhe do sistema utilizado para o ensaio de BBP com confinamento (Melo, 2018). ....	35
Figura 3.12. Preparação para o ensaio de BBP: (a) Geotêxtil com as bordas impregnadas. (b) Célula revestida com silicone.....	36
Figura 3.13. Curva de distribuição de poros – geotêxteis 400 g/m <sup>2</sup> .....	36
Figura 3.14. Curva de distribuição de poros – geotêxteis 700 g/m <sup>2</sup> .....	37
Figura 3.15. Curva de distribuição de poros – geotêxteis 900 g/m <sup>2</sup> .....	37
Figura 3.16. Corpo de prova na máquina para ensaio de tração. ....	39
Figura 3.17. Corpos de prova com rompimento nas garras. ....	40
Figura 3.18. Espécime reforçado com rompimento fora da região da garra.....	40
Figura 3.19. Curvas de tensão versus deformação na direção de fabricação (DF) e na direção perpendicular a esta para todas as amostras virgens ensaiadas. ....	41
Figura 3.20. Curvas carga versus deformação do ensaio à tração nos geotêxteis virgens – rompimento na direção de fabricação (valores médios).....	42
Figura 3.21. Curvas carga versus deformação do ensaio à tração nos geotêxteis virgens – rompimento normal à direção de fabricação (valores médios). ....	42
Figura 3.22. Esquema geral do equipamento (Andrade, 2010).....	44
Figura 3.23. Equipamentos dos ensaios de carregamento cíclico. (a) Detalhes do cilindro bipartido. (b) Cilindro apoiado na estrutura de reação e ligação com o sistema hidráulico. ...	45

Figura 3.24. Detalhes do sistema hidráulico (Susunaga, 2015).	46
Figura 3.25. Temporizador, responsável pela frequência do carregamento.	46
Figura 3.26. Medidor de deslocamento linear.	47
Figura 3.27. Calibração do medidor de deslocamento linear.	47
Figura 3.28. Elementos do transdutor de pressão.	48
Figura 3.29. Equipamentos para a calibração dos piezômetros.	48
Figura 3.30. Mangueiras para medição de poropressão pelo transdutor.	49
Figura 3.31. Mangueiras inseridas no cilindro no momento da compactação.	49
Figura 3.32. Medidores de poropressão conectados ao cilindro.	50
Figura 3.33. Calibração da célula de carga.	50
Figura 3.34. Posicionamento dos instrumentos. (a) Vista frontal. (b) Vista superior.	51
Figura 3.35. Sistema de aquisição de dados utilizado.	51
Figura 3.36. Cilindro forrado com camadas de plástico para minimizar o atrito lateral. (a) Parte inferior. (b) Parte superior.	53
Figura 3.37. Curva granulométrica dos agregados selecionados para compor o lastro nos ensaios cíclicos e limites da especificação 80-EM-033a-58-8006 da VALEC.	54
Figura 3.38. Britas utilizadas em um dos ensaios cíclicos.	55
Figura 3.39. Compactação do solo do subleito.	56
Figura 3.40. Cortes nas amostras de geotêxtil para que essas ficassem moldadas ao cilindro.	57
Figura 3.41. Grampos e silicone para unir os cortes.	57
Figura 3.42. Amostra de geotêxtil fixada na parte superior do cilindro.	58
Figura 3.43. Ensaio montando.	59
Figura 4.1. Deslocamentos da primeira etapa de ensaios.	62
Figura 4.2. Deslocamentos da segunda etapa de ensaios.	64
Figura 4.3. Acúmulo de finos entre os grãos da brita criando uma barreira.	65
Figura 4.4. Desmonte do ensaio C(27)-SG: (a) Britas e água no topo da camada sem a presença de finos; (b) Nas proximidades do solo do subleito ainda percebe-se que não há presença de finos na água; (c) Britas que penetraram no solo do subleito e ausência de finos nas laterais do cilindro, bem como nas partes expostas das britas.	66
Figura 4.5. Estágios de carregamento e descarregamento no ensaio cíclico (Susunaga, 2015).	67
Figura 4.6. Poropressões no piezômetro P1 na 1 <sup>o</sup> etapa de ensaios.	67
Figura 4.7. Geotêxtil de 900 g/m <sup>2</sup> após ensaio de carregamento cíclico: (a) Face em contato direto com o solo do subleito; (b) face em contato direto com as britas.	68
Figura 4.8. Poropressões no piezômetro P2 na 1 <sup>o</sup> etapa de ensaios.	71
Figura 4.9. Poropressões nos piezômetros P1 e P2 na primeira etapa de ensaios.	71
Figura 4.10. Poropressões no piezômetro P1 na 2 <sup>o</sup> etapa de ensaios.	72
Figura 4.11. Poropressões no piezômetro P2 na 2 <sup>o</sup> etapa de ensaios.	73
Figura 4.12. Poropressões nos piezômetros P1 e P2 na primeira etapa de ensaios.	73
Figura 4.13. Imagens do geotêxtil de 400 g/m <sup>2</sup> nas três condições.	74
Figura 4.14. Imagens do geotêxtil de 700 g/m <sup>2</sup> nas duas condições.	74
Figura 4.15. Imagens do geotêxtil de 900 g/m <sup>2</sup> nas duas condições.	75
Figura 4.16. Penetração dos grãos de brita moldada com gesso no ensaio C(24)-SG.	77
Figura 4.17. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(24)-400.	77
Figura 4.18. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(24)-700.	77

Figura 4.19. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(24)-900 -1° ensaio.....	78
Figura 4.20. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(24)-900 -2° ensaio.....	78
Figura 4.21. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(27)-400.....	78
Figura 4.22. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(27)-SG.....	79
Figura 4.23. Desenho esquemático da impregnação devido a penetração dos grãos de brita no solo. ....	80
Figura 4.24. Vista superior do molde de parafina do ensaio C(27)-SG com água.....	80
Figura 4.25. Molde de parafina do ensaio C(27)-SG com água.....	80
Figura 4.26. Massa de finos por unidade de área que impregnaram as britas na 1° etapa de ensaios. ....	81
Figura 4.27. Massa de finos por unidade de área que impregnaram as britas na 2° etapa de ensaios. ....	81
Figura 4.28. Massa de finos por unidade de área que impregnaram as britas em todos os ensaios. ....	82
Figura 4.29. Comparação da resistência para as amostras de 400 g/m <sup>2</sup> , antes e após os ensaios cíclicos.....	84
Figura 4.30. Comparação da resistência para as amostras de 700 g/m <sup>2</sup> , antes e após os ensaios cíclicos.....	85
Figura 4.31. Comparação da resistência para as amostras de 900 g/m <sup>2</sup> , antes e após os ensaios cíclicos.....	85
Figura 4.32. Geotêxteis após rompimento na prensa de tração (corpos de prova submetidos aos ensaios de carregamento cíclico). ....	88

## LISTA DE ABREVIACOES, NOMECLATURAS E SÍMBOLOS

<b>Abreviaoes</b>	<b>Significado</b>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BBP	Bubble Point Test
CC	Coeficiente de curvatura
CP	Corpo de prova
CU	Coeficiente de uniformidade
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FHWA	Federal Highway Administration
INPF	Instituto Nacional de Pesquisa Ferroviária
NBR	Norma Brasileira
RIC	Rail Infrastructure Corporation
SNCF	Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF)



<b>Nomeclaturas e Símbolos</b>	<b>Significado</b>
C(24) - SG	Configuração de ensaio com umidade de 24% e sem geotêxtil
C(24) - 400	Configuração de ensaio com umidade de 24% e com geotêxtil de gramatura de 400 g/m <sup>2</sup>
C(24) - 700	Configuração de ensaio com umidade de 24% e com geotêxtil de gramatura de 700 g/m <sup>2</sup>
C(24) - 900	Configuração de ensaio com umidade de 24% e com geotêxtil de gramatura de 900 g/m <sup>2</sup>
C(27) - SG	Configuração de ensaio com umidade de 27% e sem geotêxtil
C(27) - 400	Configuração de ensaio com umidade de 27% e com geotêxtil de gramatura de 400 g/m <sup>2</sup>
$d_s$	Diâmetro das partículas de solo, assumidas esféricas, dentro do geotêxtil
$D_{10}$	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 10% passante em peso
$D_{15}$	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 15% passante em peso
$D_{30}$	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 30% passante em peso
$D_{50}$	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 50% passante em peso
$D_{60}$	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 60% passante em peso
$D_{85}$	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 85% passante em peso
$D_{90}$	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 90% passante em peso
$D_{95}$	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 95% passante em peso
$g$	Aceleração da gravidade
$K$	Coefficiente de permeabilidade
$K^*$	Coefficiente de permeabilidade do geotêxtil parcialmente colmatado
$K_{GT}$	Permeabilidade do geotêxtil
$K_{pc}$	Fator de redução devido a colmatção
$K_{\sigma}$	Fator de redução devido aos efeitos do nível de tensões
$M_s$	Massa das partículas de solo no geotêxtil
$M_f$	Massa das fibras do geotêxtil
$n$	Porosidade do geotêxtil
$n_w$	Viscosidade dinâmica da água
$O_f$	Abertura de filtração sem confinamento
$O_f^*$	Abertura de filtração do geotêxtil em condições de confinamento e parcialmente colmatado
$O_{95}$	Abertura do poro que 95% dos poros são menores
$O_{90}$	Abertura do poro que 90% dos poros são menores

<b>Nomeclaturas e Símbolos</b>	<b>Significado</b>
$O_{50}$	Abertura do poro que 50% dos poros são menores
$O_{15}$	Abertura do poro que 15% dos poros são menores
POA	Porcentagem de área aberta do geotêxtil
$\beta$	Fator de forma
$\Delta W_{kf}$	Porcentagem de material retido em cada peneira após a execução do ensaio
$\Delta W_{ki}$	Porcentagem de material retido em cada peneira antes da execução do ensaio
$\lambda$	Índice de impregnação
$\rho_f$	Massa específica das fibras do geotêxtil
$\rho_s$	Massa específica das partículas de solo
$\rho_w$	Massa específica da água

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

O modal ferroviário, por apresentar características como alta capacidade de transportar grande volume de passageiros e cargas, baixa emissão de poluentes das locomotivas, menor impacto ambiental na construção da infraestrutura, além de elevado nível de segurança, consagra-se como veículo indutor de crescimento e desenvolvimento econômico, assumindo importante papel estratégico na composição da matriz de transporte dos países (CNT, 2013).

As ferrovias ampliaram a sua participação no Brasil nos últimos anos, mas ainda são necessários mais investimentos. Quando comparada com outros países de grandes dimensões territoriais, como Rússia, EUA e Canadá, nota-se grande desequilíbrio na matriz de transporte brasileira, sendo o modal rodoviário o predominante (ANTF, 2018; CONSÓRCIO LOGIST/ GISTRAN, 2012).

A construção de novas ferrovias, bem como duplicações, manutenções e reparos nas linhas existentes, são medidas necessárias para atender as demandas internas e externas do Brasil. Por apresentar dimensões continentais e produzir grandes quantidades de commodities que necessitam ser escoados, a dependência do modal rodoviário no país proporciona desperdícios, aumento do preço das mercadorias, além da vulnerabilidade a greves que afetam o abastecimento.

Diante desse cenário, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), implantou, em 2018, o Instituto Nacional de Pesquisa Ferroviária (INPF). Esse instituto visa o desenvolvimento tecnológico do modal ferroviário, a redução do custo do transporte logístico no país e, conseqüente, aumento de competitividade no mercado externo (DNIT, 2018).

Atualmente, os serviços de manutenção são os responsáveis pela maior parte dos gastos durante o ciclo de vida de uma ferrovia, atingindo cerca de 70% do custo total (Paim da Silva, 2015). Assim, o uso de soluções alternativas e inovadoras é essencial para melhorar o funcionamento e durabilidade das obras. Dentre os materiais alternativos utilizados para aumentar a vida útil e reduzir as manutenções em pavimentos ferroviários, pode-se destacar os geossintéticos.

Os geossintéticos são produtos industrializados com pelo menos um de seus componentes fabricados com polímero sintético ou natural. Podem apresentar diferentes funções como: drenagem, barreira, proteção, impermeabilização, controle de processos erosivos, reforço, filtração e separação (IGS, 2018; Aguiar & Vertematti, 2015).

A separação entre materiais é uma das aplicações mais comuns de geossintéticos em obras de pavimentação, sendo o geotêxtil não tecido o produto mais utilizado para essa finalidade. Um geotêxtil inserido entre a camada granular e o subleito impede que ocorra a interpenetração das camadas e o bombeamento de finos (carreamento de finos para a camada granular) devido às cargas dinâmicas e cíclicas produzidas pelo tráfego. Desta forma, os geossintéticos podem proporcionar ganho na vida útil do pavimento ferroviário e diminuição dos gastos com manutenções, possibilitando maior competitividade ao modal.

Por estarem submetidos a condições complexas, como carregamento cíclico com altas tensões verticais, e contato com materiais mecanicamente agressivos, ainda são necessários estudos aprofundados do comportamento dos geotêxteis como elementos de separação em pavimentos ferroviários para aferições, avaliações de desempenho e desenvolvimento de métodos de dimensionamento.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral dessa pesquisa consiste na avaliação do comportamento de geotêxteis não tecidos utilizados como elementos de separação em camadas de pavimento ferroviário.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar o desempenho do geotêxtil inserido entre a camada de lastro e o subleito;
- Analisar o comportamento do sistema à medida que ocorre umedecimento das camadas;
- Avaliar a influência da gramatura do geotêxtil quando utilizado como elemento de separação em pavimento ferroviário;
- Estimar a capacidade de retenção de partículas finas pelo geotêxtil;

- Avaliar os danos mecânicos no geotêxtil e a degradação do material de lastro (quebra das partículas), devido ao carregamento cíclico, com e sem a presença do geotêxtil como elemento separador.

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O trabalho foi estruturado em 5 (cinco) capítulos, conforme descrito a seguir:

O Capítulo 1 aborda de forma sucinta a proposta do estudo, apresentando a motivação e os objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2 apresenta-se uma breve revisão bibliográfica dos principais assuntos pertinentes ao tema: pavimento ferroviário; geossintéticos, com destaque para os geotêxteis não tecidos, principalmente quando usados como elemento de separação; diferentes pesquisas realizadas em laboratório e campo sobre a utilização de geossintéticos utilizados em ferrovias, como também em outros sistemas de transportes.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais, o equipamento e a metodologia adotada para a realização dos ensaios de carregamento cíclico, os quais permitiram avaliar a aplicação de geotêxteis como elementos de separação entre camadas do pavimento ferroviário.

No Capítulo 4 tem-se os resultados obtidos para as diferentes configurações de ensaio. Esses resultados foram adquiridos por meio das leituras da instrumentação, bem como pela realização de ensaios feitos após os materiais serem submetidos aos ciclos de carregamento.

No Capítulo 5 tem-se as conclusões do presente estudo e sugestões para pesquisas futuras.

## CAPÍTULO 2

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa apresentar o embasamento teórico dos principais assuntos pertinentes ao tema dessa dissertação.

#### 2.1 FERROVIAS

As ferrovias são exemplos de obras lineares, cujo pavimento é comumente composto pelos trilhos, dormentes, lastro, sublastro e subleito ou solo de fundação (Figura 2.1). Alguns autores como Brina (1979), subdivide o pavimento ferroviário em duas partes: a infraestrutura constituída pela terraplenagem e todas as obras situadas abaixo do greide de projeto; a superestrutura composta pelo sublastro, lastro, dormentes e trilhos. Outros autores como Selig & Waters (1994) subdividem em: superestrutura composta pelos trilhos, fixadores e dormentes; subestrutura constituída pelo lastro, sublastro e subleito.

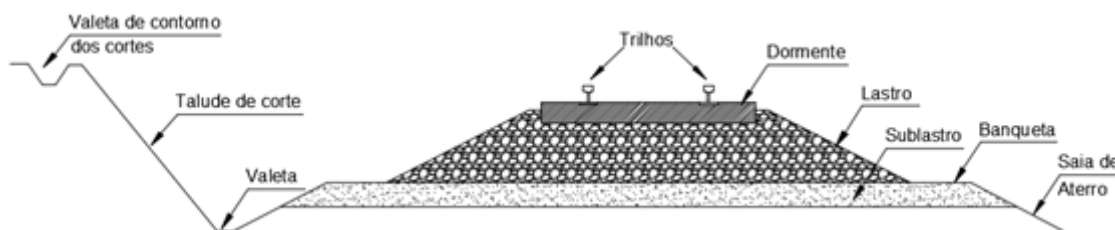


Figura 2.1. Pavimento ferroviário (Brina, 1979).

No passado, os estudos foram mais concentrados nas características dos dormentes e trilhos, sendo poucas as considerações desenvolvidas para o lastro, o sublastro e o subleito. Porém, o enorme custo envolvido na manutenção destas camadas pode ser significativamente reduzido com o conhecimento de suas características físicas e mecânicas, as quais são mais variadas e de difícil obtenção (Selig & Waters, 1994; Indraratna et al., 2011).

Segundo Fernandes (2005), o pavimento ferroviário compara-se ao pavimento tradicional rodoviário (Figura 2.2), pois ambos são estruturas em camadas que se apoiam no subleito (solo de fundação).

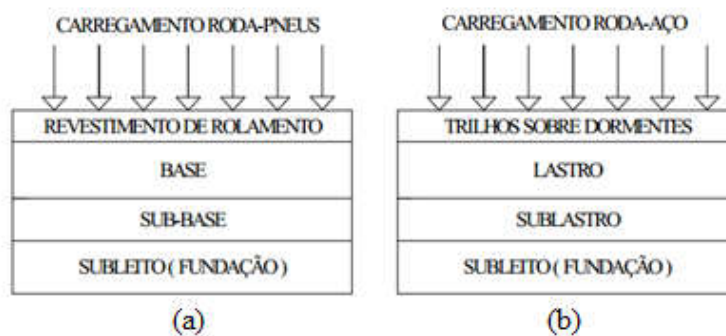


Figura 2.2. Sistema de camadas no pavimento: (a) Rodoviário; (b) Ferroviário (Fernandes, 2005).

### 2.1.1 LASTRO

O lastro, elemento situado entre os dormentes e o sublastro, é composto por material granular devidamente selecionado, que visa resistir as forças advindas dos dormentes e permitir a drenagem da água, proporcionando estabilidade à via férrea (Selig & Waters, 1994). Para desempenhar essas funções é necessário alcançar um equilíbrio, pois para dissipar as cargas e proporcionar estabilidade, o lastro precisa ser composto por partículas angulares, bem graduadas e compactadas, o que, por sua vez, diminui a sua capacidade de drenagem (Indraratna *et al.*, 2006).

Segundo Selig & Waters (1994), a disponibilidade e as considerações econômicas são os fatores principais na seleção do material que irá compor o lastro. Assim, tem-se uma grande variedade de materiais usados (agregados oriundos de rochas como granito, basalto, calcário, e também escórias e cascalho). Indraratna *et al.* (2011) ressalta que a capacidade de carga de materiais reciclados, como escória de alto forno, não pode ser comparada com materiais extraídos de rocha natural.

Várias especificações para os agregados da camada de lastro foram definidas por diferentes organizações ferroviárias no mundo (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) nos EUA; Rail Infrastructure Corporation (RIC) e Queensland Rail na Austrália; Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF), na França; British Railways na Inglaterra). No Brasil, têm-se a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - NBR 5564 (2011) e a especificação VALEC (80-EM-033a-58-8006). A Tabela 2.1 apresenta os limites expostos nas especificações brasileiras.

Tabela 2.1. Propriedades do lastro pelas especificações brasileiras.

<b>Característica</b>	<b>ABNT NBR 5565</b>	<b>VALEC (80-EM-033a-58-8006)</b>
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica
Partículas não cúbicas (máximo)	15%	10%
Massa específica aparente (mínima)	2500 kg/m <sup>3</sup>	2400 kg/m <sup>3</sup>
Absorção de água (máxima)	0,8%	1,0%
Porosidade aparente (máxima)	1,5%	1,0%
Resistência à intempérie (máxima) <sup>(a)</sup>	10,0%	5,0%
Resistência ao choque (índice de tenacidade Treton, máximo)	25%	20%
Teor de fragmentos macios e friáveis (máximo) <sup>(a)</sup>	5%	5%
Resistência à compressão axial (mínima)	100 MPa	100 MPa
Material pulverulento (máximo)	1,0%	1,0%
Torrões de argila (máximo)	0,50%	0,50%
Limite de massa unitária no estado solto	1,25 g/ cm <sup>3</sup>	-
Abrasão Los Angeles (máxima)	30,0%	40,0%

<sup>(a)</sup> Verificação opcional

Quanto a faixa granulométrica, as normas internacionais apresentam várias granulometrias com características distintas, porém com dimensões das partículas normalmente entre 63 a 10 mm. No Brasil, as duas curvas definidas pelas normas citadas acima apresentam diferenças (Figura 2.3). A curva da NBR é voltada para um material mais uniforme, enquanto a da VALEC, para uma curva mais graduada (Paim da Silva, 2018).



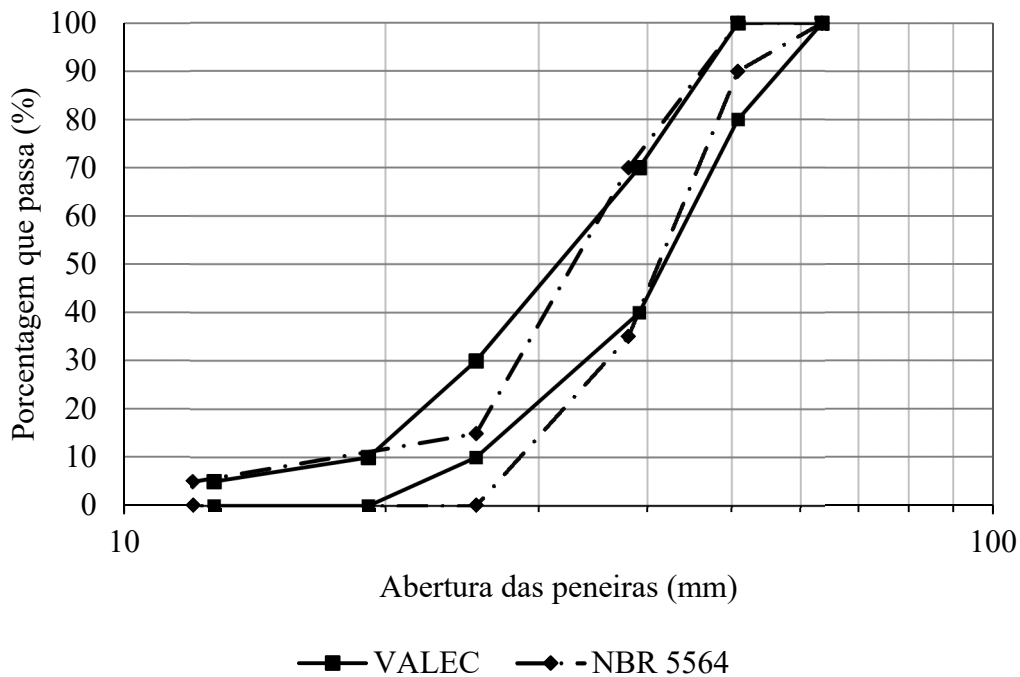


Figura 2.3. Curvas granulométricas para o lastro – especificações brasileiras.

Muitos são os estudos que abordam o efeito da distribuição granulométrica na degradação e recalques do lastro. Em destaque têm-se os estudos realizados na Universidade de Wollongong (Austrália), usando equipamento cilíndrico de grande escala.

Indraratna *et al.* (2003) realizaram ensaios com quatro granulometrias diferentes: bem uniforme ( $C_u = 1,39$ ); uniforme ( $C_u = 1,72$ ); granulometria descontínua (gap-graded) ( $C_u = 1,68$ ); bem graduada ( $C_u = 2,03$ ). Os resultados mostraram que as distribuições bem graduadas resultaram nas menores degradações. Os autores ressaltam que um dos problemas da utilização de granulometria bem graduada é a redução da drenagem, o que leva a problemas na superestrutura como bombeamento de finos, perda de resiliência, incrustações no lastro e demora na dissipação de poropressões. Como alternativa para esses danos, várias pesquisas estão sendo realizadas utilizando geossintéticos e lastros bem graduados.

### 2.1.1.1 CONTAMINAÇÃO DO LASTRO

A contaminação do lastro é uma das principais razões para a deterioração da geometria da pista. Ela advém, principalmente, da quebra dos grãos das britas (altas concentrações de tensões nos pontos de contato entre os grãos), da deterioração natural do lastro (processo de intemperismo no material granular), do bombeamento de finos do solo do subleito e de detritos transportados

pela água e ar, bem como o derramamento dos materiais transportados (carvão, minério, etc) (Indraratna *et al.*,2011).

O efeito da contaminação depende da quantidade e características do material contaminante. Areias e materiais menos graúdos levam ao aumento de resistência ao cisalhamento e rigidez, assim aumentam a estabilidade e diminuem as deformações plásticas. Porém, geram diminuição da resiliência e da capacidade de drenagem. Siltes e argilas geram vários problemas a depender da quantidade, do tamanho das partículas e da presença ou não de água. Quando a quantidade de partículas finas é significativamente alta, essas passam a controlar o comportamento do lastro. Assim, os serviços de manutenção aumentam consideravelmente, pois o nivelamento da camada granular se torna cada vez mais ineficiente, sendo, em certos casos, necessário a troca de toda a camada (Selig & Waters, 1994).

Segundo Paim da Silva *et al.* (2015), os custos com manutenções podem atingir até 70% do custo total do ciclo de vida de uma ferrovia. Por isso, cuidados para diminuição da contaminação do lastro são imprescindíveis para a viabilização desse modal.

### **2.1.2 SUBLASTRO**

O sublastro é a camada intermediária entre o lastro e o subleito e, normalmente, é composto por material granular menos nobre do que o utilizado na camada de lastro. Também tem as funções de dissipar as tensões e permitir a drenagem, além da função de separação, ou seja, evitar o bombeamento de material proveniente do subleito e a interpenetração entre o lastro e o subleito. Algumas funções do sublastro podem ser realizadas por outros materiais, como cimento ou asfalto para estabilização de solo local, asfalto-concreto ou geossintéticos. Para alcançar estas finalidades, além de resistir as tensões oriundas do tráfego, o sublastro deve atender aos critérios de filtro e drenagem (Selig & Waters, 1994).

Segundo Selig & Waters (1994), a mistura do lastro com o subleito é um problema que advém, principalmente, das cargas repetidas oriundas do tráfego, e poucos são os estudos para os critérios de filtro que consideram essa condição. Assim, costuma-se usar os critérios comumente utilizados para filtros granulares (Equação 2.1 e Equação 2.2).

$$D_{15}(\text{filtro}) \leq 5D_{85}(\text{solo protegido}) \quad (2.1)$$

$$D_{50}(\text{filtro}) \leq 25D_{50}(\text{solo protegido}) \quad (2.2)$$

Adicionalmente ao critério de filtro, tem-se o critério para a garantia da permeabilidade, expresso pela Equação 2.3:

$$D_{15}(\text{filtro}) > 4 \text{ até } 5D_{15}(\text{solo sendo drenado}) \quad (2.3)$$

Atender a todos esses critérios com um material natural é difícil, e com um agregado britado, costuma ser caro. Além disso, tem-se o custo com a mão-de-obra. Nesse contexto, a utilização de geossintéticos pode ser mais econômica (Selig & Waters, 1994).

### **2.1.3 SUBLEITO**

A camada final de terraplenagem, também chamada de subleito, é o elemento de suporte da via que recebe as tensões do tráfego e das demais camadas necessárias para a operação ferroviária (Stopatto, 1987). Basicamente, o solo do subleito pode ser dividido em duas categorias: solo natural ou solo de aterro (Selig & Waters, 1994; Indraratna *et al.*, 2011).

Segundo Selig & Waters (1994), as tensões oriundas do tráfego atingem até 5 metros abaixo dos dormentes e assim, alcançam o subleito. Indraratna *et al.* (2011) ressaltam a necessidade de campanhas de investigações geotécnicas no solo do subleito antes do início do projeto da ferrovia, pois a falha ou a instabilidade nesse solo resulta em problemas geométricos na via, mesmo quando as camadas superiores (lastro e sublastro) são de alta qualidade.

### **2.1.4 ESFORÇOS NA VIA FÉRREA**

Entender os complexos mecanismos de transferência de tensões e acúmulo de deformações nas camadas do pavimento ferroviário é essencial para prever o ciclo de manutenções, bem como realizar projetos de novas vias. São diversos os modelos matemáticos e numéricos propostos no passado para entender o comportamento das camadas submetidas a cargas cíclicas (Indraratna *et al.*, 2010).

Os trechos experimentais auxiliam na avaliação do desempenho de seções com diferentes materiais e configurações, possibilitando a obtenção dos valores reais das tensões e deformações nas camadas do pavimento.

Indraratna *et al.* (2010) instrumentaram um trecho ferroviário em Bulli na Austrália, e registraram as tensões verticais e horizontais máximas nas camadas do pavimento ferroviário ao ser solicitado por trens de passageiros com 20,5 t/eixo e velocidade de 60 km/h, bem como

trens de carga com 25 t/eixo. Os autores também compararam as tensões verticais máximas medidas com os resultados de modelos e estudos de campo realizados por outros autores.

Filho (2013), utilizando software Ferrovia 3.0, verificou o comportamento tensão – deformação gerado pelo tráfego de vagões comumente utilizados nas vias férreas brasileiras e, também, vagão ainda em fase de projeto, com capacidade de carregamento mais elevada do que a tradicional. Esse autor adverte que o dimensionamento da camada de lastro é passível de discussões por parte dos projetistas de pavimentos ferroviários no Brasil, pois as formulações comumente utilizadas consideram dados de países estrangeiros (ângulo de espraiamento, valores de módulo, granulometria, etc).

## **2.2 GEOSINTÉTICOS**

Os geossintéticos são produtos oriundos de polímeros manufaturados ou naturais, utilizados em obras geotécnicas e de proteção ambiental. Em geral, tem-se um predomínio da utilização de fibras poliméricas, principalmente em obras de vida útil mais elevada (Palmeira, 2018).

No Brasil, desde a produção do primeiro geossintético, por volta de 1971, o desenvolvimento em pesquisas acadêmicas, aplicações e mercados têm superado as expectativas e prosperado significativamente (Aguiar & Vertematti, 2015).

São diversos os tipos de geossintéticos produzidos no mercado. Esses podem desempenhar diferentes funções em obras de engenharia geotécnica e proteção ambiental. Inclusive, um mesmo geossintético pode exercer, ao mesmo tempo, duas ou mais funções. Na Tabela 2.2 encontram-se indicados diferentes tipos de geossintéticos e produtos derivados, bem como suas aplicações típicas.

Tabela 2.2. Tipos de geossintéticos de produtos derivados e suas aplicações típicas (Palmeira, 2018).

TIPO	Função						
	Reforço	Separação	Drenagem	Filtração	Barreira	Proteção	Outra
GEOBLOCOS							X
GEOCÉLULAS	X					X	X
GEOCOMPOSTO	X	X	X	X	X	X	
GEOCONTÊINERES			X			X	X
GEOFORMAS			X			X	
GEODRENOS			X	X			
GEOESPAÇADORES			X				
GEOFIBRAS	X						
GEOGRELHAS	X						
GEOMANTAS						X	X
GEOMEMBRANAS		X			X	X	
GEORREDES			X				
GEOTÊXTEIS	X	X	X	X	X	X	X
GEOTIRAS	X						
GEOTUBOS			X				
TUBOS							
GEOTÊXTEIS			X			X	X

Tratando-se de obras viárias, os geossintéticos podem desempenhar diferentes papéis, como destaca a Tabela 2.3. Percebe-se que, em ferrovias, apresentam o maior número de funções (drenagem, filtração, separação e reforço).

Tabela 2.3. Aplicações de geossintéticos em obras viárias (modificado - Fernandes, 2005).

Áreas de Utilização	Tipos de Aplicação	Funções Relevantes				
		D	F	S	R	B
Obras Viárias	Recapeamento asfáltico				X	X
	Estradas Vicinais e de serviço		X	X	X	
	Pátios, arruamentos e estacionamentos		X	X	X	
	Ferrovias	X	X	X	X	

B – Barreira; D - Drenagem; F - Filtração; S - Separação; R – Reforço

Com foco nos objetivos desta pesquisa, maior ênfase será dada nas funções de separação, filtração e drenagem, pois a inserção de um geossintético entre o lastro e o subleito visa, simultaneamente, separar os materiais, reter as partículas e escoar a água. Entre os geossintéticos mais indicados para exercer essas funções tem-se os geotêxteis, em especial os não tecidos. Assim, maior destaque, também, será dado a esse tipo de geossintético.

### 2.3 GEOTÊXTEIS

Geotêxteis são mantas permeáveis, produzidas com fibras naturais ou sintéticas, utilizadas nas funções de filtração, drenagem, separação, reforço e estabilização em estruturas de engenharia civil. São um dos tipos de geossintéticos mais utilizados e são classificados como tecidos ou não tecidos (Figura 2.4) a depender da disposição de suas fibras ou filamentos (Palmeira, 1992).

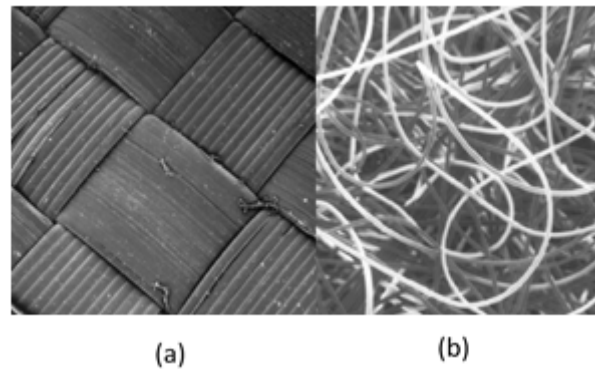


Figura 2.4. Vista plana de geotêxteis: (a) geotêxtil tecido (ampliado 8 vezes); (b) geotêxtil não tecido (ampliado 40 vezes) (Bathia & Smith, 1996).

Nos geotêxteis tecidos suas fibras ou filamentos são orientados em duas direções perpendiculares, uma sobre a outra. Já nos não tecidos, as fibras ou filamentos são distribuídas aleatoriamente.

Os geotêxteis não tecidos apresentam a morfologia mais complexa entre os materiais têxteis. Entende-se por morfologia a orientação das fibras, o volume de fibras, o número de contatos entre as fibras, a distância entre os contatos, a porosidade e a distribuição de poros (Rawal *et al.*, 2012).

Nos geotêxteis não tecidos os tipos de fibras se diferenciam entre: filamentos contínuos e filamentos cortados. A única diferença entre estes dois tipos de elementos é o seu comprimento.

Os filamentos contínuos apresentam grande extensão, enquanto os filamentos cortados apresentam comprimento reduzido, na faixa de 25 a 100 mm (Bathia & Smith, 1996).

Dependendo do processo de união das fibras, a norma NBR 12553 (2003) classifica os geotêxteis não tecido em:

- Agulhados: as fibras são interligadas mecanicamente por processo de agulhagem;
- Termoligados: as fibras são interligadas por fusão parcial por meio de aquecimento;
- Resinados: as fibras são interligadas por meio de produtos químicos.

## 2.4 GEOTÊXTEIS EM SEPARAÇÃO

Na função de separação, um geossintético é interposto entre materiais distintos para manter ou melhorar a integralidade e a funcionalidade destes materiais. Para tanto, os geossintéticos devem ser capazes de reter os finos provenientes do solo de fundação (subleito) e resistir aos esforços aos quais serão submetidos ao longo da vida útil da obra (Palmeira & Fonseca, 2015).

Koerner (2016) explica dois mecanismos que ocorrem, simultaneamente, quando um solo granular é disposto sobre um solo fino: a entrada de solo fino nos vazios da camada granular (bombeamento de finos), o que prejudica a capacidade de drenagem; a penetração do solo granular na camada de solo fino, o que prejudica a resistência do sistema.

A Figura 2.5 esquematiza a atuação de um geossintético como elemento de separação entre camadas de solo granular e fino.

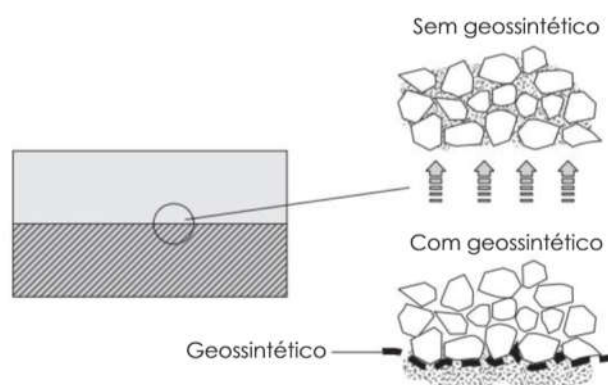


Figura 2.5. Geossintético atuando na função de separação (Palmeira & Fonseca, 2015).

A capacidade de um geotêxtil de reter as partículas depende do tamanho da abertura de filtração, a qual está associada as dimensões dos poros e constrictões no geotêxtil (Gourc & Palmeira, 2018).

Além do tamanho da abertura de filtração, outras propriedades são significativas para os geossintéticos aplicados com a finalidade de separação. Palmeira (2018), Koerner (2016) e Palmeira & Fonseca (2015) destacam: resistência ao estouro, à tração, à perfuração e ao rasgo.

Como requisitos de projeto para utilização de geotêxteis como elementos de separação, têm-se os critérios de retenção de finos, permeabilidade, sobrevivência e anticolmatação.

#### **2.4.1 ABERTURA DE FILTRAÇÃO**

O geotêxtil é um material que pode ser considerado similar ao solo por ser constituído de vazios (poros) e partículas (filamentos e fibras). Entretanto, no geotêxtil, a relação geométrica entre filamentos e vazios é mais complexa devido a forma e compressibilidade dos filamentos (Christopher & Fischer, 1992).

Apesar da importância das maiores aberturas e distribuição de poros, estas são propriedades difíceis de medir. Entre as principais técnicas tem-se os métodos indiretos (peneiramento seco, peneiramento úmido e peneiramento hidrodinâmico e os métodos diretos (análises de imagens, porosimetria por intrusão de mercúrio e método do *Bubble Point* (BBP)), além de modelos teóricos (Bathia & Smith, 1996).

Cada método fornece uma distribuição de poros que não necessariamente consagra-se como uma propriedade do geotêxtil, mas sim, é uma função do método utilizado. Além disso, devido a variabilidade deste material, o tamanho da abertura de seus poros não pode ser definido por um único valor (Christopher & Fischer, 1992).

O tamanho da abertura dos poros do geotêxtil é influenciada pelo nível de tensões e impregnação no material. São vários os estudos realizados que levam em consideração esses fatores, entre eles: Palmeira & Gardoni (2000a, 2000b e 2002), Trejos Galvis (2016) e Melo (2018).



#### 2.4.1.1 BUBBLE POINT TEST (BBP)

O ensaio de BBP permite obter a curva de distribuição dos poros do geotêxtil sob diferentes condições e solicitações, assim pode-se avaliar essa propriedade levando em consideração as solicitações as quais os geotêxteis serão submetidos na obra.

O BBP é baseado no princípio de que o líquido de saturação é mantido nos canais dos poros contínuos do geotêxtil por atração capilar e tensão superficial. A pressão mínima necessária para forçar o líquido a passar pelos poros está relacionada com o diâmetro dos mesmos (Trejos Galvis, 2016).

Diversos trabalhos foram realizados por esse método e reportam a acurácia dos seus resultados (Trejos Galvis, 2016; Moraes Filho, 2018; Melo, 2018).

#### 2.4.2 CRITÉRIOS DE RETENÇÃO DE FINOS

São diversos os critérios de retenção encontrados na literatura. Os mais comuns são geralmente baseados na relação entre o tamanho da abertura dos poros do geotêxtil ( $O_{95}$ ,  $O_{90}$ ,  $O_{50}$  ou  $O_{15}$ ) e o tamanho dos grãos do solo ( $D_{95}$ ,  $D_{90}$ ,  $D_{85}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{30}$  ou  $D_{15}$ ) a ser retido, o que, na prática, nada mais é do que a medida da maior partícula que vai efetivamente passar através do geotêxtil (Christopher & Fischer 1992).

De forma geral, os critérios de retenção utilizados para geotêxteis com função de separação são os mesmos para esse material com função de filtro e drenagem. Alguns desses critérios levam em consideração condições de fluxo cíclico, como o da Federal Highway Administration (FHWA) (*apud* Palmeira, 2018), apresentados na Equação 2.4 e Equação 2.5.

$$\frac{O_{95}}{D_{15}} \leq 1 \quad (2.4)$$

Ou

$$\frac{O_{50}}{D_{85}} \leq 0,5 \quad (2.5)$$

Narejo (2003) avaliou diversas pesquisas, de campo e de laboratório, sobre a competência dos geotêxteis em reter partículas quando estão submetidos a carregamentos cíclicos. A partir das

análises, esse autor propôs a relação apresentada pela Equação 2.6 para solos finos, como silte argilosos e argilas.

$$\frac{O_{95}}{D_{85}} \leq 0,5 \quad (2.6)$$

Palmeira & Gardoni (2002) avaliaram a influência do confinamento e da colmatação parcial na capacidade de retenção de geotêxteis não tecidos. Os autores constataram que, para os espécimes ensaiados, a depender do nível de tensão aplicada, os geotêxteis foram capazes de reter partículas com a metade do tamanho previsto pelos critérios usuais de projeto. Para calcular a abertura de filtração dos geotêxteis levando em consideração esses fatores, os autores apresentam a Equação 2.7.

$$O_f^* = \frac{O_f}{K_\sigma K_{pc}} \quad (2.7)$$

Onde:

$O_f^*$  = Abertura de filtração do geotêxtil em condições de confinamento e parcialmente colmatado;

$O_f$  = Abertura de filtração sem confinamento;

$K_\sigma$  = Fator de redução devido aos efeitos do nível de tensão;

$K_{pc}$  = Fator de redução devido a colmatação.

De forma geral, os critérios de retenção comumente utilizados são conservadores, no entanto, mais pesquisas são necessárias para avaliar os efeitos provenientes das condições de campo para melhor entendimento e previsão da capacidade de retenção de geotêxteis.

### **2.4.3 CRITÉRIOS DE PERMEABILIDADE**

O critério de permeabilidade estabelece que o geotêxtil deve permitir uma adequada capacidade de fluxo a fim de evitar inesperados acréscimos de poropresões (Silva, 2007).

Assim como para a retenção de finos, vários critérios de permeabilidade são definidos por diferentes autores. Na Tabela 2.4 são apresentados os mais relacionados com obras de pavimentação por levarem em consideração condições mais severas.

Tabela 2.4. Critérios de permeabilidade (Palmeira, 2018).

REFERÊNCIA	CRITÉRIO	COMENTÁRIOS
Carroll (1983) e Christopher e Holtz (1985)	$k_{GT} > 10k_s$	Condições críticas e condições severas hidráulicas e de solo.
Departamento de Transportes do Reino Unido - Corbet (1993)	$k_{GT} > 10k_s$	Para geotêxteis tecidos e não tecidos finos ( $t_{GT} > 2\text{mm}$ ).
	$k_{GT} > 100k_s$	Para não tecidos espessos ( $t_{GT} > 2\text{mm}$ ).
Christopher e Holtz (1985)	$k_{GT} > 100k_s$	Quando houver risco de colmatação biológica

Para os critérios de permeabilidade é necessário conhecer o coeficiente de permeabilidade do geotêxtil ( $K_{GT}$ ), o qual deve ser obtido sob o nível de tensões esperado na obra (Palmeira, 2018).

O  $K_{GT}$  de um geotêxtil pode ser determinado por ensaios laboratoriais, sendo que, em especial para geotêxteis não tecidos, pode-se observar grande variabilidade nos valores obtidos. Assim, um número significativo de ensaios deve ser realizado de modo a ser possível uma análise estatística (Palmeira, 2018).

Para cálculos preliminares, existem modelos teóricos para estimar o coeficiente de permeabilidade normal dos geotêxteis.

Giroud (1996) propôs a Equação 2.8 e a Equação 2.9, apresentadas a seguir:

$$k = \frac{\beta \rho_w g}{16 \eta_w} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_f^2 \quad (2.8)$$

$$k = \frac{\rho_w g n O_f^2}{32 \eta_w} \quad (2.9)$$

Onde:

$k$  = coeficiente de permeabilidade;

$\rho_w$  = massa específica da água;

$g$  = aceleração da gravidade;

$n$  = porosidade do geotêxtil;

$\eta_w$  = viscosidade dinâmica da água;

$\beta$  = fator de forma, igual a 0,11, como sugerido por Giroud (1996) para geotêxtil não tecido;

$O_f$  = Abertura de filtração.

Palmeira e Gardoni (2000a), por meio de ensaios de laboratório, comprovaram que as equações propostas por Giroud (1996) são ferramentas úteis para prever a permeabilidade de geotêxteis não tecidos. A Equação 2.8 apresentou os melhores resultados quando comparada com outras soluções propostas, especialmente para geotêxteis com gramaturas maiores que 300 g/m<sup>2</sup> e porosidade acima de 0,8. Já para a Equação 2.9, os ensaios com geotêxteis de gramaturas mais baixas apresentaram melhores correlações do que para gramaturas maiores.

A impregnação do geotêxtil devido a entrada de partículas no seu interior gera alterações nas propriedades desse material, entre elas a compressibilidade e a permeabilidade. Giroud (1994) apresentou uma expressão para a permeabilidade dos geotêxteis parcialmente colmatados a qual foi modificada por Palmeira & Gardoni (2000a) e reescrita conforme as Equações 2.10 a 2.12, considerando que as partículas de solo estão uniformemente dispersas nos poros do geotêxtil.

$$K^* = \frac{\beta \rho_w g}{\eta_w} \frac{\left[ n - \lambda \frac{\rho_f}{\rho_s} (1-n) \right]^3}{\left( \frac{4}{d_f} + \lambda \frac{\rho_f}{\rho_s} \frac{6}{d_s} \right)^2 (1-n)^2} \quad (2.10)$$

$$\lambda = \frac{M_s}{M_f} \quad (2.11)$$

$$\frac{d_s}{d_f} = \sqrt{\frac{\pi}{1-n}} - 1 \quad (2.12)$$

Onde:

$K^*$  = coeficiente de permeabilidade do geotêxtil parcialmente colmatado;

$\beta$  = fator de forma, igual a 0,14, como sugerido por Palmeira & Gardoni (2000a) para geotêxtil não tecido;

$d_s$  = diâmetro das partículas de solo, assumidas esféricas, dentro do geotêxtil;

$\rho_w$  = massa específica da água;

$\rho_f$  = massa específica das fibras do geotêxtil;

$\rho_s$  = massa específica das partículas de solo;

$M_s$  = massa das partículas de solo no geotêxtil;

$M_f$  = massa das fibras do geotêxtil;

$\lambda$  = nível de impregnação do geotêxtil;

$n$  = porosidade do geotêxtil sem considerar a presença das partículas nos poros.

#### **2.4.4 CRITÉRIO DE SOBREVIVÊNCIA**

Os geotêxteis são solicitados durante sua instalação, construção e operação da obra. Assim, antes da sua aplicação em campo, devem ser avaliados: resistência à tração localizada, ao estouro, puncionamento e impacto. Explicações detalhadas dessas propriedades podem ser encontradas em Palmeira (2018), Koerner (2016) e Palmeira & Fonseca (2015).

#### **2.4.5 CRITÉRIOS ANTICOLMATAÇÃO**

De forma geral, espera-se que partículas finas de solo entrem na estrutura do geotêxtil com a passagem da água. A colmatação ocorre quando há uma excessiva impregnação dos poros do geotêxtil ou acúmulo de partículas finas sobre sua face (cegamento).

Basicamente são três os mecanismos de colmatação de geotêxteis: Cegamento, bloqueamento e obstrução interna.

O cegamento ocorre quando partículas finas do solo são retidas pelo geotêxtil, causando a formação de uma camada de solo fino de baixa permeabilidade na face do geotêxtil, o que leva a redução significativa da permeabilidade global do sistema. O bloqueamento ocorre quando partículas do solo fecham os poros dos geotêxteis. A obstrução interna pode ocorrer devido a impregnação excessiva por partículas de solo nos poros e canais dos geotêxteis. A impregnação nos geotêxteis podem surgir com o espalhamento de solos finos não coesivos sobre o espécime, ou partículas finas trazidas pela água. Além disso, colônias de bactérias ou precipitação de compostos químicos podem obstruir os poros dos geotêxteis (Palmeira & Gardoni, 2000b; Palmeira, 2018)). A Figura 2.6 apresenta os mecanismos de colmatação.

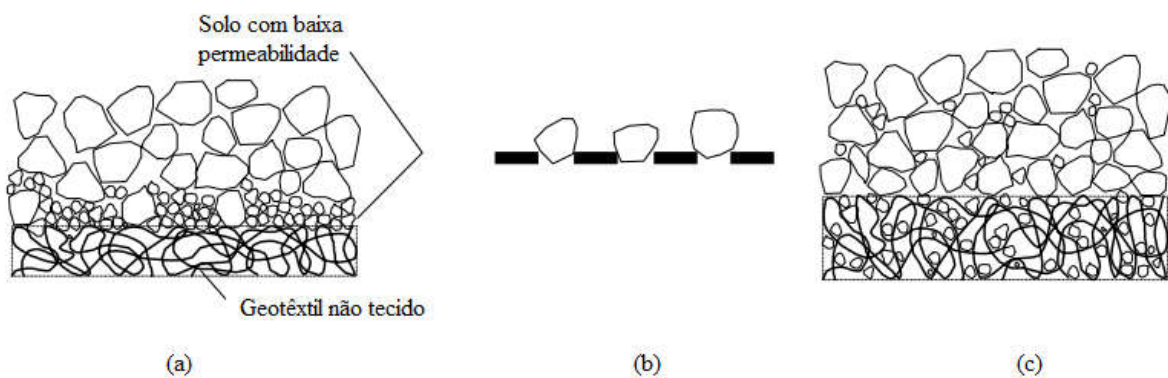


Figura 2.6. Mecanismos de colmatação (modificado de Palmeira e Gardoni, 2000b): (a) Cegamento, (b) Bloqueamento, (c) Obstrução interna.

De modo a minimizar as possibilidades de colmatação em obras de pavimentação o manual da FHWA recomenda as relações apresentadas pelas Equações 2.13, 2.14 e 2.15 (Zornberg & Thompson, 2012):

$$O_{95} \geq 3D_{15} \quad (2.13)$$

$$n \geq 50\% \text{ (para geotêxteis não tecidos)} \quad (2.14)$$

$$POA \geq 4\% \text{ (para geotêxteis tecidos)} \quad (2.15)$$

Sendo  $n$  a porosidade do geotêxtil e  $POA$  a porcentagem de área aberta do geotêxtil.

## 2.5 GEOSSINTÉTICOS EM PAVIMENTAÇÃO

Diversos estudos abordam o desempenho de geossintéticos aplicados entre camadas de pavimentos ferroviários e rodoviários. A inclusão desses materiais pode reforçar, distribuir as tensões e diminuir a mistura do material granular da camada de lastro (ou base para pavimento rodoviário) com o solo fino do subleito, o que, conseqüentemente, proporciona melhor estabilidade da via. Dessa forma, consegue-se diminuir os serviços de manutenção e reparos.

Conforme já mencionado, Koerner (2016) explica que a mistura entre um solo granular e um solo fino ocorre por dois processos: entrada de finos nos vazios da camada granular (bombeamento de finos) e penetração do solo granular na camada de solo fino.

Alobaidi & Hoare (1994) explicam que para ocorrer o bombeamento de finos são necessários:

- Solo do subleito com alta porcentagem de finos;
- Camadas de base ou sub-base com poucas partículas finas;
- Água livre na interface material fino/ material granular; e
- Cargas cíclicas.

Esses autores realizaram vários testes laboratoriais e detalharam os principais fatores que afetam a quantidade de bombeamento de finos entre o subleito e a sub-base de pavimentos rodoviários com a presença de geotêxtil não tecido. Entre os fatores estudados tem-se: número de ciclos de carga e volume de água livre (água adicionada ao sistema). De forma bem resumida os autores encontraram que:

- A taxa de bombeamento de finos reduziu com o número de ciclos de carga. Entre os fatores que justificam essa constatação tem-se: formação de uma camada filtrante na base do geotêxtil (quando o solo do subleito contém porcentagem significativa de areia); diminuição das tensões de contato nos grãos da brita devido a penetração da camada de sub-base no subleito (mais significante no início do ensaio); colmatação do geotêxtil e viscosidade da mistura água – solo fino, a qual aumenta com o bombeamento de finos; porém, à medida que aumenta a viscosidade, diminui a permeabilidade e, assim, diminui a taxa de bombeamento.

- Quanto mais água foi adicionado ao sistema, maior foi a taxa de bombeamento de finos. Entre as justificativas para essa constatação tem-se que há concentração de finos dentro do geotêxtil e nas regiões onde esse fica em contato com o solo do subleito; assim, quanto mais água entra no sistema, maior a possibilidade de diminuir essa concentração de finos, o que favorece o bombeamento.

Uma das principais conclusões do trabalho de Alobaidi & Hoare (1994) é que a intensidade de bombeamento de finos está diretamente relacionada com as deformações.

Alobaidi & Hoare (1996), também por meio de ensaios laboratoriais, nos quais foi possível medir as poropressões no centro da área de contato da sub-base com o subleito, constatou que a migração de finos do subleito depende, principalmente, da pressão da água nessa interface. A inserção de um geotêxtil entre essas camadas reduz a penetração das partículas da sub-base no subleito, o que reduz as poropressões. Entretanto, a rápida dissipação das poropressões pelo geotêxtil, podem gerar erosões na superfície do solo do subleito e bombeamento de finos. De forma geral, as dissipações das poropressões aumentaram com o aumento da permeabilidade e diminuíram com o aumento da espessura e da compressibilidade do geotêxtil. Os autores relatam que a decisão de medir as poropressões na interface entre as duas camadas deve-se a estudos anteriores como o de Alobaidi (1991) (*apud* Alobaidi & Hoare, 1996) o qual constatou que não há relação entre a quantidade de bombeamento de finos e a poropressão medida a 7 mm abaixo do solo do subleito. Além disso, os autores ainda concluem que, para solos coesivos de baixa permeabilidade, a poropressão dissipada no subleito durante o tempo de um carregamento deve ocorrer na superfície da camada do subleito (aproximadamente até 1 mm abaixo do topo).

Black & Holtz (1999) avaliaram o desempenho de cinco diferentes geotêxteis (4 não tecidos de gramaturas entre 132 g/m<sup>2</sup> a 280 g/m<sup>2</sup> e 1 não tecido com gramatura de 240 g/m<sup>2</sup>) usados como elementos de separação cinco anos após sua instalação em uma rodovia norte americana. Em relação aos danos, os geotêxteis exumados apresentaram pequenas lesões que, aparentemente, ocorreram durante a construção, porém isso pouco impactou no desempenho do pavimento. Apenas um dos geotêxteis apresentou danos mais significativos. Os agregados angulares penetraram parcialmente em áreas isoladas dos geotêxteis não tecidos de menores gramaturas, no entanto esses danos não foram refletidos nos resultados do ensaio de resistência à tração em faixa larga. Quanto à colmatação, os geotêxteis não tecidos apresentaram diferentes níveis de



impregnação, porém nenhum foi totalmente colmatado. No geotêxtil tecido, aparentemente ocorreu mais cegamento. A respeito do bombeamento de finos, foi observado contaminação em até 50 mm de espessura e nenhum tipo de geotêxtil se destacou como mais eficiente na redução da migração de finos. Os autores ressaltam que, aparentemente, a quantidade de partículas bombeadas não se relaciona com o nível de danos nos geotêxteis. Nos ensaios de resistência a tração em faixa larga a proposta foi avaliar a diferença da resistência à tração máxima e o alongamento máximo das amostras exumadas em relação às das amostras virgens. Além disso, foram retiradas amostras em pontos com diferentes espessuras de camada de base, o que mostrou gerar diferenças significativas nos resultados. Em todos os ensaios com geotêxteis, os solos do subleito adensaram significativamente mais em comparação com o trecho sem geotêxtil.

Indraratna *et al.* (2006) avaliaram, em equipamento de grande escala com carregamento cíclico, a efeito da inclusão de diferentes tipos de geossintéticos (geotêxtil tecido, geogrelha e geocomposto) na degradação e deformação de lastros novos e reutilizados. As inclusões foram inseridas entre o lastro e o subleito, e apresentaram resultados mais significativos nos ensaios com lastro reutilizado. Entre os geossintéticos empregados, o geocomposto formado por uma geogrelha e um geotêxtil não tecido proporcionou o melhor desempenho, diminuindo as deformações e a quebra de grãos do lastro reutilizado a valores menores do que os obtidos nos ensaios com lastro novo sem a utilização de geossintéticos.

Fernandes *et al.* (2008) apresentaram estudos do uso de geossintéticos e resíduos de mineração para reduzir o consumo de material de boa qualidade no sublastro de uma ferrovia de minério. Foram construídos e instrumentados 6 trechos experimentais. Os geossintéticos (geotêxtil não tecido e geogrelha) foram instalados em diferentes posições (base e topo da camada de sublastro) com o objetivo de avaliar a influência do tráfego na performance do geossintético. Os resultados obtidos apontaram para a influência positiva dos geossintéticos no desempenho do material alternativo de sublastro.

Henry *et al.* (2013) realizaram ensaios triaxiais cíclicos para avaliar a mistura de material granular disposto sobre camada de solo siltoso (nas condições saturada e não saturada), com e sem geotêxtil como elemento de separação. Medidores de deformação foram dispostos nas camadas, bem como na interface entre elas. A mistura das duas camadas foi impedida pelo geotêxtil, porém teve-se maiores deslocamentos totais na condição não saturada e com a

presença do geotêxtil, bem como maiores deslocamentos na camada de silte saturada com o elemento de separação. A Figura 2.7 apresenta os resultados obtidos.

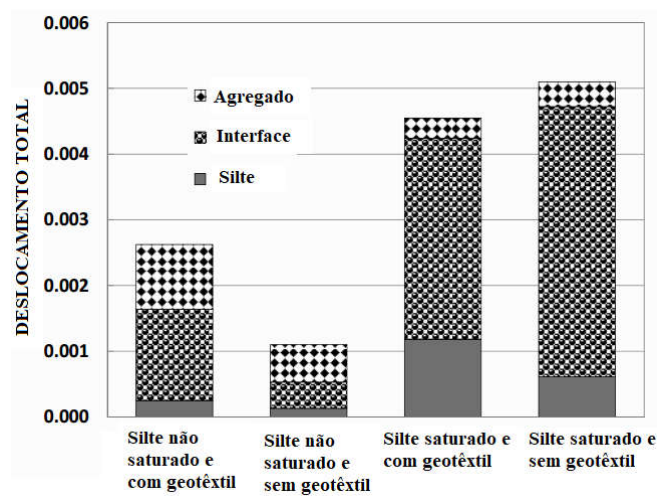


Figura 2.7. Deslocamentos permanentes no final dos ensaios cíclicos (modificado de Henry *et al.*, 2013).

Como justificativa para os maiores deslocamentos na condição não saturada e com a presença do geotêxtil, os autores propõem que o elemento de separação não permitiu o intertravamento do solo fino com o solo mais granular, o que promoveu o movimento lateral das partículas. Já quanto aos maiores deslocamentos na camada de silte na condição saturada, os autores primeiramente ressaltam a necessidade de mais ensaios, mas levantam a hipótese de ter ocorrido adensamento dessa camada devido a migração da água para o geotêxtil e a camada sobrejacente.

Chawla & Shahu (2016) realizaram ensaios em um modelo físico de uma ferrovia, na escala 1:3. Foram avaliadas duas espessuras para a camada de sublastro e dois tipos de solo de subleito (siltoso e argiloso). As geogrelhas de reforço foram inseridas na interface lastro-sublastro e os geotêxteis não tecidos separadores entre o sublastro e o subleito. Foram construídos modelos apenas com geogrelha ou geotêxtil, bem como com ambos. Os resultados mostraram que as inclusões melhoram a distribuição de tensões nas camadas do pavimento ferroviário e reduziram o bombeamento de finos. No caso do subleito com solo siltoso, o pavimento reforçado apenas com geotêxtil apresentou melhores respostas do que o reforçado apenas com geogrelha. Isto ocorreu devido ao comportamento do geotêxtil como elemento de separação, que não permitiu a mistura de partículas do subleito com o sublastro. Já no caso do subleito com solo argiloso, o ensaio apenas com geogrelha proporcionou melhores resultados quando comparado com os ensaios onde foi utilizado apenas o geotêxtil.

Susunaga *et al.* (2018) investigou o desempenho de geotêxteis não tecidos (200, 400 e 600 g/m<sup>2</sup>) como elemento de separação entre camadas de pavimento rodoviário, por meio de ensaios laboratoriais com carregamento cíclico. Medidas de deslocamento e poropressão no solo do subleito foram obtidas e, após os ensaios, foram avaliados os danos mecânicos nos materiais sintéticos. Os resultados mostraram que os geotêxteis são eficientes como elemento de separação, pois evitam a contaminação do solo de base e aceleram a dissipação das poropressões no subleito. Entretanto, danos mecânicos significativos foram observados no geotêxtil de menor gramatura.

Entre as principais conclusões obtidas pelos estudos citados tem-se que o geotêxtil impede ou diminui significativamente a interpenetração entre camadas de um pavimento e o subleito. Porém, quanto a bombeamento de finos, estudos específicos para relacionar a granulometria do solo do subleito com o tipo de geotêxtil (espessura, gramatura, abertura de filtração, permeabilidade, etc.) são necessários para que esse material reduza efetivamente esse fenômeno.

Em ferrovias, o geotêxtil pode ser incluído na interface sublastro-subleito, bem como pode substituir, parcial ou totalmente, a camada de sublastro. A inclusão desse material permite maior rapidez na construção e, se especificado corretamente, pode reduzir a contaminação do lastro, o que proporciona diminuição das atividades de manutenção e, assim, maior competitividade ao modal.

## CAPÍTULO 3

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentadas as principais características dos materiais utilizados na pesquisa, bem como a descrição dos equipamentos, as configurações e os procedimentos adotados na realização dos ensaios.

Como o objetivo principal do trabalho é avaliar a influência de geotêxteis não tecidos com a função de separar as camadas do pavimento ferroviário, foram realizados ensaios com carregamento cíclico, de forma a simular o tráfego das locomotivas e vagões. Para melhor conhecimento dos materiais e avaliação dos resultados, algumas propriedades dos geotêxteis foram obtidas sob tensões com magnitudes semelhantes às dos ensaios cíclicos. Além disso, os materiais também foram avaliados após submetidos as cargas cíclicas. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta um esquema geral dos ensaios realizados.

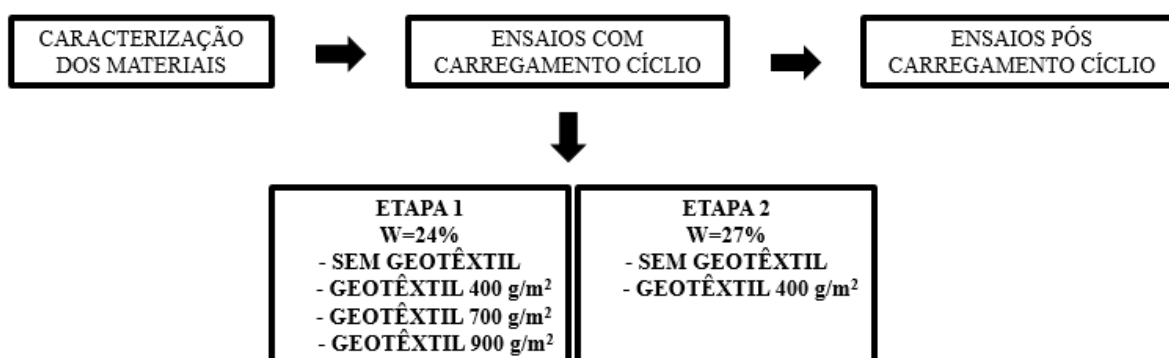


Figura 3.1. Esquema geral dos ensaios realizados.

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

#### 3.1.1 LASTRO

Para a camada de lastro foi utilizado material granular oriundo do pátio de armazenamento de agregados do metrô de Brasília. Segundo os relatórios de ensaios fornecidos pela empresa MPE Engenharia e Serviços S.A, esses agregados são provenientes de rocha gnaisse e foram extraídos da pedreira Campo Limpo, localizada no Estado do Goiás.

A coleta foi realizada seguindo as especificações do anexo G da norma NBR 5564 (2011). Para obter amostras representativas e homogêneas buscou-se coletar material em diversos pontos da pilha. Na Figura 3.2 são apresentadas imagens do momento da coleta.



Figura 3.2. Coleta realizada no pátio de estocagem do metrô de Brasília.

Todo material coletado foi homogeneizado e quarteado conforme as recomendações da norma NBR NM 27 (2001). Na Figura 3.3 tem-se as amostras divididas. Cuidados como a limpeza da superfície onde as britas foram dispostas, bem como varrer os espaços vazios entre um monte e outro, foram tomados para evitar contaminação e perda do material. Durante a mistura e o quarteamento, o material foi umedecido para evitar a perda de finos.



Figura 3.3. Homogeneização e quarteamento das britas.

Após o quarteamento, as amostras foram reduzidas às quantidades especificadas nas normas para caracterização do lastro ferroviário (NBR 5564 e especificação 80-EM-033a-58-8006 da VALEC). Porém, para o cumprimento do cronograma da pesquisa, não foi possível a realização desses ensaios. Apenas a granulometria do material, por meio de peneiramento a seco, seguindo o exposto na NBR NM 248 (2001), foi concluída. Na Figura 3.4 têm-se a curva granulométrica obtida, bem como os limites adotados na especificação 80-EM-033a-58-8006 da VALEC e na NBR 5564.

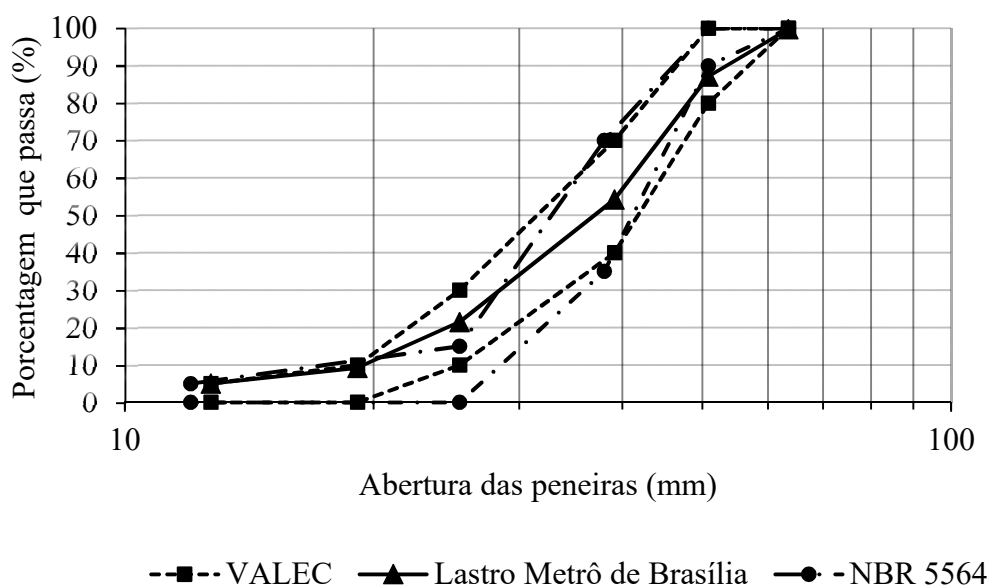


Figura 3.4. Curva granulométrica dos agregados coletados no pátio de armazenamento de agregados do metrô de Brasília e limites da especificação 80-EM-033a-58-8006 da VALEC e NBR 5564.

Pela Figura 3.4, percebe-se que a granulometria do lastro do metrô de Brasília encontra-se nos limites especificados pela Valec, mas não pela NBR 5564. Na Tabela 3.1 são apresentadas algumas informações advindas da análise granulométrica.

Tabela 3.1 Análise Granulométrica do Lastro do Metrô de Brasília.

Normatização	Ensaio	Resultado
NBR NM 248/ 2001	Análise Granulométrica	Figura 3.4
	D10 (mm)	19,5
	D30 (mm)	28,9
	D50 (mm)	37,4
	D60 (mm)	41,4
	D95 (mm)	57,5
	CU	1,8
	CC	0,9

Os demais resultados das propriedades físicas do material foram fornecidos pela empresa MPE Engenharia e Serviços S.A e estão apresentados na Tabela 3.2, bem como os valores de referência expostos na Norma NBR 5564 (2011) e na especificação 80-EM-033a-58-8006 da VALEC.

Tabela 3.2. Características do material granular e valores de referência.

<b>Característica</b>	<b>Valor de referência NBR 5564</b>	<b>Valor de referência VALEC</b>	<b>Resultados obtidos</b>
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica	Cúbica
Partículas não cúbicas (máximo)	15%	10%	28%
Massa específica aparente (mínima)	2500 kg/m <sup>3</sup>	2400 kg/m <sup>3</sup>	2860 kg/m <sup>3</sup>
Absorção de água (máxima)	0,8%	1,0%	0,2%
Porosidade aparente (máxima)	1,5%	1,0%	0,7%
Resistência a compressão axial (mínima)	100 MPa	100 MPa	233,9 MPa
Material pulverulento (máximo)	1,0%	1,0%	0,6%
Torrões de argila (máximo)	0,50%	0,50%	0,0%
Limite de massa unitária no estado solto	1,25 g/ cm <sup>3</sup>	-	1,55 g/cm <sup>3</sup>
Abrasão Los Angeles (máxima)	30,0%	40,0%	14,4%

Pela Tabela 3.2, conclui-se que, quanto à forma média das partículas, os agregados não atenderam os limites adotados nas especificações brasileiras. As demais propriedades foram atendidas.

De forma geral, agregados com forma cúbica proporcionam melhor entrosamento entre os grãos o que leva a uma maior resistência ao cisalhamento. Além disso, como as forças são transmitidas pelo contato entre as partículas, as de formato não cúbica, ou seja, lamelares ou alongadas, são mais suscetíveis a quebra (Pinto, 2006). Assim, a forma do agregado é um fator importante que influencia o comportamento mecânico do lastro.

### 3.1.2 SUBLEITO

Para compor o material do subleito foi utilizado o solo do antigo Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. Na Figura 3.5 têm-se imagens do local da retirada das amostras.

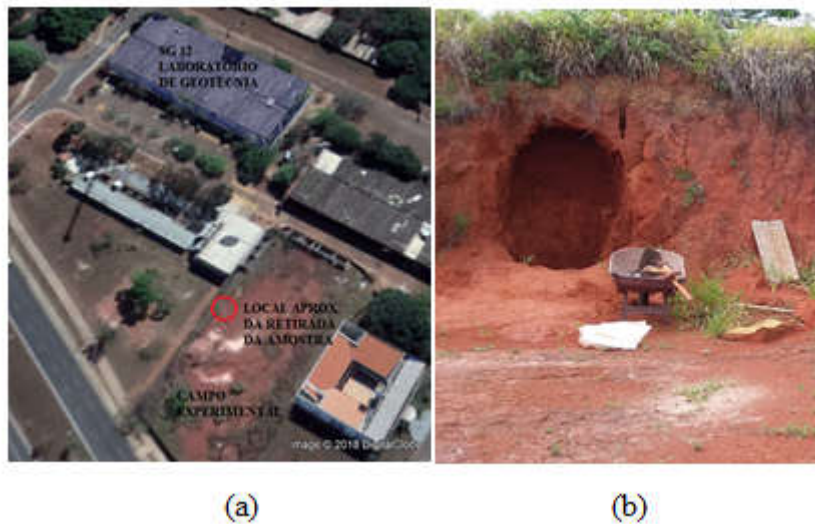


Figura 3.5. Local de retirada da amostra do solo do subleito. (a) Visão geral; (b) Ponto da coleta.

A escolha desse solo deve-se as facilidades de retirada das amostras, já que o antigo Campo Experimental encontra-se próximo ao Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília, onde foram realizados os ensaios desse trabalho. Além disso, vários pesquisadores utilizaram esse solo, e assim, tem-se uma gama de resultados de ensaios para utilização e comparações.

### 3.1.2.1 GRANULOMETRIA

Na Figura 3.6 têm-se as curvas granulométricas (com e sem defloculante) do solo do campo experimental e, na Tabela 3.3, algumas propriedades e classificações desse material.

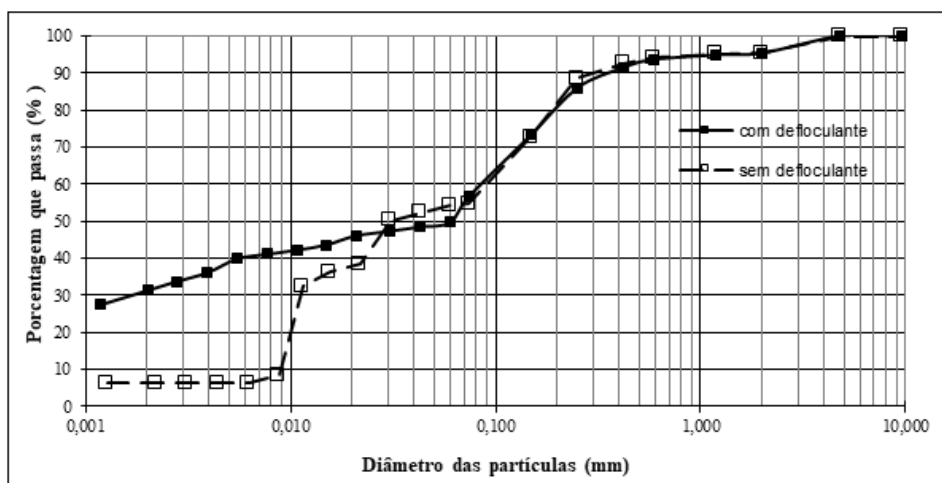


Figura 3.6. Curvas granulométricas do solo do campo experimental (Burgos Lopera, 2016).



Tabela 3.3. Propriedades e classificações do solo do campo experimental da Universidade de Brasília (Burgos Lopera, 2016).

<b>Propriedades</b>	<b>Valores com defloculante / sem defloculante</b>
Análise Granulométrica	Figura 3.6
D15 (mm)	- /0,0094
D85 (mm)	0,24 / 0,22
Limete de liquidez (%)	37
Limete de plasticidade (%)	28
Índice de plasticidade (%)	9
Classificação SUCS	ML-CL / CL
Classificação AASHTO	A-4 /A-4
Classificação MCT expedita	LA-LA'

Em síntese, o solo foi classificado como areia silto-argilosa laterítica, porosa, com predominância de gibsita, presença de macroporos e muitos agregados (Burgos Lopera, 2016).

### **3.1.2.2 CURVA DE COMPACTAÇÃO E INDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA**

Seguindo as recomendações da norma NBR 7182 (2016) foram realizados, com energia Proctor Normal, ensaios de compactação (Figura 3.7). A escolha da energia Proctor Normal deve-se à Especificação de Serviço ISF 207: Estudos Geotécnicos, do DNIT (2016), a qual preconiza essa energia para o estudo do solo do subleito na fase de projeto básico de ferrovias.

Para obter as curvas de saturação do solo em estudo fez-se necessário conhecer o peso específico dos sólidos. Para isso, foi utilizado o aparelho Pentapyc 5200E, o qual foi projetado para medir o volume de materiais sólidos, empregando o princípio de deslocamento de fluido (gás), uma vez que este penetra nos poros menores, garantindo máxima precisão. Para tanto, e conforme recomendado, utilizou-se gás hélio, já que suas pequenas dimensões atômicas garantem a penetração em poros que se aproximam de 0,2 nm em diâmetro (Quantachrome Instruments, 2009). O valor médio obtido nos ensaios foi de 2,7 g/cm<sup>3</sup>.

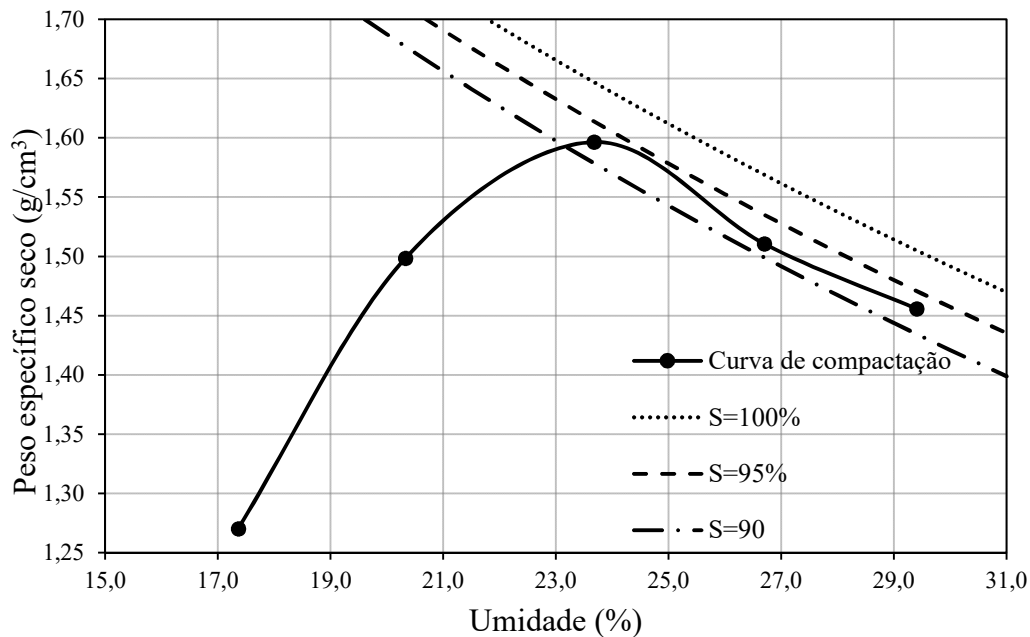


Figura 3.7. Curvas de compactação e saturação.

Após obter a curva de compactação, foram realizados ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão (de acordo com as recomendações da NBR 9895 (2016) para conhecer a capacidade de suporte do solo utilizado. Na primeira etapa de ensaios de carregamento cíclico o solo do subleito foi compactado com umidade de 24% (umidade ótima). Optou-se pela umidade ótima, pois as deformações aceitáveis no modal ferroviário são muito baixas. Hay, 1982 *apud* Spada, 2003 apresenta valores aceitáveis de deflexão nos trilhos para diferentes condições de via. Já na segunda etapa de ensaios buscou-se avaliar o comportamento do pavimento com o solo do subleito com menor capacidade de suporte e, assim, escolheu-se a umidade de 27%. Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados de ISC e expansão para o solo do subleito compactado nessas duas umidades.

Tabela 3.4. Resultados ISC e expansão.

	w = 24%	w = 27%
<b>ISC (%)</b>	7	3
<b>EXPANSÃO (%)</b>	0,1	-0,51

### 3.1.2.3 PERMEABILIDADE

Ensaio de permeabilidade no solo do campo experimental foram realizados por alguns autores (Oliveira, 2003; Silva, 2007), sendo o mais recente o de Uribe (2016). A autora realizou ensaios

com amostras indeformadas retiradas a 5 m e obteve valores de permeabilidades entre  $2,63 \times 10^{-7}$  a  $9,01 \times 10^{-7}$  m/s.

### 3.1.3 ELEMENTOS DE SEPARAÇÃO

Com o objetivo de avaliar o efeito de geotêxteis como elemento de separação em pavimento ferroviário, foram utilizados geotêxteis do tipo não tecido com filamentos cortados e unidos por agulhagem. A variação definida como critério de seleção dos geotêxteis foi a gramatura: 400, 700 e 900 g/m<sup>2</sup>. Os materiais de 400 e 700 g/m<sup>2</sup> são de poliéster e o de 900 g/m<sup>2</sup>, de polipropileno. A Figura 3.8 apresenta os espécimes utilizados.

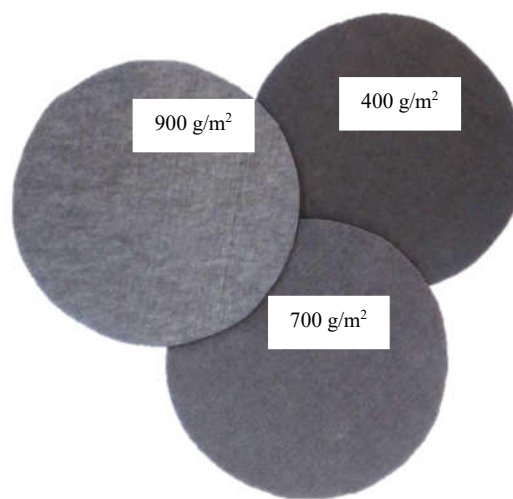


Figura 3.8. Geotêxteis utilizados na pesquisa.

Para conhecer algumas propriedades dos geotêxteis quando submetidos a esforços de compressão, foram realizados ensaios de compressibilidade (variação da espessura com a aplicação de tensões normais) e avaliação da abertura de filtração pelo método do Bubble Point (BBP). Além desses ensaios, para avaliar a resistência dos geotêxteis antes e após o carregamento cíclico, os espécimes foram submetidos ao ensaio de tração em faixa larga.

#### 3.1.3.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL: AVALIAÇÃO DA ESPESSURA DO GEOTÊXTIL SOB TENSÃO NORMAL

Com o intuito de conhecer a variação da espessura dos geotêxteis quando submetidos a tensões de compressão, foram realizados ensaios no equipamento de adensamento unidimensional (prensa de adensamento tipo BISHOP) (Figura 3.9).

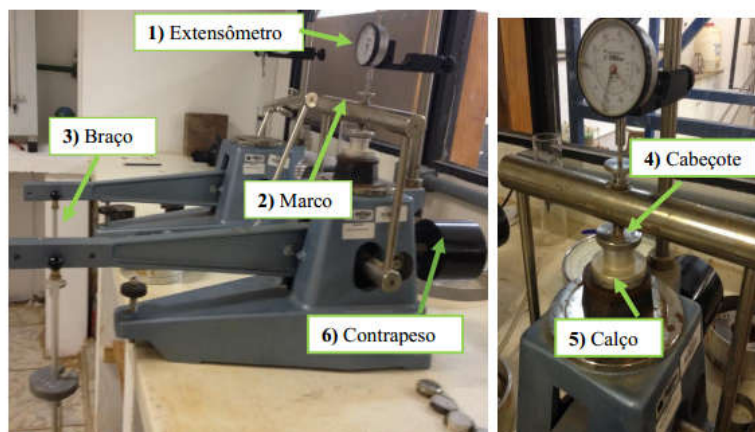


Figura 3.9. Equipamento de adensamento usado para ensaios de compressão uniaxial (Trejos Galvis, 2016).

Os espécimes para esse ensaio não passaram por nenhum tipo de preparo, apenas foram cortados nas dimensões adequadas (aproximadamente 74 mm). Foi feito o equilíbrio da prensa por meio de nível de bolha e os pesos foram aplicados em 4 estágios (10 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa). Para mudar de um estágio de carregamento, esperou-se a completa estabilização dos deslocamentos. Mais detalhes da metodologia utilizada nesse ensaio podem ser encontrados no trabalho de Trejos Galvis (2016) A Figura 3.10 apresenta os resultados obtidos para os geotêxteis utilizados na pesquisa.

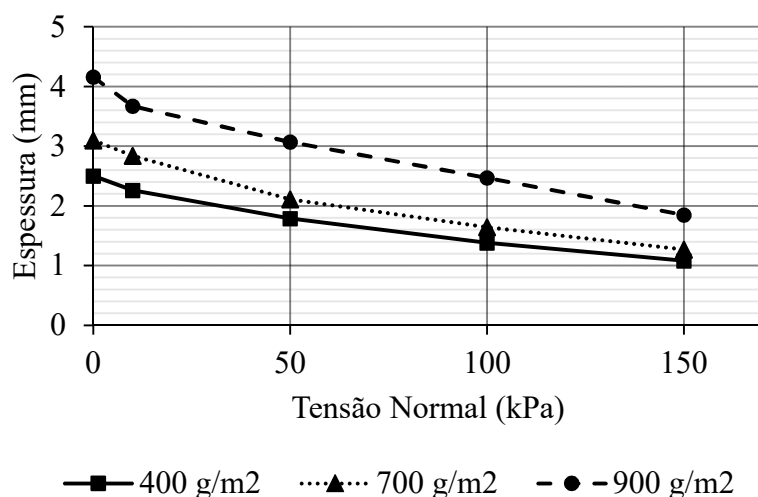


Figura 3.10. Variação da espessura dos geotêxteis com a tensão normal.

Pela Figura 3.10 percebe-se que, quanto maior a gramatura do geotêxtil, maior a variação da espessura quando submetido a tensões de compressão.

### 3.1.3.2 ENSAIO DE BUBBLE POINT

Para conhecer a abertura de filtração dos geotêxteis, tanto sem a aplicação de esforços, como quando submetido a tensão de compressão, utilizou-se o método de ponto de bolha (Bubble Point Test - BBP). Detalhes do equipamento estão apresentados na Figura 3.11.

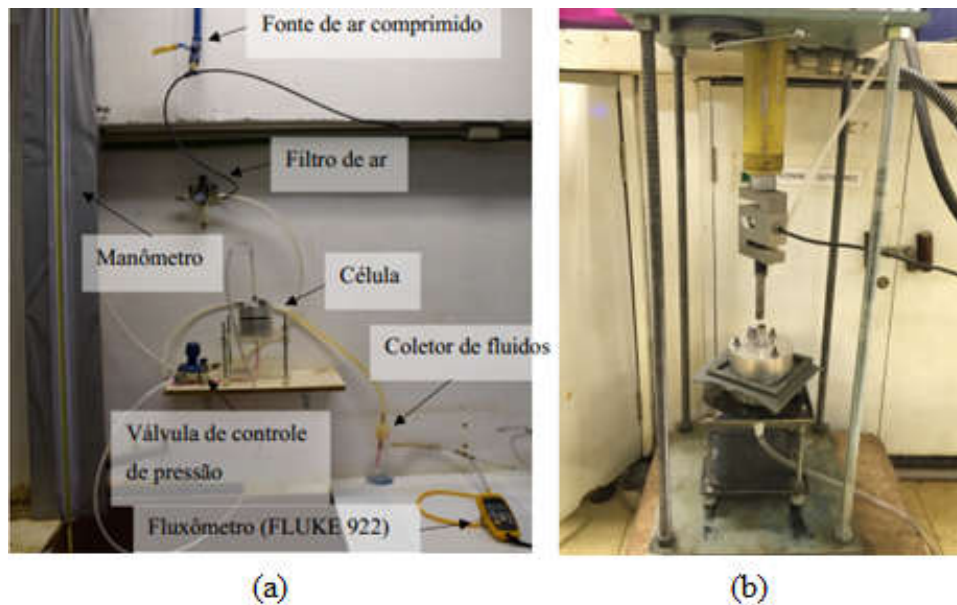


Figura 3.11. (a) Equipamento do ensaio de BBP sem confinamento (Moraes Filho, 2018). (b) Detalhe do sistema utilizado para o ensaio de BBP com confinamento (Melo, 2018).

Nos ensaios com confinamento utilizou-se o sistema composto por uma estrutura de reação metálica, um cilindro hidráulico conectado a uma bomba manual, uma célula de carga e um pendural para aplicação das tensões de confinamento (Figura 3.11b). Para a aquisição dos dados foi utilizado o aquisitor Spider-8, modelo SR55, da empresa HBM. Mais detalhes sobre os sistemas utilizados podem ser encontrados nos trabalhos de Melo (2018), Moraes Filho (2018) e Trejos Galvis (2016).

Os procedimentos no ensaio de BBP foram divididos em duas fases: com o espécime seco; com o espécime saturado. O líquido de saturação utilizado foi o etanol, conforme recomendado pela ASTM D6767 (2011). O processo de saturação ocorreu dentro da célula, sendo que, previamente, as bordas dos espécimes foram impregnadas com silicone (Figura 3.12a). Além disso, toda a borda da célula foi revestida com silicone para que não houvessem vazamentos (Figura 3.12b). Devido aos insucessos por falta de saturação nos primeiros ensaios realizados, após a colocação do etanol, esperou-se 60 minutos antes de iniciar os procedimentos. Ressalta-se que, esse mesmo tempo de espera foi adotado por Melo (2018).



Figura 3.12. Preparação para o ensaio de BBP: (a) Geotêxtil com as bordas impregnadas. (b) Célula revestida com silicone.

Após a saturação, os demais passos seguiram a metodologia utilizada por Melo (2018) e, para a interpretação dos resultados, as recomendações da ASTM D6767 (2011). Assim, obteve-se as curvas de distribuição das dimensões dos poros para amostras sem e com confinamento (Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15). A tensão de compressão aplicada foi de 100 kPa, pois essa foi a tensão a qual os geotêxteis foram submetidos nos ensaios com carregamento cíclico. A Tabela 3.5 resume os resultados encontrados.

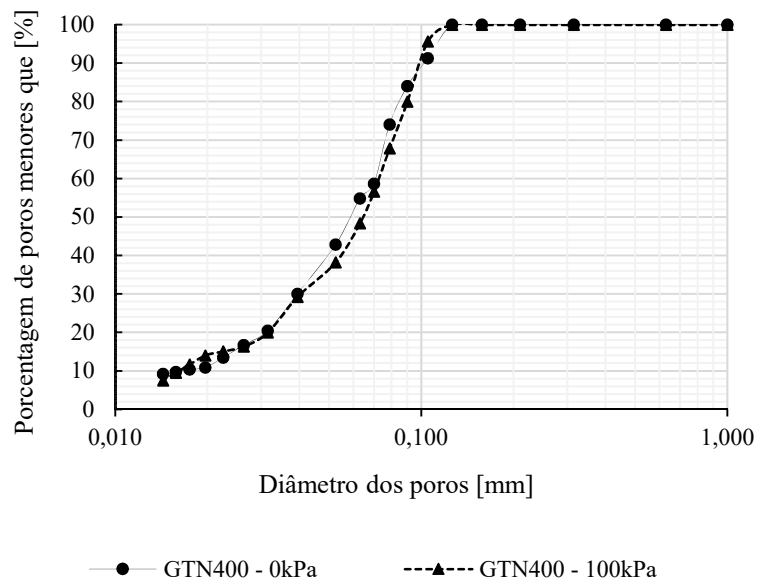


Figura 3.13. Curva de distribuição de poros – geotêxteis 400 g/m<sup>2</sup>.

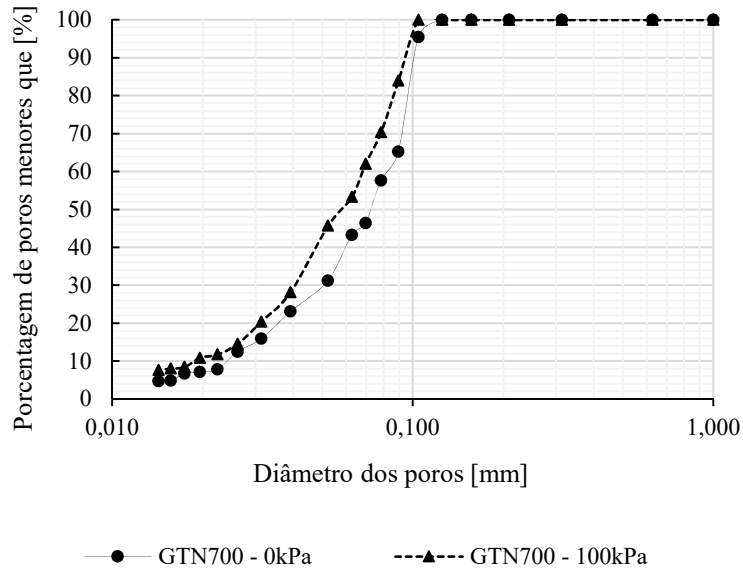


Figura 3.14. Curva de distribuição de poros – geotêxteis 700 g/m<sup>2</sup>.

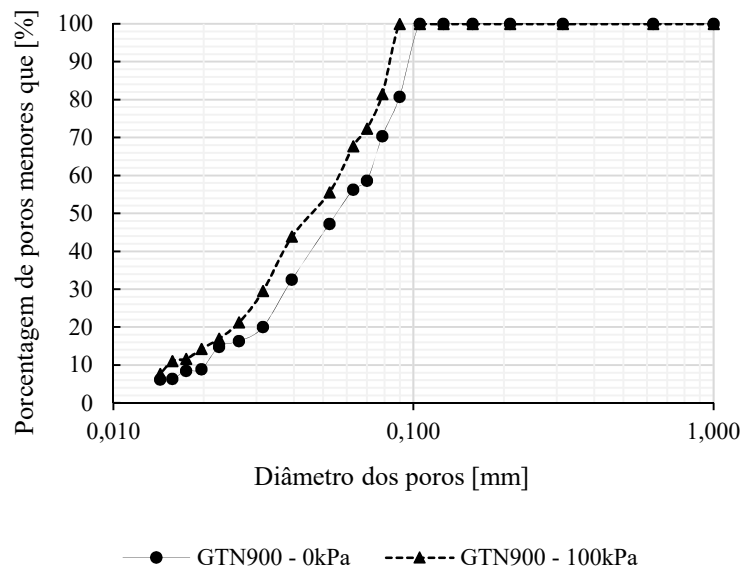


Figura 3.15. Curva de distribuição de poros – geotêxteis 900 g/m<sup>2</sup>.

Tabela 3.5. Resultados BBP.

	Geotêxtil 400 g/m <sup>2</sup>		Geotêxtil 700 g/m <sup>2</sup>		Geotêxtil 900 g/m <sup>2</sup>	
	0 kPa	100kPa	0 kPa	100kPa	0 kPa	100kPa
<b>O98 (mm)</b>	0,120	0,111	0,109	0,102	0,102	0,088
<b>O95 (mm)</b>	0,113	0,105	0,104	0,098	0,100	0,085
<b>O90 (mm)</b>	0,103	0,098	0,101	0,094	0,096	0,081
<b>O50 (mm)</b>	0,059	0,064	0,055	0,058	0,055	0,051

Pelos gráficos e tabelas apresentados acima, percebe-se que, como esperado, as aberturas de filtração diminuíram quando o espécime foi submetido ao confinamento. Apenas para os valores de  $O_{50}$  essa tendência não foi observada nas gramaturas de  $400 \text{ g/m}^2$  e  $700 \text{ g/m}^2$ . Uma possível explicação para o ocorrido deve-se ao fato de que o confinamento tem influência mais significativa nos poros maiores do que nos menores. Além disso, ao ser confinado, houve modificações em toda estrutura do espécime, podendo os poros de diâmetros menores sofrerem redução ou aumento.

Ressalta-se que, devido as dificuldades de saturação das amostras, o que levou a necessidade de todo preparo com impregnação de silicone, não foi possível a realização dos ensaios em um número relevante de amostras, assim, mais ensaios devem ser realizados.

### **3.1.3.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRACÇÃO EM FAIXA LARGA**

Os ensaios de tração foram realizados na prensa de tração uniaxial modelo DL 2000 fabricada pela empresa EMIC seguindo as especificações da NBR10319 (2013). Esse equipamento fornece os dados necessários para determinar a resistência máxima do corpo de prova (CP) e sua deformação quando atingida a ruptura.

Como as amostras virgens serviriam de referência para comparação com as amostras que foram submetidas aos ensaios com carregamento cíclico, ambas foram cortadas com as mesmas dimensões. Devido às restrições do tamanho das amostras que foram ensaiadas no equipamento de carregamento cíclico, todas os CP's foram cortados com as dimensões de 17,5 cm por 15 cm, sendo que, os marcadores na prensa ficaram com 7,5 cm x 15 cm. A Figura 3.16 apresenta o CP na máquina de ensaio.





Figura 3.16. Corpo de prova na máquina para ensaio de tração.

Após o ensaio percebeu-se que os CP's estavam rompendo nas garras do equipamento (Figura 3.17). Na tentativa de solucionar esse problema, cortou-se pedaços de geotêxteis de forma a recobrir as partes das amostras que ficavam em contato com a garra, assim, o espécime ficou mais rígido nessas regiões e a garra não ficou em contato direto com a mostra ensaiada. Com essa configuração obteve-se, para alguns espécimes, rompimento fora da região da garra (Figura 3.18). Na Figura 3.19 são apresentadas as curvas de tensão *versus* deformação para todas as amostras ensaiadas. Na Figura 3.20 e Figura 3.21 são apresentadas, respectivamente, as curvas com os valores médios de carga *versus* deformação para tracionamento nas direções de fabricação e perpendicular a esta. Percebe-se que para os geotêxteis com gramaturas de 700 g/m<sup>2</sup> e 900 g/m<sup>2</sup> a direção do tracionamento proporcionou resultados de resistência significativamente diferentes, inclusive, a resistência na direção perpendicular à direção de fabricação nos geotêxteis de 700 g/m<sup>2</sup> foram superiores a de 900 g/m<sup>2</sup> na direção de fabricação (Tabela 3.6).



Figura 3.17. Corpos de prova com rompimento nas garras.

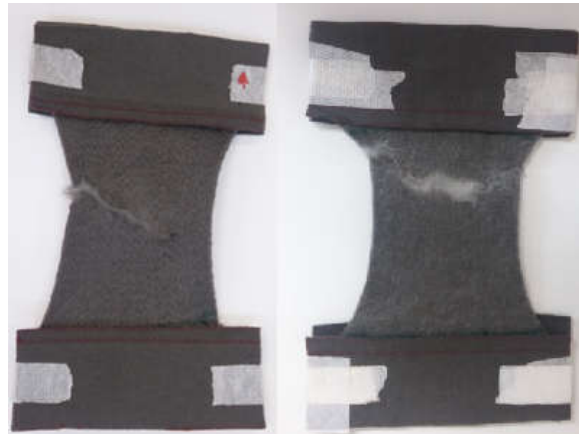


Figura 3.18. Espécime reforçado com rompimento fora da região da garra.

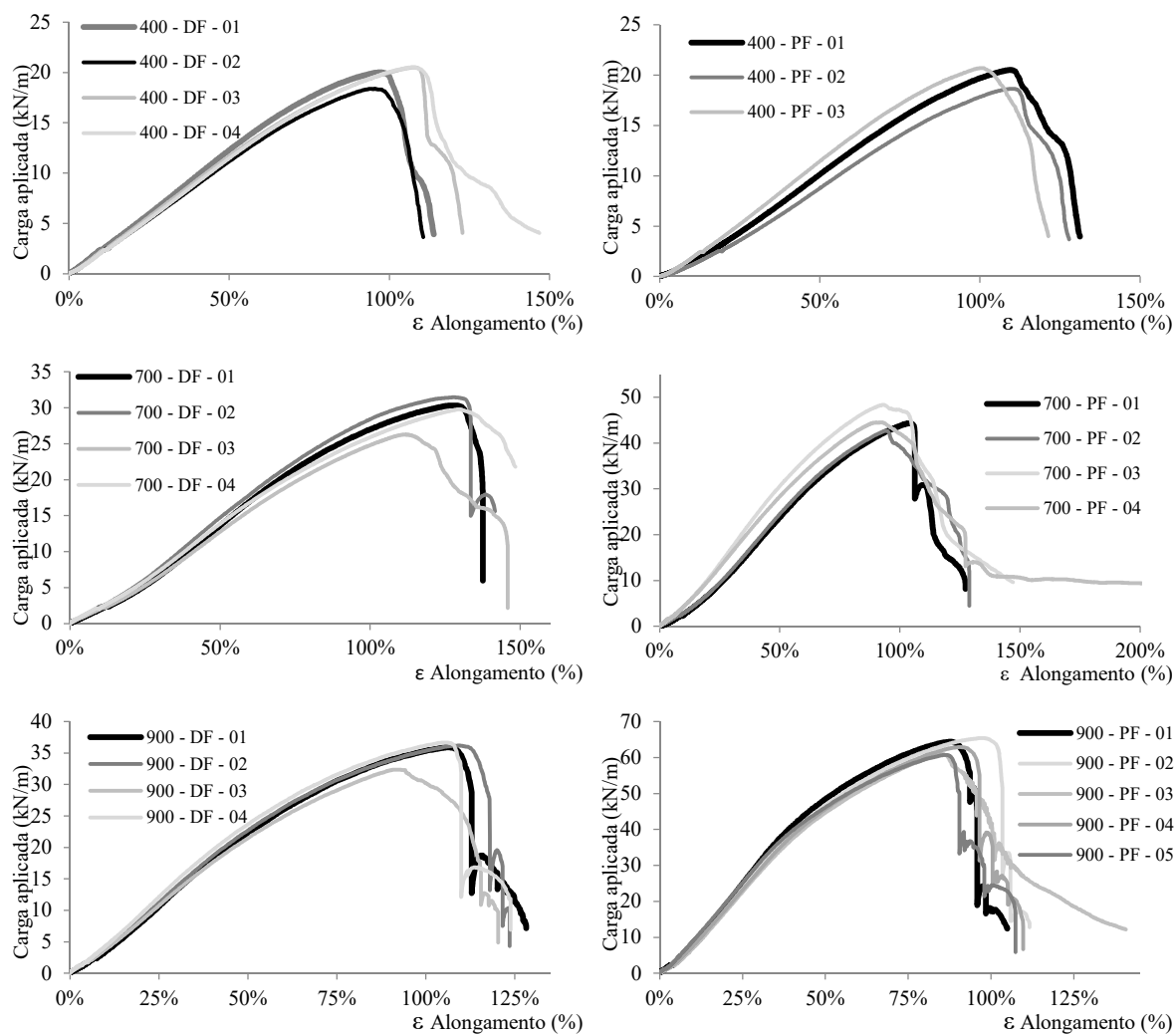


Figura 3.19. Curvas de tensão versus deformação na direção de fabricação (DF) e na direção perpendicular a esta para todas as amostras virgens ensaiadas.

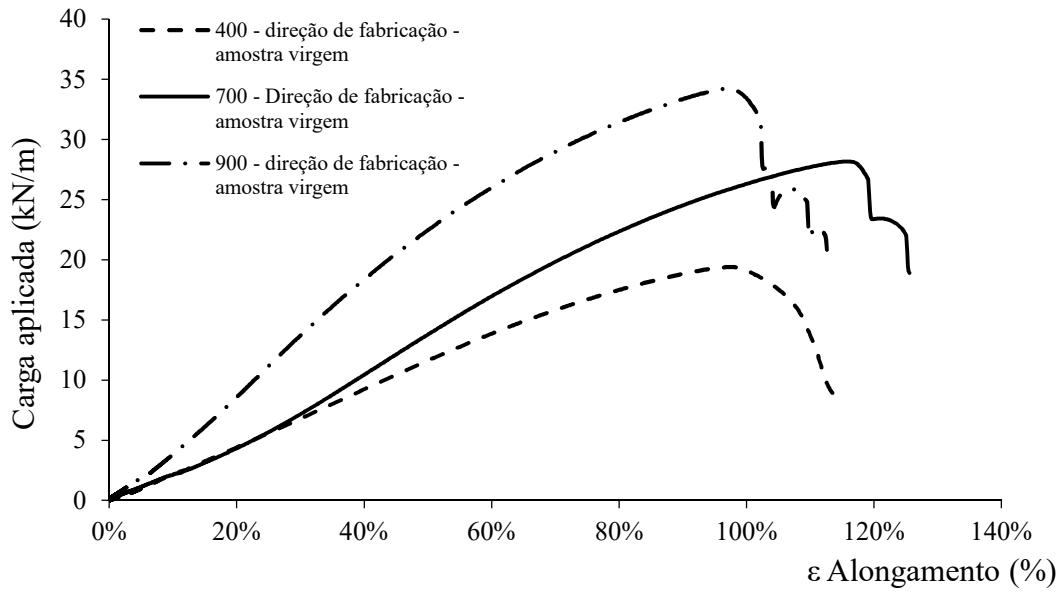


Figura 3.20. Curvas carga versus deformação do ensaio à tração nos geotêxteis virgens – rompimento na direção de fabricação (valores médios).

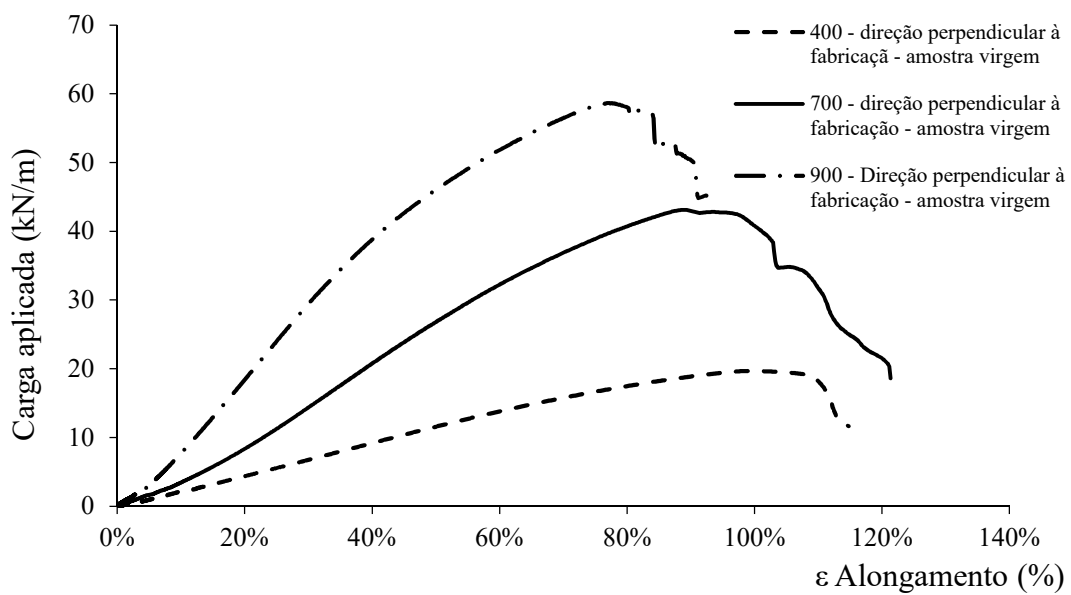


Figura 3.21. Curvas carga versus deformação do ensaio à tração nos geotêxteis virgens – rompimento normal à direção de fabricação (valores médios).

Tabela 3.6. Resistência a tração máxima (valor médio).

<b><u>AMOSTRAS</u></b> <b><u>VIRGENS</u></b>	<b>Geotêtil 400 g/m<sup>2</sup></b>		<b>Geotêtil 700 g/m<sup>2</sup></b>		<b>Geotêtil 900 g/m<sup>2</sup></b>	
	<b>Tracionam. na direção de fabricação</b>	<b>Tracionam. na direção perpendicular à fabricação</b>	<b>Tracionam. na direção de fabricação</b>	<b>Tracionam. na direção perpendicular à fabricação</b>	<b>Tracionam. na direção de fabricação</b>	<b>Tracionam. na direção perpendicular à fabricação</b>
<b>Resistência à tração máx. (valor médio – kN/m)</b>	19,9	20,0	29,5	45,0	35,3	62,9

Posteriormente, no item 4.6.2, esses resultados serão comparados com os obtidos nos geotêxteis submetidos ao carregamento cíclico.

### 3.2 EQUIPAMENTOS

O equipamento utilizado nos ensaios de carregamento cíclico foi projetado por Andrade (2010) para estudar a influência de elementos de separação entre as camadas de pavimento. O equipamento é composto por:

- Cilindro de aço bipartido e estrutura de reação;
- Sistema hidráulico para aplicação do carregamento cíclico.

A Figura 3.22 apresenta o esquema completo do equipamento com a instrumentação.

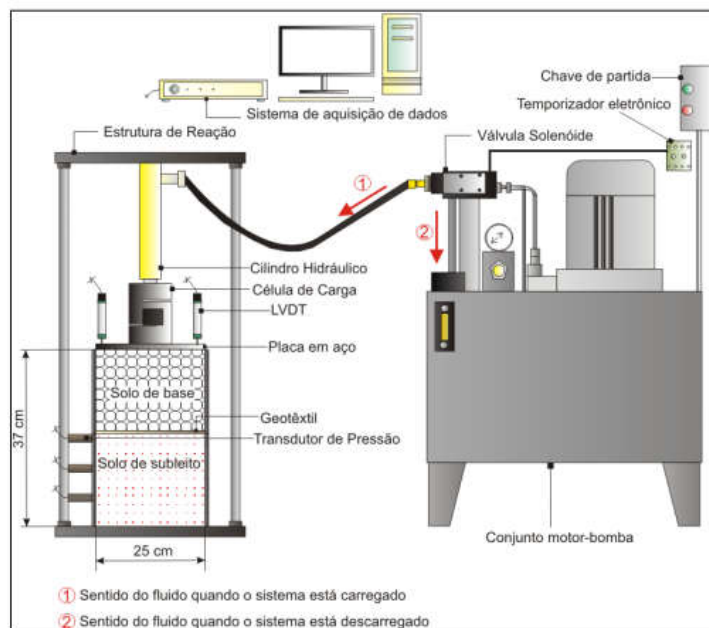


Figura 3.22. Esquema geral do equipamento (Andrade, 2010).

### 3.2.1 CILINDRO DE ENSAIO E ESTRUTURA DE REAÇÃO

O cilindro utilizado nos ensaios é composto por duas partes e tem 25 cm de diâmetro e altura total de 37 cm, sendo 22 cm na parte inferior e 15 na superior. As duas partes são conectadas por meio de 4 parafusos. Ao longo da altura, têm-se pequenos furos onde são instalados os transdutores de poropressão. O cilindro é acoplado à uma estrutura de reação, na qual está fixado um cilindro hidráulico para aplicação do carregamento. A ligação do cilindro hidráulico com o sistema de aplicação de carregamento cíclico (sistema hidráulico) é feita por meio de mangueiras de alta pressão. Na Figura 3.23 são apresentados detalhes dos equipamentos.

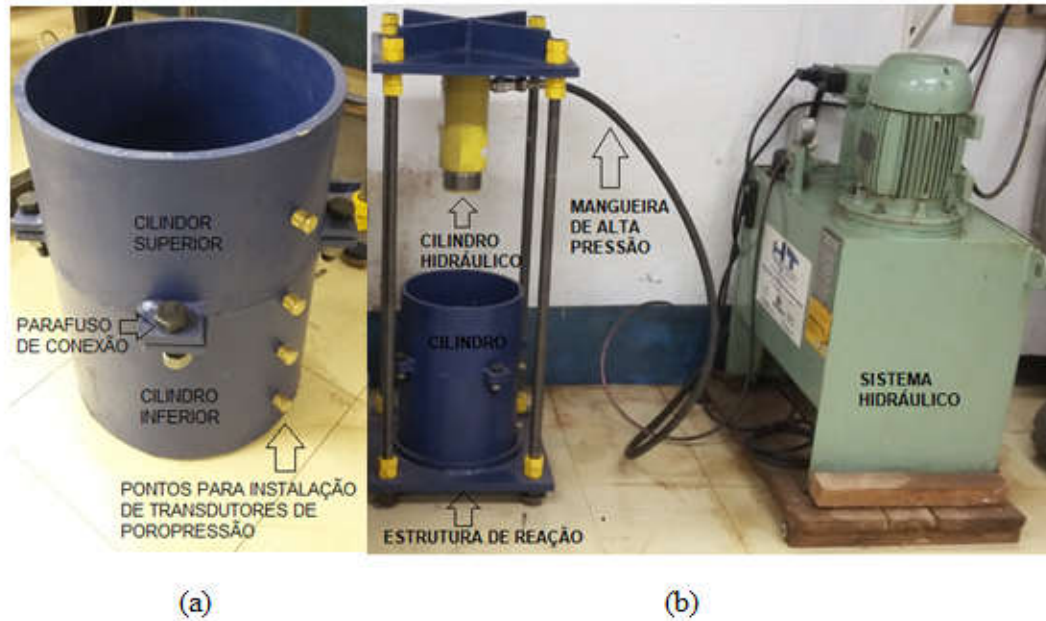


Figura 3.23. Equipamentos dos ensaios de carregamento cíclico. (a) Detalhes do cilindro bipartido. (b) Cilindro apoiado na estrutura de reação e ligação com o sistema hidráulico.

### 3.2.2 SISTEMA HIDRÁULICO DE CARREGAMENTO CÍCLICO

O sistema hidráulico, similar ao utilizado por Antunes (2008) e Susunaga (2015), é composto por:

- Conjunto motor bomba com reservatório de óleo de 80 l e motor trifásico de 4 cv, responsável pela circulação do fluido e aplicação da pressão no cilindro hidráulico, sendo esta pressão posteriormente transmitida à placa de aço posicionada sobre a camada de brita;
- Válvula solenoide responsável pelo direcionamento do fluido para o cilindro hidráulico (sistema carregado) ou para o reservatório (sistema descarregado);
- Válvula de alívio como sistema de segurança do circuito contra pressões excessivas (máxima pressão 30 MPa);
- Cilindro hidráulico para aplicação da carga cíclica;
- Mangueiras hidráulicas de alta pressão para transportar o fluido do reservatório ao cilindro hidráulico;

- Temporizador para controle da frequência de abertura e fechamento da válvula solenoide.

A Figura 3.24 apresenta detalhes do sistema hidráulico utilizado e a Figura 3.25 o temporizador usado nos ensaios.

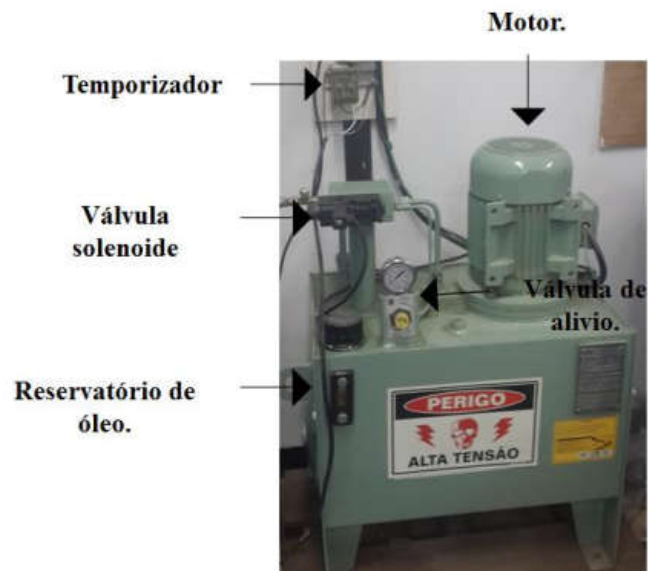


Figura 3.24. Detalhes do sistema hidráulico (Susunaga, 2015).



Figura 3.25. Temporizador, responsável pela frequência do carregamento.



### 3.3 INSTRUMENTAÇÃO

Os seguintes equipamentos foram utilizados nos ensaios.

#### 3.3.1 MEDIDORES DE DESLOCAMENTO LINEAR

Foram utilizados três medidores de deslocamento linear para medir os deslocamentos verticais na superfície do lastro. Esses instrumentos possuem cursor máximo de 100 mm, são sensores potenciométricos resistivos e foram calibrados com auxílio de um micrômetro. A Figura 3.26 apresenta detalhes do instrumento e a Figura 3.27 imagem da calibração de um dos medidores de deslocamento utilizado nos ensaios.



Figura 3.26. Medidor de deslocamento linear.



Figura 3.27. Calibração do medidor de deslocamento linear.

### 3.3.2 TRANSDUTORES DE PRESSÃO

Foram utilizados dois transdutores de pressão instalados em diferentes pontos do subleito (3 cm e 10 cm da base da camada de brita), com a finalidade de medir as poropressões durante o ensaio. Esses instrumentos funcionam com circuito elétrico tipo ponte completa. O transdutor de pressão foi conectado a um T para a instalação de duas válvulas que permitem a abertura e o fechamento do sistema (Figura 3.28).

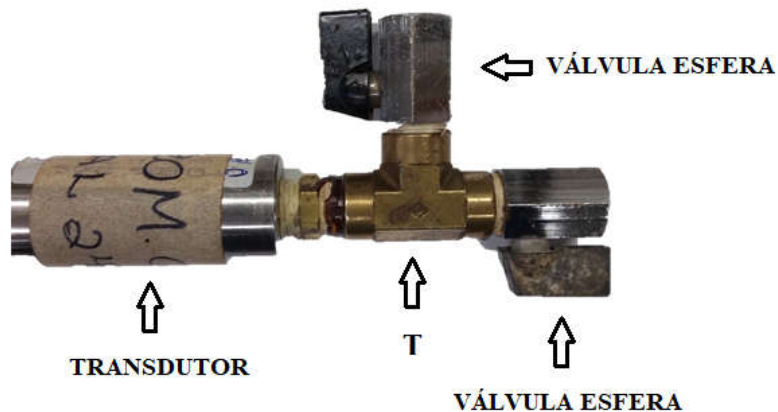


Figura 3.28. Elementos do transdutor de pressão.

A calibração dos transdutores de pressão foi realizada com o equipamento Standard Pressure/ Volume Controller, da GDS Instruments. Antes de iniciar a calibração, para retirar o ar do interior do Standard Pressure/ Volume Controller, utilizou-se uma proveta e uma pedra porosa. Ressalta-se a importância desse processo antes de iniciar a calibração. A Figura 3.29 apresenta os equipamentos para a calibração dos piezômetros.

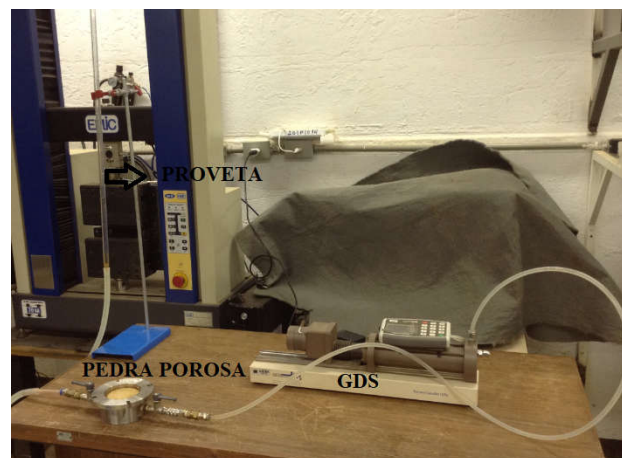


Figura 3.29. Equipamentos para a calibração dos piezômetros.

Para medir as poropressões no centro do cilindro, foram utilizadas mangueiras (similares as usadas em máquinas de ensaio triaxial), as quais foram preenchidas com geotêxtil (Figura 3.30). Essas mangueiras foram inseridas no cilindro no momento da compactação do solo do subleito (Figura 3.31). Posteriormente, por meio de uma das válvulas esfera, os medidores de poropressão foram conectados à mangueira (Figura 3.32). É importante ressaltar que o geotêxtil no interior da extremidade da mangueira deve ficar totalmente saturado e, para isso, o sistema mangueira-geotêxtil foi submerso em água destilada e levado à fervura.



Figura 3.30. Mangueiras para medição de poropressão pelo transdutor.



Figura 3.31. Mangueiras inseridas no cilindro no momento da compactação.



Figura 3.32. Medidores de poropressão conectados ao cilindro.

### 3.3.3 CÉLULA DE CARGA

Para medir as cargas aplicadas durante o ensaio foi utilizada uma célula de carga com capacidade de 50 kN, do tipo “S”. A calibração desse instrumento foi realizada por meio de uma prensa hidráulica do tipo MTS (Material Test System) com capacidade de carga máxima de 65 kN no Laboratório de Fadiga, Fratura e Materiais do Laboratório de Engenharia Mecânica da UnB. A Figura 3.33 apresenta a célula de carga no momento da calibração.

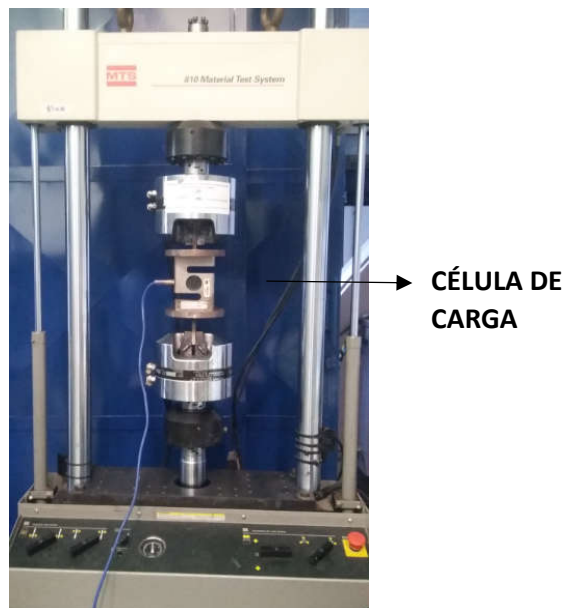


Figura 3.33. Calibração da célula de carga.

### 3.3.4 POSICIONAMENTO DOS INSTRUMENTOS

Na Figura 3.34 têm-se a representação esquemática do posicionamento dos instrumentos. A célula de carga e os transdutores de deslocamento foram dispostos em uma placa metálica posicionada acima das britas.

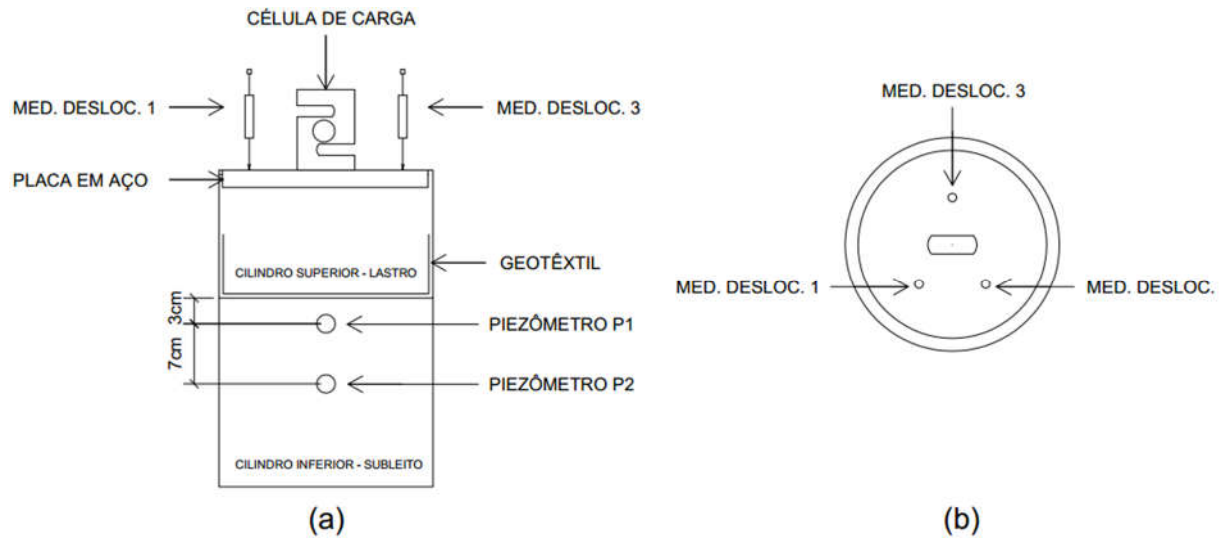


Figura 3.34. Posicionamento dos instrumentos. (a) Vista frontal. (b) Vista superior.

### 3.3.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para obtenção dos sinais da instrumentação foi utilizado o sistema de aquisição de dados da empresa Lynx, modelo ADS 2000, dotado de 32 canais (Figura 3.35), que utiliza o software específico (AqDados 7) para o processamento dos dados. Esse equipamento permite a obtenção simultânea dos dados de todos os canais e diferentes frequências de leitura dos mesmos.



Figura 3.35. Sistema de aquisição de dados utilizado.

### 3.4 METODOLOGIA DE ENSAIO

De modo geral, os materiais descritos anteriormente foram dispostos no cilindro de aço bipartido. Na parte inferior do cilindro foi compactado o solo do subleito e na superior foram inseridas as britas. Nos ensaios com geotêxteis, estes foram colocado entre os cilindros, ou seja, entre a brita e o solo. As duas partes foram conectadas por meio de 4 parafusos e na união entre as peças passou-se silicone industrial para evitar vazamentos. Após a colocação dos materiais, os componentes da instrumentação foram posicionados para, posteriormente, ser acionado o motor bomba e iniciar efetivamente o ensaio. A seguir serão dados mais detalhes de cada uma das etapas descritas acima.

#### 3.4.1 PROGRAMA DE ENSAIOS

O programa experimental desta pesquisa consistiu na realização de ensaios com aplicação de carregamento cíclico variando a gramatura do geotêxtil, a umidade de compactação do solo do subleito e o número de ciclos. Na Tabela 3.7 estão indicadas as variáveis do estudo e suas respectivas simbologias.

Tabela 3.7. Variáveis em estudo.

<b>Etapa</b>	<b>Variável</b>	<b>Umidade de compactação</b>	<b>Número de ciclos</b>	<b>Simbologia</b>
1	Sem Geotêxtil	24% - umidade ótima	420 000	C(24) - SG
	Geotêxtil com gramatura de 400 g/m <sup>2</sup>	24% - umidade ótima	420 000	C(24) - 400
	Geotêxtil com gramatura de 700 g/m <sup>2</sup>	24% - umidade ótima	420 000	C(24) - 700
	Geotêxtil com gramatura de 900 g/m <sup>2</sup>	24% - umidade ótima	420 000	C(24) - 900
2	Sem Geotêxtil	27%	260 000	C(27) - SG
	Geotêxtil com gramatura de 400 g/m <sup>2</sup>	27%	260 000	C(27) - 400

Considerando o tempo para realização da pesquisa, buscou-se aplicar o maior número de ciclos de carregamento nos ensaios cíclicos. Assim, na primeira etapa foi possível concluir os ensaios com 420.000 ciclos. Porém, na segunda etapa, foi necessário diminuir a quantidade de ciclos de carregamento para 260.000 ciclos, bem como realizar apenas dois ensaios nessa configuração para cumprimento do cronograma.

### 3.4.2 PREPARAÇÃO DOS CILINDROS

A parte inferior e superior do cilindro foram forradas com duas camadas de plástico antes da colocação dos materiais. Entre estas camadas, e na parede interna, foi passado vaselina. Essa preparação visou minimizar o atrito lateral entre as paredes do cilindro e os materiais utilizados (Figura 3.36).



Figura 3.36. Cilindro forrado com camadas de plástico para minimizar o atrito lateral. (a) Parte inferior. (b) Parte superior.

### 3.4.3 PREPARAÇÃO DO LASTRO

Para a camada de lastro foi selecionada uma mistura de fragmentos que atendesse a especificação 80-EM-033a-58-8006 da VALEC pois, conforme apresentado no item 3.1.1, o agregado utilizado nessa pesquisa ficou entre as faixas estabelecidas por essa especificação.

Para minimizar o efeito escala, mas ainda permanecer nos limites apresentados pela especificação 80-EM-033a-58-8006 da VALEC, limitou-se o tamanho do grão máximo de modo a conseguir a relação  $D/d_{m\acute{a}x}$  (onde:  $D$  = diâmetro do equipamento; e  $d_{m\acute{a}x}$  = diâmetro máximo do agregado) entorno 5. A relação adotada tem como embasamento o trabalho de Skoglund (2002), onde o autor relata que os valores típicos da relação  $D/d_{m\acute{a}x}$  variam de 5 a 7. Segundo Merheb (2014), o cuidado com a relação  $D/d_{m\acute{a}x}$  permite que o comportamento do conjunto de agregados seja avaliado como um todo.

De modo a atender os dois requisitos apresentados acima, a curva padrão para os ensaios de carregamento cíclico foi composta conforme a curva granulométrica apresentada na Figura 3.37.

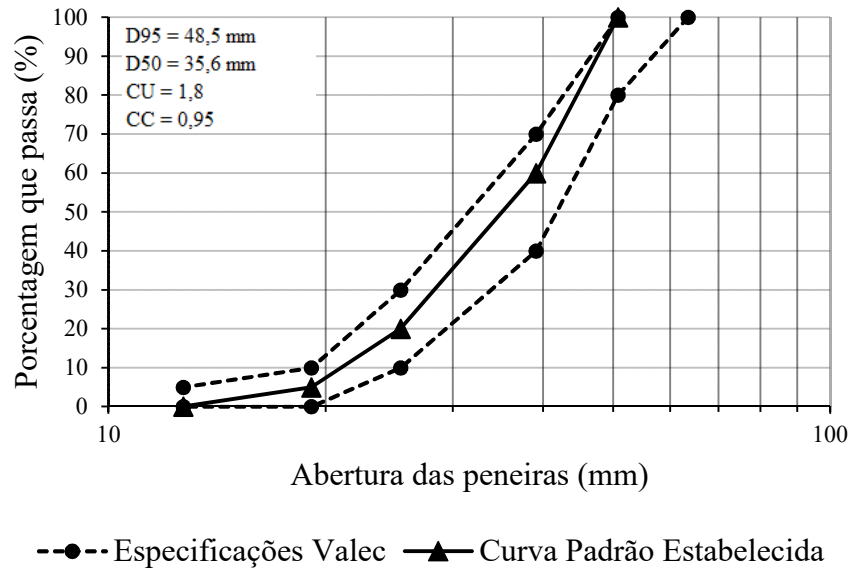


Figura 3.37. Curva granulométrica dos agregados selecionados para compor o lastro nos ensaios cíclicos e limites da especificação 80-EM-033a-58-8006 da VALEC.

Foram dispostas manualmente 10 kg de britas de modo que estas preenchessem 13 cm da parte superior do cilindro (os 2 cm restantes foram ocupados pela placa metálica).

Na Figura 3.38 tem-se a composição para um dos ensaios cíclicos realizados.





Figura 3.38. Britas utilizadas em um dos ensaios cíclicos.

#### 3.4.4 PREPARAÇÃO DO SOLO DO SUBLEITO

Após definidas as umidades de compactação, procedeu-se conforme descrito a seguir.

Primeiramente o solo foi seco até a umidade higroscópica e, em seguida, foi peneirado na peneira N°4 para a retirada de fragmentos de rochas e de matéria orgânica. Posteriormente, foi adicionada a quantidade de água para atingir a umidade desejada. Por ser um solo argiloso, após a homogeneização o solo foi colocado na câmara úmida por 24 horas. Por fim, foi verificado se o solo atingiu a umidade esperada.

A quantidade de solo necessária para preencher todo o cilindro inferior foi calculada a partir da Equação 3.1, considerando os valores de peso específico seco obtidos no ensaio de compactação ( $\gamma = 1,6 - w = 24\%$ ;  $\gamma = 1,5 - w = 27\%$ ).

$$Mh = \gamma d \times V \times \left(1 + \frac{w(\%)}{100}\right) \quad (3.1)$$

A quantidade calculada foi disposta no cilindro de modo a permitir a colocação das mangueiras preenchidas com geotêxtil (Figura 3.31). Cada camada foi compactada estaticamente com o auxílio de uma bomba manual conectada ao cilindro hidráulico (Figura 3.39). Após a compactação de uma camada, o solo era escarificado com uma espátula para, então, ser lançado o solo da camada seguinte.



Figura 3.39. Compactação do solo do subleito.

### 3.4.5 PREPARAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis foram inseridos entre o cilindro inferior e o superior, ou seja, entre o solo do subleito e o lastro. Para que o solo não passasse pelas laterais do cilindro superior, mas somente pelo geotêxtil, as amostras foram cortadas com diâmetro maior (aproximadamente 42 cm) que o do cilindro e suas bordas foram fixadas à parte superior. Como os geotêxteis, principalmente o de gramatura de  $900 \text{ g/m}^2$ , são espessos e pouco maleáveis, foram necessários alguns procedimentos explicados a seguir:

- A amostra de geotêxtil, já nas dimensões necessárias, foi colocada na parte superior do cilindro. Para garantir que o geotêxtil cobrisse toda a base do cilindro, e suas bordas ficassem em contato com a parede do mesmo, foram necessários alguns cortes na amostra, sempre com o cuidado de não cortar a parte do geotêxtil que ficaria sobre o solo (Figura 3.40);
- Após os cortes, as duas partes foram sobrepostas e, entre elas passou-se silicone industrial. Durante a secagem do silicone as duas partes foram mantidas pressionadas para que essas se unissem;
- Esperou-se a secagem do silicone e, para evitar que as duas partes se soltassem durante o ensaio, essas foram grampeadas e, novamente, passou-se silicone (Figura 3.41);

- No momento da montagem do ensaio, estando o geotêxtil com o formato adequado para se encaixar no cilindro, fixou-se as bordas do geotêxtil à parede do cilindro superior também com silicone industrial (Figura 3.42)



Figura 3.40. Cortes nas amostras de geotêxtil para que essas ficassem moldadas ao cilindro.



Figura 3.41. Grampos e silicone para unir os cortes.



Figura 3.42. Amostra de geotêxtil fixada na parte superior do cilindro.

### **3.4.6 CARREGAMENTO**

Como a intenção do trabalho foi avaliar a interface brita - solo do subleito ou brita – geotêxtil - solo do subleito, foi aplicada tensão de aproximadamente 100 kPa nos ensaios de carregamento cíclico. A escolha dessa tensão advém, principalmente, do trabalho de Filho (2013), o qual, por análise numérica, encontrou tensões nessa ordem na base da camada de lastro. Esse autor considerou o tráfego de vagões comumente utilizados nas vias férreas brasileiras, bem como, modelo de vagão ainda em fase de projeto com capacidade de carregamento mais elevada do que a tradicional. Assim, a carga aplicada durante os ensaios foi da ordem de 5 kN.

### **3.4.7 FREQUÊNCIA DO CARREGAMENTO**

Para o cálculo da frequência do carregamento utilizado nos ensaios, considerou-se os vagões/locomotivas com comprimento médio de 10m (são diversos os modelos e tipos de vagões que trafegam nas ferrovias brasileiras) e velocidade aproximada de 35 km/h (velocidade típica dos trens no Brasil). Assim, a frequência calculada foi de 1 Hz.

### **3.4.8 PROCEDIMENTOS DURANTE A EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO CÍCLICO**

Os ensaios iniciaram na umidade de compactação. Ao atingir 150.000 ciclos nos ensaios com o solo do subleito compactado na umidade ótima (24%) e 100.000 ciclos para os compactados na umidade de 27%, começou-se o umedecimento com a colocação de água nos furos presentes na placa metálica disposta acima da brita. Foi colocada quantidade de água suficiente para preencher todo o cilindro, o que corresponde à situação mais crítica. Até o final do ensaio manteve-se o nível da água acima da camada de brita. A diferença no número de ciclos para

iniciar o umedecimento deve-se à alteração no número total de ciclos de carregamento que foram submetidos os ensaios compactados com umidade de 24% e 27 %, conforme explicado no item 3.4.1. O intuito foi submeter todos ensaios à condição mais crítica durante a maior parte do tempo de execução dos mesmos.

A Figura 3.43 apresenta o ensaio montado com todos seus componentes.



Figura 3.43. Ensaio montado.

### 3.4.9 PROCEDIMENTOS APÓS OS ENSAIOS DE CARREGAMENTO CÍCLICO

Após o final de cada ensaio de carregamento cíclico foram realizados os seguintes procedimentos:

- Retirada da instrumentação;
- Retirada da brita e posterior lavagem para coletar e quantificar o solo que se misturou com esse material, bem como comparação da granulometria das britas antes e após os ensaios cíclicos (cálculo do parâmetro  $B_g$  explicado mais adiante no item 3.4.9.1);
- Retirada da água e posterior secagem para coletar e quantificar o solo que se misturou com esse material;
- Nos ensaios com geotêxtil, esses foram retirados do cilindro e colocados na estufa por 24 hrs. Após a secagem, a parte desse material que ficou em contato com o solo do subleito foi cortada em forma de círculo com diâmetro de aproximadamente 25 cm. Os círculos foram pesados e, posteriormente, esses foram lavados para coletar as partículas finas que ficaram no seu interior. Em seguida fez-se inspeção visual nos espécimes para avaliar possíveis danos gerados no ensaio. Posteriormente, os círculos foram cortados

com as dimensões de 17,5 cm por 15 cm para serem ensaiados na prensa de tração. Essas dimensões são devido às restrições do tamanho das amostras que foram ensaiadas no equipamento de carregamento cíclico;

- Após a retirada dos materiais que estavam acima do solo do subleito, foi colocada parafina sobre o solo para moldar a superfície e avaliar a penetração das britas.
- Retirada a parafina, coletou-se solo nas proximidades das mangueiras preenchidas com geotêxteis para verificar a umidade e, assim, avaliar se a água utilizada no estágio de inundação percolou até os pontos de instalação dos piezômetros.

### 3.4.9.1 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUEBRA DOS GRÃOS

Por meio dos resultados dos ensaios de granulometria antes e após o ensaio de carregamento cíclico, calculou-se o índice de quebra dos grãos ( $B_g$ ) conforme metodologia proposta por Marsal (1967) e expressa na Equação (3.7)

$$B_g = \sum_1^n (\Delta W_{ki} - \Delta W_{kf}) \quad (3.7)$$

Onde  $B_g$  é o índice de quebra dos grãos;  $\Delta W_{ki}$  porcentagem de material retido em cada peneira antes da execução do ensaio;  $\Delta W_{kf}$  porcentagem de material retido em cada peneira após execução do ensaio e  $n$  é o número de intervalos de dimensões das partículas considerados. Sendo que, na Equação (3.7) são considerados apenas os valores positivos da relação ( $\Delta W_{ki} - \Delta W_{kf}$ ).

## CAPÍTULO 4

### 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios cíclicos divididos em duas etapas: com o solo do subleito compactado com umidade de 24% (umidade ótima), nomeados C(24); com o solo do subleito compactado com umidade de 27%, nomeados C(27). Para cada configuração foram avaliados os deslocamentos na superfície da camada de lastro (brita), as poropressões no solo do subleito, a penetração das britas no solo, a quebra dos grãos de brita, o bombeamento de finos (impregnação de solo na brita e nos geotêxteis), danos e variação de resistência após os ciclos de carregamento nos geotêxteis.

Na primeira etapa foram realizados ensaios sem geotêxtil e com geotêxteis com gramaturas de 400 g/m<sup>2</sup>, 700 g/m<sup>2</sup> e 900g/m<sup>2</sup>. De forma a certificar os resultados obtidos no primeiro ensaio com geotêxtil de 900g/m<sup>2</sup> (uma vez que foram registrados altos valores mais altos de poropressão), fez-se outro experimento nas mesmas condições. Em todos os ensaios, quando foi completado 150.000 ciclos, começou-se o umedecimento por inundação e passagem de água pelos furos presentes na placa metálica disposta acima das britas. Esses ensaios foram interrompidos quando completados 420.000 ciclos.

Na segunda etapa foram realizados ensaios sem geotêxtil e com geotêxtil com gramatura de 400 g/m<sup>2</sup>. Nesses experimentos o umedecimento começou após transcorridos 100.000 ciclos e o ensaio foi finalizado aos 260.000 ciclos. O menor número de ciclos, bem como o menor número de ensaios, foi devido ao prazo para finalização da pesquisa.

#### 4.1 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Os deslocamentos verticais nos sistemas propostos podem ocorrer devido a cinco fatores: penetração da brita no subleito, rearranjo dos grãos de brita, quebra dos grãos de brita, compressão dos geotêxteis e bombeamento de finos do solo do subleito para a camada de lastro.

A seguir são apresentados gráficos e tabelas comparativas com os resultados para cada etapa de ensaio.

#### 4.1.1 DESLOCAMENTOS VERTICAIS NA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS – SUBLEITO COMPACTADO COM UMIDADE DE 24%.

Os deslocamentos medidos nos ensaios com o solo do subleito compactados na umidade de 24% (umidade ótima) estão apresentados na Figura 4.1. Primeiramente, nota-se que, o ensaio sem geotêxtil apresentou o maior valor de deslocamento (11,5 mm). Além disso, observa-se que esse ensaio foi o mais sensível ao umedecimento das camadas, apresentando uma curvatura acentuada após os 150.000 ciclos. O primeiro ensaio com geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup> apresentou o menor deslocamento (5,8 mm) e o de 700 g/m<sup>2</sup> apresentou o maior (7,6 mm). O deslocamento no ensaio com geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup> foi muito próximo ao primeiro ensaio com geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup> (6,0 mm). Enquanto que, o deslocamento no segundo ensaio com geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup> foi muito próximo ao de 700 g/m<sup>2</sup> (7,4 mm). A Tabela 4.1 apresenta os valores dos deslocamentos totais para essa etapa de ensaio.

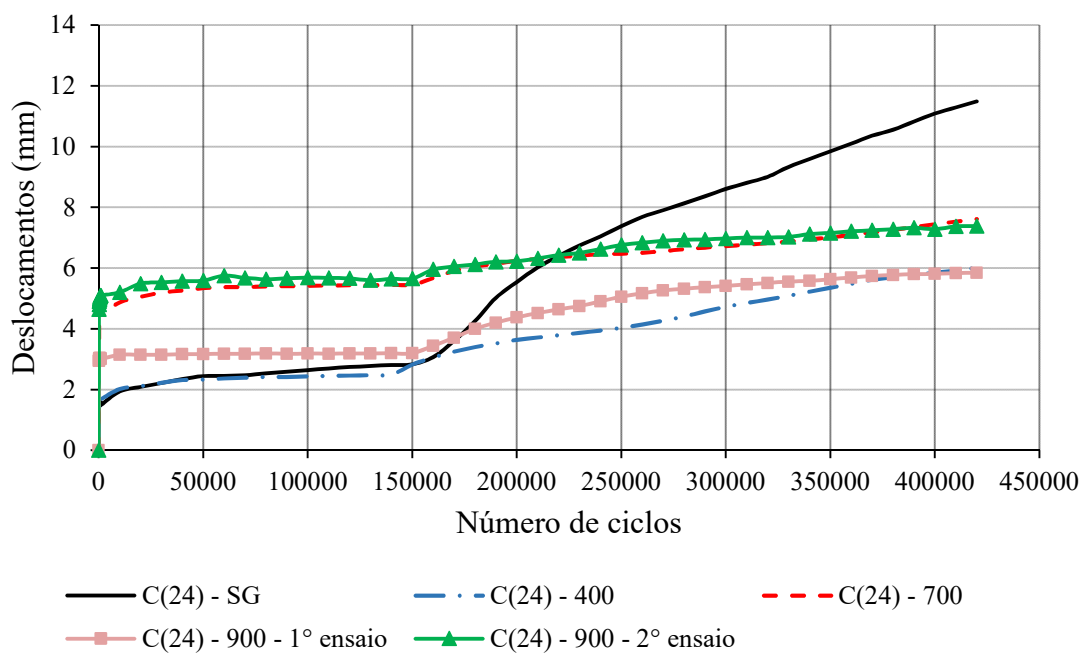


Figura 4.1. Deslocamentos da primeira etapa de ensaios.



Tabela 4.1. Deslocamentos totais - 1º etapa de ensaios.

<b>Ensaio</b>	<b>Deslocamento total (mm)</b>
C(24) - SG	11,5
C(24) - 400	6,0
C(24) - 700	7,6
C(24) - 900 - 1º ensaio	5,8
C(24) - 900 - 2º ensaio	7,4

Quanto aos deslocamentos iniciais, esses ocorrem, principalmente, pela penetração da brita no solo, pela compressibilidade do geotêxtil (quanto maior a gramatura do espécime, maior a sua compressibilidade – Figura 3.10), e pelo rearranjo dos grãos de brita.

Como não era possível manter a mesma configuração no momento da colocação das britas e considerando que em campo também ocorrerão os deslocamentos iniciais no processo de compactação (socaria), sendo, posteriormente, o lastro nivelado para atender as condições de projeto, avaliou-se, também, os deslocamentos desconsiderando os valores iniciais (Tabela 4.2).

Partindo do exposto acima, tem-se que quanto maior a gramatura do geotêxtil, menores foram os deslocamentos obtidos nessa fase de ensaios. Conforme será apresentado posteriormente, isso ocorreu principalmente, pois, quanto maior a gramatura do elemento de separação, menor foi a mistura do solo com a brita, ou seja, menor o bombeamento de finos, e menor a penetração de grãos de brita no subleito.

Tabela 4.2. Deslocamentos desconsiderando os valores iniciais

<b>Ensaio</b>	<b>Deslocamento desconsiderando os valores iniciais (mm)</b>
C(24) - SG	10,0
C(24) - 400	4,3
C(24) - 700	3,2
C(24) - 900 - 1º ensaio	2,8
C(24) - 900 - 2º ensaio	2,3

#### **4.1.2 DESLOCAMENTOS VERTICAIS NA SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS – SUBLEITO COMPACTADO COM UMIDADE DE 27%.**

Os deslocamentos medidos nos ensaios com o solo do subleito compactados na umidade de 27% (umidade ótima) estão apresentados na Figura 4.2. Diferentemente do encontrado na

primeira etapa, o ensaio com geotêxtil de 400g/m<sup>2</sup> apresentou deslocamento total maior do que o ensaio sem geotêxtil.

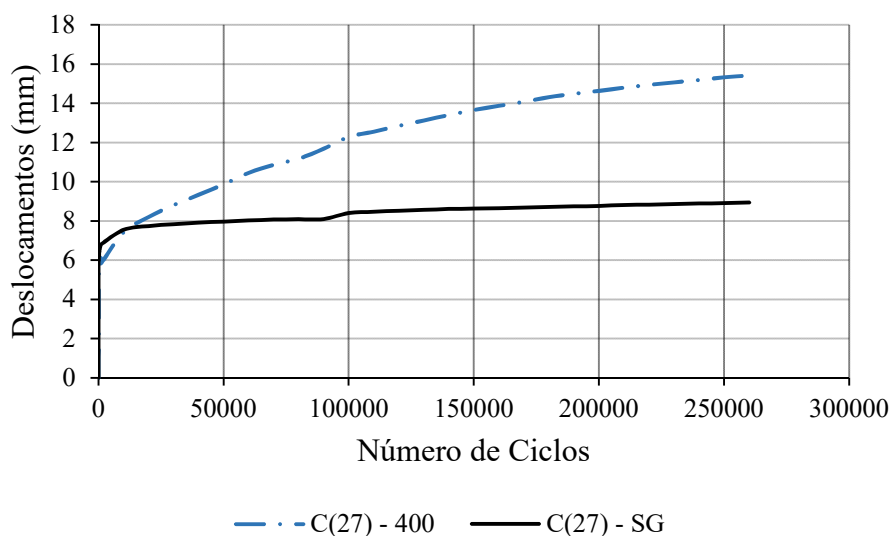


Figura 4.2. Deslocamentos da segunda etapa de ensaios.

Uma justificativa para o ocorrido é que, como o solo do subleito encontrava-se mais úmido e menos compacto, e como a permeabilidade do geotêxtil é maior que a permeabilidade do solo, isso pode ter favorecido a drenagem da água do subleito. Assim, o geotêxtil pode ter acelerado o processo de adensamento do solo. Nesse caso, com o efeito contínuo do carregamento, junto com a água, passaram também as partículas mais finas. Já no ensaio sem geotêxtil, o deslocamento foi primordialmente devido a penetração dos grãos de brita no solo. Como o solo encontrava-se menos compacto, os grãos penetraram mais e a camada de solo que ficou entre as britas, devido a sua natureza coesiva, pode ter criado uma barreira (Figura 4.3). A Figura 4.4 apresenta imagens do desmonte do ensaio C(27)-SG, onde nota-se ausência de material fino na água e nos grãos de brita que estavam mais distantes do solo do subleito (Figura 4.4(a), Figura 4.4(b)), além dos grãos de brita que penetraram no solo (Figura 4.4 (c)). Note-se que, nesse caso, o ensaio foi interrompido para um número menor de ciclos de carga (260.000 ciclos). Pode ser que, se solicitada por mais tempo (maior número de ciclos de carga), essa barreira fosse rompida e, assim, o fenômeno de bombeamento de finos ocorresse, o que, como consequência, levaria ao aumento dos deslocamentos. Ressalta-se que no trabalho de Black & Holtz (1999), o qual avaliou o desempenho de diferentes geotêxteis cinco anos após sua instalação em uma rodovia, foi observado que os solos do subleito onde havia geotêxteis adensaram significativamente mais em comparação com o trecho sem geotêxtil. Henry *et al.*

(2013) também propuseram a hipótese de ocorrência de adensamento na camada de um solo siltoso e saturado quando utilizado geotêxtil, para justificar os maiores deslocamentos nessa camada em comparação com ensaios sem geotêxtil.

Outra consideração é que, apesar do solo dos dois ensaios terem sido coletados no mesmo ponto do Campo Experimental da UnB, a coleta não aconteceu no mesmo dia, mas sim meses depois (a amostra do ensaio com geotêxtil foi coletada junto com as dos ensaios da primeira etapa). Assim, a variabilidade natural do solo, pode ter influenciado os resultados.

Para confirmar as hipóteses acima e averiguar a acurácia dos dados obtidos, ressalta-se a necessidade de realização de mais ensaios.

Outra diferença em relação a primeira etapa de ensaios é que, como o solo estava mais úmido, teve-se uma leve variação no deslocamento no ensaio sem geotêxtil após iniciado o umedecimento (100.000 ciclos, Figura 4.2). No ensaio com geotêxtil, a alteração foi menor.

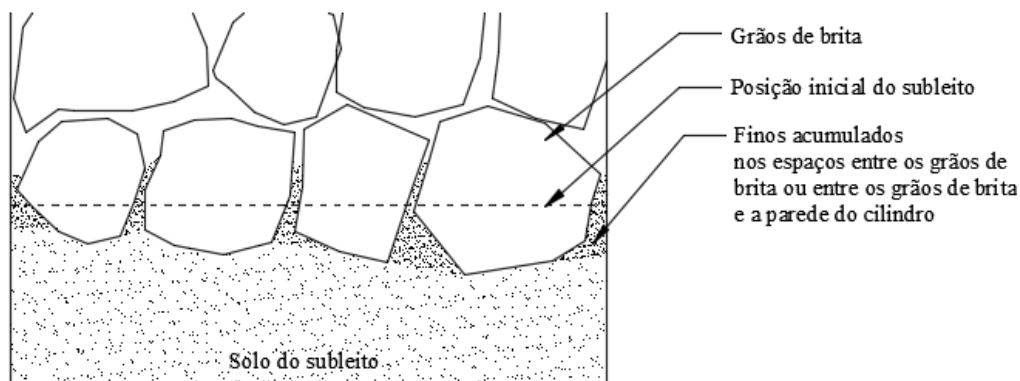


Figura 4.3. Acúmulo de finos entre os grãos da brita criando uma barreira.



Figura 4.4. Desmonte do ensaio C(27)-SG: (a) Britas e água no topo da camada sem a presença de finos; (b) Nas proximidades do solo do subleito ainda percebe-se que não há presença de finos na água; (c) Britas que penetraram no solo do subleito e ausência de finos nas laterais do cilindro, bem como nas partes expostas das britas.

## 4.2 POROPRESSÕES

Foram instalados dois piezômetros no subleito com o intuito de medir as poropressões durante o carregamento cíclico. O piezômetro posicionado mais próximo a interface solo-brita foi denominado P1 e o mais profundo, P2.

De forma geral, durante cada ciclo de carregamento e descarregamento no ensaio, espera-se que solo seja submetido aos seguintes estágios:

- 1- O ensaio é iniciado com a configuração indicada na Figura 4.5(a);
- 2- A carga aplicada sobre a placa de aço comprime o solo, e assim, tem-se diminuição dos vazios e elevação das poropressões (Figura 4.5(b));
- 3- Na fase de descarregamento o solo se expande e, como a mudança de volume, as poropressões diminuem podendo chegar a valores negativos (Figura 4.5(c));

Esses estágios tendem a ser mais perceptíveis no piezômetro mais próximo à interface solo-brita.

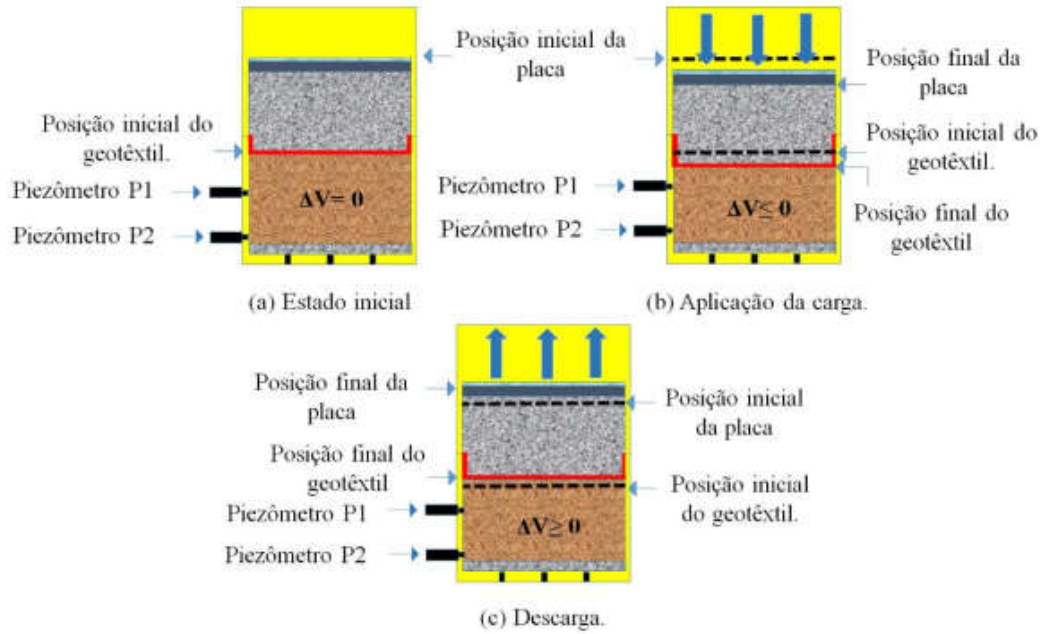


Figura 4.5. Estágios de carregamento e descarregamento no ensaio cíclico (Susunaga, 2015).

#### 4.2.1 POROPRESSÕES NA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS – SUBLEITO COMPACTADO COM UMIDADE DE 24%.

Primeiramente serão avaliadas as poropressões obtidas pelo piezômetro P1. Na Figura 4.6 tem-se esses resultados para todos os ensaios da primeira etapa.

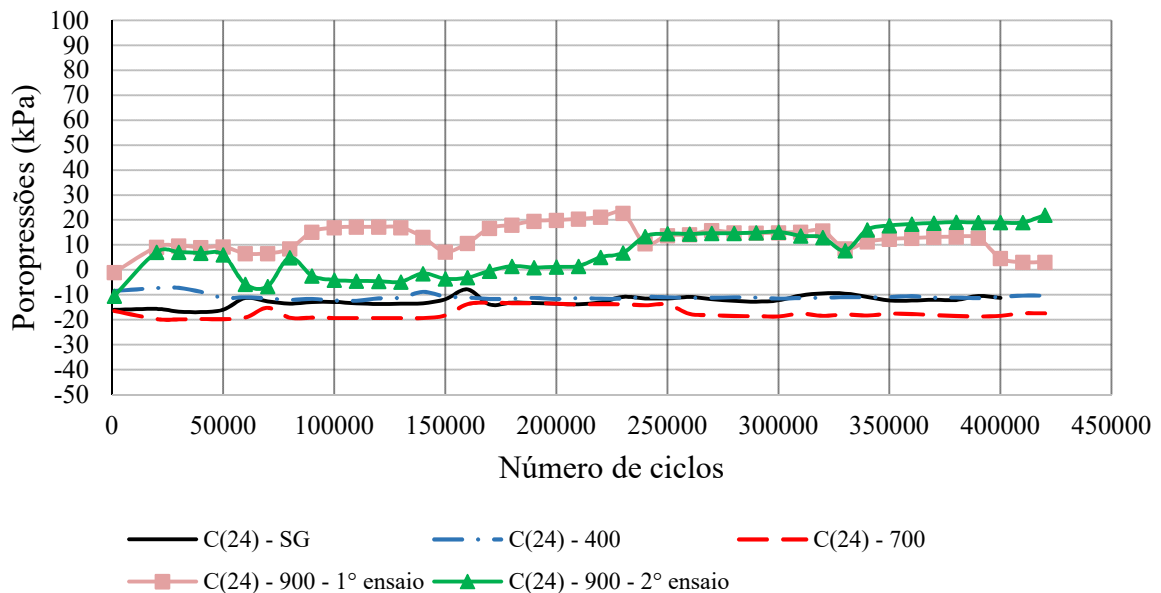


Figura 4.6. Poropressões no piezômetro P1 na 1ª etapa de ensaios.

Em todos os ensaios as poropressões iniciais apresentaram valores negativos (entre -1 kPa e -16 kPa). Sendo que, nos ensaios sem geotêxtil e com geotêxteis de gramaturas de 400 g/m<sup>2</sup> e 700 g/m<sup>2</sup> essas permaneceram negativas durante todos os ciclos de carregamento. Comparando-se apenas esses três ensaios, pode-se perceber que a presença do geotêxtil proporcionou um leve decaimento nos valores de poropressão e uma maior estabilização dessas. Já no ensaio sem geotêxtil pode-se observar uma tendência ao aumento das poropressões. Essas constatações podem ser justificadas pela maior capacidade drenante dos geotêxteis frente ao solo, propiciando maior dissipação de poropressões.

No primeiro ensaio com geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup> foram registrados maiores valores de poropressões, diferentemente do observado nos ensaios anteriores. De forma a validar esses valores e descartar erros de instrumentação, foi realizado mais um ensaio com geotêxtil dessa gramatura. Nesse, também, foram registradas maiores poropressões.

O aumento das poropressões podem ter sido ocasionadas pela retenção de partículas finas na face (cegamento) e no interior do espécime, ou seja, uma colmatação, o que levaria a diminuição da permeabilidade do material. Na Figura 4.7, são apresentadas imagens do geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup> no momento da retirada do espécime do cilindro de ensaio cíclico, onde pode-se constatar uma considerável impregnação do geotêxtil. Para afirmar essa hipótese seriam necessários outros tipos de procedimentos como ensaio de permeabilidade e análise de imagens por microscopia, por exemplo. Para cumprimento do cronograma da pesquisa não foi possível a realização de mais ensaios.

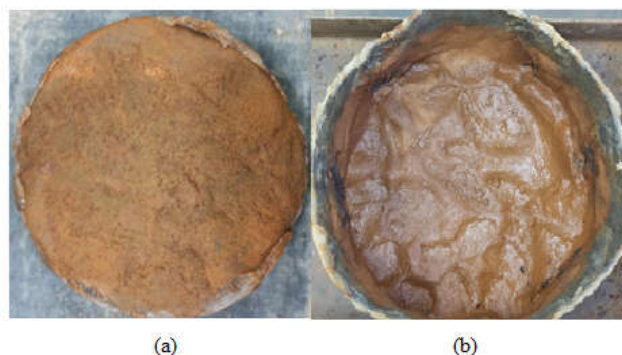


Figura 4.7. Geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup> após ensaio de carregamento cíclico: (a) Face em contato direto com o solo do subleito; (b) face em contato direto com as britas.

Porém, conforme apresentado no item 2.4.3, alguns autores propuseram modelos teóricos para estimar a permeabilidade dos geotêxteis, tanto no estado virgem, como parcialmente colmatado. Utilizando-se essas equações e os resultados obtidos pelo ensaio de BBP e de compressão uniaxial (item 3.1.3.1 e item 3.1.3.2), ambos para confinamento de 100 kPa, bem como considerando os valores apresentados na Tabela 4.3, foram estimados valores de coeficiente de permeabilidade para o geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup> no estado virgem e impregnado (Tabela 4.4).

Tabela 4.3. Valores utilizados no cálculo do coeficiente de permeabilidade (modificado – Trejos Galves, 2016).

Diâmetro das fibras de polipropileno	$d_f$	0,037 mm
Massa específica das fibras de polipropileno	$\rho_f$	910 kg/m <sup>3</sup>
Massa específica das partículas de solo (3.1.2.2)	$\rho_s$	2,7 g/cm <sup>3</sup>
Aceleração da gravidade	$g$	9,81 m/s <sup>2</sup>
Viscosidade dinâmica da água	$\eta_w$	0,001 kg/m.s
Densidade da água	$\rho_w$	1000 kg/m <sup>3</sup>
Porosidade do geotêxtil considerando a espessura a 100 kPa (3.1.3.1)	$n$	0,6
Abertura de filtração considerando confinamento de 100 kPa (3.1.3.2)	$O_f$	0,085 mm
Nível de impregnação (4.4) – valor médio dos dois geotêxteis ensaiados	$\lambda$	0,92
Fator de forma para geotêxtil virgem (sugerido por Giroud, 1996)	$\beta$	0,11
Fator de forma para geotêxtil impregnado (sugerido por Palmeira e Gardoni, 2000a)	$\beta$	0,14

Tabela 4.4. Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup> calculada por soluções teóricas.

	<b>Equação 2.8 - Giroud (1996)</b>	<b>Equação 2.9 - Giroud (1996)</b>	<b>Equação 2.10 - Palmeira e Gardoni (2000a)</b>
<b>K<sub>GT</sub> (m/s)</b>	1,59×10 <sup>-4</sup>	1,34×10 <sup>-3</sup>	5,14×10 <sup>-5</sup>

Considerando a permeabilidade do solo do campo experimental na faixa de 2,63x10<sup>-7</sup> m/s e 9,01x10<sup>-7</sup> m/s (Uribe, 2016), percebe-se que o valor de K<sub>GT</sub> calculado pela Equação (2.10) (Palmeira e Gardoni, 2000a), para geotêxteis parcialmente colmatados, fica muito próximo ao limite apresentado pelo critério do Departamento de Transportes do Reino Unido (Corbet, 1993) *apud* Palmeira (2018) e pelo critério proposto por Christopher & Holtz (1985) *apud* Palmeira (2018), também apresentados no item 2.4.3. Dessa forma, tem-se que os aumentos de

poropressão registrados no piezômetro P1 podem ter sido ocasionadas pela diminuição da permeabilidade do geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup>, devido à retenção de partículas finas no interior do espécime ou cegamento. Novamente ressalta-se que, para a confirmação dessa hipótese, mais ensaios laboratoriais deveriam ser realizados.

Em todos os ensaios dessa etapa iniciou-se o umedecimento após 150.000 ciclos de carga. Pela Figura 4.6, pode-se perceber que nos ensaios sem geotêxtil e com geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup> não ocorreram variações significativas nas poropressões após esse número de ciclos. Já no ensaio com geotêxtil de 700 g/m<sup>2</sup> pode-se observar um leve aumento e, posteriormente, um decaimento, retornando aos valores antes do umedecimento. Após finalizado os ciclos de carregamento, mediu-se a umidade do solo nas proximidades do piezômetro P1 e, nesses três ensaios, a umidade manteve-se muito próxima da umidade de compactação. Assim, não deve ter havido percolação significativa da água de inundação até os piezômetros. O aumento das poropressões nos ensaios com geotêxtil de 700 g/m<sup>2</sup>, após os 150.000 ciclos, pode ser devido às oscilações dos sinais elétricos da instrumentação.

Nos ensaios com os espécimes de 900 g/m<sup>2</sup>, principalmente no segundo ensaio, pode-se observar aumento de poropressões após os 150.000 ciclos. Assim como nos demais ensaios, após finalizado os ciclos de carregamento, mediu-se a umidade do solo nas proximidades do piezômetro P1. No primeiro ensaio teve-se um leve aumento da umidade (25%), porém no segundo, a umidade manteve-se muito próxima da umidade de compactação. Dessa forma, assim como nos demais ensaios, não houve percolação da água de inundação que foi adicionada ao sistema até as profundidades dos piezômetros. No entanto, certamente houve um umedecimento da superfície do solo de subleito, o que pode ter contribuído com cegamento ou impregnação do geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup>.

Quanto às poropressões registradas no piezômetro P2 (Figura 4.8), percebe-se que essas mantiveram-se sempre positivas e na faixa dos 30 kPa. Conforme esperado, por estar mais longe da interface solo-brita, tiveram-se menos variações de leituras naquele piezômetro durante os ciclos de carregamento. As umidades nas proximidades desse piezômetro mantiveram-se semelhantes às da compactação. A Figura 4.9 apresenta os gráficos das poropressões de P1 e P2 por ensaio, onde observa-se nitidamente a tendência a menores poropressões no piezômetro P1, mais próximo da interface brita-subleito.



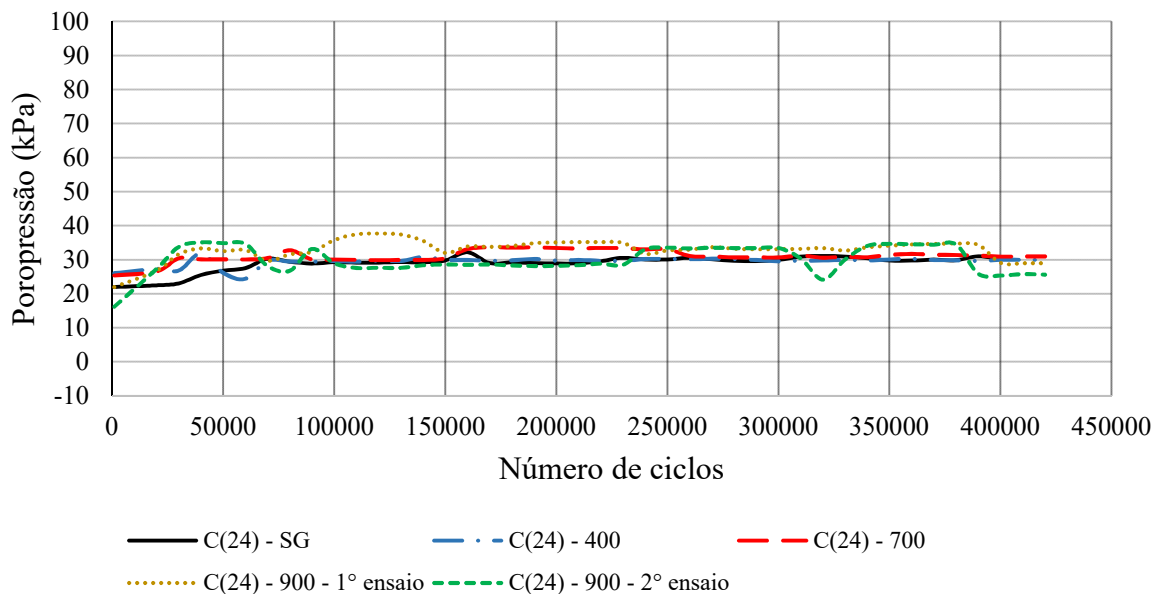


Figura 4.8. Poropressões no piezômetro P2 na 1º etapa de ensaios.

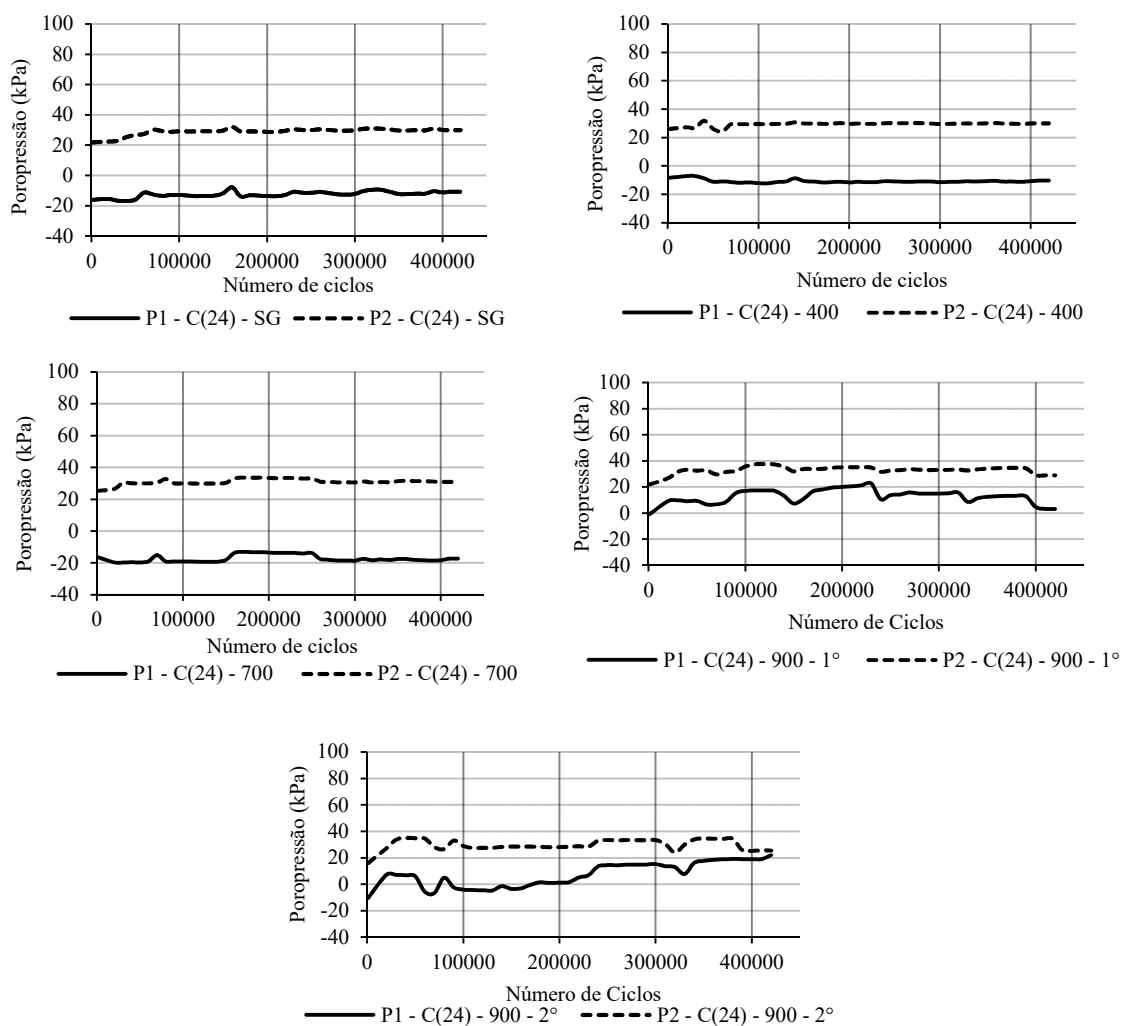


Figura 4.9. Poropressões nos piezômetros P1 e P2 na primeira etapa de ensaios.

#### 4.2.2 POROPRESSÕES NA SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS – SUBLEITO COMPACTADO COM UMIDADE DE 27%.

As poropressões no piezômetro P1 dos ensaios da segunda etapa (sem geotêxtil e com geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup> - Figura 4.10), conforme esperado, foram maiores que as medidas na etapa 1 (sem geotêxtil e com geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup> e 700 g/m<sup>2</sup>), já que a umidade de compactação foi maior. Nos dois ensaios realizados nessa etapa, com aproximadamente 20.000 ciclos, as pressões se estabilizaram e ficaram em torno de -2 kPa, para o ensaio sem geotêxtil, e 1 kPa para o ensaio com o elemento de separação. Ou seja, dentro da faixa de incerteza destas leituras. Não foram observadas variações após iniciado o umedecimento para ambos os ensaios, e as medidas finais de umidade do solo mantiveram-se semelhantes às de compactação.

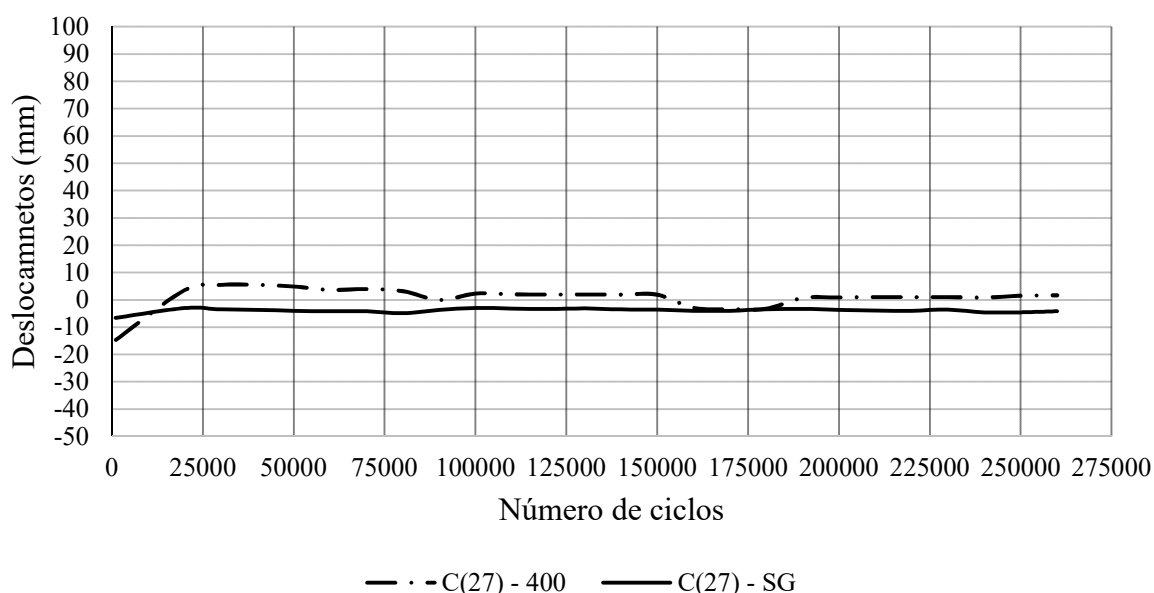


Figura 4.10. Poropressões no piezômetro P1 na 2ª etapa de ensaios.

As poropressões no piezômetro P2 na segunda etapa de ensaios (Figura 4.11) também se mantiveram próximas para ambas as configurações (com e sem geotêxtil), ficando em torno dos 30 kPa, assim como na primeira etapa. Inicialmente, esperava-se um aumento dessas poropressões quando comparado com os resultados da primeira etapa. Porém, como o piezômetro P2 encontra-se mais afastado da interface solo-brita, as condições de drenagem não favorecem a dissipação de poropressões de forma mais eficiente. Isso também é evidenciado na Figura 4.12, que apresenta os gráficos das poropressões em P1 e P2 por ensaio.

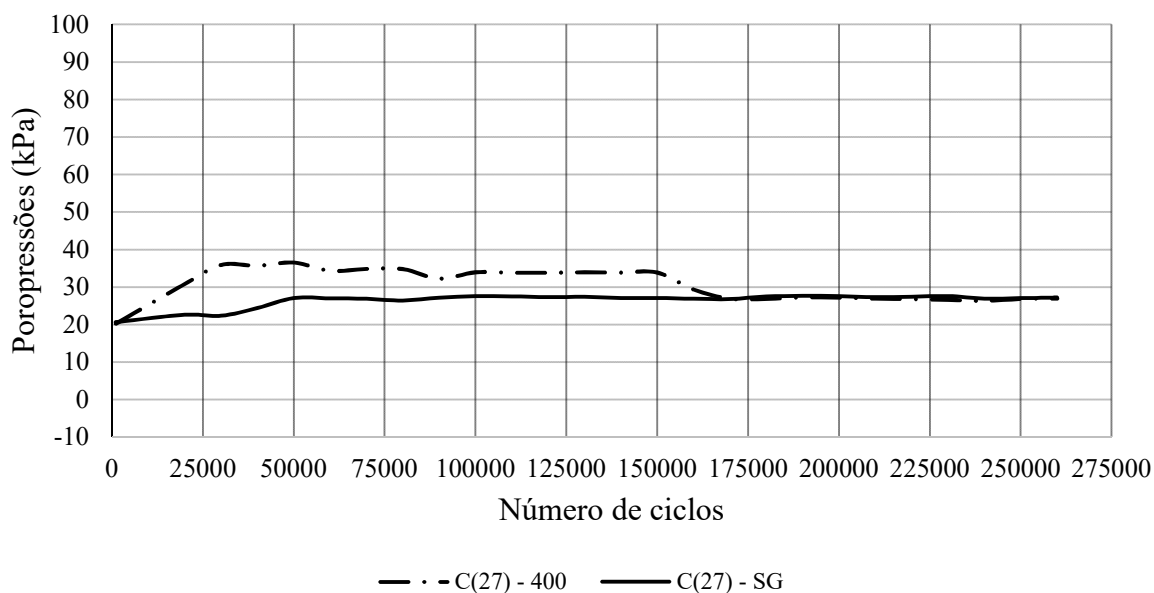


Figura 4.11. Poropressões no piezômetro P2 na 2º etapa de ensaios.

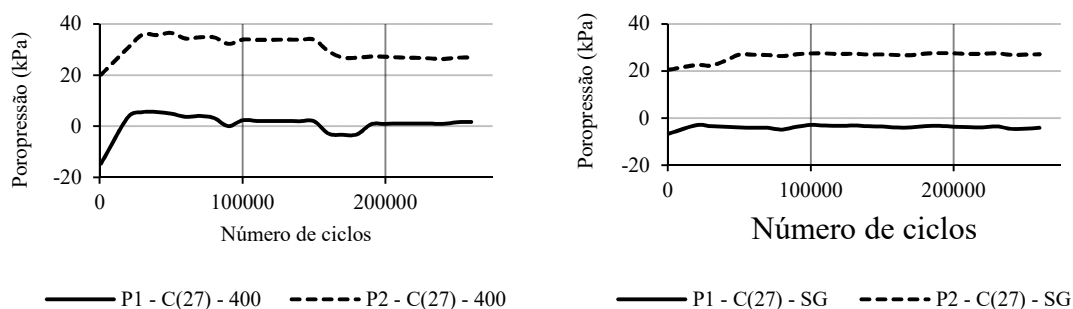


Figura 4.12. Poropressões nos piezômetros P1 e P2 na primeira etapa de ensaios.

### 4.3 INSPEÇÃO VISUAL DOS GEOTÊXTEIS APÓS ENSAIO

Após lavagem dos geotêxteis, por meio de avaliação visual sem auxílio de equipamentos, verificou-se possíveis danos causados pela brita durante os ensaios. A Figura 4.13 apresenta o geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup> no estado virgem e após submetidos as duas etapas de ensaios. Percebe-se as marcas deixadas pelas britas e a cor avermelhada devido à presença de finos nos vazios do espécime. No ensaio em que o solo do subleito foi compactado com umidade de 27% é mais perceptível a presença do solo e as marcas das britas. Com o solo mais úmido, a drenagem da água pelo geotêxtil foi maior e maior a impregnação do geotêxtil por partículas do solo de subleito. Os dois ensaios não geraram rasgos ou furos nas amostras.

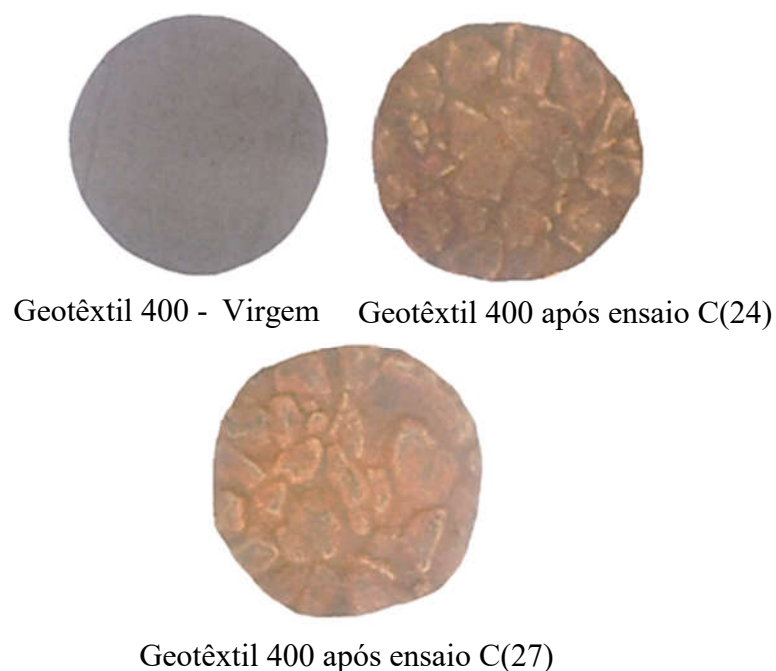


Figura 4.13. Imagens do geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup> nas três condições.

A Figura 4.14 apresenta o geotêxtil de 700 g/m<sup>2</sup> no estado virgem e após submetidos ao ensaio em que o solo do subleito foi compactado com umidade de 24%. Pode-se perceber as marcas deixadas pelas britas (com menor intensidade quando comparada com os geotêxteis de 400 g/m<sup>2</sup>) e a cor avermelhada devido à presença de finos nos seus vazios, mais concentradas no centro da amostra. Esse ensaio também não gerou rasgos ou furos no espécime.

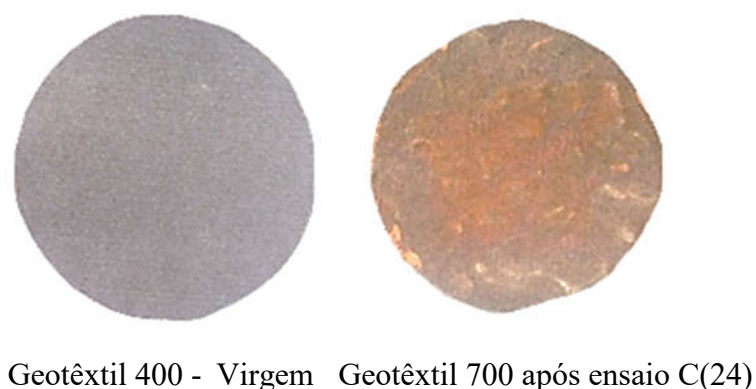


Figura 4.14. Imagens do geotêxtil de 700 g/m<sup>2</sup> nas duas condições.

Na Figura 4.15 tem-se o geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup> no estado virgem e após submetido ao ensaio em que o solo do subleito foi compactado com umidade de 24% (C(24) – 900 – 2º ensaio). A amostra do primeiro ensaio (C(24) – 900 – 1º ensaio) não foi lavada objetivando-se a realização

de outros ensaios em pesquisas futuras. Assim como nos demais, também foi possível perceber as marcas deixadas pelas britas e a cor avermelhada devido à presença de finos nos vazios do espécime, porém em menor intensidade quando comparado com as outras amostras. Também não houve rasgos ou furos.



Figura 4.15. Imagens do geotêxtil de 900 g/m<sup>2</sup> nas duas condições.

No geral, não foram observados danos visíveis nas amostras ensaiadas, apenas as marcas das britas e a presença de solo. O espécime de 400 g/m<sup>2</sup> ensaiado com o subleito compactado com umidade de 27% apresentou as impressões mais intensas das britas e da presença de solo (Figura 4.13). O espécime de 900 g/m<sup>2</sup> foi o que apresentou as marcas das britas e coloração menos evidentes (Figura 4.15)

#### 4.4 ÍNDICE DE IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL

Conforme já explicitado, as propriedades hidráulicas do geotêxtil são afetadas pela retenção de finos nos seus poros. O índice de impregnação ( $\lambda$ ) é definido como a razão entre a massa das partículas retidas dentro do geotêxtil e a massa do geotêxtil limpo.

A Tabela 4.6 apresenta os valores de índice de impregnação nos espécimes após os ensaios de carregamento cíclico. É possível observar que o maior valor ocorreu no ensaio C(27)-400, isso está associada a maior facilidade de migração de finos na direção do geotêxtil durante o ensaio com subleito compactado com maior umidade.

Os geotêxteis de 900 g/m<sup>2</sup> apresentaram os menores índices de impregnação. Como nos ensaios cíclicos com esses espécimes foram registrados aumentos de poropressão, uma hipótese levantada é a predominância de impregnação na região superficial do geotêxtil, favorecendo

também o seu cegamento. Tal ocorrência leva a um menor valor de  $\lambda$ , já que a impregnação não se deu de forma uniforme ao longo de toda a espessura do geotêxtil. Esta concentração de impregnação no geotêxtil junto à interface solo-geotêxtil também foi observada por outros pesquisadores (Palmeira & Trejos Galvis, 2017) no caso de ensaios com geotêxteis mais espessos.

Tabela 4.5. Índice de impregnação dos geotêxteis.

Ensaio	Índice de impregnação de finos ( $\lambda$ )
C(24) - 400	2,05
C(27) - 400	2,37
C(24) - 700	1,19
C(24) - 900 -1º ensaio	0,95
C(24) - 900 -2º ensaio	0,90

#### 4.5 PENETRAÇÃO DOS GRÃOS DE BRITA NO SOLO DO SUBLEITO

Para medir a penetração da brita no solo do subleito, primeiramente, colocou-se gesso sobre a superfície do solo de subleito após a cuidadosa retirada dos grãos de brita. Esse processo foi realizado no primeiro ensaio (C(24)-SG) (Figura 4.16). Para a realização desse procedimento, o traço do gesso foi feito de modo a permitir que ele preenchesse todos os espaços anteriormente ocupados pelos grãos de brita, ou seja, o gesso tinha que estar mais fluido. Por isso, o período de secagem desse material foi consideravelmente alto. De modo a agilizar essa fase, nos demais ensaios, utilizou-se parafina, ao invés de gesso.

A Figura 4.16 mostra que os grãos de brita penetraram significativamente no solo do subleito, deixando a superfície do gesso bem irregular. Já nos ensaios da 1º etapa com geotêxtil (Figura 4.17, Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20) as superfícies da parafina ficaram bem mais lisas quando comparadas com o molde do ensaio sem geotêxtil. Nos ensaios da 2º etapa (Figura 4.21 e Figura 4.22), percebem-se marcas mais significativas do que na 1º etapa, principalmente no ensaio sem geotêxtil. Conforme já explicado, o deslocamento nesse ensaio adveio, principalmente da penetração dos grãos de brita no solo.



Figura 4.16. Penetração dos grãos de brita moldada com gesso no ensaio C(24)-SG.



Figura 4.17. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(24)-400.



Figura 4.18. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(24)-700.



Figura 4.19. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(24)-900 -1° ensaio.



Figura 4.20. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(24)-900 -2° ensaio.



Figura 4.21. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(27)-400.





Figura 4.22. Penetração dos grãos de brita moldada com parafina no ensaio C(27)-SG.

#### **4.6 IMPREGNAÇÃO DAS BRITAS (CONTAMINAÇÃO DA CAMADA DE LASTRO)**

A contaminação do lastro ocorreu com a mistura do solo fino na água de inundação e nos grãos de brita, bem como, no caso dos ensaios sem geotêxtil, com a penetração dos grãos de brita no solo do subleito.

Para quantificar a contaminação nos dois primeiros casos, secou-se a água de inundação e lavou-se a brita. Esses procedimentos foram feitos para todos os ensaios. Já no terceiro caso, mais evidentes nos ensaios sem geotêxtil, para estimar a quantidade de solo que ficou entre os grãos de brita, usou-se o molde de parafina. Para isso, selou-se a borda do molde com silicone industrial e colocou-se água. O volume de água que foi possível colocar até praticamente cobrir as elevações do molde, corresponde a uma estimativa do volume de solo que foi penetrado pelos grãos da brita. A Figura 4.23 apresenta um desenho esquemático desse tipo de impregnação. A Figura 4.24 e a Figura 4.25 mostram imagens do molde do ensaio C(27)-SG com água. Não foi possível contabilizar a contaminação devido a penetração dos grãos no ensaio C(24) – SG, pois o molde desse ensaio foi feito com gesso.

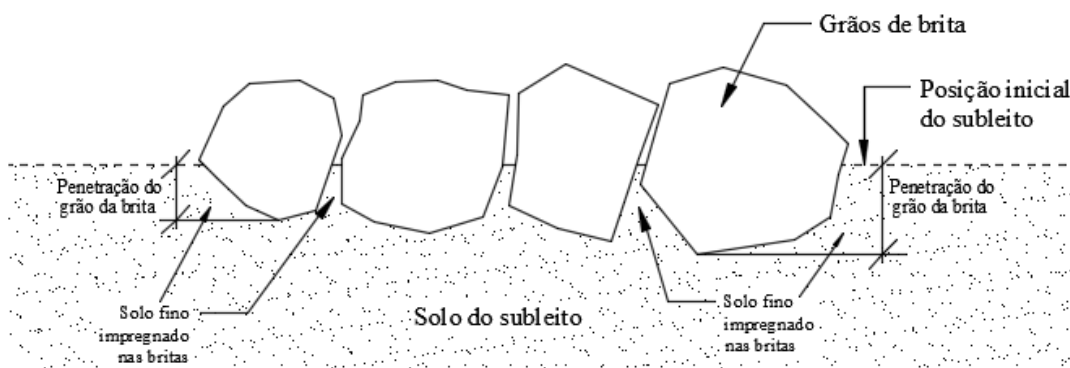


Figura 4.23. Desenho esquemático da impregnação devido a penetração dos grãos de brita no solo.



Figura 4.24. Vista superior do molde de parafina do ensaio C(27)-SG com água.



Figura 4.25. Molde de parafina do ensaio C(27)-SG com água.

As figuras a seguir apresentam a massa de finos por unidade de área que impregnou a brita ao final dos ensaios cíclicos. Pode-se perceber que o ensaio sem geotêxtil com umidade de 24% apresentou a maior contaminação. Além disso, quanto maior a gramatura dos geotêxtil, menor foi a quantidade de solo que se misturou a camada de lastro nos ensaios da 1<sup>o</sup> etapa (Figura 4.26). Isso ocorreu, devido a capacidade de retenção dos geotêxteis e quanto maior a gramatura

do espécime, menor é sua abertura de filtração e, assim, maior a sua capacidade de reter os finos.

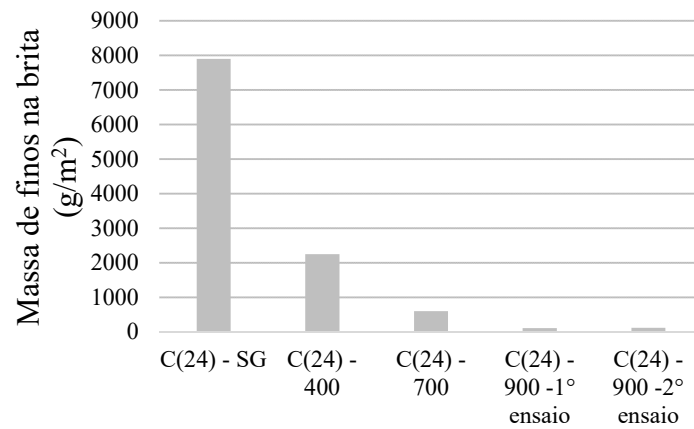


Figura 4.26. Massa de finos por unidade de área que impregnaram as britas na 1º etapa de ensaios.

Na 2º etapa de ensaios, as massas de finos por unidade de área foram muito próximas em ambos os experimentos (com e sem geotêxtil). Porém, a forma como ocorreu a contaminação foi diferente. No ensaio sem geotêxtil, essa foi devido, principalmente, a penetração dos grãos de brita no solo do subleito. Conforme já explicitado, uma hipótese é a formação da barreira de material fino e coesivo entre os grãos de brita - Figura 4.3 – a qual diminuiu significativamente o bombeamento de finos. Já no ensaio com geotêxtil, a contaminação se deu pelas partículas finas que foram capazes de passar pelos vazios do geotêxtil e alcançaram a camada de lastro, se misturando aos grãos de brita e à água de inundação (Figura 4.27).

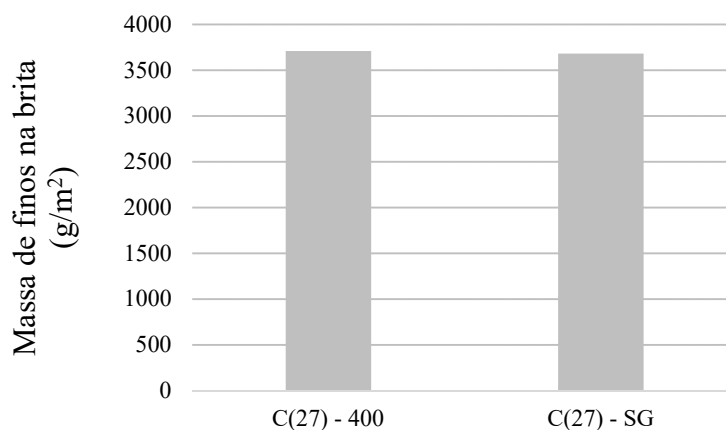


Figura 4.27. Massa de finos por unidade de área que impregnaram as britas na 2º etapa de ensaios.

A Figura 4.28 apresenta massa de finos por unidade de área que impregnou a brita para todos os ensaios realizados (por ordem decrescente de contaminação). Comparando-se os dois ensaios realizados com geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup>, tem-se que o ensaio cujo solo do subleito foi compactado com maior umidade apresentou maior contaminação da brita. Com o solo mais úmido, foi maior a drenagem da água pelo geotêxtil e maior o carreamento de partículas finas. Entre todos os ensaios, o C(24) – SG foi o que apresentou a maior quantidade de solo misturado na brita (mesmo não tendo sido possível contabilizar a massa devido a penetração dos grãos no solo). Ou seja, no ensaio C(27)-400 o geotêxtil reduziu a contaminação da brita em relação ao ensaio C(24)-SG, mesmo o solo do subleito tendo sido compactado com umidade maior.

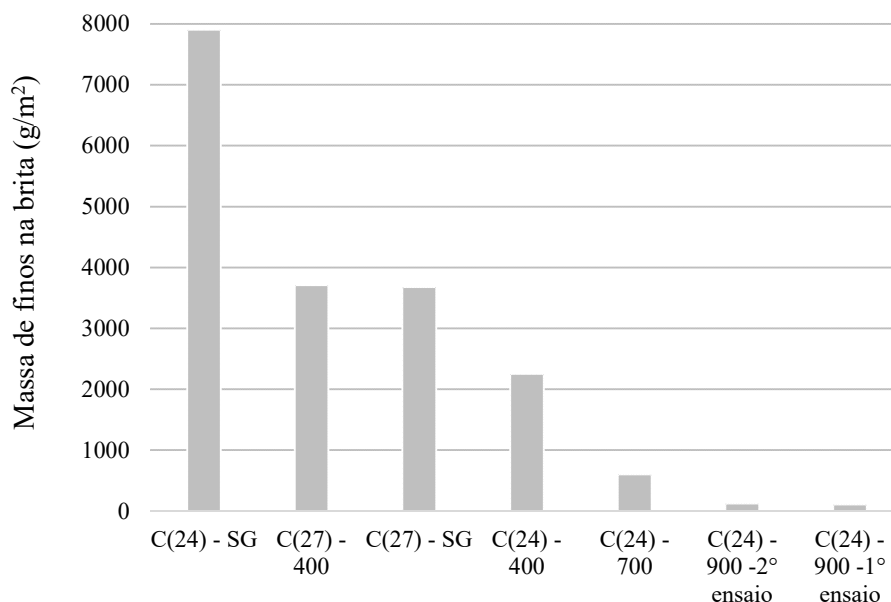


Figura 4.28. Massa de finos por unidade de área que impregnaram as britas em todos os ensaios.

#### 4.6.1 AVALIAÇÃO DA QUEBRA DE GRÃOS DO LASTRO

Conforme metodologia exposta no item 3.4.9.1, foram determinados os índices de quebra dos grãos ( $B_g$ ). Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 4.1.

De forma geral, os índices de quebra (parâmetro  $B_g$ ) foram baixos. Isso se deve a boa resistência do material granular que advém de rocha gnaisse. Além disso, como o estudo foi focado na interface solo – elemento de separação – brita, os ensaios representaram o final da camada de lastro (os últimos 13 cm). Assim, a carga que foi aplicada ao sistema corresponde a carga que

alcança o subleito, ou seja, uma carga menor do que as britas da parte superior da camada de lastro são submetidas.

Nos ensaios da 1<sup>o</sup> etapa a diminuição dos índices de quebra nos experimentos com geotêxtil foram pouco expressivas, sendo o ensaio com espécime de 400 g/m<sup>2</sup> o que apresentou as menores quebras. Já na 2<sup>o</sup> etapa a diminuição dos índices de quebra no experimento com geotêxtil mostrou-se um pouco mais evidente (redução de aproximadamente 6%).

O ensaio sem geotêxtil com solo do subleito compactado com umidade maior foi o que apresentou a maior quebra de grãos, mesmo tendo sido submetido a um menor número de ciclos de carga. Comparando os dois ensaios com geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup>, as maiores quebras de grãos se deram no ensaio com subleito compactado com maior umidade, mesmo esse tendo sido submetido a um menor número de ciclos de carga.

Tabela 4.6. Índice de quebra dos grãos das britas no final dos ensaios

Ensaio	Índice de quebra (Bg) %
C(24) - SG	2,3
C(24) - 400	0,7
C(24) - 700	1,6
C(24) - 900 -1 <sup>o</sup> ensaio	1,9
C(24) - 900 -2 <sup>o</sup> ensaio	1,6
C(27) - SG	6,8
C(27) - 400	1,9

#### 4.6.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS APÓS OS ENSAIOS DE CAREGAMENTO CÍCLICO

Visando verificar o nível de perda de resistência a tração nos geotêxteis submetidos ao carregamento cíclico, foram realizados ensaios de tração em faixa larga para comparação com os resultados das amostras virgens. Com o objetivo de realizar, futuramente, outros ensaios nas amostras com gramatura de 900 g/m<sup>2</sup>, só foi feito o ensaio de tração no espécime C(24) – 900 – 2<sup>o</sup> ensaio. As curvas das amostras virgens apresentadas a seguir, corresponde aos resultados médios dos espécimes nessa condição.

Primeiramente, comparando os dois ensaios com geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup> (Figura 4.29 e Tabela 4.7), percebe-se maior perda de resistência no ensaio cujo solo do subleito foi compactado com umidade maior. Conforme apresentado anteriormente, nesse espécime (C(27)-400), teve-se as

maiores marcas deixadas pelas britas (Figura 4.13 e Figura 4.21), sendo assim, essa amostra foi a mais solicitada, o que justifica a perda de resistência.

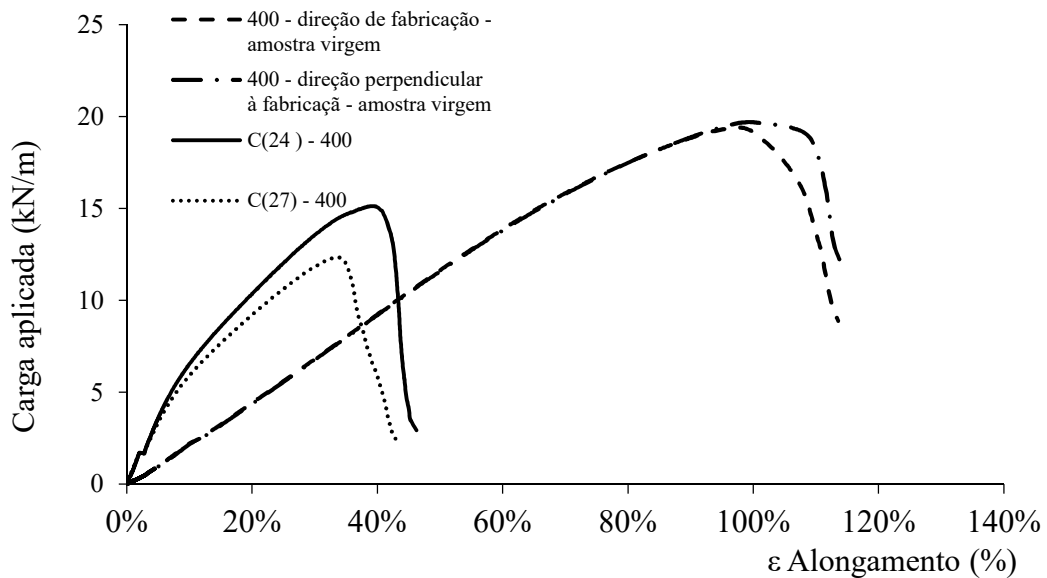


Figura 4.29. Comparação da resistência para as amostras de 400 g/m<sup>2</sup>, antes e após os ensaios cíclicos.

As amostras virgens de 700 g/m<sup>2</sup> e 900 g/m<sup>2</sup> apresentaram grandes variações de resistência, a depender da direção de tracionamento na prensa (sentido de fabricação ou sentido perpendicular à fabricação). Devido as marcas nos espécimes após o carregamento cíclico, essas foram rompidas sem a identificação da direção de fabricação das fibras. Porém, pela Figura 4.30, acredita-se que o rompimento da amostra do ensaio C(24) - 700 tenha ocorrido na direção perpendicular à fabricação das fibras. Já a amostra do ensaio C(24) - 900, mesmo após a plotagem da curva Carga *versus* Deformação (Figura 4.31), não é possível afirmar qual foi a direção de rompimento.

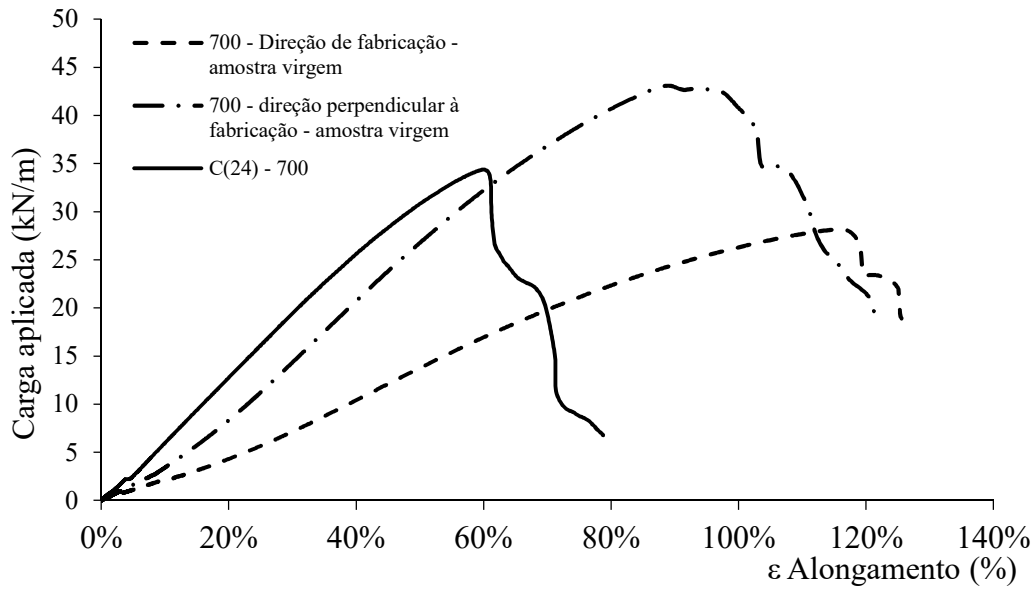


Figura 4.30. Comparação da resistência para as amostras de 700 g/m<sup>2</sup>, antes e após os ensaios cíclicos.

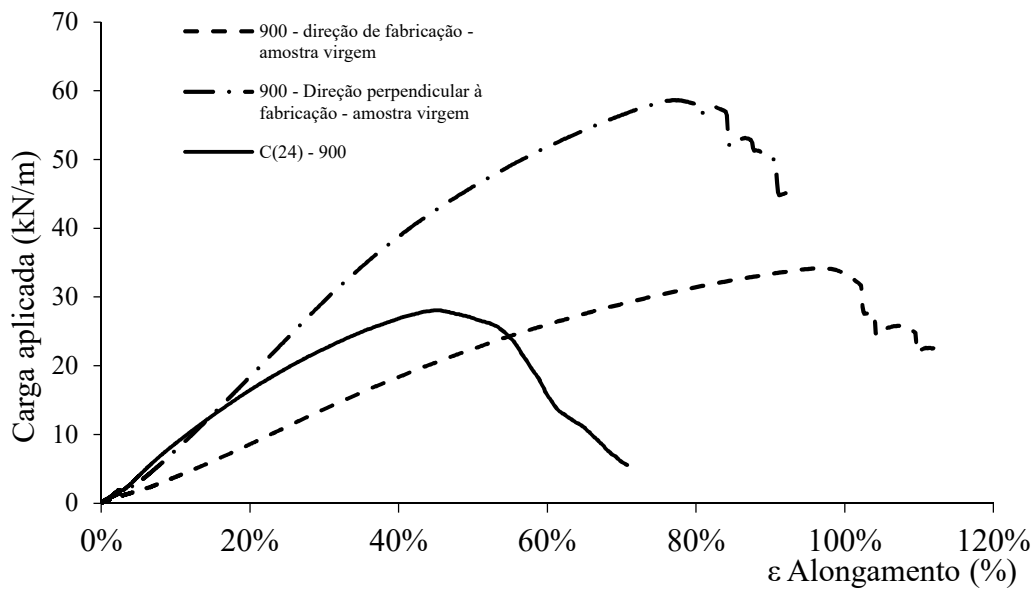


Figura 4.31. Comparação da resistência para as amostras de 900 g/m<sup>2</sup>, antes e após os ensaios cíclicos.

A Tabela 4.7 apresenta os valores de resistência a tração máxima dos geotêxteis após os ensaios cíclicos, e os valores de resistência médio, para as duas direções de rompimento, das amostras virgens.

Tabela 4.7. Resistência a tração máxima das amostras virgens e das submetidas a cargas cíclicas.

<b><u>AMOSTRAS VIRGENS</u></b>	<b>Geotêxtil 400 g/m<sup>2</sup></b>		<b>Geotêxtil 700 g/m<sup>2</sup></b>		<b>Geotêxtil 900 g/m<sup>2</sup></b>	
	<b>Tracionam. na direção das fibras</b>	<b>Tracionam. na direção perpendicular às fibras</b>	<b>Tracionam. na direção das fibras</b>	<b>Tracionam. na direção perpendicular às fibras</b>	<b>Tracionam. na direção das fibras</b>	<b>Tracionam. na direção perpendicular às fibras</b>
<b>Resistência à tração máx. (valor médio – kN/m)</b>	19,9	20,0	29,5	45,0	35,3	62,9
<b><u>AMOSTRAS APÓS ENSAIO CÍCLICO</u></b>	<b>C(24) - 400</b>	<b>C(27) - 400</b>	<b>C(24) - 700</b>		<b>C(24) - 900</b>	
<b>Resistência à tração máx (kN/m).</b>	15,1	12,4	34,4		28,1	

Tendo o valor médio e o desvio padrão da resistência a tração máxima nos geotêxteis virgens, foi calculado, pela distribuição t-Student, os limites para um intervalo de confiança de 95%. Esses limites foram comparados com os resultados das amostras solicitadas pelo carregamento cíclico, para certificar se teve variação da resistência após a submissão a ciclos de carga (Tabela 4.8)



Tabela 4.8. Limites máximos e mínimos de acordo com a distribuição t-Student para as amostras de geotêxtil virgem e comparação com as amostras submetidas aos ensaios cíclicos.

		Geotêxtil 400 g/m <sup>2</sup>		Geotêxtil 700 g/m <sup>2</sup>		Geotêxtil 900 g/m <sup>2</sup>	
		Tracionam. na direção de fabricação.	Tracionam. na direção perpendicular à fabricação.	Tracionam. na direção de fabricação.	Tracionam. na direção perpendicular à fabricação.	Tracionam. na direção de fabricação.	Tracionam. na direção perpendicular à fabricação.
Amostra virgem	Limite inferior (kN/m)	18,2	17,1	25,9	41,2	32,1	65,4
	Limite superior (kN/m)	21,4	22,8	33,0	48,8	38,4	60,3
Porcentagem de redução da resistência nos ensaios com subleito compactado com umidade de 24%		24%	25%	Valor acima do intervalo de confiança	24%	20%	55%
Porcentagem de redução da resistência nos ensaios com subleito compactado com umidade de 27%		38%	38%	-		-	

Pela Tabela 4.8 percebe-se que houve redução de 38% na amostra C(27)-400 e 25% na amostra do ensaio C(24)-400. Como o valor encontrado no espécime do ensaio C(24)-700 está acima do limite superior calculado para a resistência a tração máxima na direção de fabricação, muito provavelmente essa amostra foi tracionada na direção perpendicular à fabricação (fato também evidenciado pela Figura 4.30) e, assim, apresentou uma redução de 24%. Já a amostra com gramatura de 900 g/m<sup>2</sup>, não é possível afirmar qual o sentido do rompimento, assim, caso tenha sido rompida na direção de fabricação, teve-se redução de 20%, enquanto que, se rompeu na direção perpendicular à fabricação, a redução foi de 55%.

Em relação a deformação máxima, todas as amostras submetidas as cargas cíclicas tiveram redução expressiva (em torno de 50% ou mais).

A Figura 4.32 apresenta os geotêxteis após rompimento na prensa de tração. Ressalta-se que os procedimentos adotados nessa fase de ensaios foram semelhantes aos apresentados no item 3.1.3.3 e, assim, os rompimentos ocorreram fora da região das garras.



Figura 4.32. Geotêxteis após rompimento na prensa de tração (corpos de prova submetidos aos ensaios de carregamento cíclico).

#### 4.6.3 RESUMO DOS RESULTADOS

A Tabela 4.9 apresenta os principais resultados obtidos na pesquisa.

Tabela 4.9. Resumo dos resultados.

	<b>W=24% - 1º etapa</b>	<b>W=27% - 2º etapa</b>
<b>Deslocamentos</b>	Diminuição com a presença dos geotêxteis – menores deslocamentos com o aumento da gramatura dos espécimes	Aumento com a presença do geotêxtil – possibilidade de adensamento do solo do subleito
<b>Poropressões</b>	Aumento nos ensaios com geotêxteis de 900 g/m <sup>2</sup> – possibilidade de colmatção	Pouca variação nos ensaios com e sem geotêxtil
<b>Inspeção visual</b>	Sem rasgos ou furos	Sem rasgos ou furos
<b>Penetração</b>	Geotêxteis diminuíram a penetração dos grãos de brita no solo do subleito	Geotêxteis diminuíram a penetração dos grãos de brita no solo do subleito
<b>Contaminação do lastro</b>	Diminuição com a presença dos geotêxteis – menor contaminação com o aumento da gramatura do espécime	Diferença em relação à forma de contaminação
<b>Quebra dos grãos de brita</b>	Diminuição pouco expressiva com a presença dos geotêxteis	Diminuição mais expressiva com a presença dos geotêxteis
<b>Resistência a tração</b>	Redução da resistência após os ciclos de carregamento	Redução da resistência após os ciclos de carregamento

## CAPÍTULO 5

### 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo são apresentadas as considerações finais e as principais conclusões obtidas por meio do programa de ensaios, os quais visaram avaliar o uso de geotêxteis não tecidos como elementos de separação em pavimento ferroviário.

#### 5.1 CONCLUSÕES

Em relação aos deslocamentos verticais na primeira etapa de ensaios (umidade do subleito de 24%) pode-se concluir que:

- A presença dos geotêxteis como elementos de separação diminuíram os deslocamentos em mais de 50% quando comparados com o ensaio sem geotêxtil. Quanto maior a gramatura do espécime, menores foram os deslocamentos. Isso ocorreu principalmente porque os elementos de separação diminuíram a mistura do solo fino com a camada de lastro (bombeamento de finos). Além disso, os espécimes também diminuíram a penetração dos grãos da brita no solo e a quebra destes;
- O ensaio sem geotêxtil mostrou-se mais sensível ao umedecimento das camadas, tendo os deslocamentos aumentado mais significativamente do que nos ensaios com geotêxtil. A água de inundação, ao entrar no sistema, tende a aumentar o bombeamento de finos, porém, a presença do elemento de separação conseguiu reter consideravelmente essas partículas.

Em relação aos deslocamentos verticais na segunda etapa (umidade do subleito de 27%) de ensaios pode-se concluir que:

- O ensaio sem geotêxtil apresentou deslocamento total menor do que o ensaio com geotêxtil (aproximadamente 50%). Uma das hipóteses para o ocorrido é que a maior permeabilidade do geotêxtil, pode ter acelerado o fenômeno de adensamento do solo e, com o efeito contínuo do carregamento, junto com a água, passaram também as partículas mais finas. Além disso, a maior penetração dos grãos de brita no solo do subleito, no ensaio sem geotêxtil, propiciou a formação de uma barreira de solo fino que devido a sua baixa permeabilidade, diminuiu a mistura de solo na camada de lastro. Ressalta-se que esses ensaios foram interrompidos para um número menor de ciclos de

carga (260.000), em comparação com os ensaios da primeira etapa (420.000). Ressalta-se, também, que os solos desses ensaios não foram coletados no mesmo dia na jazida. Assim, a variabilidade natural do solo, pode ter influenciado os resultados. Dessa forma, mais ensaios devem ser realizados para melhor entendimento e confirmação dos valores encontrados e das hipóteses mencionadas;

- Diferentemente dos ensaios da primeira etapa, como o solo estava mais úmido, teve-se uma leve variação no deslocamento a partir do início de umedecimento (100.000 ciclos), para ambos os ensaios dessa etapa.
- Os deslocamentos iniciais nessa etapa foram maiores que os da primeira etapa, fato também justificado pela maior umidade de compactação do solo do subleito;

A respeito das poropressões na primeira etapa de ensaios:

- Nos ensaios com geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup> e 700 g/m<sup>2</sup>, as poropressões no piezômetro P1 (localizado mais próximo à interface solo-brita) tiveram uma leve diminuição e maior estabilização quando comparadas com o ensaio sem geotêxtil. Isso ocorreu devido a maior capacidade drenante dos geotêxteis frente ao solo;
- Nos ensaios com geotêxteis de gramatura de 900 g/m<sup>2</sup> teve-se aumento das poropressões no piezômetro P1, o que pode ter sido ocasionado por uma colmatação dos geotêxteis por cegamento. A análise visual do geotêxtil após o ensaio e o coeficiente de permeabilidade calculado por soluções teóricas são fatores que reforçam a hipótese. Porém, apenas por meio de ensaios (permeabilidade e análise de imagens por microscopia, por exemplo) poder-se-ia confirmar a colmatação.
- As poropressões no piezômetro P2 (mais distante da interface solo-brita) foram pouco influenciadas pelo carregamento em todos os ensaios dessa etapa;

A respeito das poropressões na segunda etapa de ensaios:

- As poropressões registradas nos piezômetros P1 mantiveram-se muito próximas em ambos os ensaios (com e sem geotêxtil);
- As poropressões no piezômetro P2 (mais distante da interface solo-brita) foram pouco influenciadas pelo carregamento;

Quanto aos danos nos geotêxteis após os ensaios de carregamento cíclico:

- Nenhum dos geotêxteis ensaiados apresentaram furos ou rasgos, que pudessem ser identificados visualmente, após submetidos às cargas cíclicas;
- O espécime de 400 g/m<sup>2</sup>, utilizado no ensaio com solo menos compacto, foi o que apresentou as maiores marcas dos grãos de brita e a coloração mais intensa, o que evidencia a maior quantidade de solo no seu interior. Isso ocorreu pois, com o solo mais úmido, a drenagem da água pelo geotêxtil foi maior e, assim, também maior foi a quantidade de solo retido no seu interior;
- Nos ensaios da primeira etapa, quanto maior a gramatura do geotêxtil menores foram as impressões deixadas pelos grãos da brita e pela presença de solo retido no interior dos espécimes.

Quanto à impregnação dos geotêxteis:

- O espécime de 400 g/m<sup>2</sup> utilizado no ensaio com solo de subleito menos compacto foi o que apresentou o maior índice de impregnação ( $\lambda = 2,37$ ) em decorrência da maior facilidade de migração dos finos no solo compactado com maior umidade;
- Nos ensaios da primeira etapa, quanto maior a gramatura do geotêxtil menores foram os valores de  $\lambda$ , ou seja, menor a quantidade de solo retida no interior do geotêxtil. Isso ocorre pois, quanto maior a gramatura, menor o tamanho dos poros do espécime;
- Os geotêxteis de 900 g/m<sup>2</sup> apresentaram os menores índices de impregnação ( $\lambda < 1$ ), porém pode ter ocorrido predominância de impregnação na região do geotêxtil em contato com o solo, o que pode ter favorecido o cegamento e levado a menores valores de  $\lambda$  localmente, uma vez que a impregnação não se deu de modo uniforme ao longo da espessura do geotêxtil.

Quanto a penetração dos grãos de brita no solo do subleito:

- De forma geral os ensaios com geotêxteis diminuíram a penetração dos grãos de brita no solo do subleito;

Quanto a impregnação da brita (contaminação da camada de lastro):

- Nos ensaios da primeira etapa, a presença do geotêxtil reduziu significativamente a quantidade de massa de finos por unidade de área (aproximadamente 75% no ensaio com geotêxtil de 400 g/m<sup>2</sup> e mais de 90% nos ensaios com geotêxtis de maiores gramaturas). Quanto maior a gramatura do espécime, menor foi a quantidade de solo que se misturou na camada de lastro. Isso se deve a capacidade de retenção dos geotêxteis não tecidos ensaiados, a qual aumenta com a gramatura;
- Nos ensaios da segunda etapa a massa de finos por unidade de área foram muito próximas em ambos os experimentos. A diferença se deu na forma de contaminação. No ensaio sem geotêxtil a impregnação foi devida a penetração dos grãos de brita no solo do subleito, enquanto no ensaio com geotêxtil, se deu pelas partículas finas que foram capazes de passar pelos vazios do geotêxtil e alcançaram a camada de lastro, se misturando aos grãos de brita e à água de inundação.

Quanto a quebra dos grãos de brita:

- De forma geral, os índices de quebra (parâmetro Bg) foram baixos;
- Teve-se diminuição das quebras nos ensaios com geotêxtil para ambas as etapas, porém, na primeira observaram-se valores menos expressivos (máximo de 1,6%), enquanto que, na segunda etapa, a redução foi de 6%.

Quanto a resistência a tração dos geotêxteis após os ensaios de carregamento cíclico:

- Todas as amostras sofreram redução de resistência sendo 38% no ensaio C(27)-400, 25% no C(24)-400 e 24% no C(24)-700. No ensaio C(24)-900 não foi possível afirmar qual o sentido do rompimento, assim, caso tenha sido rompida na direção de fabricação, teve-se redução de 21%, enquanto que, se a ruptura ocorreu na direção perpendicular à fabricação, a redução seria de 55%;
- Em relação a deformação máxima, todas as amostras submetidas às cargas cíclicas tiveram redução expressiva (em torno de 50% ou mais).

Como conclusões gerais tem-se que:

- Os geotêxteis são materiais com alto potencial para serem utilizados como elemento de separação em pavimento ferroviário. Por meio da inserção de um geotêxtil entre as

camadas do pavimento pode-se conseguir redução dos deslocamentos, redução das poropressões, diminuição de bombeamento de finos e da penetração dos grãos de brita no subleito. Para tanto, faz-se necessário estudo aprofundado das características do material sintético, bem como dos materiais naturais (o solo do subleito, a brita do lastro e a camada de sublastro, quando houver). Ressalta-se que, mais importante do que as propriedades físicas e mecânicas do material virgem sem confinamento, é a obtenção destas sob esforços similares aos encontrados em campo.

- Nessa dissertação o uso de geotêxteis de maior gramatura ( $900 \text{ g/m}^2$ ) não se mostraram eficientes (nas condições do ensaio) para a diminuição das poropressões, porém quanto aos deslocamentos e impregnação de finos na camada de lastro, os mesmos propiciaram as maiores reduções. Os espécimes de gramatura de  $400 \text{ g/m}^2$  e  $700 \text{ g/m}^2$  apresentaram resultados positivos para a inclusão desse material entre o subleito e o lastro, também considerando as condições estudadas (1º etapa de ensaios apresentada), em todos os aspectos analisados.
- Apesar dos deslocamentos terem sido maiores no ensaio com geotêxtil (2º fase de ensaios), caso se confirme as hipóteses de aceleração do processo de adensamento e de ocorrência de bombeamento de finos com maior número de ciclo de cargas (no ensaio sem geotêxtil), o uso desse material apresenta grandes vantagens para o pavimento.

## **5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

De forma a complementar os estudos apresentados nessa dissertação, sugere-se:

- Realizar ensaios de permeabilidade e análise de imagens por microscopia nos geotêxteis após os ensaios de carregamento cíclico, em especial no de gramatura de  $900 \text{ g/m}^2$ ;
- Realizar ensaios de granulometria das partículas passantes e retidas nos geotêxteis;
- Realizar ensaios nas condições apresentadas na 2º etapa com um maior número de ciclos de carga e com geotêxteis de maiores gramaturas;
- Executar ensaios com diferentes intensidades de carga e frequências;
- Executar ensaios nas condições apresentadas, porém em equipamento com diâmetro maior;

- Executar ensaios com diferentes granulometrias de brita e outros tipos de solo de subleito.
- Medir as poropressões mais próximo à interface subleito - geotêxtil.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ABNT. (2001). Agregados – Determinação da composição granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR NM 248. Rio de Janeiro, RJ, 6 p.
- ABNT. (2001). Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR NM 27. Rio de Janeiro, RJ, 15 p.
- ABNT. (2003). Geossintéticos - Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12553. Rio de Janeiro, RJ, 3 p.
- ABNT. (2011). Via Férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de dimensionamento. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 5564. Rio de Janeiro, RJ, 32 p.
- ABNT. (2013). Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga. NBR ISO 10319. ABNT, Rio de Janeiro, 15p.
- ABNT. (2016). Ensaio de compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7182. Rio de Janeiro, RJ, 13 p.
- ABNT. (2016). Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 9895. Rio de Janeiro, RJ, 14 p.
- ANTF. (2018). Informações Gerais. Agência Nacional dos Transportes Ferroviários. Disponível em: < <http://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>>. Acesso em: 10 fev. 2018.
- AGUIAR, P.R. & VERTEMATTI, J. C. (2015). Introdução. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Blucher, São Paulo, SP, p. 17-30.
- ALOBAYDI, I., & HOARE, D. (1994). Factors affecting the pumping of fines at the subgrade subbase interface of highway pavements: a laboratory study. *Geosynthetics International*, 1(2): 221-259.
- ALOBAYDI, I., & HOARE, D. J. (1996). The development of pore water pressure at the subgrade-subbase interface of a highway pavement and its effect on pumping of fines. *Geotextiles and Geomembranes*, 14(2): 111-135.
- ANDRADE, H. (2010). Avaliação de Geotêxteis como Elementos de Separação em Camadas de Pavimentos. Seminário de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 21 p.
- ANTUNES, L. G. S. (2008). Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 158 p.
- ASTM. (2011). Standard test method for pore size characteristics of geotextiles by capillary flow test. American Society for Testing and Materials D6767, 6p.
- BHATIA, S. K. & SMITH, J. L. (1996). Geotextile characterization and pore-size distribution: Part I. A review of test methods and results. *Geosynthetics International*, 3(1): 85–105.
- BLACK, P. J., & HOLTZ, R. D. (1999). Performance of geotextile separators five years after installation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(5): 404-412.
- BRINA, H.L. (1979). Estradas de Ferro 1 – Via Permanente. Livros Técnicos e Científicos S.A, Rio de Janeiro, RJ, 1 vol., 258 p.

- BURGOS LOPERA, J.F. (2016). Influência da Microestrutura no Comportamento Mecânico dos Solos Tropicais Naturais e Compactados. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.
- CNT. (2013). Transporte e Economia: O sistema ferroviário brasileiro. Confederação Nacional dos Transportes. Brasília, DF, 58 p, CDU 656.2.025.4(81).
- CHAWLA, S. & SHAHU, J.T. (2016). Reinforcement and mud-pumping benefits of geosynthetics in railway tracks: Model tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 44 (3): 366-380.
- CHRISTOPHER, B. R., & FISCHER, G. R. (1992). Geotextile filtration principles, practices and problems. *Geotextiles and Geomembranes*, 11 (4-6): 337-353.
- CONSÓRCIO LOGIT/ GISTRAN. (2012). Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT – Plano Nacional de Logística e Transportes. Ministério dos Transportes, Brasília, DF, 260 p.
- DNIT. (2018). Nota Técnica N°: 5542/2018/CONFER/CGOFER/DIF/DNIR SEDE. Implantação do INPF – Instituto Nacional de Pesquisas Ferroviárias. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasília, DF, 10 p.
- DNIT. (2016). Estudos Geotécnicos. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ISF-207, 20 p.
- FERNANDES, G. (2005). Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 282 p.
- FERNANDES, G., PALMEIRA, E.M. & GOMES, R.C. (2008). Performance of geosynthetic-reinforced alternative sub-ballast material in a railway track. *Geosynthetics International*, 15(5): 311-321.
- FILHO, J.C.S. (2013). Análise Numérica do Comportamento Mecânico de um Pavimento Ferroviário para Diferentes Tipos de Veículos de Via. Dissertação de Mestrado, Núcleo de Geotecnia – NUGEO, Escola de Minas, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 188 p.
- GIROUD, J. P. (1994). Quantification of geosynthetic behavior. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, IGS, Singapore, Special Lecture: 3-27.
- GIROUD, J.P. (1996). Granular filters and geotextiles filters. *Geofilters'96*. J, Lafleur & Rollin A.L, Montreal, Quebec, Canada: 565-678.
- GOURC, J.P. & PALMEIRA, E.M. (2018). Geossintéticos em drenagem e filtração. Disponível em <http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/7.pdf>. Acesso em 22 nov. 2018.
- HENRY, K. S., COLE, D. M., & DURELL, G. D. (2013). Mixing in an aggregate/fine-grained soil system subjected to cyclic loading with a geotextile separator. *Sound Geotechnical Research to Practice: Honoring Robert D. Holtz II*: 306-317.
- IGS. (2018). Os Geossintéticos. International Geosynthetics Society – IGS Brasil. Disponível em <http://igsbrasil.org.br/os-geossinteticos>. Acesso em 22 nov. 2018.
- INDRARATNA, B., KHABBAZ, H. & LACKENBY, J. (2003). Behaviour of railway ballast under dynamic loads based on large-scale triaxial testing. *AusRAIL PLUS 2003*, 17-19 November 2003, Sydney, NSW, Austrália.

- INDRARATNA, B., KHABBAZ, H., SALIM, W. & CHRISTIE, D. (2006). Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 10(3): 91-101.
- INDRARATNA, B., NIMBALKAR, S., CHRISTIE, D., RUJIKIATKAMJORN, C., & VINOD, J. (2010). Field assessment of the performance of a ballasted rail track with and without geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(7): 907-917.
- INDRARATNA, B., SALIM, W. & RUJIKIATKAMJORN, C. (2011). *Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track*. Taylor and Francis Group, London, UK, 413 p.
- KOERNER, R. M. (2016). *Designing with Geosynthetics*. Robert M. Koerner, EUA, 1 vol., 508 p.
- MARSAL, R. J. (1967). Large scale testing of rock fill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 93(2): 27-43.
- MELO, D.L.A. (2018). *Avaliação da Abertura de Filtração de Geotêxteis Não Tecidos sob Diferentes Esforços Solicitantes*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99 p.
- MERHEB, A.H.M. (2014). *Análise Mecânica do Lastro Ferroviário Por Meio de Ensaio Triaxiais Cíclicos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 148 p.
- 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.
- NAREJO D.B. (2003). Opening size recommendations for separation geotextiles used in pavements. *Geotextiles and Geomembranes*, 21 (4): 257–264.
- OLIVEIRA, D.R (2003). *Análise da Interação Solo-Atmosfera Durante a Secagem para a Argila Porosa de Brasília*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 187 p.
- PAIM DA SILVA, F. H. (2018). *Estudo do Comportamento de um Lastro Ferroviário Sob Carga Repetida em Modelo Físico de Verdadeira Grandeza*. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 251 p.
- PAIM DA SILVA, F. H., RAMIRES, M. C. P., MALYSZ, R., MICHELIN, C.R.L. & ROSENBAACH, M.C. (2015). *Aplicação de geogrelha no controle da contaminação do lastro ferroviário*. 44º Reunião Anual de Pavimentação e 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, RAPv, ENACOR, Foz do Iguaçu, Brasil, 1807-5568.
- PALMEIRA, E. M. (1992). *Tipos e Evolução nos Últimos Anos*. Seminário sobre aplicações de Geossintéticos em Geotecnia Geossintéticos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 1-20.
- PALMEIRA, E. M. (2018). *Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente*. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 294 p.
- PALMEIRA, E. M. & FONSECA, E. C. (2015). *Aplicações em Separação de Materiais*. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Blucher, São Paulo, pp. 323-340.

- 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. *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 non-woven geotextiles under confinement using diferente experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranes*, 20 (2): 97–115.
- PALMEIRA, E. M., & TREJOS GALVIS, H. L. (2016). Opening sizes and filtration behaviour of nonwoven geotextiles under confined and partial clogging conditions. *Geosynthetics International*, 24(2): 125-138.
- PINTO, C.S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. Oficina de Textos*, São Paulo, SP, 3º edição, 247 p.
- QUANTACHROME INSTRUMENTS (2009). *Operation Manual for Pentapyc 5200e and Pentafoam 5200e*. Florida, USA, 135 p.
- RAWAL, A., MISHRA, P. K., & SARASWAT, H. (2012). Modeling the compression-induced morphological behavior of nonwoven materials. *Journal of Materials Science*, 47(5): 2365-2374.
- SELIG, E.T. & WATERS, J.M. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management*. Thomas Telford Services Ltd, London, 458 p.
- SILVA. J.P. (2007). *Estudos Preliminares para Implantação de Trincheiras de Infiltração*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167 p.
- SKOGLUND. K.A. (2002). *A Study of Some Factors in Mechanistic Railway Track Design*. Thesis, Department of Road and Railway Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 260 p.
- SPADA, J.L.G. (2003). *Uma Abordagem de Mecânica dos Pavimentos Aplicada ao Entendimento do Mecanismo de Comportamento Tensão-Deformação da Via Férrea*. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 251 p.
- STOPATTO, S. (1987). *Via Permanente Ferroviária – Conceitos e Aplicações*. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 5 vol., 251 p.
- SUSUNAGA, M.P.S. (2015). *Geotêxteis em Separação de Camadas de Pavimentos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96 p.
- TREJOS GALVIS, H.L. (2016). *Avaliação da Abertura de Filtração de Geotêxteis sob Confinamento e Parcialmente Colmatado*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 164 p.
- URIBE, C.M. (2016). *Projeto e Construção de um Permeâmetro de Parede Flexível e Carga Constante*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133 p.

VALEC ENGENHARIA, CONSTRUÇÕES E FERROVIAS S.A. (2012). Especificação de material de superestrutura – Pedra britada para lastro – 80-EM-033A-58-8006. 7 p.

ZORNBERG, J. G., & THOMPSON, N. (2012). Application guide and specifications for geotextiles in roadway applications (No. FHWA/TX-10/0-5812-1). University of Texas at Austin, Center for Transportation Research, 137 p.