

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

GEOTÊXTEIS EM SEPARAÇÃO DE CAMADAS DE
PAVIMENTOS

MARIA PAULA S. SUSUNAGA

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph. D.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-250/2015

BRASÍLIA/DF: MARÇO/2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**GEOTÊXTEIS EM SEPARAÇÃO DE CAMADAS DE
PAVIMENTOS**

MARIA PAULA S. SUSUNAGA

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 GEOTECNIA.

APROVADA POR:

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

PROF. LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

PROF. LILIAN RIBEIRO DE REZENDE D.Sc. (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 12 DE MARÇO DE 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

SUSUNAGA, MARIA PAULA S.

Geotêxteis em Separação de Camadas de Pavimentos. [Distrito Federal] 2014 xv, 80 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotécnia, 2015)

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- | | |
|-------------------|---------------------------|
| 1. Geossintéticos | 2. Geotêxteis não tecidos |
| 3. Separação | 4. Pavimentos |

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SUSUNAGA, M.P. (2015) Geotêxteis em Separação de Camadas de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, Publicação G-DM-250/2015, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Maria Paula S. Susunaga

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Geotêxteis em Separação de Camadas de Pavimentos

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.

Maria Paula S. Susunaga

E-mail: ingcivilsusunaga@gmail.com

A Libardo Susunaga y Pastora Susunaga por ser todo lo que quiero ser.
A mis madres Edith Susunaga y Gloria Susunaga por ser mi apoyo y creer en mí.
Al amor de mi vida Juan David Del Río Gaitán por estar a mi lado siempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, porque graças a ele o sonho foi realizado.

Ao professor Ennio Marques Palmeira pelo apoio e pela ajuda. O senhor é um exemplo de pessoa e de profissional. Fico muito grata de poder trabalhar com o senhor.

Aos meus avós por serem os melhores pais que eu pude ter, por serem meus exemplos e serem sempre as melhores pessoas que eu conheço.

À minha mãe Edith agradeço a você cada luta, cada esforço que faz por mim e por minha irmã. Você é uma guerreira. Mãe obrigada porque graças a você eu estou neste momento realizando meu sonho; porque você me ensinou a nunca desistir.

À minha tia Gloria, por ser meu apoio, por sua preocupação, por seu amor incondicional de mãe. Valorizo muito todas as coisas que você faz por mim. Obrigada pela amizade, por ser minha amiga incondicional. Sei que sempre poderei contar com a minha “segunda mãe”.

À minha família, por sempre estar dispostos a me ajudar. Às minhas tias Clara Marcela e Maria Juana, obrigada por sempre ficarem por perto. À minha irmã por ser a pequeninha linda que eu sempre vou amar e cuidar. Às minhas primas pela amizade.

Às minhas amigas Ana Maria e Natalia, por estarem presentes neste processo, me dando forças para sempre continuar. Obrigada pela amizade de tantos anos.

À Juan David, obrigada por todo o que você faz por mim, por me acompanhar e me amar sempre. Esta conquista também é sua. Simplesmente, sem você isto não seria possível.

Aos meus colegas Jaime e Ivonne, Obrigada pelas ajudas e os auxílios! Muito obrigada por me ajudar sempre que eu precisei.

Às minhas amigas Lucía, Tânia e Liliane, Obrigada por estarem presentes durante o processo e me ajudarem quando foi necessário. Aos meus amigos queridos Alejandra e Ivan, por me acolherem e me fazerem sentir em casa quando cheguei a Brasília.

À Juan Carlos Ruge por mostrar-me a oportunidade de estudo aqui no Brasil.

A meus companheiros de laboratório, Ewerton, Oisy, Janaina, Carolina, Amarillo, obrigada por o tempo compartilhado.

Aos técnicos do laboratório, obrigada pelas ajudas durante os ensaios.

Aos senhores Arthur e o Wesley, por me ajudarem na confecção de peças para o equipamento e sua manutenção.

Agradeço à Capes pelo apoio financeiro.

MUITO OBRIGADA-MUCHAS GRACIAS

RESUMO

As principais funções de um pavimento é permitir o tráfego de veículos com conforto e segurança para os usuários. Para tanto, sua estrutura deve ser projetada de modo a garantir tais condições ao longo de toda a sua vida útil. As estruturas de pavimentos têm evoluído significativamente, nas últimas décadas, incluindo a utilização de materiais alternativos e de novos materiais para a melhoria do seu desempenho.

Os geotêxteis são um tipo de geossintético utilizados em obras de engenharia, sendo usados nas funções de drenagem, filtração, reforço, separação e proteção. Por exemplo, podem ser utilizados na separação entre camadas de pavimentos com a finalidade de reduzir a impregnação do material de base por finos oriundos do subleito. O uso desses materiais como elementos separadores pode aumentar significativamente a vida útil de bases de pavimentos rodoviários e ferroviários.

Esta dissertação visa estudar o comportamento de três geotêxteis não tecidos como elemento de separação entre camadas típicas de um problema de pavimentação. Para isso, foi utilizado o equipamento EGS, capaz de simular carregamentos cíclicos.

Foram realizados oito ensaios, dos quais dois sem o geotêxtil, para servirem como ensaios de referência. Foram utilizadas duas condições de compactação do solo de subleito (subleito compactado e sem compactação), visando verificar a influência da compactação na intensidade de migração de finos do subleito para a base (brita). Transdutores de pressão em duas posições no subleito permitiram medir os acréscimos de poropressões durante os ensaios. Ao final dos ensaios de carregamento cíclico foram realizados ensaios adicionais, visando quantificar o nível de impregnação do geotêxtil por partículas de solo de subleito e a perda de resistência à tração dos geotêxteis.

Os resultados obtidos mostraram que a presença do geotêxtil como elemento separador melhorou a dissipação de poropressões geradas no subleito devido aos carregamentos superficiais e minimizou a impregnação da brita por finos. Além disso, menores recalques superficiais foram registrados nos ensaios com geotêxteis, uma vez que a presença deles diminuiu a penetração de grãos de brita no solo de subleito. De forma geral, o desempenho dos sistemas com geotêxtil foram semelhantes para os três geotêxteis utilizados. Entretanto, o geotêxtil com maior gramatura foi o que apresentou menor perda de resistência à tração após os ensaios de carregamento cíclico.

ABSTRACT

The main function of a pavement is to allow the traffic of vehicles with comfort and safety for the users. To do so, its structure must be designed in order to guarantee such conditions throughout its life. Pavement structures have evolved significantly during the last decades with the use of alternative construction materials or new materials to improve pavement performance.

A geotextile is a type of geosynthetic used in geotechnical and geoenvironmental works in functions such as drainage, filtration, reinforcement, separation and protection. As an example, geotextiles can be used as separators in pavements to minimize the contamination of the base soil with fines from the subgrade. The use of geotextiles as separators can increase significantly the life of highway and railway pavements.

This dissertation investigated the behaviour of three nonwoven geotextiles as separators between typical soil layers of a pavement. The equipment EGS capable of applying cyclic loads was used in the tests.

Eight tests were executed, being two without geotextile to serve as reference tests. Two situations were adopted for the subgrade soil, with and without compaction, to evaluate the effects of subgrade compaction on the intensity of the migration of fines from the subgrade to the base soil (gravel). Pressure transducers were installed at two positions in the subgrade to assess the excess of pore pressure during the tests. Additional tests were carried out at the end of the tests with cyclic load in order to quantify the impregnation of the geotextile separator with fines from the subgrade and the loss of tensile strength of the geotextiles.

The results obtained showed that the presence of the geotextile separator improved the dissipation of pore pressure excesses in the subgrade soil caused by the loads at the system surface and minimized the impregnation of the gravel by fines from the subgrade. In addition, smaller surface settlements were obtained in the tests with geotextile, because its presence reduced the penetration of gravel particles in the subgrade soil. In general, the performance of the systems with geotextile was similar for the three geotextiles tested. However, the geotextile with the greatest mass per unit area was the one with less tensile strength loss after cyclic loading.

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	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. GEOSSINTÉTICOS	4
2.1.1. CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS	4
2.2. GEOTÊXTEIS	8
2.2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS	8
2.2.1.1. CLASSIFICAÇÃO POR MÉTODO DE FABRICAÇÃO	8
2.2.1.2. CLASSIFICAÇÃO POR COMPOSIÇÃO	10
2.2.2. PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS	11
2.2.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS	11
2.2.2.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	13
2.2.2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS	15
2.3. NOÇÕES GERAIS SOBRE PAVIMENTAÇÃO	17
2.3.1. PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS	19
2.4. SEPARAÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTOS COM GEOTÊXTEIS	21
2.4.1. CRITÉRIO DE RETENÇÃO DE FINOS	25
2.4.2. CRITÉRIO DE SOBREVIVÊNCIA	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1. EQUIPAMENTO	33
3.1.1. SISTEMA HIDRÁULICO	34
3.2. MATERIAIS	36
3.2.1. MATERIAL DE SUBLEITO	36

3.2.2. ELEMENTO DE SEPARAÇÃO	38
3.2.3. MATERIAL DA CAMADA DE BASE	39
3.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	41
3.4. INSTRUMENTAÇÃO	42
3.5. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	45
3.5.1. PREPARAÇÃO DO SOLO DE SUBLEITO	45
3.5.1.1. PRIMEIRA ETAPA	45
3.5.1.2. SEGUNDA ETAPA	47
3.5.2. PROCEDIMENTOS ANTES DA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	48
3.5.3. PROCEDIMENTOS DURANTE A EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	50
3.5.4. PROCEDIMENTOS APÓS O ENSAIO	50
4. ANÁLISES DOS RESULTADOS	52
4.1. DESLOCAMENTOS VERTICAIS	52
4.1.1. DESLOCAMENTOS DA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS	53
4.1.2. DESLOCAMENTOS DA SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS	55
4.2. POROPRESSÕES.	58
4.2.1. POROPRESSÕES DA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS	59
4.2.2. POROPRESSÕES NA SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS.	61
4.3. INSPEÇÃO VISUAL DOS GEOTÊXTEIS APÓS ENSAIO	64
4.4. IMPREGNAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS E DA BRITA	67
4.4.1. ÍNDICE DE IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTIL	67
4.4.2. IMPREGNAÇÃO DA BRITA NOS ENSAIOS SEM GEOTÊXTIL.	69
4.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS ESPÉCIMES DE GEOTÊXTIL APÓS ENSAIOS DE CARGA REPETIDA	70
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.	75
5.1. CONCLUSÕES	75
5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	76
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Usos dos diferentes tipos de geossintéticos (Bueno & Vilar, 2004).	8
Tabela 2.2. Comparação dos métodos para determinar distribuição de poros.(modificado de Shukla, 2002).	14
Tabela 3.1. Propriedades do solo empregado como subleito (Rufo, 2013).	36
Tabela 3.2. Resultados dos ensaios da metodologia MCT para solos finos (Rufo, 2013).	37
Tabela 3.3. Propriedades dos geotêxteis utilizados (dados fornecidos pelo fabricante).	39
Tabela 3.4. Resultados de ensaio de Abrasão Los Angeles (Ante, 2012).	40
Tabela 3.5. Resultados da avaliação de textura e forma (Ante, 2012).	40
Tabela 4.1 Ensaios realizados.	52
Tabela 4.2. Deslocamentos totais dos ensaios da primeira etapa.	53
Tabela 4.3. Deslocamentos totais da segunda etapa.	55
Tabela 4.4. Propriedades do geotêxtil utilizado por Perkins (2000)	57
Tabela 4.5. Propriedades do solo de subleito utilizado por Perkins (2000)	57
Tabela 4.6. Valores de umidade e grau de saturação médios dos ensaios da 1ª etapa.	59
Tabela 4.7. Índice de impregnação dos geotêxteis.	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Imagens de alguns tipos de geossintéticos (Palmeira, 2013)	5
Figura 2.2. Esquema da função drenagem (Bidim Mexichem, 2009).....	6
Figura 2.3. Esquema da função de filtração (Bidim Mexichem, 2009).	6
Figura 2.4 Esquema da função de separação (Bidim Mexichem, 2009).....	6
Figura 2.5. Esquema da função de reforço (Bidim Mexichem, 2009).	7
Figura 2.6 Esquema da função de proteção (Bidim Mexichem, 2009).....	7
Figura 2.7. Vista microscópica de geotêxteis não tecidos: (a) agulhado (b) termo-ligado (Pavco, 2012).	9
Figura 2.8. Vista microscópica de geotêxteis tecidos. (a). Monofilamento Tecido. (b). Monofilamento tecido costurado. (c). Multifilamento Tecido. (d). Tecido plano (Pavco, 2012).....	10
Figura 2.9. Esquema de ensaio para obter a espessura (Palmeira, 2013).....	11
Figura 2.10. Variação da espessura do geotêxtil com a tensão vertical (Faure <i>et al</i> , 1990). ...	12
Figura 2.11. Permissividade e transmissibilidade de um geotêxtil (Tatto, 2010).	14
Figura 2.12. Ensaio de tração unidirecional em faixa larga(Bueno & Vilar, 2004).	16
Figura 2.13. Exemplos de situações de perfuração (Vidal, n.d.).....	17
Figura 2.14. Esquema do ensaio tração multidirecional. Palmeira (2013)	17
Figura 2.15. Pavimento asfáltico (Bernucci <i>et al.</i> , 2008).....	18
Figura 2.16. Pavimento de concreto (Bernucci <i>et al.</i> 2008).....	18
Figura 2.17. Distribuições de carga em pavimentos rígidos e flexíveis (Modificado de Bernucci <i>et al</i> 2008).	19
Figura 2.18. Esquema dos tipos de trinca no pavimento asfáltico (DNIT, 2003).....	20
Figura 2.19. O fenômeno de bombeamento e consequências (Villibor <i>et al.</i> , 2005).....	21
Figura 2.20. Comparação entre um pavimento sem geotêxtil e com geotêxtil (Zornberg <i>et al.</i> , 2008).....	22
Figura 2.21. Esquema do equipamento utilizado por Perkins (2000)	23
Figura 2.22. Esquema modificado do equipamento utilizado por Gobel et al (1994).	24
Figura 2.23. Fenômeno de colmatção. (Pavco, 2012)	26
Figura 2.24. Resistencia ao estouro, situação em campo (Koerner, 2005).	28
Figura 2.25. solicitações de tração localizada (Palmeira & Cardoso, 2004).....	29
Figura 2.26. Visualização da atuação das pressões no geotêxtil (Koerner, 2005).	30
Figura 2.27. Fator de minoração de energia de impacto (Palmeira & Cardoso, 2004).....	31

Figura 3.1. Esquema geral da metodologia dos ensaios.....	33
Figura 3.2. Esquema do equipamento EGS utilizado (Andrade,2010).	34
Figura 3.3. Esquema básico de funcionamento do sistema hidráulico (Souza, 2008).	34
Figura 3.4. Temporizador utilizado.....	35
Figura 3.5. Sistema hidráulico.....	36
Figura 3.6. Curvas granulométricas do solo de subleito (Rufo, 2013).....	37
Figura 3.7. Ábaco de classificação MCT.	38
Figura 3.8. Curva de compactação do solo empregado como subleito (Rufo, 2013).	38
Figura 3.9. Curva granulométrica da brita (Ante, 2012).....	39
Figura 3.10. Sistema de aquisição de dados utilizado.....	41
Figura 3.11. Configuração dos sensores.....	41
Figura 3.12. LVDT utilizado nos ensaios desta pesquisa.	42
Figura 3.13. Transdutor de pressão utilizado nos ensaios.....	43
Figura 3.14. Controlador de pressões utilizado para a calibração dos piezômetros.....	44
Figura 3.15. Célula de carga utilizada nos ensaios.	44
Figura 3.16. Posicionamento dos instrumentos utilizados nos ensaios. (a) vista frontal. (b) vista superior.	45
Figura 3.17. Bomba manual utilizada para a compactação das camadas de solo.	46
Figura 3.18. Esquema de umedecimento da amostra pela face inferior do cilindro (primeira etapa).	47
Figura 3.19. Seção da parte inferior do cilindro (segunda etapa).	48
Figura 3.20. Esquema do arranjo dos materiais no cilindro para cada etapa do programa de ensaios: (a) primeira etapa e (b) segunda etapa.....	49
Figura 3.21. Ensaio montado.....	50
Figura 4.1. Deslocamentos verticais durante os ensaios (a) Deslocamentos com geotêxtil. (b) Deslocamentos sem geotêxtil.	53
Figura 4.2. Impregnação da brita por finos do subleito – Ensaio sem geotêxtil.	54
Figura 4.3. Deslocamento <i>versus</i> Número de ciclos (ensaios com geotêxtil da primeira etapa).	54
Figura 4.4. Deslocamento <i>versus</i> Número de ciclos (todos os ensaios da primeira etapa).....	55
Figura 4.5. Deslocamento <i>versus</i> número de ciclos nos ensaios da segunda etapa.	56
Figura 4.6. Impregnação da brita por finos do subleito – Ensaio sem geotêxtil segunda etapa dos ensaios.....	56
Figura 4.7. Resultados obtidos por (Perkins, 2000).	58

Figura 4.8. Mecanismo de deformação em cada ciclo de carga.....	59
Figura 4.9. Poropressões <i>versus</i> número de ciclos da primeira etapa.....	60
Figura 4.10. Poropressões medidas no piezômetro P1 – 1ª Etapa.....	61
Figura 4.11. Poropressões medidas no piezômetro P2 – 1ª Etapa.....	61
Figura 4.12. Poropressões <i>versus</i> Número de ciclos - Segunda etapa.....	62
Figura 4.13. Poropressões <i>versus</i> número de ciclos no piezômetro P1- Segunda etapa.....	63
Figura 4.14. Poropressões <i>versus</i> número de ciclos no piezômetro P2 - Segunda etapa.....	63
Figura 4.15. Poropressões <i>versus</i> deslocamento vertical (Xiao-Yun <i>et al.</i> , 1995).....	64
Figura 4.16. Poropressões <i>versus</i> número de repetições de carga (Xie <i>et al.</i> 2006).....	64
Figura 4.17. Imagens do geotêxtil 600g/m ² sob três condições.....	65
Figura 4.18. Imagens do geotêxtil de 400g/m ² sob três condições.....	66
Figura 4.19. Imagens do geotêxtil de 200g/m ² sob três condições.....	67
Figura 4.20. Índice de impregnação do geotêxtil com 200g/m ²	68
Figura 4.21. Índice de impregnação do geotêxtil com 400g/m ²	69
Figura 4.22. Índice de impregnação do geotêxtil com 600g/m ²	69
Figura 4.23. Massa dos finos que impregnaram à brita.....	69
Figura 4.24. Curvas carga <i>versus</i> deformação do ensaio à tração no geotêxtil virgem com 200 g/m ²	70
Figura 4.25. Curvas carga <i>versus</i> deformação do ensaio à tração no geotêxtil virgem com 400 g/m ²	70
Figura 4.26. Curvas carga <i>versus</i> deformação do ensaio à tração no geotêxtil virgem com 600 g/m ²	71
Figura 4.27. Curvas Carga Aplicada <i>versus</i> Deformação do ensaio a tração dos geotêxteis utilizado na primeira etapa de ensaios.....	72
Figura 4.28. Curvas Carga Aplicada <i>versus</i> Deformação do ensaio a tração dos geotêxteis utilizado na segunda etapa de ensaios.....	72
Figura 4.29. Resistência à tração dos geotêxteis com 200g/m ²	73
Figura 4.30 Resistência à tração dos geotêxteis com 400g/m ²	73
Figura 4.31. Resistência à tração dos geotêxteis com 600g/m ²	74
Figura 4.32. Deformações na ruptura em ensaios de tração em espécimes virgens e após ensaio de carga repetida.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

E_{ensaio}	A resistência ao impacto obtida no laboratório
AOS	Abertura aparente de filtração
O_f	Abertura de filtração
O_{95}	Abertura de filtração do 95%
ASTM	<i>American Section of the International Association for Testing Materials</i>
ASFEMA	<i>Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Cm	Centímetro
c'	Coefficiente angular da reta assimilável à curva de deformabilidade
C_u	Coefficiente de uniformidade
S_2	D_{ensaio}/d_{50}
ρ_f	Densidade da fibra
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
d'	Inclinação da parte reta do ramo seco da curva de compactação
d_f	Diâmetro das fibras do geotêxtil
D_v	Diâmetro do vazio
d_{ensaio}	Diâmetro do elemento contundente no ensaio de laboratório
d_{50}	Diâmetro médio dos grãos ou objetos
EGS	Equipo para Ensaio em Geotêxteis em Separação de Camadas
E_{adm}	Energia de impacto admissível
E_{req}	Energia de impacto requerida
t_{gt}	Espessura do geotêxtil
S_3	Fator de ajuste de forma do elemento plano do laboratório à forma do elemento perfurante em campo
f_{imp}	Fator de minoração
S_1	Fator de penetração
F_{ensaio}	Fator de redução
$F_{S_{\text{imp}}}$	Fator de redução contra a ruptura por impacto
FR_{imp}	Fator de redução para o valor da resistência
FR_{tl}	Fator de redução para o valor de tração localizada obtido em ensaio
FS_{perf}	Fator de segurança contra a ruptura por tração localizada
FS_{tl}	Fator de segurança contra a ruptura por tração localizada do geotêxtil
F_{req}	Força à perfuração que o geotêxtil deve resistir;
$f(E)$	Função deformação do geotêxtil deformado
G	Gramas
g/m^2	Gramas/Centímetro quadrado
Hz	Hertz
e'	Índice da Classificação MCT.
CBR	Índice de suporte Califórnia
IPEA	Instituto de pesquisa de economia aplicada

kN	Quilo newton
B	Largura do vazio entre blocos
LVDT	<i>Linear variable differential transformer</i>
ρ_f	Massa específica das fibras do geotêxtil
MA	Massa por unidade de área
Mh	Massa úmida
M	Metro
Mm	Milímetro
MCT	Miniatura compactado tropical
NBR	Norma brasileira
d_{85}	O diâmetro das partículas de solo
Y	Penetração do geotêxtil no vazio entre blocos
Pi	Perda de massa por imersão expressa em porcentagem
k_p	Permeabilidade ao longo do plano;
k_G	Permeabilidade do geotêxtil
k_{solo}	Permeabilidade do solo
k_n	Permeabilidade normal ao plano;
θ	Permissividade;
Γ_a	Peso específico da água a 4°C.
γ_f	Peso específico da fibra (densidade da fibra multiplicada pelo peso específico da água)
g_d	Peso específico seco
γ	Peso específico total do geotêxtil
%	Porcentagem
kN	Quilo newton
km	Quilometro
F_{adm}	Resistencia à perfuração admissível
T_{req}	Resistencia a tração requerida do geotêxtil
T_{adm}	Tensão admitida
p'	Tensão vertical ao nível do geotêxtil
Ψ	Transmissibilidade
W	Umidade
V	Volume
V_v	Volume de vazios do geotêxtil
V	Volume total do geotêxtil

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, a exigência nos projetos de construção de pavimentos aumentou significativamente, em especial, devido às alterações climáticas que tem acarretando incrementos no volume de chuvas e ao acréscimo nos volumes de tráfego. Tal fato tem provocado uma redução da durabilidade das estruturas. Nesse sentido, faz-se importante a criação de soluções e alternativas que ajudem a mitigar as situações que afetam o bom funcionamento de pavimentos e aumento da durabilidade das obras.

No Brasil, a malha viária é muito importante porque transporta mais de 60% da carga de todo o país, mostrando como um aspecto essencial para a economia nacional. Em outros países, o transporte rodoviário é menos comum. Nos Estados Unidos da América (EUA), por exemplo, este tipo de transporte só atinge 26% de sua utilização, e na China, somente um 8%. Porém, os investimentos do governo brasileiro para o sistema rodoviário não consegue cobrir todas as necessidades do mesmo, que se encontra em estado de deterioração (IPEA, 2010).

A ASFEMA (2014) assegura que uma via em estado ruim aumenta em 34% o consumo de combustível e diminui a vida útil dos pavimentos em 25%, acarretando em problemas econômicos e ambientais. Além disso, quando se tem um pavimento danificado, a velocidade média dos veículos na via acaba ficando comprometida. Segundo o IPEA (2012) só o 33,8 % da malha viária do Brasil se encontra em bom estado de conservação.

Assim, é preciso construir vias mais resistentes e duráveis. Para tanto, é fundamental a inclusão de novos materiais na construção de pavimentos, como, por exemplo, a utilização de geossintéticos. Os geossintéticos representam uma nova alternativa de solução para problemas em obras de pavimentação, tais como: drenagem, separação de camadas de pavimentos e reforço.

O uso de geossintéticos no Brasil teve início na década de 1970 e vem aumentando significativamente nos últimos 15 anos. Em 2005, o consumo de geossintéticos chegou aos 60 milhões de metros quadrados. Para a referida situação, os geotêxteis e as geomembranas são produtos de maior consumo. Embora a quantidade de metros consumidos seja alta, acredita-se que esta cifra pode dobrar, por que ainda muitos engenheiros projetistas não tem o conhecimento necessário para a projeção de obras com a inclusão destas tecnologias (Souza, 2007).

Os geossintéticos, na construção de vias, são de serventia para a diminuição da manutenção, o aumento da vida útil do pavimento, evitam a reflexão de trincas de uma camada asfáltica antiga para uma nova, reduzem a espessura das camadas estruturais e de rolamento, impedem a saída de finos e afundamentos.

Um problema muito comum nas estradas é o bombeamento de partículas finas do subleito, que produz alterações no comportamento da estrutura das camadas. Também pode haver a criação de vazios gerados pela saída de grãos menores por trincas superficiais do pavimento, que se dá devido ao manejo ineficiente de água, à ausência de drenagem ou à ascensão do lençol freático.

A fim de reduzir o problema de bombeamento de finos, é possível o uso de geotêxteis como barreiras que impedem a saída de grãos finos pelos vazios entre as partículas maiores, evitando deformações permanentes e a redução de resistência, sendo este o tema principal do presente estudo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é estudar o comportamento de geotêxteis não tecidos quando são usados na separação de camadas de pavimentos.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos tem-se:

- Avaliar as propriedades relevantes do geotêxtil como elemento de separação.
- Avaliar a capacidade de retenção de partículas finas do geotêxtil.
- Avaliar o comportamento dos materiais frente a um solo compactado e um sem compactar.
- Comparar os resultados dos ensaios realizados com diferentes tipos de geotêxteis e sem geotêxtil.
- Identificar qual geotêxtil apresenta menor dano e diminuição de resistência.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente estudo foi dividido em 05 (cinco) capítulos, conforme descrição a seguir.

O primeiro capítulo tratou da introdução do tema da pesquisa, com exposição geral da motivação, dos objetivos gerais e específicos, da estrutura da dissertação e uma breve descrição de cada capítulo.

O segundo capítulo tratou da revisão bibliográfica, descrevendo os temas de interesse para o estudo, quais sejam: os geossintéticos, com enfoque nos geotêxteis, e a definição dos pavimentos, com ênfase nos processos de degradação. E ainda, tem-se ali a apresentação de diferentes pesquisas realizadas sobre a utilização de geotêxteis na separação de camadas de pavimentos.

No terceiro capítulo foram descritos os materiais adicionados para o estudo, o equipamento e a metodologia adotada nos ensaios para avaliar os diferentes fatores dos geotêxteis utilizados para a separação de camadas de pavimentação.

O quarto capítulo apresentou as análises dos resultados obtidos durante a execução dos ensaios. A obtenção de dados foi o resultado das leituras da instrumentação, do sistema de aquisição de dados e da coleta de amostras de solo quando da finalização do ensaio.

No capítulo quinto tem-se as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A inclusão de diferentes tipos de materiais em obras de melhoramento e reforço do solo já era efetuada por nossos antepassados séculos atrás. Na época dos romanos, utilizavam-se juncos de madeira, os chineses usavam raízes, madeira ou bambu e na idade média usou-se peles de animais. Nos anos 40, iniciou-se a produção de fibras sintéticas abrindo o caminho para os geotêxteis; na década de 80, o mercado expandiu e criaram-se novos tipos de materiais e no ano 1983 o engenheiro J.E. Fluet Jr. introduziu a palavra geossintéticos (Lopes, 1992).

Segundo Figueiredo (2009), os geossintéticos são materiais poliméricos utilizados para resolver problemas da engenharia civil e têm muita importância na área geotécnica, devido aos altos níveis de durabilidade que são necessários. O consumo dos geossintéticos tem sido crescente com o transcurso dos anos. O uso desses materiais tem vantagens sob os materiais convencionais já que, em geral, têm facilidade de instalação e oferecem maior economia.

2.1. GEOSSINTÉTICOS

2.1.1. CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

Na atualidade, têm-se diferentes tipos de geossintético de acordo sua fabricação e emprego e esses materiais têm funções diversas nas obras de engenharia. Em países como Estados Unidos dificilmente pode-se pensar em uma obra civil sem a utilização de um geossintético. Segundo a IGS (2015) Brasil a descrição dos diferentes tipos de geossintéticos é:

- Geotêxteis são mantas de fibras ou filamentos tecidos ou não tecidos. A Figura 2.1 a e b mostra os geotêxteis tecidos e não tecidos respectivamente. São flexíveis e permeáveis. São utilizados para as aplicações de separação, proteção, filtração, drenagem, reforço e controle de erosões.
- Geogrelhas: são materiais geossintéticos com forma de malha. A principal aplicação destes são em reforço de solos.
- Georredes: são materiais em forma de grelha. Possui alta permeabilidade ao longo de seu plano sendo utilizada para drenagem de fluidos.
- Geomembranas: são mantas contínuas e flexíveis utilizadas para impermeabilizar devido a sua baixa permeabilidade (Figura 2.1 e).
- Geocompostos: são matérias constituídos pela união de um o mais geossintéticos como o formado pelo geotêxtil e a georrede mostrado na Figura 2.1 c utilizado para conduzir fluidos através dele.

- Geotubos: são tubos perfurados utilizados para encaminhar a água. Em alguns casos o geotubo é envolvido por um geotêxtil.
- Geocélulas: são materiais tridimensionais constituídos por tiras poliméricas soldadas para criar células de confinamento de solo. Podem ser unidas verticalmente para formar estruturas de maior altura denominadas geocolchão. Suas aplicações são em muros de contenção, controle de erosão e melhoramento de solo. (Figura 2.1 d).
- Geoexpandido: são blocos de espuma de poliestireno de baixa densidade. São utilizados para isolamento térmico, como material leve em substituição a aterros de solo ou como uma camada vertical compressível para minimizar pressões.

A Figura 2.1 mostra alguns dos diferentes tipos de geossintéticos.



Figura 2.1. Imagens de alguns tipos de geossintéticos (Palmeira, 2013) .

Os geossintéticos têm diferentes funções em diversas obras geotécnicas e geoambientais. As principais são:

- Drenagem: baseia-se na condução da água através do geossintético, facilitando a saída da água do solo. Por exemplo: os drenos verticais que se utilizam para adensar terrenos sob aterros, drenos em muros de contenção, etc. (Figura 2.2)

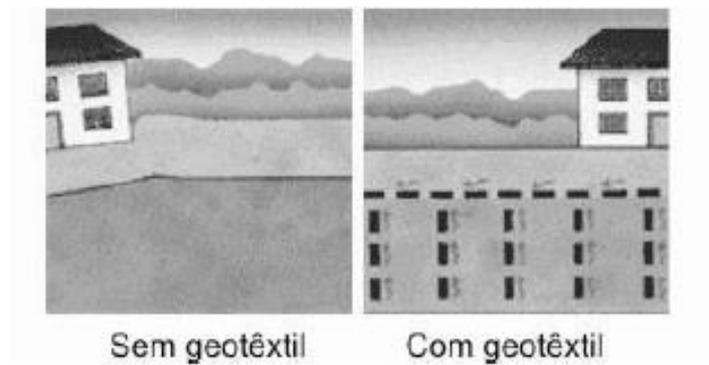


Figura 2.2. Esquema da função drenagem (Bidim Mexichem, 2009).

- Filtração: permite a passagem de fluidos, retendo as partículas que seriam carreadas pelo fluxo. Por exemplo: geotêxtil sob rip-rap para evitar a erosão do solo, filtros de drenos em aterros (Figura 2.3), entre outros.

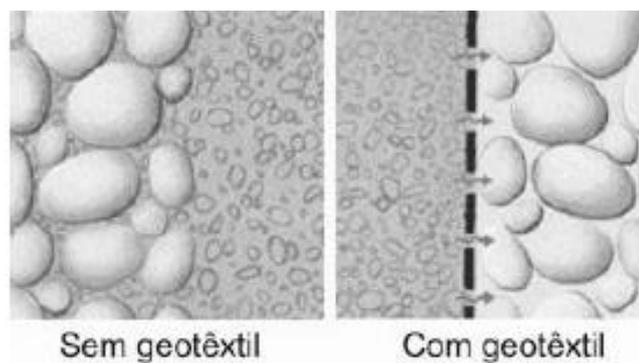


Figura 2.3. Esquema da função de filtração (Bidim Mexichem, 2009).

- Separação: evita a mistura de camadas de solo, sendo muito utilizado em pavimentação para evitar mistura de solos com qualidades diferentes (Figura 2.4).

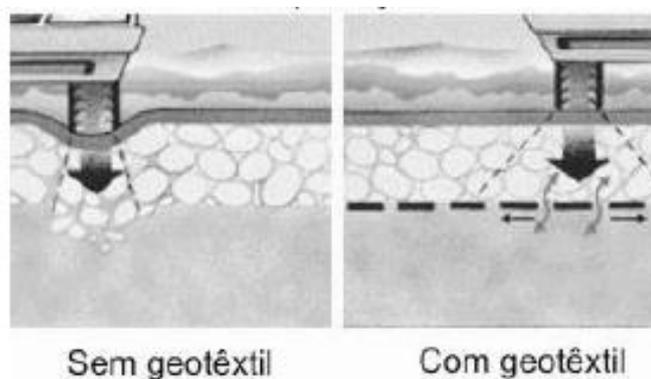


Figura 2.4 Esquema da função de separação (Bidim Mexichem, 2009).

- **Reforço:** aumenta a resistência do solo reforçado e reduz sua deformação. As geogrelhas e os geotêxteis são muito utilizados para reforçar aterros sobre solos moles, como esquematizado na Figura 2.5.

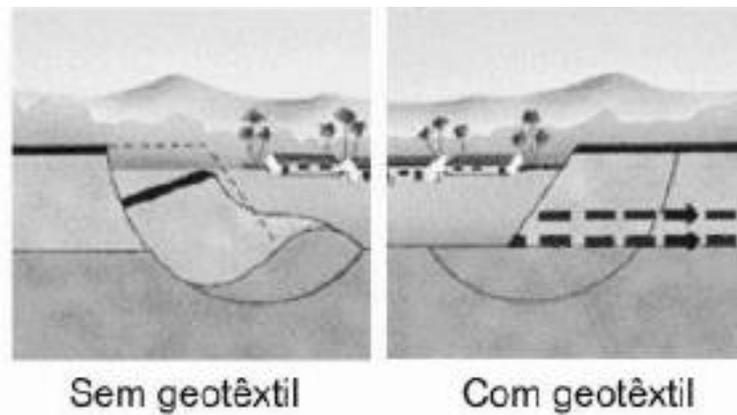


Figura 2.5. Esquema da função de reforço (Bidim Mexichem, 2009).

- **Barreira e proteção:** funciona como barreira, evitando a passagem de fluidos através do seu plano (Figura 2.6). As geomembranas e os geocompostos podem ser utilizados como barreiras em barragens e aterros sanitários.

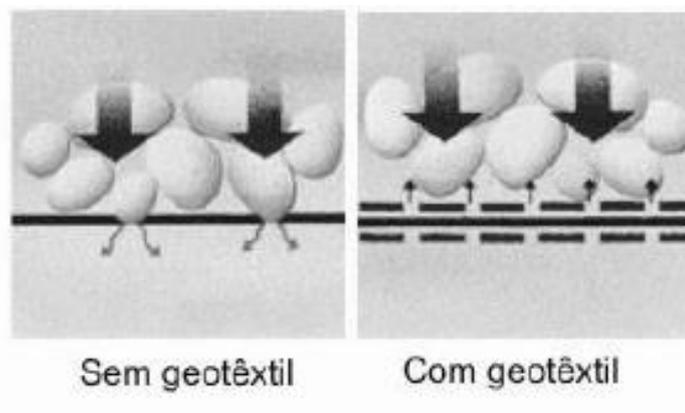


Figura 2.6 Esquema da função de proteção (Bidim Mexichem, 2009).

- **Controle de erosão:** evita a migração de partículas de solo por chuva, vento e diferentes processos, evitando assim a perda de quantidades significativas de solo que podem causar instabilidade em barragens e taludes.

A Tabela 2.1 mostra as funções que podem desempenhar os diferentes tipos de geossintéticos.

Tabela 2.1. Usos dos diferentes tipos de geossintéticos (Bueno & Vilar, 2004).

Geossintético	Separação	Proteção	Filtração	Drenagem	Erosão	Reforço	Impermeabilização
Geotêxtil	X	X	X	X	X	X	X
Geogrelha	X	-	-	-	-	X	-
Geomembrana	X	-	-	-	-	-	X
Georrede	-	X	-	X	-	-	-
Geocomposto argiloso	-	-	-	-	-	-	X
Geocélula	-	X	-	-	X	X	-
Geotubo	-	-	-	X	-	-	-
Geofibras	-	-	-	-	-	X	-

2.2. GEOTÊXTEIS

Como a presente dissertação envolverá a utilização de geotêxteis, um maior detalhamento desses materiais será apresentado neste item. Os geotêxteis são materiais planares e permeáveis, com uma ampla variedade de aplicações, tais como reforço, drenagem, filtração, separação e proteção. São materiais que podem ser classificados por diferentes características como: processo de fabricação e composição.

2.2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS

A seguir mostra-se as duas principais classificações.

2.2.1.1. CLASSIFICAÇÃO POR MÉTODO DE FABRICAÇÃO

A classificação pela forma de fabricação é a mais comum quando fala-se de geotêxteis. Geotêxteis não tecidos são materiais integrados por filamentos sem uma ordem padrão. Geralmente, são mais espessos que os tecidos. Seus filamentos podem ser de fibra cortada ou de fibra contínua. São classificados segundo seu método de união dos fios:

- Geotêxteis não tecidos agulhados: são criados colocando uma trama de fios soltos, passando por milhares de agulhas com movimentos aleatórios entrelaçando os filamentos. A maior característica destes geotêxteis é sua capacidade de deformação, atingindo tipicamente deformações superiores a 50% na ruptura. Esta propriedade faz que este material tenha uma boa adaptabilidade em contato com diferentes superfícies. São ótimos para desempenhar funções de separação (Pavco, 2012).

- Geotêxteis não tecidos termo-ligados: se realiza a união dos filamentos mediante o calor. Se diferenciam dos geotêxteis agulhados porque em geral têm menor rigidez, espessura e propriedades hidráulicas, mas podem ter melhores propriedades mecânicas (Lopes, 1992).
- Geotêxteis não tecidos resinados: a união dos filamentos se faz por produtos químicos. Se adiciona um produto que tenha a capacidade de unir os fios, por exemplo uma resina sintética. É o método menos utilizado no mercado por seu alto custo (Pavco, 2012).

A Figura 2.7 mostra a diferença entre geotêxteis agulhados e termo-ligados.

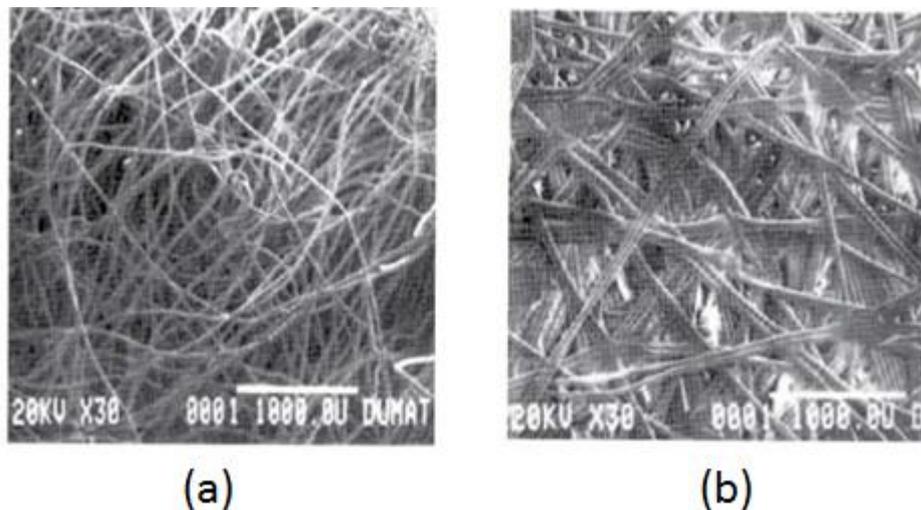


Figura 2.7. Vista microscópica de geotêxteis não tecidos: (a) agulhado (b) termo-ligado (Pavco, 2012).

Os geotêxteis tecidos são mantas formadas por filamentos que se cruzam paralelamente criando uma trama. Esta trama pode ser obtida cruzando-se um fio contra um fio (Figura 2.8 a), tecido plano (Figura 2.8 d), ou dois fios contra um (tecido canastra). Geralmente, podem desempenhar muito bem funções de reforço devido a sua alta resistência. As tramas podem ser costuradas ou tricotadas:

- Costurados: são formados por tiras horizontais e verticais. São planares e sua resistência é biaxial. (Figura 2.8b)
- Tricotados: são formados por fios entrecruzados. Sua estrutura é tridimensional e sua resistência pode ser multiaxial ou biaxial.

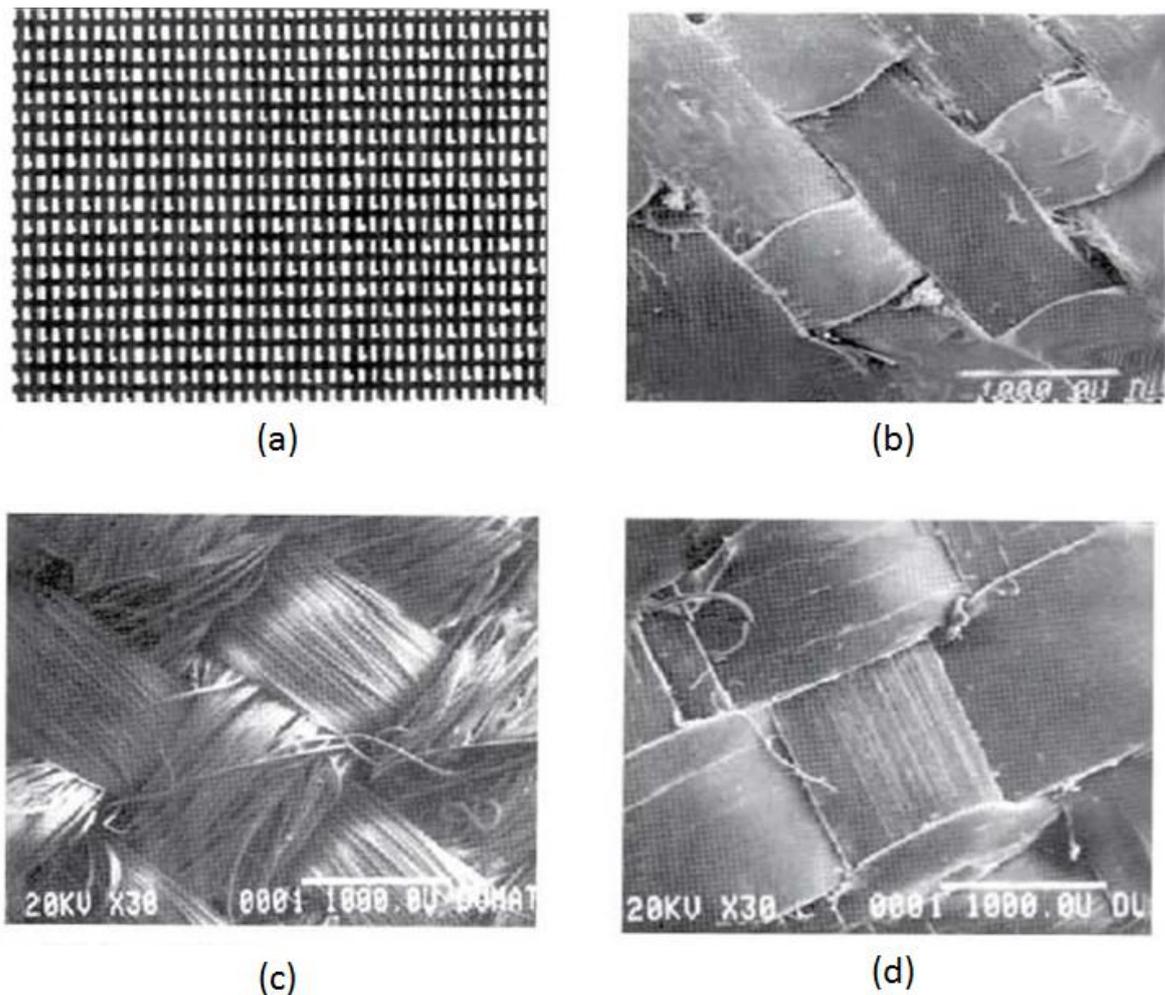


Figura 2.8. Vista microscópica de geotêxteis tecidos. (a). Monofilamento Tecido. (b). Monofilamento tecido costurado. (c). Multifilamento Tecido. (d). Tecido plano (Pavco, 2012).

2.2.1.2. CLASSIFICAÇÃO POR COMPOSIÇÃO

A composição dos geotêxteis é influente na durabilidade. Dentre os materiais que o compõem estão as fibras naturais, artificiais e as sintéticas. Estas serão explicadas a seguir:

- **Fibras sintéticas:** Quando se exige durabilidade usam-se os produtos compostos por fibras sintéticas, feitos a partir de polímeros como o polipropileno, poliéster, polietileno, poliamida e poliacrílico.
- **Fibras naturais:** estes podem ser de origem animal ou vegetal, fabricados a partir de pelos de animais, coco, seda entre outros. Seu maior uso está dado na estabilização de taludes e no reflorestamento dos mesmos (Lopes, 1992).
- **Fibras artificiais:** são feitas a partir da celulose que é submetida a processos químicos para criar fibras de materiais como o *rayon*, a viscose e o acetato.

2.2.2. PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS

As propriedades dos geotêxteis determinam o seu comportamento. Avaliando-se suas propriedades hidráulicas, mecânicas e físicas tem-se uma ideia de qual é seu melhor uso para que seu desempenho na obra seja eficiente.

2.2.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas de um geotêxtil são gramatura, espessura, rigidez, porosidade e arranjo estrutural das fibras ou filamentos. Essas propriedades são afetadas pela umidade e temperatura, o que torna importante controlar estas variáveis quando se faz um ensaio em campo ou laboratório (Shukla, 2002).

A massa por Unidade de Área (Gramatura) é uma propriedade independente da carga que é aplicada ao geotêxtil. Consiste na massa do material em uma área determinada (g/m^2). É a propriedade mais utilizada para descrever os geotêxteis não tecidos e pode fornecer um indicativo de resistência ao punção e de propriedades hidráulicas (ASTM D 5261). O ensaio que determina a gramatura baseia-se na pesagem de corpos de prova geralmente com 100 cm^2 de área.

A espessura é a medida distância entre as faces superior e inferior do geotêxtil. Esta característica é dependente da pressão aplicada. O ensaio para determinar a espessura baseia-se na medição da distância entre duas superfícies paralelas que comprimem o geotêxtil, sob diferentes cargas aplicadas. A Figura 2.9 mostra o esquema do ensaio e a Figura 2.10 mostra as variações de espessura de diferentes tipos de geotêxtil com diferentes valores de tensão normal.

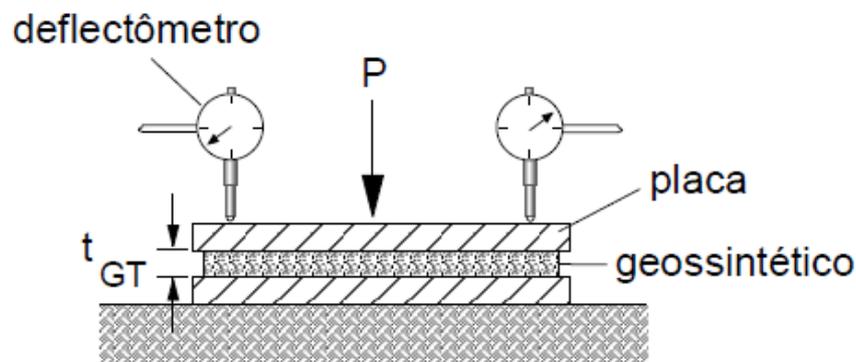


Figura 2.9. Esquema de ensaio para obter a espessura (Palmeira, 2013).

A espessura nominal do geotêxtil é a determinada sob uma tensão normal de 2 kPa.

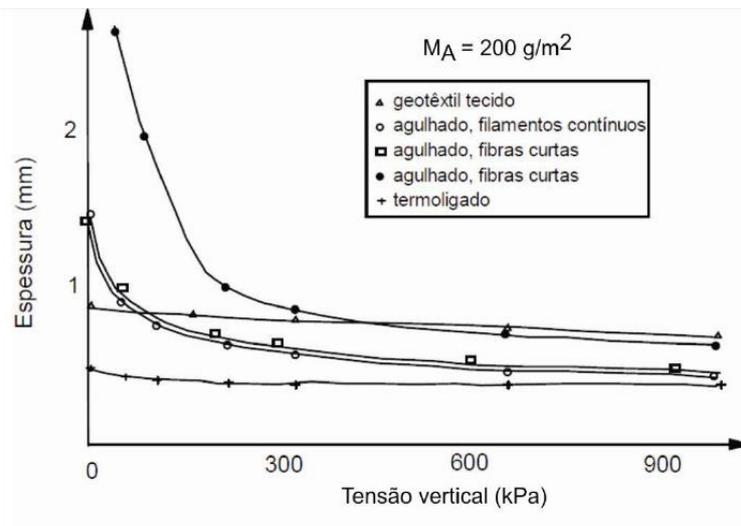


Figura 2.10. Variação da espessura do geotêxtil com a tensão vertical (Faure *et al*, 1990).

A porosidade é a relação entre os volumes de vazios e total do geotêxtil. Pode ser obtida pela expressão 2.1:

$$n_g = \frac{V_V}{V} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_f} = 1 - \frac{M_A}{T_g * \rho_f * \gamma_a} \quad (2.1)$$

sendo:

V_V o volume de vazios do geotêxtil

V o volume total do geotêxtil

T_g a espessura do geotêxtil

γ o peso específico total do geotêxtil

γ_f o peso específico da fibra (densidade da fibra multiplicada pelo peso específico da água)

M_A a gramatura do geotêxtil

ρ_f a densidade da fibra

γ_a o peso específico da água a 4°C.

A porosidade é uma propriedade do geotêxtil que depende de seu método de fabricação e da tensão que é aplicada. A porosidade em geotêxteis tecidos é muito menor que a de não tecidos.

A Rigidez à Flexão é a capacidade de acomodação sob o peso próprio e mostra a capacidade de adaptação do produto à superfície de trabalho.

2.2.2.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

As principais propriedades hidráulicas de um geotêxtil são: permeabilidade, transmissibilidade (ou transmissividade), permissividade e abertura de filtração, que são explicadas a seguir.

A transmissibilidade é a capacidade do geotêxtil de transportar água através do seu plano e é definida pela equação 2.2:

$$\Psi = k_p * t_{GT} \quad (2.2)$$

onde:

Ψ é a transmissibilidade;

k_p é a permeabilidade ao longo do plano;

t_{GT} é a espessura do geotêxtil.

A permissividade é a capacidade do geotêxtil de deixar a água passar perpendicularmente a seu plano, e é calculada por meio da equação 2.3 (Vidal, n.d.)

$$\theta = \frac{K_n}{t_{GT}} \quad (2.3)$$

onde:

θ é a permissividade;

K_n é a permeabilidade normal ao plano;

t_{GT} é a espessura do geotêxtil.

Essas duas propriedades podem ser confundidas por que as duas tem em comum a capacidade do geotêxtil de deixar passar a água, mas em direções diferentes como pode-se observar na Figura 2.11.

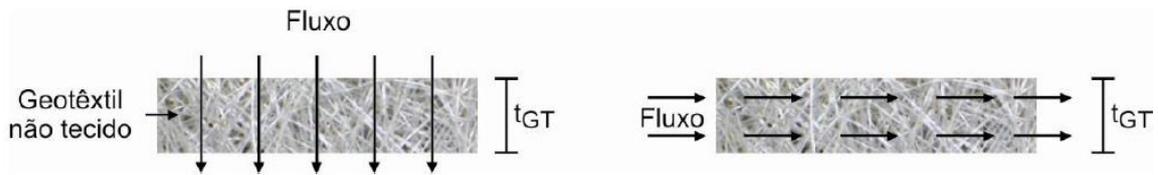


Figura 2.11. Permissividade e transmissibilidade de um geotêxtil (Tatto, 2010).

A abertura de filtração é o parâmetro que avalia o tamanho do maior grão de solo capaz de atravessar o geotêxtil. É um parâmetro importante porque define o tipo de geotêxtil indicado para trabalhar como filtro. A Tabela 2.2 mostra as diferentes metodologias para a determinação desta propriedade.

Tabela 2.2. Comparação dos métodos para determinar distribuição de poros.(modificado de Shukla, 2002).

Método	Mecanismo	Material	Tamanho da amostra (cm ²)	Duração do ensaio
Peneiramento a seco	Peneiramento a seco	Solo ou microesferas de vidro	434	2 h
Peneiramento hidrodinâmico	Alteração do fluxo d'água	Solo ou microesferas de vidro	257	24 h
Peneiramento úmido	Peneiramento úmido	Solo ou microesferas de vidro	434	2 h
Intrusão de fluidos	Intrusão de líquidos nos poros	Mercurio, água, etc.	1.77	35 min
Análise de imagens	Medida direta dos poros por meio da seção transversal do geotêxtil	Nenhum	1.5	2-3 dias

Giroud & Raymond (1996) desenvolveram a expressão 2.4 semi-empírica para a determinação da abertura de filtração de um geotêxtil:

$$\frac{O_f}{d_f} = \left[\frac{t_{GT}/d_f}{M_A/(\rho_f d_f)} \right]^{1/2} - 1 + \frac{\xi \left[1 - \frac{M_A/(\rho_f d_f)}{t_{GT}/d_f} \right]}{M_A/(\rho_f d_f)} \quad (2.4)$$

onde:

O_f é a Abertura de filtração;

d_f é a Diâmetro das fibras do geotêxtil;

ξ é o parâmetro adimensional (obtido por calibração com dados de ensaio);

M_A é a gramatura do geotêxtil;

t_{GT} é a espessura do geotêxtil;

ρ_f = Massa específica das fibras do geotêxtil.

2.2.2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Cada projeto tem exigências diferentes e as propriedades mecânicas dos produtos fornecem uma ideia de que geotêxtil será mais apropriado para cada projeto e de quais são as qualidades do geotêxtil frente a diferentes solicitações (Vidal, n.d.). As propriedades mecânicas serão descritas a seguir.

A compressibilidade é a medição das espessuras do geotêxtil frente a diferentes cargas.

A resistência à tração é definida como a tensão vertical máxima resistida por uma amostra até atingir a ruptura. É a propriedade mais importante dos geotêxteis por que todas as aplicações adotam o valor da resistência a tração como referência para a aplicação. Na função de reforço é tomada como característica principal entretanto em separação, drenagem e filtração como secundária. (Koerner, 2005).

O ensaio de tração unidirecional em faixa larga é utilizado para medir a resistência a tração é consiste em prender as extremidades de amostras de geotêxtil esticando-o até a ruptura. Os corpos de prova destes ensaios são mostrados na Figura 2.12 (Bueno & Vilar, 2004).

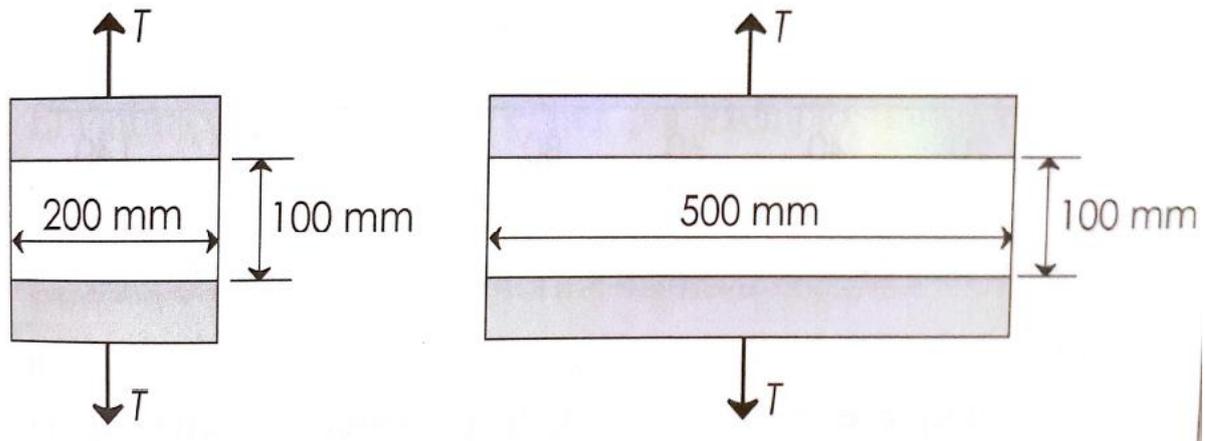


Figura 2.12. Ensaios de tração unidirecional em faixa larga (Bueno & Vilar, 2004).

A resistência à propagação do rasgo é medida com o ensaio de propagação do rasgo que se baseia no tracionamento de uma amostra de geossintético com forma trapezoidal e rasgo padrão inicial previamente feito. Na obra o geotêxtil pode ser perfurado acidentalmente e é importante que não se propague esse dano. (Vidal, n.d.).

A resistência a perfuração por impacto é a resistência que mede a capacidade do geotêxtil de resistir ao impacto devido à queda de um objeto (Figura 2.13 a). Esta capacidade é obtida por meio de um ensaio que avalia a energia necessária para danificar o geotêxtil e o diâmetro do furo provocado pela queda de um cone (Bueno & Vilar, 2004).

A resistência a perfuração por penetração mede a capacidade do geotêxtil de ser perfurado quando é submetido a uma carga concentrada (Figura 2.13 b). O ensaio consiste na aplicação de uma força dinâmica ou estática por meio de um cilindro (Vidal, n.d.).

A resistência a perfuração por estouro mede a resistência do geotêxtil a ser perfurado quando é aplicada uma carga distribuída a um espaço vazio como se mostra na Figura 2.13 c. O ensaio utilizado é tração multidirecional (Figura 2.14). Para ensaiar mostras de geotêxteis deve-se cobrir com uma mostra de geomembrana flexível e prender junto com o corpo de prova (Bueno & Vilar, 2004).

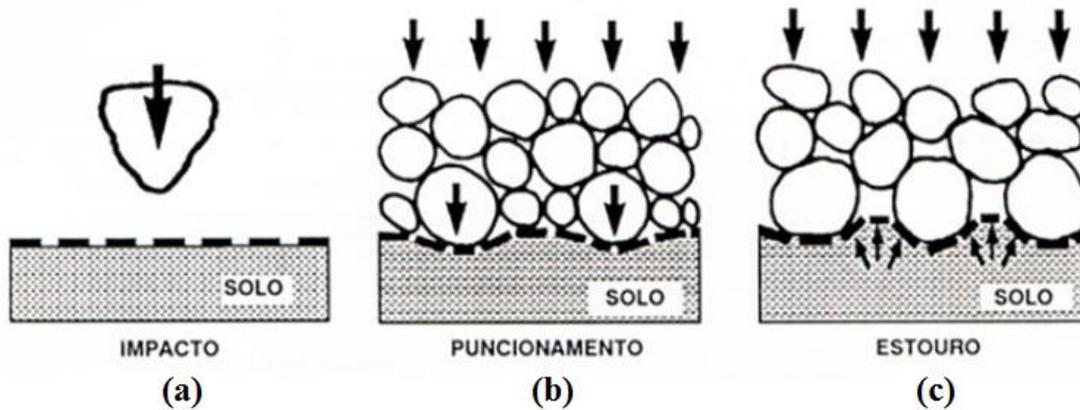


Figura 2.13. Exemplos de situações de perfuração (Vidal, n.d.).

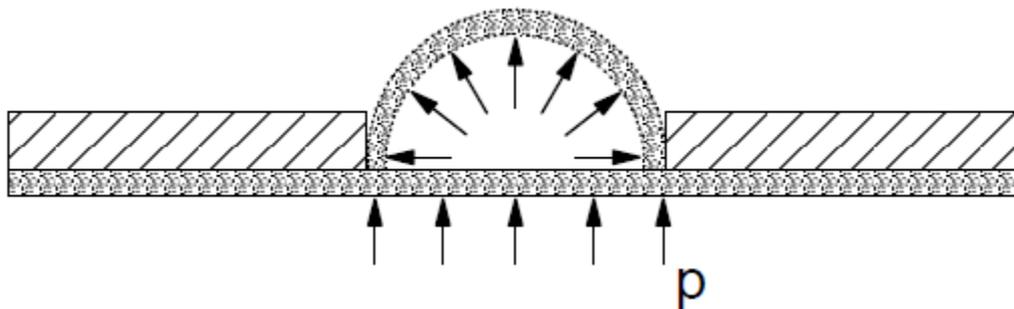


Figura 2.14. Esquema do ensaio tração multidirecional. Palmeira (2013)

A fluência ocorre quando o geotêxtil é submetido a esforços de longa duração. Para estimá-la deve-se carregar um corpo de prova com níveis de carga entre 60% e 90% da carga de ruptura da resistência a tração e registrar o tempo que demora em romper. A magnitude desta propriedade depende da temperatura e da carga (Bueno & Vilar, 2004).

2.3. NOÇÕES GERAIS SOBRE PAVIMENTAÇÃO

O pavimento é uma estrutura construída após a terraplenagem, destinada a resistir e distribuir sobre o subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego de veículos, melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança e resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento (ABNT, 1982). A estrutura de um pavimento é formada por camadas, e sabe-se que a principal função dessas camadas é propiciar uma superfície de rolamento que permita a adequada circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um tempo determinado (Branco *et al.*, 2011).

Os pavimentos são divididos em três tipos: os articulados, os rígidos e os flexíveis, sendo os dois últimos os mais utilizados. Os pavimentos rígidos são os que têm como revestimento uma placa de concreto e os pavimentos flexíveis são os que têm como revestimento uma mistura entre agregados pétreos e ligante asfáltico.

Os pavimentos asfálticos são formados por uma estrutura composta de quatro camadas que são: reforço de subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico, como se vê na Figura 2.15

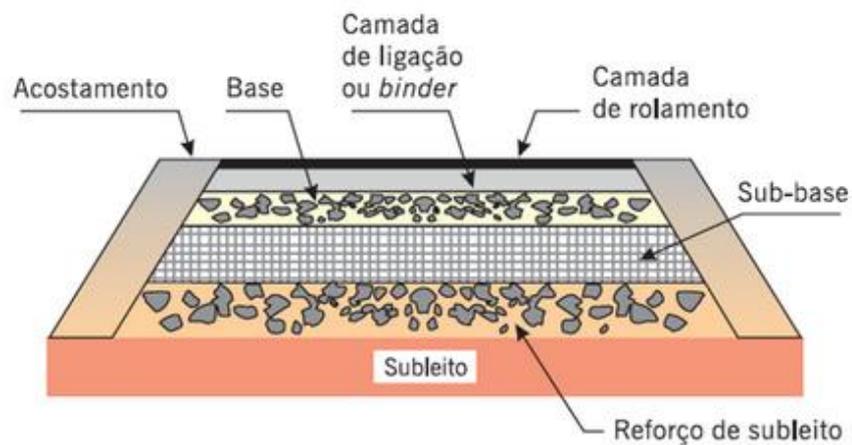


Figura 2.15. Pavimento asfáltico (Bernucci *et al.*, 2008)

Os pavimentos rígidos, ou em concreto Portland, são compostos por duas camadas, que são a sub-base e o revestimento, como esquematizado na Figura 2.16.

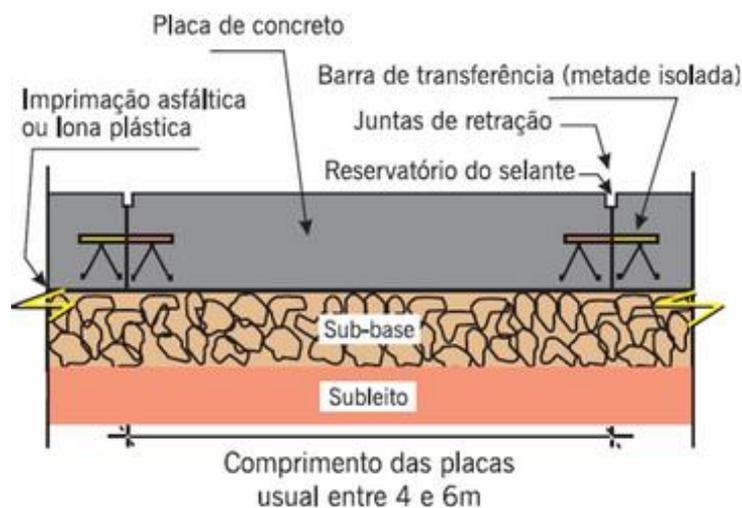


Figura 2.16. Pavimento de concreto (Bernucci *et al.* 2008).

A distribuição das camadas dos diferentes tipos de pavimentos está relacionada com a distribuição das cargas. Segundo Bernucci *et al* (2008) as principais diferenças são:

- Nos pavimentos rígidos a maior parte das tensões são absorvidas pela placa de revestimento, enquanto que nos pavimentos flexíveis as tensões são distribuídas em todas as camadas e todas elas sofrem deformações.
- Os pavimentos rígidos têm deformações menores que os pavimentos flexíveis. As deformações nos pavimentos flexíveis devem ser elásticas. Nos pavimentos asfálticos o subleito tem grande importância estrutural e nos rígidos tem menos importância porque a carga é predominantemente suportada pelas placas de concreto. Na Figura 2.17 mostram-se as distribuições de carga para os dois tipos de pavimentos(L. Bernucci *et al* 2008).

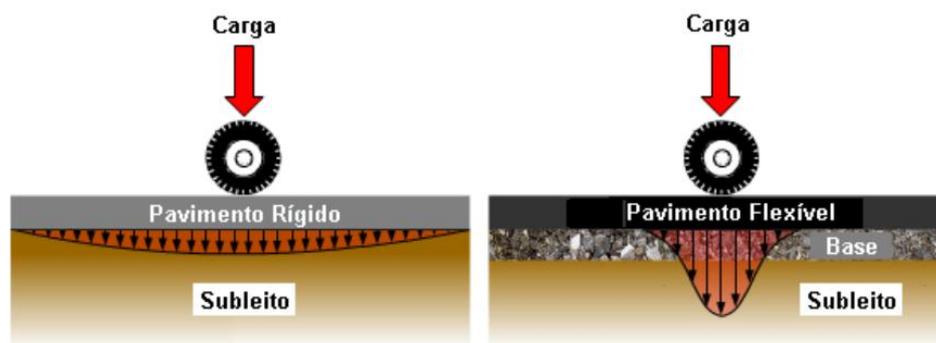


Figura 2.17. Distribuições de carga em pavimentos rígidos e flexíveis (Modificado de Bernucci *et al* 2008).

2.3.1. PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS

A função principal dos pavimentos é dar aos veículos as condições necessárias para uma boa trafegabilidade, mas sua degradação é a principal ameaça para tal função. As principais causas da deterioração de pavimentos são: a falta de drenagem, alterações climáticas, altos volumes de tráfego e erros de projeto ou construção.

Segundo o DNIT (2003), os pavimentos asfálticos são afetados por diferentes processos de degradação, tais como: afundamentos, ondulação da superfície, escorregamento do concreto asfáltico, exsudação do ligante asfáltico e fendas. A Figura 2.18 mostra graficamente os tipos de trincas dos pavimentos asfálticos.

As fendas são descontinuidades na superfície do asfalto, como fissuras imperceptíveis ou grandes trincas transversais, longitudinais ou interligadas. Dentre este tipo de falha encontra-se o couro de jacaré ou trinca tipo bloco.

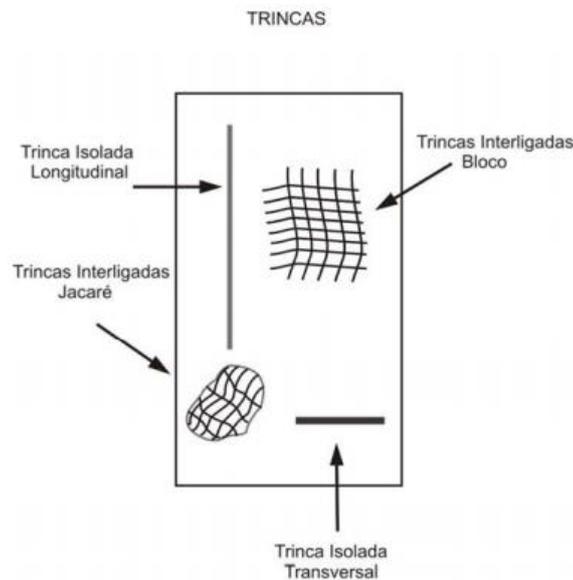


Figura 2.18. Esquema dos tipos de trinca no pavimento asfáltico (DNIT, 2003)

Segundo o DNIT (2004), os pavimentos rígidos podem ser afetados por diferentes defeitos como: alçamento de placas, fissuras de canto, placa dividida, degrau nas juntas, falha na selagem das juntas, fissuras lineares, quebras localizadas, buracos e assentamentos.

Quando um pavimento flexível ou rígido tem defeitos que incluem fissuras, trincas ou erros no selamento das juntas, criam-se processos degenerativos que danificam a carpeta e desenvolvem problemas ainda maiores.

No momento que a capa de rolamento não pode desempenhar a função de impermeabilização, a água pode entrar na estrutura do pavimento criando problemas como o bombeamento de finos. Tal mecanismo se caracteriza pela saída de finos do subleito ou das camadas do pavimento pelas trincas na camada de rolamento.

Quando o pavimento encontra-se trincado com presença de água (geralmente relacionada a chuvas intensas) e é submetido a cargas repetidas, ocorrem aumento de poropressões e aceleração na degradação dos materiais. Além da possibilidade de bombeamento dos finos através das trincas do revestimento, pode-se ter também a contaminação do material de base pelos finos do subleito. A remoção de partículas das camadas do pavimento faz com que a

estrutura seja cada vez mais instável. Essa instabilidade provoca trincamentos adicionais que agravam a situação do pavimento. Na Figura 2.19 observa-se um modelo esquemático do processo (Villibor *et al.*, 2005).

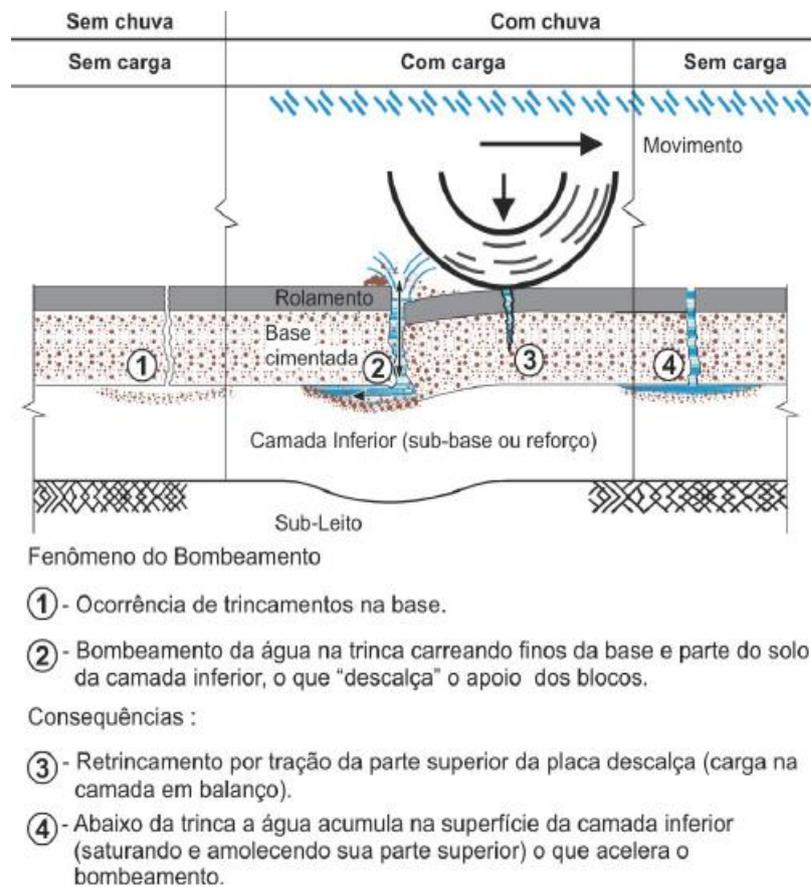


Figura 2.19. O fenômeno de bombeamento e consequências (Villibor *et al.*, 2005)

Por ser um processo que vai piorando com o tempo, deve-se procurar uma solução duradora e econômica. A utilização dos geotêxteis na separação das camadas de pavimentação pode ser uma solução técnica e economicamente viável, com será descrito a seguir.

2.4. SEPARAÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTOS COM GEOTÊXTEIS

Entre os benefícios que podem ser obtidos com a utilização de geossintéticos em pavimentação destacam-se:

- Diminuição de deformações na superfície do pavimento e no subleito;
- Diminuição da espessura das camadas;
- Como elemento separador minimiza a contaminação do material de base e evita o bombeamento de finos;

- Aumento da capacidade de carga e a vida útil da estrutura;
- Maior rapidez na construção e redução de atividades de manutenção.

Os geotêxteis são ótimos para desempenhar a função de separação, porque sua estrutura permite a passagem de fluidos e gases (Vertematti, 2004), retendo o material fino e, por conseguinte, evitando mistura entre materiais. A Figura 2.20 esquematiza a situação onde o geotêxtil separa o subleito do material do pavimento.

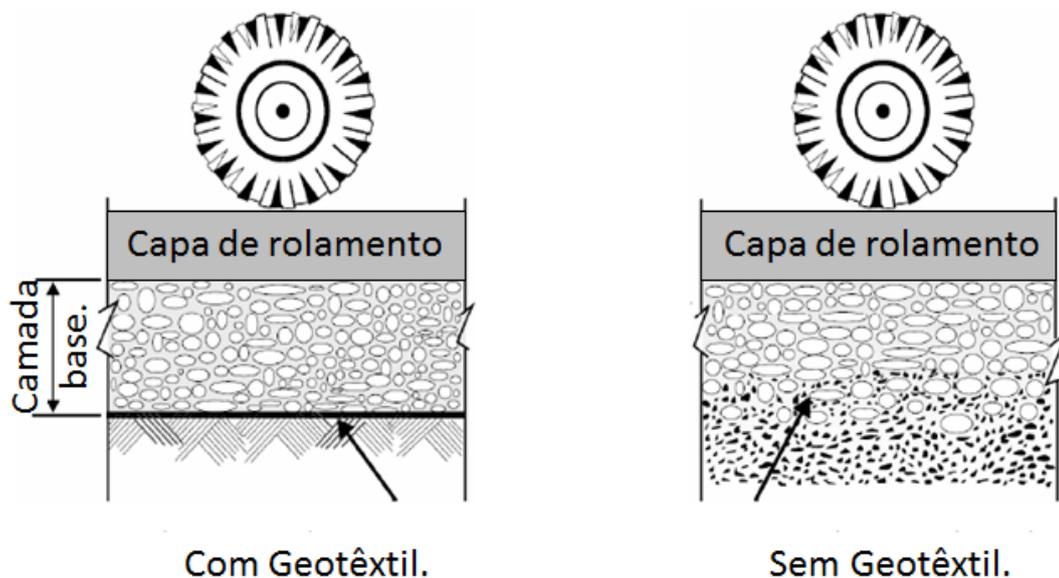


Figura 2.20. Comparação entre um pavimento sem geotêxtil e com geotêxtil (Zornberg *et al.*, 2008)

No que se refere a aplicações como reforço, Fannin & Sigurdsson (1996) utilizaram geossintéticos na separação e reforço de estradas não pavimentadas sobre solos moles. Estes autores observaram uma diminuição da espessura nas camadas, que proporcionou uma melhoria na trafegabilidade e redução de custos das estradas.

A separação de camadas pode ser utilizada tanto em vias pavimentadas como não pavimentadas. Nos pavimentos rígidos, o geotêxtil pode ser utilizado abaixo de placas de concreto e acima do subleito para evitar a migração de finos. Também é possível utilizar geotêxtil na restauração de capas de asfalto trincadas, entre as capas antiga e nova, visando minimizar a reflexão de trincas e bombeamento de finos (Wilmers, 2007).

Perkins (2000), com ajuda de uma caixa quadrada (Figura 2.21) com dimensões 1,5 m de altura e 2,2 m de comprimento lateral, avaliou o comportamento de geogrelhas e geotêxteis no reforço de pavimentos asfálticos. O autor observou diminuição das deformações permanentes

e a eliminação da contaminação da base por finos provenientes do subleito quando da utilização de geotêxteis.

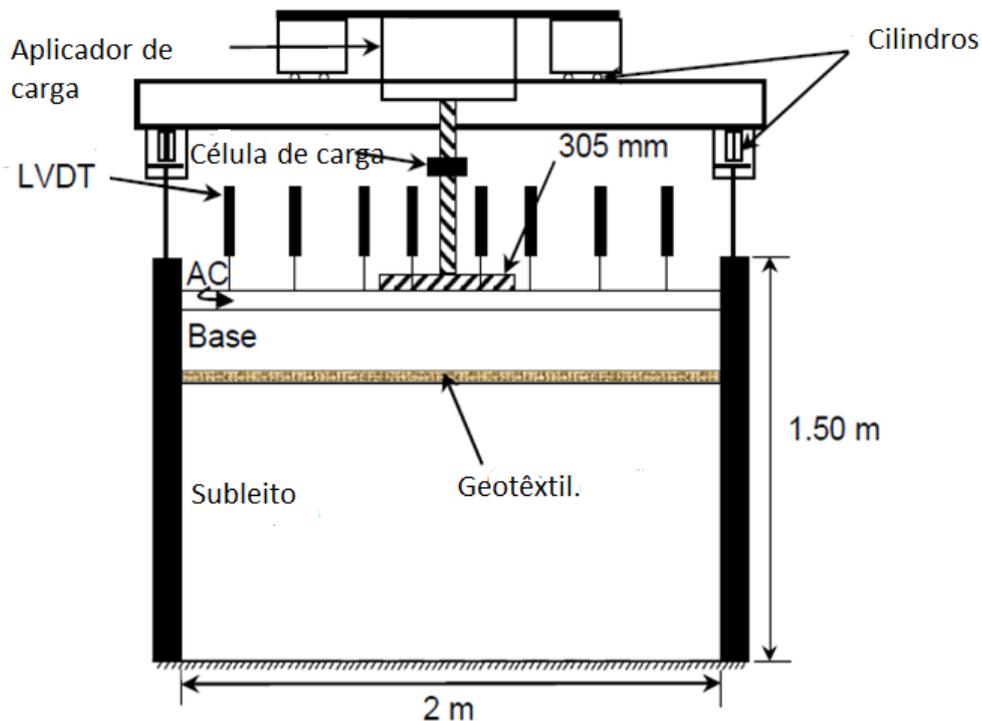


Figura 2.21. Esquema do equipamento utilizado por Perkins (2000)

Holtz (1996) realizou testes em campo e em laboratório em amostras extraídas de projetos em que utilizaram-se geotêxteis para separação. Essa pesquisa foi dividida em duas fases: a primeira com 8 ensaios e a segunda com 13. As conclusões mais importantes foram que o geotêxtil, após ser lavado, recuperou uma porcentagem de 67% de sua permissividade original, e que os geotêxteis não tecidos termo-ligados, com baixa massa por unidade de área ($< 118 \text{ g/m}^2$, foram os que apresentaram maiores danos. A recomendação é que estes geotêxteis sejam instalados somente em projetos com um controle cuidadoso da compactação e do método construtivo.

Na segunda fase do trabalho, Holtz (1996) estudou geotêxteis em função do seu tipo e sua massa por unidade de área, todos instalados sobre subleitos moles. Foram utilizados 14 geotêxteis, sendo 6 tecidos, com massas por unidade de área entre 122 a 231 g/m^2 , 6 não tecidos agulhados, com massas por unidade de área entre 143 a 251 g/m^2 , e 2 eram não tecidos termo-ligados, com massa por unidade de área igual a 136 g/m^2 . Os não tecidos com termo-ligados foram os mais susceptíveis à colmatação, enquanto os com maior massa por unidade de área tiveram melhor comportamento em bases com partículas angulares.

Gobel *et al.* (1994) estudaram a utilização de geotêxteis não tecidos para o reforço de um sistema ferroviário. O sistema multicamadas foi composto por: solo fino, geotêxtil, pedregulho arenoso e brita, como pode-se observar na Figura 2.22. A carga utilizada por Gobel *et al.* (1994) foi de 76 kN, com uma frequência de 10 Hz e 5 milhões de ciclos, simulando um tráfego de 103 trens por hora durante um ano. Com este ensaio os autores puderam concluir que a utilização de geotêxtil separador pode aumentar em 2,5 vezes a vida útil do sistema.

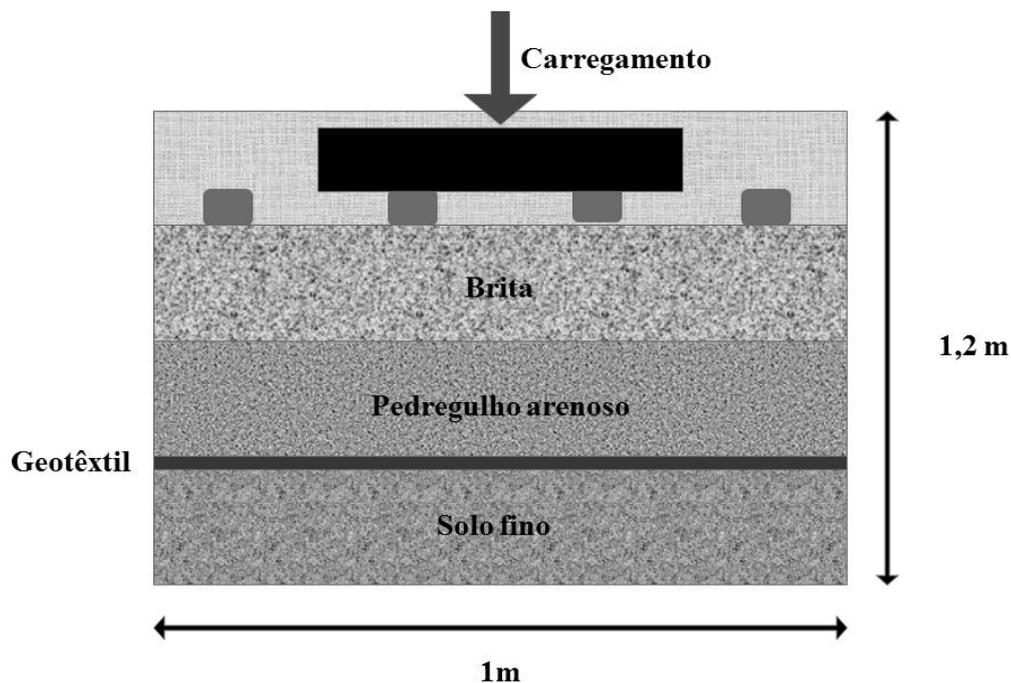


Figura 2.22. Esquema modificado do equipamento utilizado por Gobel *et al.* (1994).

Segundo Wilmers (2007), o elemento separador deve ter as seguintes características:

- Deve seguir as deformações sob as cargas rolantes.
- Deve ter alongamento suficiente para não romper.
- Deve possuir a resistência necessária para impedir que a estrutura colapse resistindo os esforços mecânicos produzidos pelo tráfego.

O geotêxtil deve ter propriedades adequadas para conseguir cumprir os requisitos listados acima, como resistência mecânica (resistência à tração, rasgo, perfuração e estouro), e aberturas de tamanhos compatíveis com a granulometria dos materiais que se deseja separar (IGS, 2011).

O manual de geossintéticos Pavco (2012) enfatiza que para a escolha de um tipo de geotêxtil para separação de camadas é preciso avaliar corretamente suas propriedades relevantes, para que o produto escolhido atenda à função de reter as partículas de solo e resista aos esforços a que será exposto durante sua vida útil. O geotêxtil deve satisfazer os critérios que serão nomeados na frente.

2.4.1. CRITÉRIO DE RETENÇÃO DE FINOS

Segundo Palmeira & Gardoni (2000), são muitos os critérios de retenção de finos aplicáveis na separação de camadas de pavimentos que se tem na literatura. O critério de Chistopher & Holtz (1985) assegura que o geotêxtil deve cumprir com a seguinte condição para que as partículas não traspassem o geotêxtil (equação 2.5).

$$AOS \text{ ou } O_{95} \leq B d_{85}; \quad (2.5)$$

sendo:

AOS a abertura aparente de filtração;

O_{95} a abertura de filtração;

B o coeficiente adimensional (varia de 0,5 a 2.0 dependendo do solo a ser filtrado e do geotêxtil); e

d_{85} o diâmetro das partículas de solo.

O parâmetro B é função do coeficiente de uniformidade (C_u) onde $C_u = D_{60}/D_{10}$ para areias simples, siltosas, com pedregulhos e argilosas com menos do 50% passante da peneira #200. O valor de B pode ser obtido segundo as expressões:

- $C_u \leq 2 \text{ ou } C_u \geq 8 \Rightarrow B = 1$ (2.6)

- $2 < C_u \leq 4 \Rightarrow B = 0.5 \times C_u$ (2.7)

- $4 < C_u \leq 8 \Rightarrow B = 8/C_u$ (2.8)

B está entre 1,5 e 2 para solos arenosos mal gradados.

Para solos finos com uma porcentagem maior de 50% passante pela peneira #200, B é função do tipo de geotêxtil

- Geotêxteis tecidos: $B=1 \Rightarrow AOS \leq D_{85}$;
- Geotêxteis não tecidos $B = 1.8 \Rightarrow AOS \leq 1.8 * D_{85}$

Segundo Christopher & Holtz (1985) para solos coesivos com um índice de plasticidade maior que 7 a abertura aparente de filtração deve ser $AOS < 0.30$ mm.

A permissividade é a capacidade do geotêxtil de deixar passar água perpendicular a seu plano. O geotêxtil deve cumprir:

$$k_G \geq k_{solo} \quad (2.9)$$

sendo k_G a permeabilidade do geotêxtil e k_{solo} a permeabilidade do solo.

Para situações críticas ou condições severas se deve cumprir a seguinte condição:

$$k_G \geq 10k_{solo} \quad (2.10)$$

Para possibilidade de colmatação biológica se deve cumprir:

$$k_G \geq 100k_{solo} \quad (2.11)$$

Por definição, a colmatação é a obstrução dos poros do geotêxtil por partículas finas reduzindo a sua permeabilidade, como nota-se na Figura 2.23.

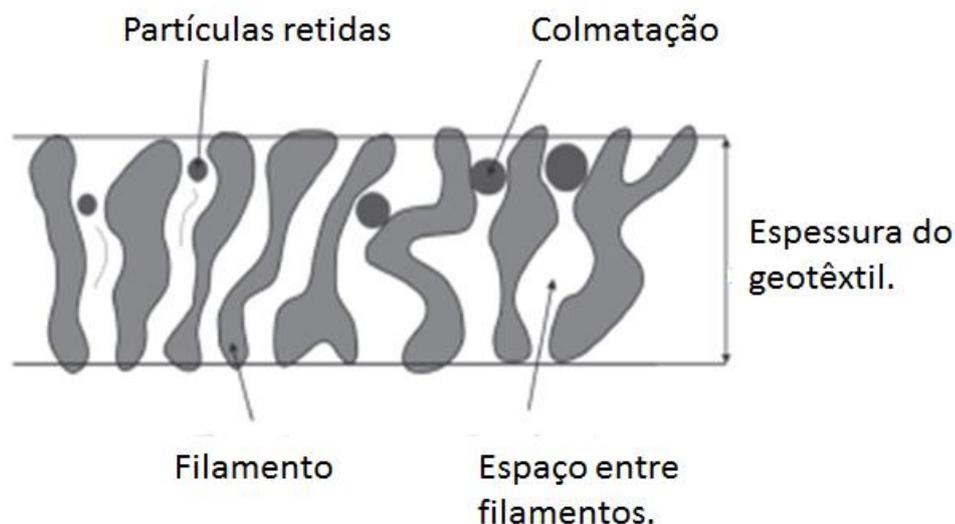


Figura 2.23. Fenômeno de colmatação (Pavco, 2012).

O fenômeno da colmatação é complexo. Para cada situação deve-se fazer um projeto específico, já que os projetos têm características e requisitos diferentes (Pavco, 2012).

Pesquisa realizada na Universidade Javeriana da Colômbia por Fajardo & Rodriguez (1999), estudou a colmatação de diferentes tipos de geotêxteis e tipos de solos em sistemas de drenagem, por um longo período de tempo. Com base aos resultados obtidos verificou-se que o material que ficava retido no geotêxtil depois de 24 horas de utilização. Observou-se algum nível de colmatação em 62% dos casos. Porém, mesmo depois de colmatação parcial, o geotêxtil continuou apresentando uma permeabilidade maior que a do solo base.

Os geotêxteis devem ter uma permeabilidade maior que 50% de sua permeabilidade original para garantir que em caso de colmatação parcial siga tendo a porosidade necessária para deixar a água passar (Pavco, 2012).

2.4.2. CRITÉRIO DE SOBREVIVÊNCIA

O geotêxtil deve suportar os danos mecânicos produzidos durante a sua instalação e vida útil. Para isso, devem ser calculadas as resistências que serão descritas a seguir.

Com relação à resistência ao estouro (Figura 2.24) Giroud (1966) apresenta a equação 2.12 a seguir que calcula a resistência ao estouro que deve ter o geotêxtil para ser utilizado como elemento de separação.

$$T_{req} = p' d_v f(\varepsilon) \quad (2.12)$$

Com

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{4} \left(\frac{2y}{b} + \frac{b}{2y} \right) \quad (2.13)$$

sendo:

T_{req} a resistência a tração requerida do geotêxtil;

p' a tensão vertical ao nível do geotêxtil;

d_v o diâmetro do vazio;

$f(\varepsilon)$ a função deformação do geotêxtil deformado;

b largura do vazio entre blocos; e

y a penetração do geotêxtil no vazio entre blocos.

O ensaio da resistência hidráulica ao estouro (ASTM, 1997) simula a situação em campo. Consiste em ter o geotêxtil tensionado de forma semiesférica aumentando a tensão até a ruptura como foi mostrada na Figura 2.14. Por esta razão deve-se utilizar o valor obtido neste ensaio para calcular a tensão última. A expressão 2.14 a adaptação que emprega este valor (Koerner, 2005).

$$T_{ult} = \frac{1}{2} P_{ensaio} d_{ensaio} [f(\varepsilon)] \quad (2.14)$$

onde:

T_{ult} é a tensão última do geotêxtil;

P_{ensaio} é a pressão de estouro do geotêxtil na ruptura; e

d_{ensaio} é a diâmetro do aparelho utilizado no ensaio (=30mm);

O Fator de segurança do estouro é calculado com a equação a seguir (Koerner, 2005).

$$FS_e = \frac{T_{adm}}{T_{req}} \quad (2.15)$$

onde:

T_{adm} é a tensão admitida pelo geotêxtil; e

T_{req} é a tensão requerida.

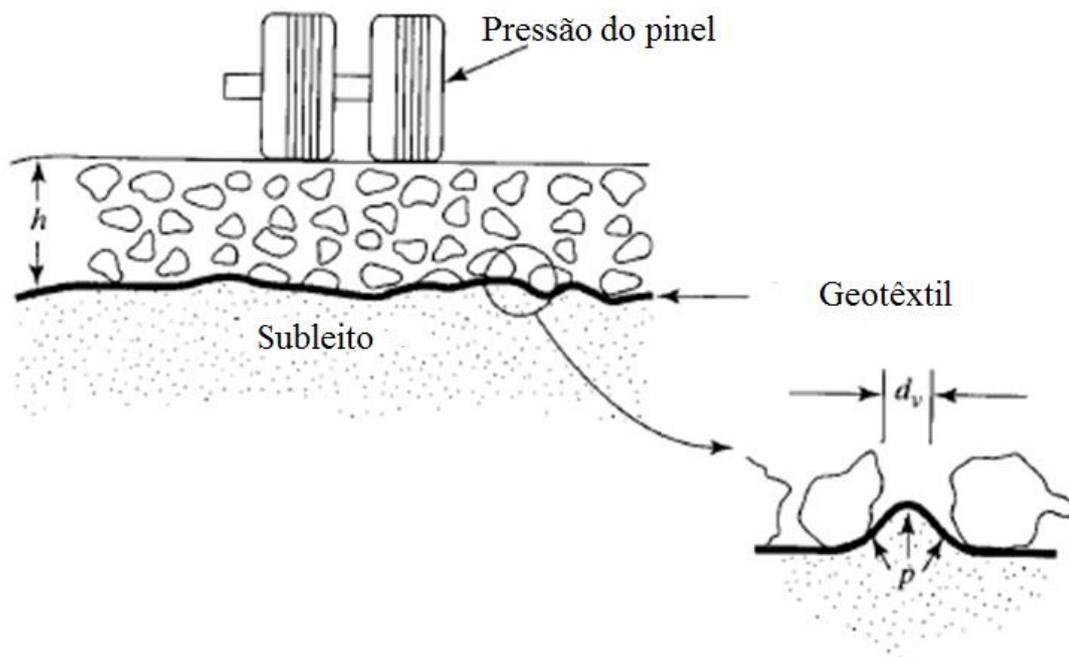


Figura 2.24. Resistencia ao estouro, situação em campo (Koerner, 2005).

Os blocos vizinhos causam a resistência a tração quando são puxados em direções contrarias (Palmeira *et al* 2004), como mostra a Figura 2.25. Para o cálculo deste critério Giroud (1984) apresenta a equação a 2.16.

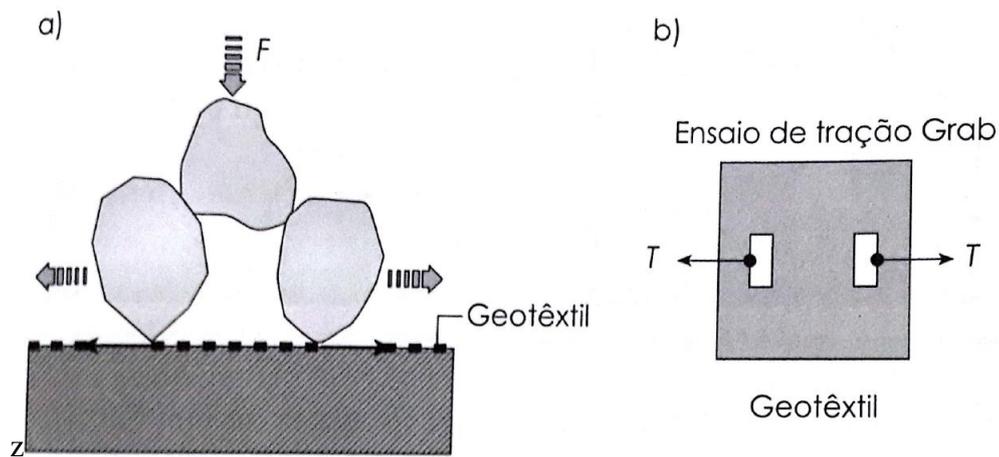


Figura 2.25. solicitações de tração localizada (Palmeira & Cardoso, 2004)

$$T_{req} = p' d_v^2 f(\varepsilon) \quad (2.16)$$

Com

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{4} \left(\frac{2y}{b} + \frac{b}{2y} \right) \quad (2.17)$$

sendo:

T_{req} a resistência a tração requerida do geotêxtil;

p' a tensão vertical ao nível do geotêxtil;

d_v o diâmetro do vazio; e

$f(\varepsilon)$ a função deformação do geotêxtil deformado;

Deve ser:

$$T_{adm} = \frac{T_{ensaio}}{FR_{tl}} \geq FS_{tl} T_{req} \quad (2.18)$$

onde:

T_{adm} é a resistência a tração localizada admissível.

T_{ensaio} é a resistência a tração localizada obtida em ensaio de laboratório;

FR_{tl} é o fator de redução para o valor de tração localizada obtido em ensaio; e

FS_{tl} é o fator de segurança contra a ruptura por tração localizada do geotêxtil.

Segundo Koerner (2005) o geotêxtil está submetido a fortes requerimentos durante e depois do processo de instalação. O geotêxtil deve ter a capacidade de resistir sem perder suas capacidades as solicitações produzidas pela forma dos grãos ou qualquer objeto acima ou embaixo.

Koerner (2005) apresenta a equação a seguir para calcular a força a ser resistida pelo geotêxtil. Na Figura 2.26 se pode visualizar como as pressões são aplicadas neste caso.

$$F_{req} = p' d_{50}^2 S_1 S_2 S_3 \quad (2.19)$$

onde:

F_{req} é a força à perfuração que o geotêxtil deve resistir;

d_{50} é o diâmetro médio dos grãos ou objetos;

S_1 é o fator de penetração.

S_2 é d_{ensaio}/d_{50}

d_{ensaio} é o diâmetro do elemento contundente no ensaio de laboratório; e

S_3 é o fator de ajuste de forma do elemento plano do laboratório à forma do elemento perfurante em campo.

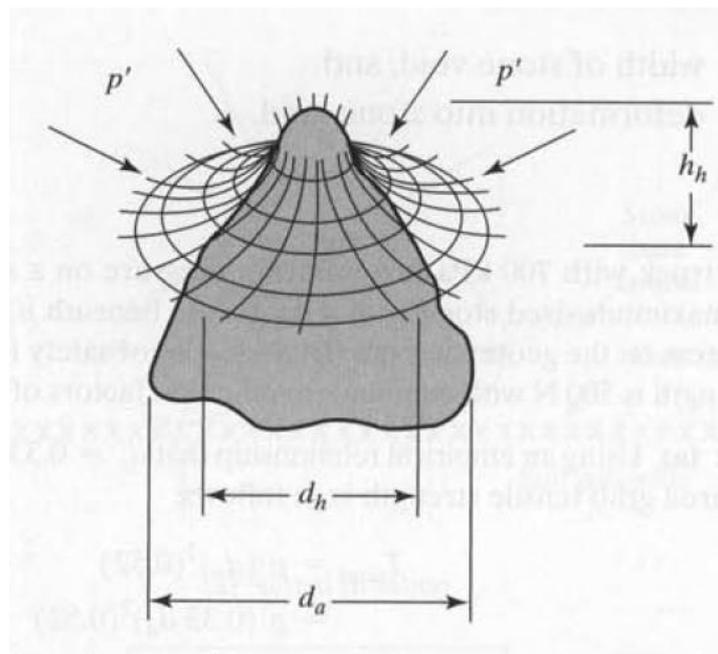


Figura 2.26. Visualização da atuação das pressões no geotêxtil (Koerner, 2005).

O fator de segurança para a resistência ao puncionamento se calcula com a expressão a seguir (Palmeira *et al* 2004).

$$F_{adm} = \frac{F_{ensaio}}{FR_{perf}} \geq FS_{perf} F_{req} \quad (2.20)$$

sendo:

F_{adm} a resistência à perfuração admissível;

F_{ensaio} o fator de redução (para este caso é menor 2); e

FS_{perf} o fator de segurança contra a ruptura por tração localizada.

O geotêxtil deve suportar quedas de objetos durante a instalação. Koerner (2005) apresenta a equação 2.21 desenvolvida a partir da transformação da energia potencial do objeto em energia cinética para calcular a resistência a impacto.

$$E_{req} = \frac{E}{f_{imp}} \quad (2.21)$$

onde:

E_{req} é a energia de impacto requerida; e

f_{imp} é o fator de minoração obtido do gráfico da Figura 2.27

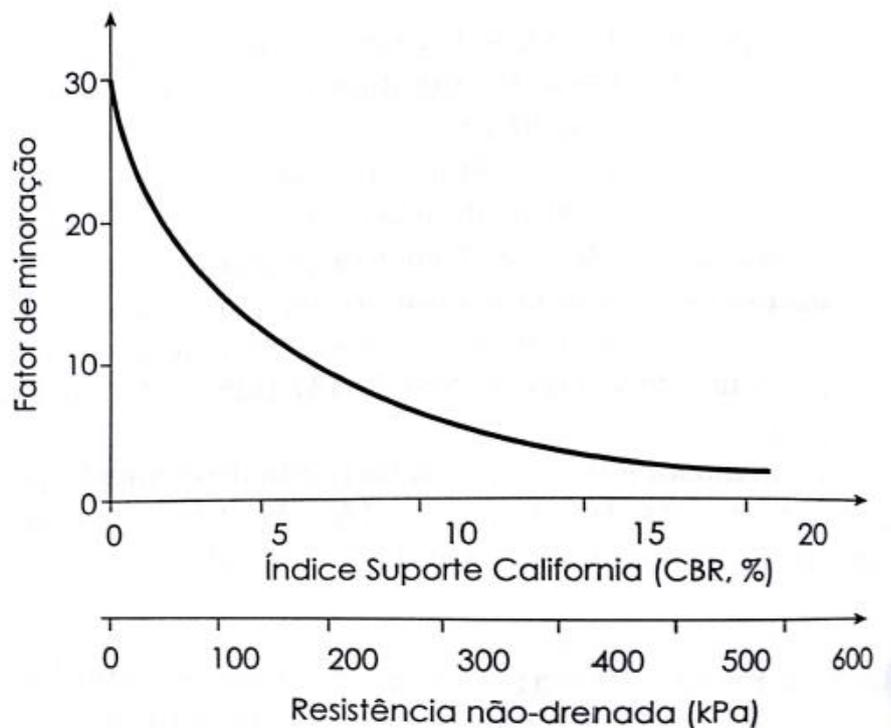


Figura 2.27. Fator de minoração de energia de impacto (Palmeira & Cardoso, 2004).

Para que o geotêxtil pode ser utilizado deve-se verificar com a seguinte equação (Palmeira & Cardoso, 2004):

$$E_{adm} = \frac{E_{ensaio}}{FR_{imp}} \geq FS_{imp} E_{req} \quad (2.22)$$

onde:

E_{adm} é a energia de impacto admissível;

E_{ensaio} é a resistência ao impacto obtida no laboratório;

FR_{imp} é o fator de redução para o valor da resistência obtido no ensaio; e

FS_{imp} é o fator de redução contra a ruptura por impacto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho estudou-se a influência de três tipos de geotêxtil não-tecido, os quais foram utilizados com a função de separar as camadas de pavimento. O material de subleito empregado foi o solo do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. Além disso, o equipamento EGS capaz de simular condições de carregamento cíclico foi utilizado neste estudo. A Figura 3.1 apresenta o esquema geral da metodologia dos ensaios realizados.

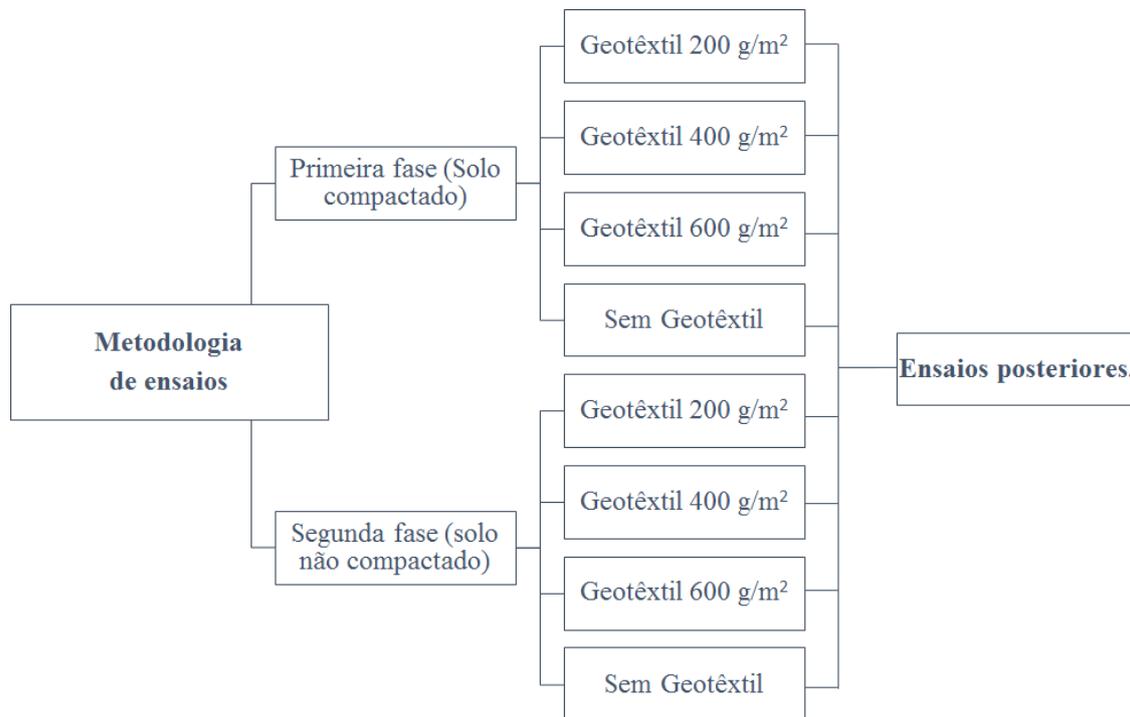


Figura 3.1. Esquema geral da metodologia dos ensaios.

3.1. EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado nesta pesquisa (Figura 3.2) foi projetado por Andrade (2010) para estudar, exclusivamente, a influência de elementos de separação entre camadas de pavimento, de forma a simular carregamentos cíclicos. O equipamento é formado por um cilindro metálico bipartido com 25 cm de diâmetro e 37 cm de altura, onde são colocados o solo de subleito, o elemento de separação e a camada de base. Uma placa metálica conectada a um sistema hidráulico permite a aplicação do carregamento cíclico. Na lateral do cilindro foram instalados transdutores de pressão, a fim de medir as pressões nos poros do solo durante os ensaios.

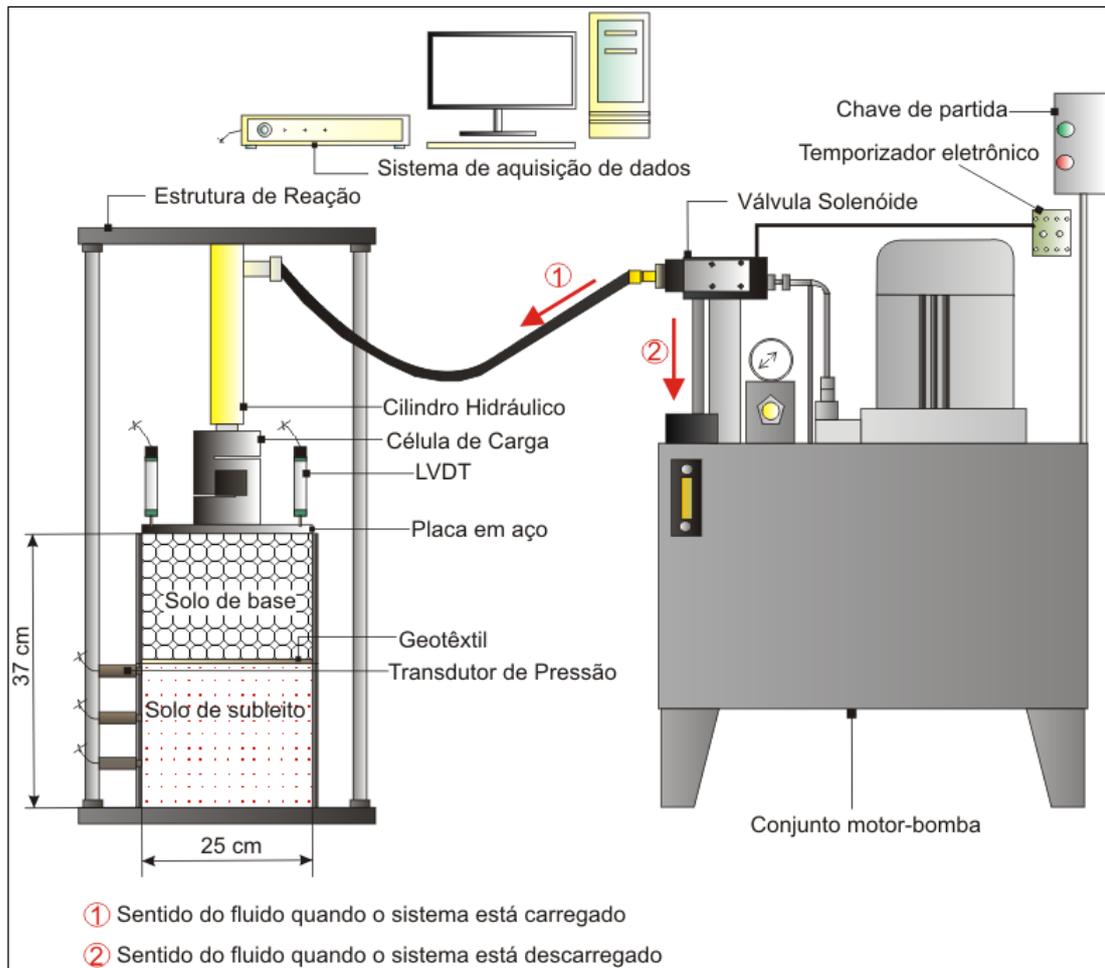


Figura 3.2. Esquema do equipamento EGS utilizado (Andrade,2010).

3.1.1. SISTEMA HIDRÁULICO

A Figura 3.3 apresenta o esquema básico de funcionamento do sistema hidráulico utilizado para aplicar o carregamento cíclico. Os componentes desse sistema são os seguintes:

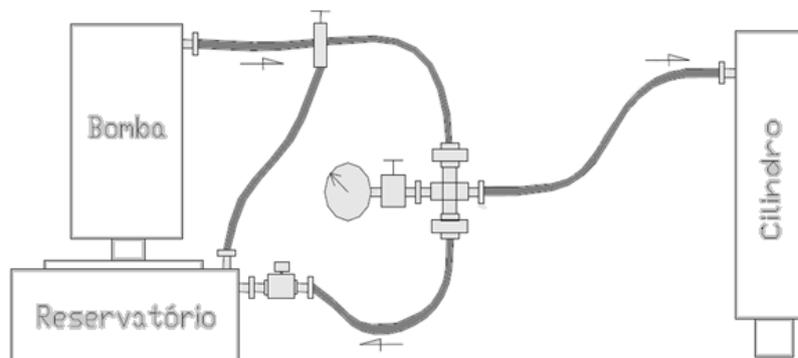


Figura 3.3. Esquema básico de funcionamento do sistema hidráulico (Souza, 2008).

- Conjunto motor-bomba: É formado por um reservatório de óleo de 80 l e um motor trifásico de 4 cv. Sua função é promover a circulação do óleo e a pressão no cilindro hidráulico. Sua pressão máxima de trabalho é de 30 MPa;
- Válvula de alívio: sua função é proteger o sistema contra pressões excessivas;
- Válvula solenoide: sua função é controlar a passagem do fluido para o cilindro hidráulico;
- Mangueiras hidráulicas de alta pressão: sua função é transportar o fluido do reservatório ao cilindro hidráulico. As mangueiras utilizadas suportam pressões de até 70 MPa;
- Cilindro hidráulico: sua função é aplicar os distintos carregamentos desejados. Sua capacidade máxima de trabalho é de 10 kN;
- Temporizador: sua função é controlar a frequência com que é aplicado o carregamento, de modo a controlar o ritmo de abertura e fechamento da válvula solenoide. O temporizador utilizado nesta pesquisa é mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4. Temporizador utilizado.

A Figura 3.5 mostra o sistema hidráulico com suas diversas partes.

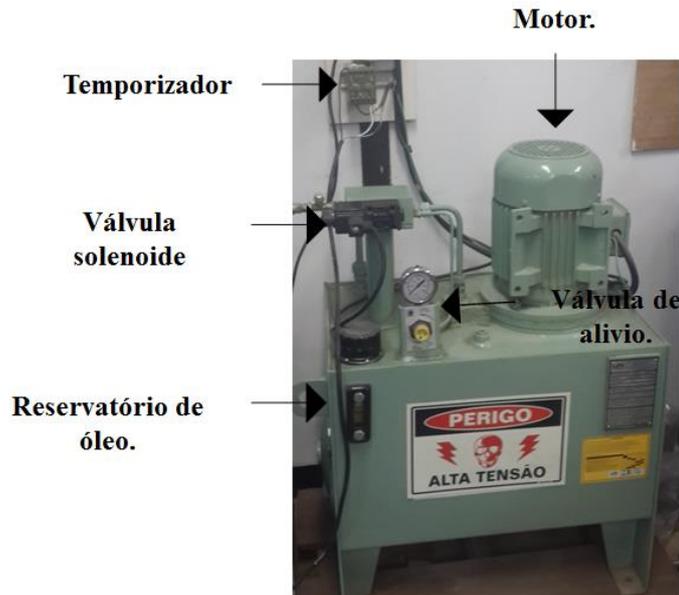


Figura 3.5. Sistema hidráulico.

3.2. MATERIAIS

3.2.1. MATERIAL DE SUBLEITO

O material de subleito utilizado foi o solo do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. A escolha deste material deveu-se ao aprofundado grau de conhecimento sobre suas propriedades e características geotécnicas.

As propriedades do solo empregado neste estudo foram estudadas, recentemente, por Rufo (2013) e são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Propriedades do solo empregado como subleito (Rufo, 2013).

Propriedade / Unidade	Valor
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	26,98
Limite de liquidez (%)	56
Limite de plasticidade (%)	36
Índice de plasticidade (%)	20
Expansão, conforme a NBR 9895 (ABNT, 1987) (%)	0,09
Índice Suporte Califórnia (CBR), conforme a NBR 9895 (ABNT, 1987), Energia normal (%)	2

A Figura 3.6 apresenta as curvas granulométricas do solo empregado como subleito obtidas com e sem utilização de ultrassom no ensaio de granulometria realizado em granulômetro a laser. Pode-se observar a influência da utilização de ultrassom nos resultados, o que indica que o solo utilizado é um solo laterítico.

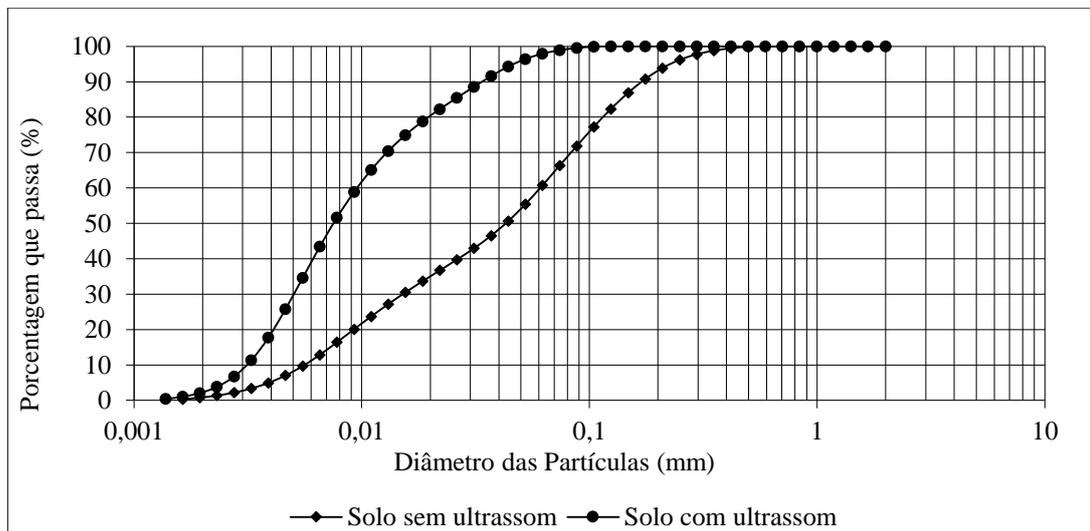


Figura 3.6. Curvas granulométricas do solo de subleito (Rufo, 2013).

O material de subleito foi classificado segundo a metodologia denominada de Miniatura Compactado Tropical (MCT). Executaram-se dois tipos de ensaios para sua classificação: compactação pelo método mini-MCV (*Moisture Condition Value*) e perda de massa por imersão. Os valores dos índices obtidos são apresentados na Tabela 3.2, os quais permitem classificar o solo como arenoso de comportamento laterítico (LA'). A Figura 3.7 apresenta o resultado no ábaco de classificação MCT.

Tabela 3.2. Resultados dos ensaios da metodologia MCT para solos finos (Rufo, 2013).

c'	d'	Pi (%)	e'	Grupo MCT
1,2	106	81,5	1,0	LA'

Obs.: c' é o coeficiente angular da reta assimilável à curva de deformabilidade com Mini-MCV=10; d' é a inclinação da parte reta do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes; Pi é a perda de massa por imersão expressa em porcentagem e e' é o índice da Classificação MCT.

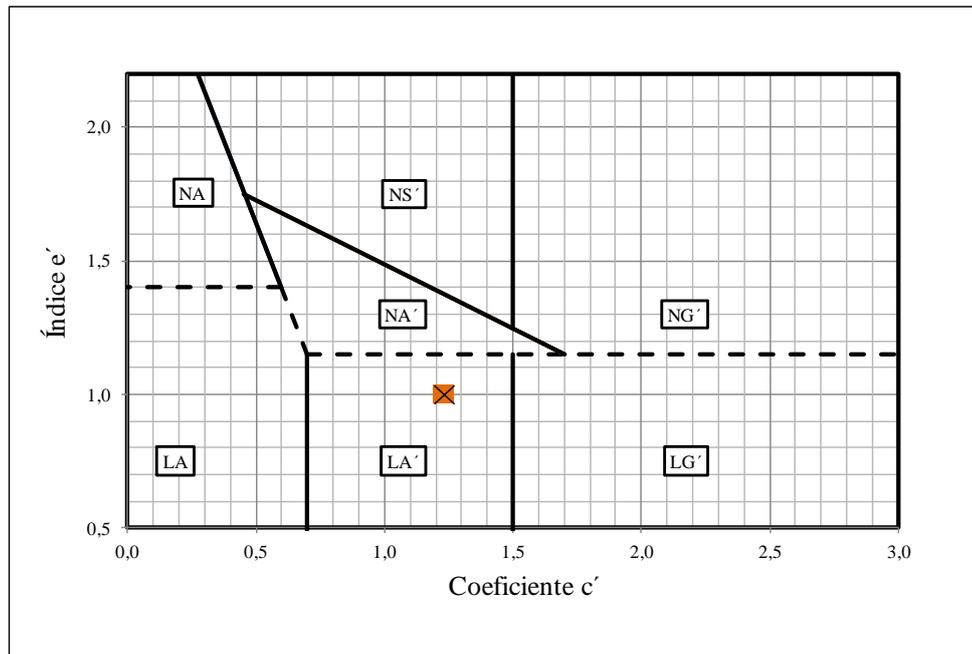


Figura 3.7 Ábaco de classificação MCT.

A Figura 3.8 apresenta a curva de compactação com energia normal, de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1986).

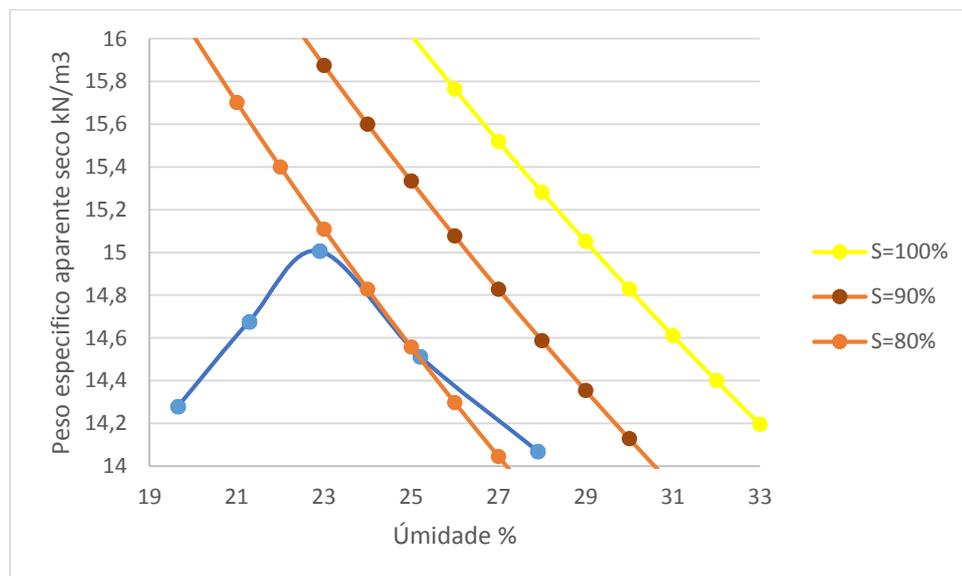


Figura 3.8. Curva de compactação do solo empregado como subleito (Rufo, 2013).

3.2.2. ELEMENTO DE SEPARAÇÃO

Três tipos de geotêxtil não-tecido foram utilizados como elementos de separação. As gramaturas destes elementos são iguais a 200, 400 e 600 g/m². Todos os geotêxteis supracitados são da marca *Bidim* e possuem filamentos contínuos e unidos por agulhagem.

Anos atrás, o fabricante mudou as referências dos geotêxteis que anteriormente eram chamados OP-X, onde X representava a sua gramatura. Suas características são mostradas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Propriedades dos geotêxteis utilizados (dados fornecidos pelo fabricante).

Geotêxtil	M _A (g/m ²)	t _{GT} (mm)	O _f (mm)	K _n (cm/s)	ψ (s ⁻¹)	n (%)	J _{sec, 2%}	ε(%)
OP-20	200	2,9	0,130	2,2 x 10 ⁻¹	0,76	93	35*	70-80
OP-40	400	3,8	0,090	2,2 x 10 ⁻²	0,57	92	51*	70-81
OP-60	600	5,9	0,059	2,2 x 10 ⁻³	0,37	91	69*	70-82

Obs: M_A = massa por unidade de área; t_{GT}= espessura; O_f= Abertura de filtração, K_n=permeabilidade normal ao plano, ψ= permissividade, n= porosidade, ε= Deformação, * Valores obtidos por ensaio de tração de faixa larga por Mendes (2006).

3.2.3. MATERIAL DA CAMADA DE BASE

A Figura 3.9 apresenta a curva granulométrica da brita calcária utilizada. A brita supracitada passou por um processo de lavagem, com a finalidade de evitar que os finos pudessem impregnar os geotêxteis. A mesma brita foi também utilizada por Ante (2012). Este autor realizou diferentes ensaios de caracterização e alguns de seus resultados serão mostrados a seguir.

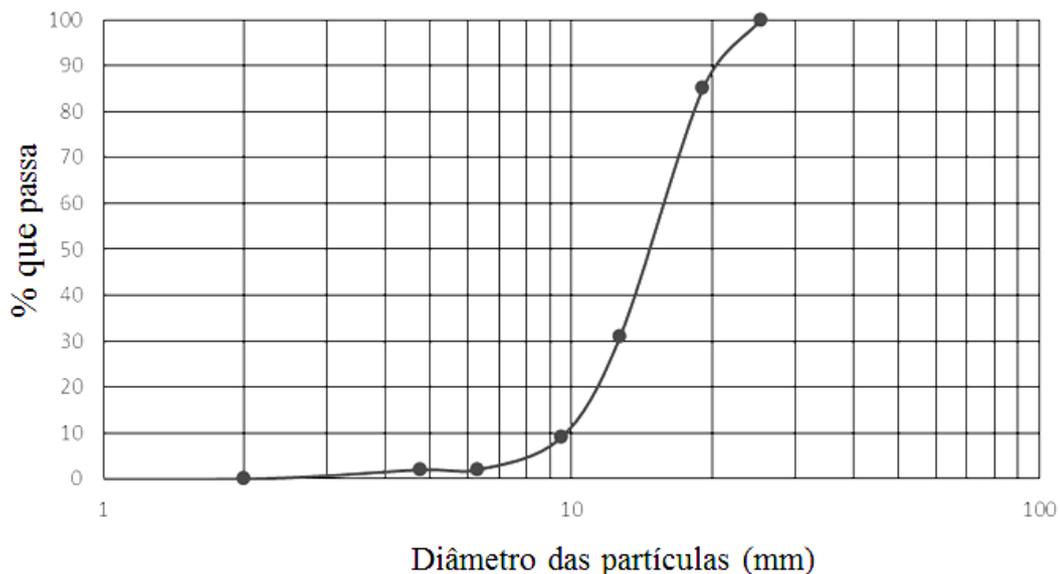


Figura 3.9. Curva granulométrica da brita (Ante, 2012).

O ensaio de abrasão “Los Angeles” consiste em calcular o desgaste do agregado quando colocado em uma máquina que gira a uma velocidade entre 30 e 33 rpm. O desgaste é representado em porcentagem. Esse ensaio foi executado conforme preconizado pela (DNER,

1998). A Tabela 3.4 mostra os resultados do ensaio de abrasão “Los Angeles” realizado na brita.

Tabela 3.4. Resultados de ensaio de Abrasão Los Angeles (Ante, 2012).

Norma utilizada	Resultado	Unidade	Especificação DNIT 031/2006
DNER ME 035/98	15.6	%	≤50

A avaliação da forma e da textura da brita foi determinada por meio de ensaios de índice de forma e de partículas fraturadas. Os parâmetros avaliados com estes ensaios permitem estimar a resistência e o comportamento que a brita tem na via (Bernucci *et al.*, 2008).

O ensaio de índice de forma determina se a configuração da brita é apta para ser utilizada em pavimentos. As partículas do material granular a ser utilizado devem ter superfície irregular, para garantir o inter-travamento entre os grãos. O índice de forma varia entre 0 e 1, isto é, quanto mais próximo de 1, mais as partículas são consideradas cúbicas e, quanto mais próximo de 0, mais as partículas são consideradas lamelares (Bernucci *et al.*, 2008). O ensaio de índice de forma foi realizado segundo o procedimento da norma DNER 086/94 e seu resultado é apresentado na Tabela 3.5.

O ensaio de partículas fraturadas fornece a porcentagem de grãos que se compõem de partículas fraturadas nos agregados pétreos. Quanto maior for a quantidade de partículas fraturadas é a resistência ao cisalhamento e o atrito entre os grãos (ASTM D 5821-95). A Tabela 3.5 também mostra os resultados obtidos nos ensaios de porcentagem de partículas fraturadas.

Tabela 3.5. Resultados da avaliação de textura e forma (Ante, 2012).

Nome do ensaio	Norma Utilizada	Resultado	Unidade	Especificação DNIT 031/2006	Especificação DNIT 031/2006
ÍNDICE DE FORMA	DNER 086/94	0.6	—	>0.5	—
PARTÍCULAS FRATURADAS	ASTM D 5821-95	96	%	55-100%	—

3.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a obtenção de sinais da instrumentação são utilizados sistemas de aquisição de dados, os quais são os encarregados de coletar todas as informações a respeito de um do processo (Lynx, 2003). Nesta pesquisa, foi utilizado o sistema Lynx, modelo ADS 2000, dotado de 32 canais (Figura 3.10). Cada sensor foi conectado em um canal, configurado segundo seu o tipo, como é mostrado na Figura 3.11. Posteriormente, foi realizada a calibração de cada instrumento utilizado.



Figura 3.10. Sistema de aquisição de dados utilizado.

Configuração das Entradas Analógicas								
Canal	CN Mod	Nome do Sinal	Unidade	Tipo	Faixa do A/D	Lim. Inferior	Lim. Superior	Descriçã
<input type="checkbox"/> 16	0		V	Linear	±10 V	-10	10	
<input checked="" type="checkbox"/> 17	1	Lvdt 1	mm	Linear	±10 V	-4203.183	4215.127	
<input checked="" type="checkbox"/> 18	2	Lvdt 2	mm	Linear	±10 V	-4266.464	4270.698	
<input checked="" type="checkbox"/> 19	3	Lvdt 3	mm	Linear	±10 V	-4191.271	4197.733	
<input type="checkbox"/> 20	4			Linear	±10 V	-207.8477	209.4787	
<input type="checkbox"/> 21	5			Linear	±10 V	-10	10	
<input checked="" type="checkbox"/> 22	6	cc	kg	Linear	±10 V	-6950.093	15470.39	
<input type="checkbox"/> 23	7			Linear	±10 V	-2802.742	12762.09	
<input type="checkbox"/> 24	8			Linear	±10 V	460.5897	-259.3782	
<input checked="" type="checkbox"/> 25	9	P1	kPa	Linear	±10 V	10402.68	-20518.45	
<input checked="" type="checkbox"/> 26	10	P2	kPa	Linear	±10 V	20750.41	-39577.6	
<input type="checkbox"/> 27	11			Linear	±10 V	-205.0444	204.23	
<input type="checkbox"/> 28	12			Linear	±10 V	-204.7105	207.5977	
<input type="checkbox"/> 29	13			Linear	±10 V	-10	10	
<input type="checkbox"/> 30	14			Linear	±10 V	-10	10	
<input type="checkbox"/> 31	15			Linear	±10 V	-10	10	

Figura 3.11. Configuração dos sensores.

3.4. INSTRUMENTAÇÃO

Segundo Palmeira (1996), a necessidade da utilização de instrumentação são: por diagnóstico (para fazer as verificações em obra ou constatar a adequabilidade de uma nova técnica de construção), para acumular experiência em um local determinado, para supervisionar fatores que prognostiquem um problema e para fins de pesquisa. No presente trabalho desejou-se avaliar o comportamento de três tipos de geotêxteis não-tecidos utilizados como elemento de separação em um pavimento sujeito a cargas cíclicas. É importante para esta pesquisa a compreensão de três fatores principais do ensaio que são: as poropressões no subleito, os deslocamentos e a granulometria (passante e retida pelo geotêxtil) após a realização dos ensaios. Para a medição de deslocamentos e poropressões foram utilizados os instrumentos descritos a seguir.

Foram utilizados três LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) para medir os deslocamentos verticais na superfície da brita. Os LVDTs empregados nesta pesquisa possuem curso máximo de 100 mm e funcionam com circuito elétrico de meia ponte. A Figura 3.12 mostra um dos LVDTs usado. As calibrações dos LVDTs foram feitas com o auxílio de um paquímetro digital.



Figura 3.12. LVDT utilizado nos ensaios desta pesquisa.

Foram utilizados dois transdutores em piezômetros instalados em diferentes pontos da camada de subleito, com a finalidade de medir as poropressões durante os ensaios. A Figura 3.13 apresenta os componentes usados para a construção dos piezômetros. Cada componente será descrito a seguir.

- Pedra porosa: sua função é filtrar as partículas de solo e permitir que somente a água passe através dela.
- Válvula esfera: sua função é permitir que o sistema possa ser aberto ou fechado de modo a possibilitar a sua saturação, além de evitar a entrada de ar.
- Transdutor de pressão: é responsável pela medida da pressão.

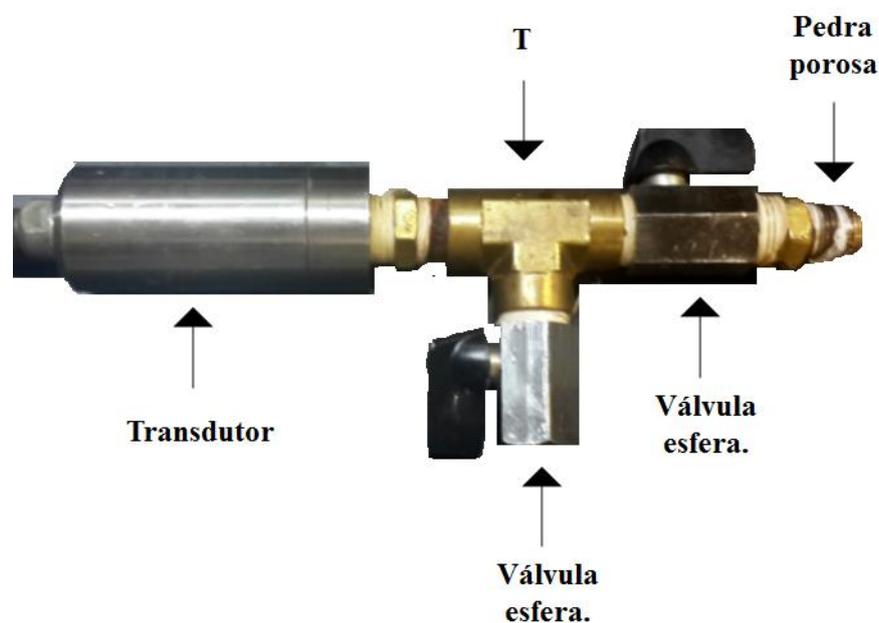


Figura 3.13. Transdutor de pressão utilizado nos ensaios.

A calibração dos piezômetros foi feita utilizando-se o equipamento *Standard Pressure/Volume Controller*, da *GDS Instruments* (Figura 3.14). Este equipamento é capaz de fornecer valores de pressões segundo o desejo do usuário. A calibração foi feita na faixa de pressões de -30 kPa até 800 kPa. É muito importante ressaltar a necessidade de retirar o ar do interior do sistema antes de iniciar cada ensaio.



Figura 3.14. Controlador de pressões utilizado para a calibração dos piezômetros.

Foi utilizada 01 (uma) célula de carga com capacidade de 50 kN, do tipo “S”, como mostrada na Figura 3.15. Esse instrumento registrou os carregamentos que foram aplicados durante os ensaios. Em cada ensaio o carregamento máximo aplicado (de forma repetida) foi igual a 10 kN. A célula de carga foi calibrada por meio de uma prensa hidráulica disponível no laboratório.



Figura 3.15. Célula de carga utilizada nos ensaios.

A posição dos instrumentos na amostra é mostrada na Figura 3.16

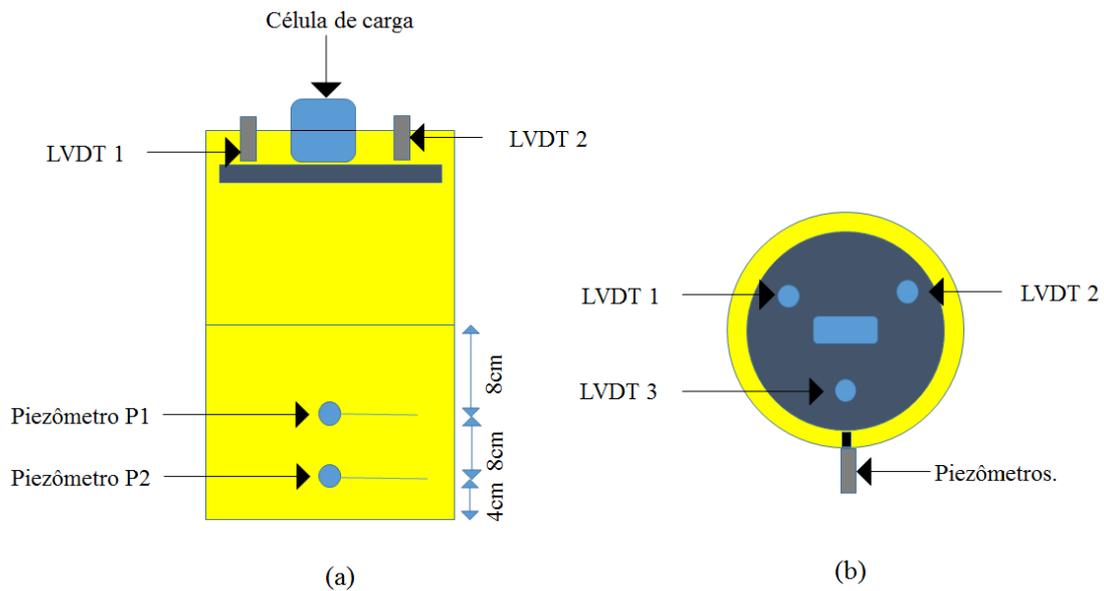


Figura 3.16. Posicionamento dos instrumentos utilizados nos ensaios. (a) vista frontal. (b) vista superior.

3.5. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

3.5.1. PREPARAÇÃO DO SOLO DE SUBLEITO

O programa de ensaios foi executado em duas etapas, as quais diferenciam-se na preparação do solo de subleito. As duas fases serão descritas a seguir.

3.5.1.1. PRIMEIRA ETAPA

O solo foi seco até atingir a umidade higroscópica, a partir do uso de lâmpadas. Posteriormente, o solo foi peneirado na peneira de N^o. 4. As pedras e o material orgânico presentes no solo foram retirados.

Considerando-se os valores de peso específico seco obtido no ensaio de compactação (ver Figura 3.8), o solo foi pesado e misturado com água, para que se atingisse uma umidade 2 % acima da umidade ótima, o que resulta em uma umidade final de 25 %.

Após misturar o solo com água, o mesmo foi colocado na câmara úmida no interior de uma sacola plástica durante 24 h. Com o material homogeneizado, foi medida a umidade para garantir que o solo ficasse com a porcentagem de água esperada. Após esses passos, uma pequena camada drenante de brita foi colocada na parte inferior do cilindro. Em seguida, foi colocado filtro geotêxtil sobre a brita. Calculou-se a quantidade de solo necessário para preencher 17 cm do cilindro, a partir da equação 3.1.

$$M_h = \gamma_d * V * \left(1 + \frac{w(\%)}{100}\right) \quad (3.1)$$

onde: M_h é a massa úmida;

γ_d é o peso específico seco;

V é o volume; e

w é a umidade.

A quantidade de solo necessária para preencher o cilindro foi dividida em três partes iguais. A primeira parte foi colocada no cilindro e compactada estaticamente com ajuda de uma placa conectada a uma bomba manual (Figura 3.17), com o cuidado para que não se ultrapassasse a capacidade da célula de carga.



Figura 3.17. Bomba manual utilizada para a compactação das camadas de solo.

Após o solo ocupar o volume calculado a partir da Equação 3.1, fez-se a escarificação com uso de espátula. O processo foi repetido até que as três camadas compactadas e ocupassem os 17 cm de altura do cilindro.

O cilindro foi introduzido em um recipiente com água e foi deixado submerso por 05 (cinco) dias, para que o material fosse saturado a partir da entrada de água pela sua parte inferior, conforme ilustrado na Figura 3.18.

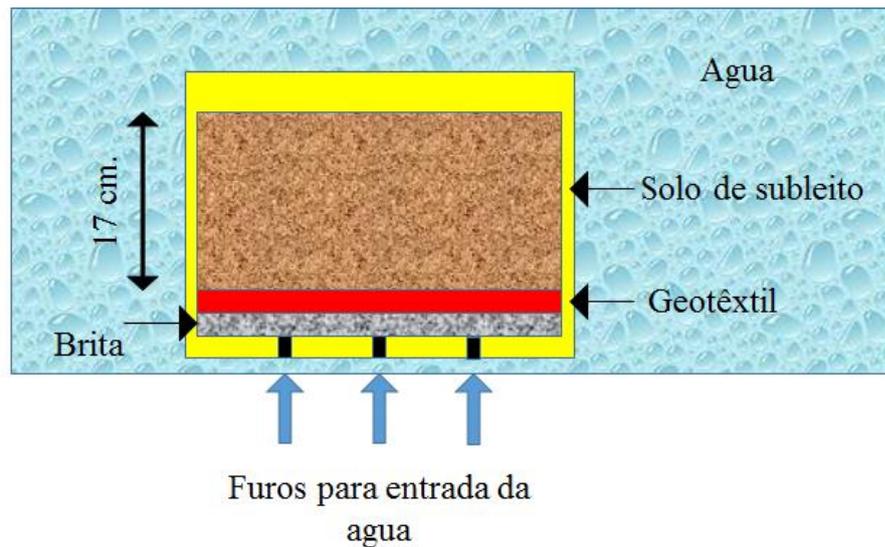


Figura 3.18. Esquema de umedecimento da amostra pela face inferior do cilindro (primeira etapa).

3.5.1.2. SEGUNDA ETAPA

A segunda etapa de ensaios foi executada com solo de subleito mais compressível. Portanto, foram realizados ensaios com o solo na condição não compactada e utilizou-se um tipo de preparação capaz de garantir a sua saturação, conforme descrito a seguir.

De maneira similar àquela empregada na primeira etapa de ensaios, o solo foi seco até atingir a umidade higroscópica. O mesmo foi peneirado na peneira de n. 4. As pedras e o material orgânico presentes no solo foram retirados. Em um recipiente metálico, foram colocados 15 kg de solo e posteriormente o mesmo foi preenchido com água destilada. Esta água foi aquecida durante 30 (trinta) minutos, para que todo ar fosse retirado, de forma a garantir que o solo ficasse saturado.

Um disco de borracha, em forma de círculo, foi colocado na base do cilindro e fixado com silicone industrial, a fim de vedar os furos na base do cilindro para se tentar uma condição mais próxima à de carregamento não drenado. A seguir, o solo foi colocado no cilindro, conservando-se uma lâmina d'água acima da sua superfície com o propósito de evitar a entrada de ar. Uma seção do cilindro, na condição supracitada, é mostrada na Figura 3.19.

A amostra de solo foi deixada para adensar sob peso próprio por um período de uma semana, mantendo-se sempre a lâmina d'água para evitar a perda de saturação.

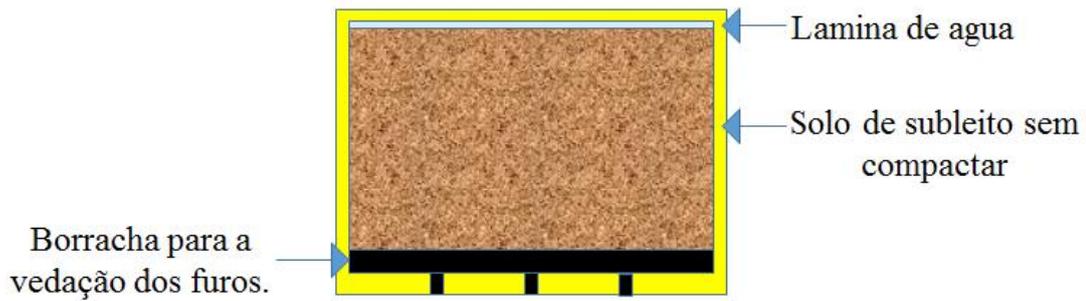


Figura 3.19. Seção da parte inferior do cilindro (segunda etapa).

3.5.2. PROCEDIMENTOS ANTES DA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Após a preparação do solo de subleito, o geotêxtil foi fixado à parte superior do cilindro, por meio de silicone industrial. Com o geotêxtil fixo à metade superior do cilindro, essa metade foi fixada à inferior por meio de quatro parafusos.

A união das duas peças que compõem o cilindro foi vedada. Esta vedação também foi feita por meio de silicone supracitado, de forma a evitar vazamentos.

A massa de brita necessária para preencher 10 cm de altura foi de 7,13 kg, obtida a partir do peso específico desse material. A brita foi colocada sobre o geotêxtil. A seguir, nivelou-se a camada de base e posicionou-se a placa metálica de transmissão dos carregamentos ao sistema hidráulico. As Figura 3.20 (a) e (b) ilustram o arranjo dos materiais no interior do cilindro.

A localização dos piezômetros com respeito ao geotêxtil vai depender da etapa. Na segunda etapa, assegurou-se que os piezômetros ficavam no subleito apesar dos deslocamentos colocando a camada de solo com maior espessura. Na primeira etapa a distância dos piezômetros foi de 5 cm e na segunda etapa foi de 7 cm.

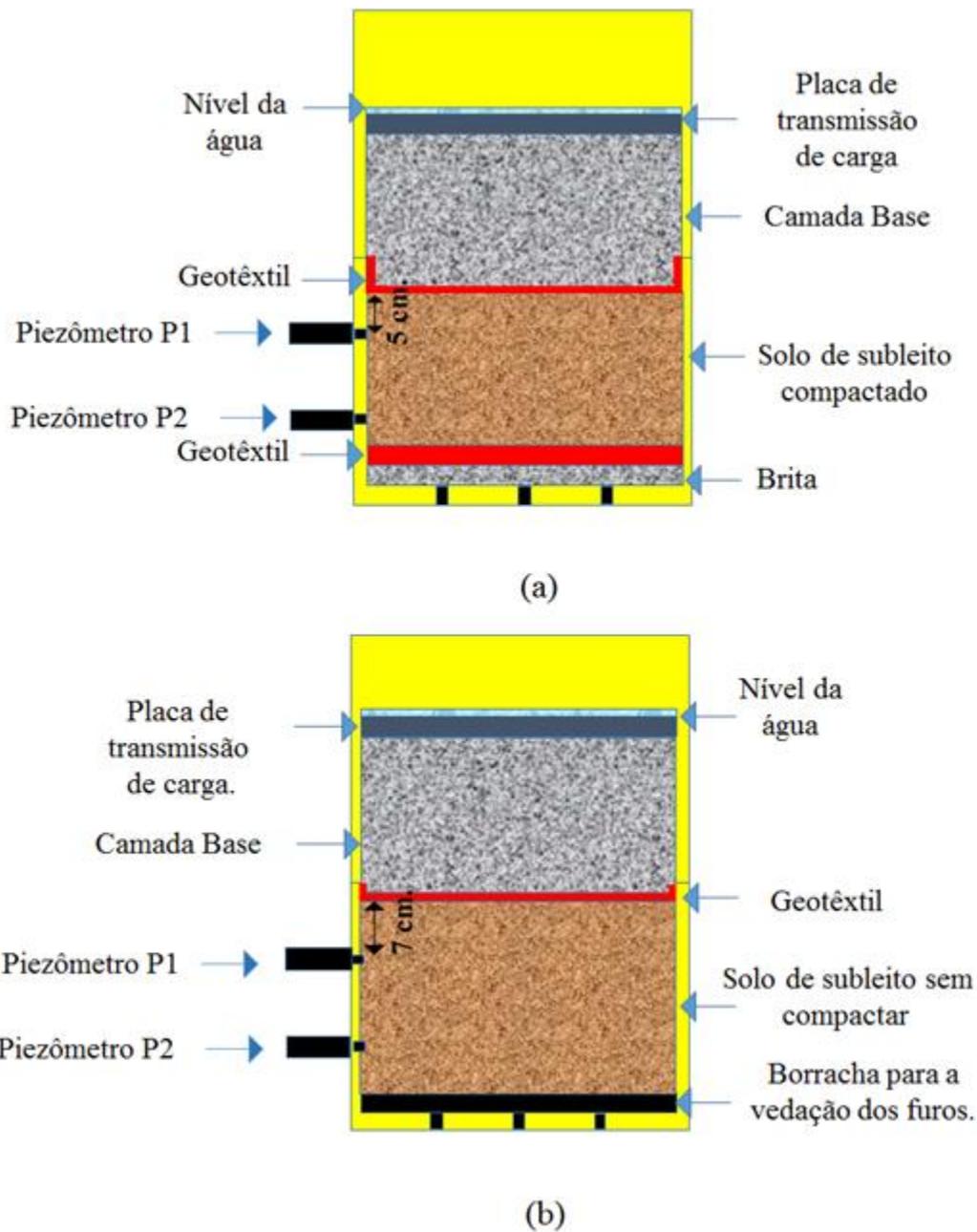


Figura 3.20. Esquema do arranjo dos materiais no cilindro para cada etapa do programa de ensaios: (a) primeira etapa e (b) segunda etapa.

Em seguida, a célula de carga e os LVDTs foram posicionados (Figura 3.16). A Figura 3.21 mostra os componentes do ensaio completamente montados.



Figura 3.21. Ensaio montado.

3.5.3. PROCEDIMENTOS DURANTE A EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Durante a execução dos ensaios, o nível da água sobre a amostra e o carregamento foram controlados. Portanto, foi necessário adicionar água durante o período de ensaio para que o nível se mantivesse estável.

3.5.4. PROCEDIMENTOS APÓS O ENSAIO

Após o fim de cada ensaio (150.000 ciclos de carregamento) o equipamento foi desmontado. Os seguintes procedimentos foram adotados, dependendo do tipo de ensaio realizado:

- Ensaios com geotêxtil: a brita (camada de base do pavimento) foi retirada do cilindro praticamente sem resíduos de solo. Foi coletada uma amostra de solo e água que ficou sobre o geotêxtil separador, a fim de se realizar análises de granulometria deste material. O geotêxtil foi retirado após a brita e foi submetido a secagem por um período de 24 h, na estufa. Foram recortados pedaços deste elemento em forma de círculo, com 25 cm de diâmetro, que ficaram em contato com o solo de subleito. Os círculos foram pesados e lavados como o propósito de coletar as partículas finas que ficavam em seu interior e, assim, obter a massa e a granulometria do material retido.

Os ensaios realizados após cada ensaio foram:

- Avaliação visual do grau de contaminação do material da camada de base;
- Avaliação visual de possíveis danos aos geotêxteis;

- Ensaios a tração de amostras virgens e dos geotêxteis utilizados nos ensaios.
- Ensaios sem geotêxtil: a brita misturou-se à camada de subleito devido à falta do elemento separador (geotêxtil). Nesse caso, o cilindro superior foi retirado junto com o solo que ficou colado a ele. Foi realizada a lavagem e a coleta do solo que ficou impregnado na brita.

Os resultados forem analisados comparando os valores obtidos com os ensaios com geotêxtil e sem geotêxtil, além disso, parâmetros como a retenção de finos, resistência a tração e deformação forem comparados os geotêxteis da primeira etapa e da segunda.

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios divididos em duas etapas. A primeira etapa envolve os ensaios com o solo de subleito compactado, que serão nomeados C-X, e a segunda etapa envolve os resultados com o solo de subleito não compactado e serão denominados S-X, onde X é a gramatura do geotêxtil (em g/m²), S indica ensaio sem compactação do subleito e C ensaio com subleito compactado. A Tabela 4.1 mostra a distribuição dos ensaios. A notação SG indica ensaio sem geotêxtil separador.

Tabela 4.1 Ensaio realizados.

Primeira etapa	C-200
	C-400
	C-600
	C-SG
Segunda etapa	S-200
	S-400
	S-600
	S-SG

4.1. DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Os deslocamentos verticais nos pavimentos podem ser permanentes, elásticos (recuperáveis) ou elasto-plásticos (recupera-se parte da deformação, mas não se retorna ao estado inicial). A estrutura de um pavimento deve resistir às cargas impostas pelo tráfego até que os deslocamentos permanentes atinjam a um valor limite, a partir do qual as condições de serviço ficarão comprometidas.

A Figura 4.1 esquematiza os mecanismos de deslocamentos verticais em ensaios com e sem a presença do geotêxtil separador. O sistema pode se deformar de três modos diferentes: pela incrustação de brita no subleito, pela compressão dos materiais e pela saída de finos do solo de subleito para a camada base.

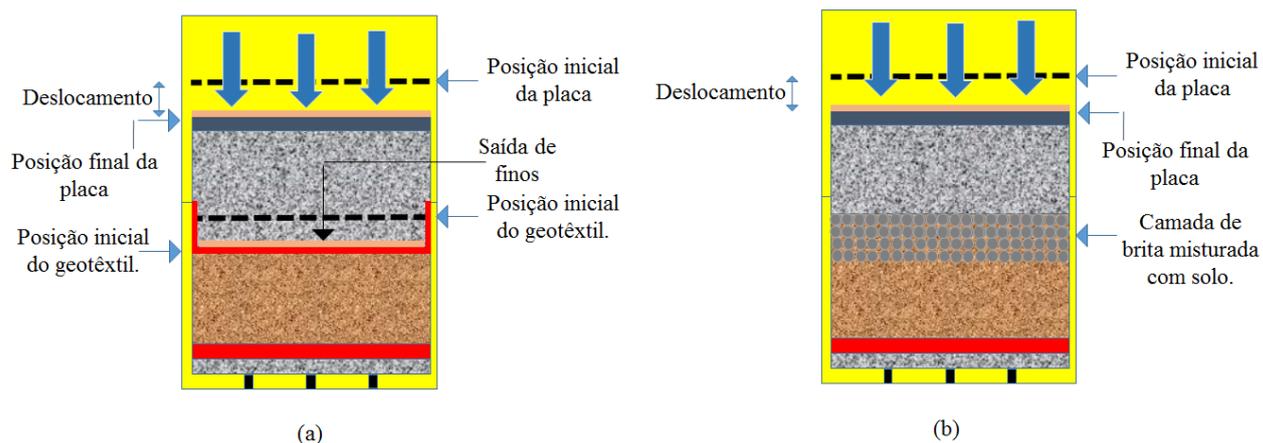


Figura 4.1. Deslocamentos verticais durante os ensaios (a) Deslocamentos com geotêxtil. (b) Deslocamentos sem geotêxtil.

4.1.1. DESLOCAMENTOS DA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS

A primeira etapa de ensaios foi conjunto dos ensaios feitos com o solo de subleito compactado. Na Tabela 4.2 mostram-se os deslocamentos finais nos 4 ensaios que foram executados nesta etapa. Os deslocamentos nos ensaios com geotêxtil foram inferiores a 1mm. O geotêxtil separador reduziu a incrustação de grãos no subleito e a migração de partículas menores para a brita. Os deslocamentos chegaram a ser 46 vezes maiores no ensaio sem geotêxtil em comparação com os ensaios com geotêxtil. Esses maiores deslocamentos foram devido principalmente, à penetração de brita no solo de subleito. A Figura 4.2 apresenta uma vista da camada de brita impregnada pelo solo de subleito ao final do ensaio sem geotêxtil.

Tabela 4.2. Deslocamentos totais dos ensaios da primeira etapa.

Ensaio	Deslocamento total (mm)
C-200	0,39
C-400	0,12
C-600	0,46
C-SG	5,54



Figura 4.2. Impregnação da brita por finos do subleito – Ensaio sem geotêxtil.

No processo de deslocamento durante os ciclos de aplicação de carga pode-se notar que os ensaios com geotêxtil (Figura 4.3) atingiram um deslocamento máximo e se estabilizaram nos primeiros 40.000 ciclos de carga. Já o ensaio sem geotêxtil os deslocamentos continuaram a aumentar durante o ensaio (Figura 4.4). O melhor desempenho foi apresentado pelo geotêxtil com massa por unidade de área igual a 400 g/m^2 . Isto pode ter sido consequência do fato do geotêxtil com 200 g/m^2 ter poros maiores e o de 600 g/m^2 ter orifícios deixados pelas agulhas (processo de agulhagem durante a fabricação) bem definidos, o que pode favorecer a passagem de finos através do geotêxtil.

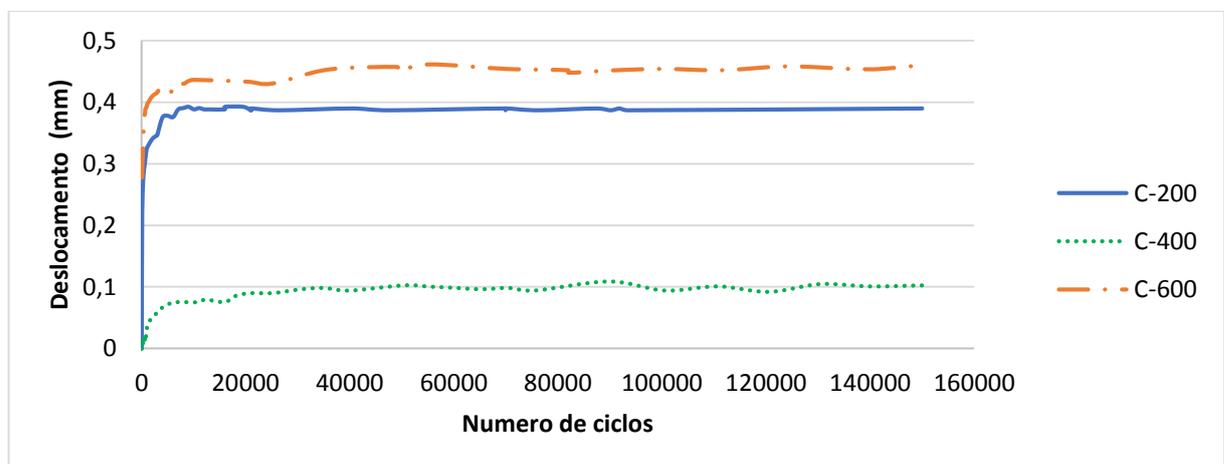


Figura 4.3. Deslocamento *versus* Número de ciclos (ensaios com geotêxtil da primeira etapa).

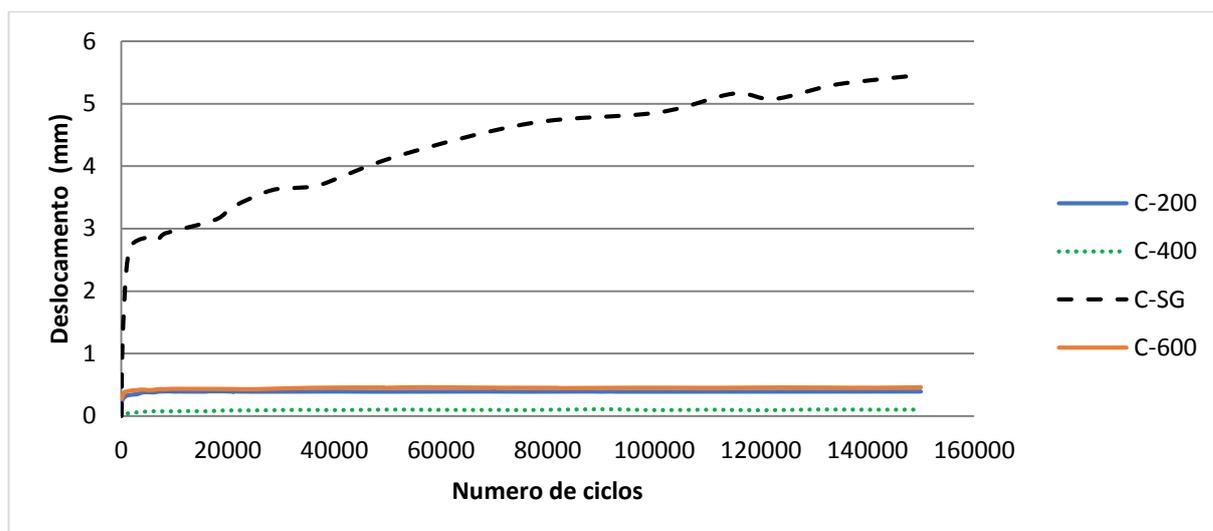


Figura 4.4. Deslocamento *versus* Número de ciclos (todos os ensaios da primeira etapa).

4.1.2. DESLOCAMENTOS DA SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS

A segunda etapa consistiu no conjunto de ensaios feitos com o subleito sem compactar. Ao contrário da primeira etapa, os deslocamentos são maiores, devido à falta de compactação do solo e à sua saturação. São mostrados na Tabela 4.3 os deslocamentos totais dos 4 ensaios feitos nesta etapa.

Tabela 4.3. Deslocamentos totais da segunda etapa.

Nome do ensaio	Deslocamentos total (mm)
S-600	39,1
S-400	38,8
S-200	39,9
S-SG	52,1

No caso dos ensaios realizados com geotêxteis, a diferença entre os deslocamentos não foi maior a 1,1 mm. No entanto, o deslocamento total no o ensaio realizado sem geotêxtil foi superior ao dos ensaios com geotêxtil em mais de 10 mm.

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

O deslocamento durante os 150.000 ciclos de carga é mostrado na Figura 4.5. Os resultados dos ensaios S-400 e S-200 são semelhantes. O ensaio S-600 mostra deslocamento menor até 40.000 repetições de carga.

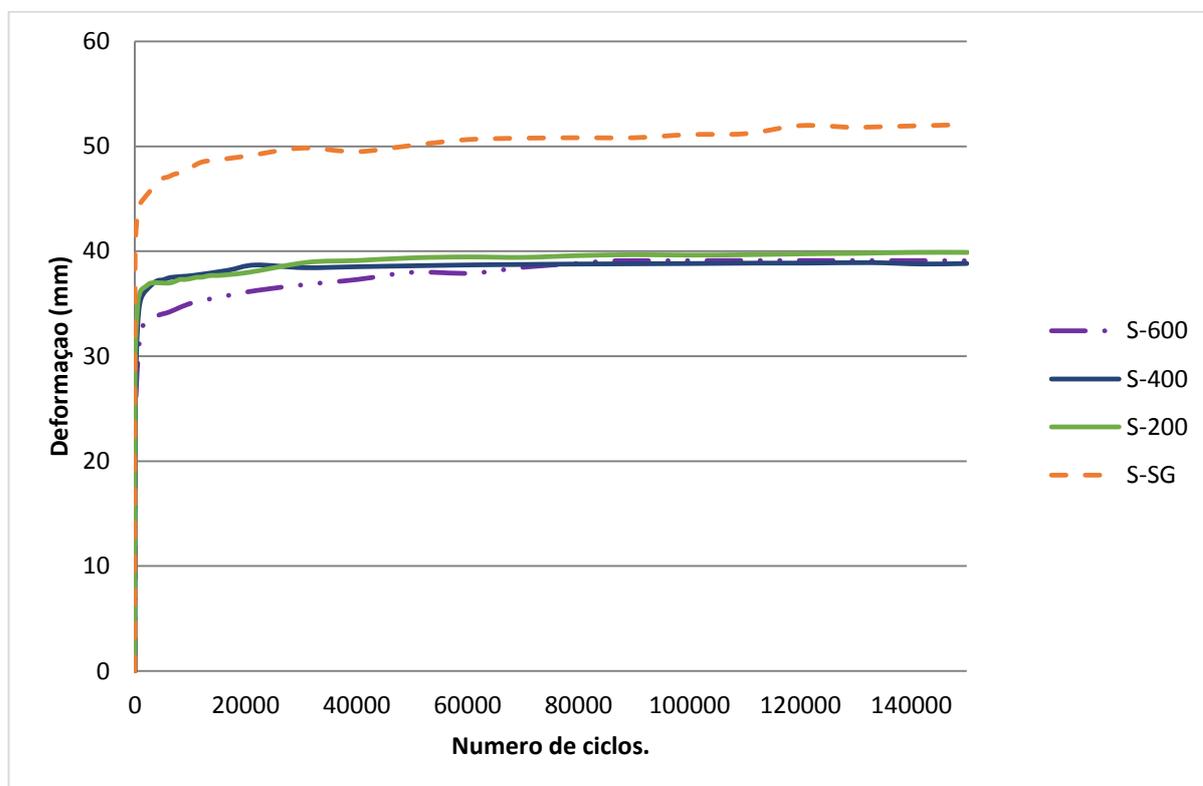


Figura 4.5. Deslocamento *versus* número de ciclos nos ensaios da segunda etapa.

No caso do ensaio da segunda etapa realizado sem geotêxtil, a ausência do elemento separador provocou uma penetração mais intensa da brita no subleito. A Figura 4.6 mostra como a brita penetrou no subleito.



Figura 4.6. Impregnação da brita por finos do subleito – Ensaio sem geotêxtil segunda etapa dos ensaios.

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

Os deslocamentos no ensaio sem geotêxtil não mostram indícios de estabilização mas os ensaios com geotêxtil mostraram uma certa tendência à estabilização nos estágios finais de carga (Figura 4.5).

Os resultados obtidos nesta pesquisa podem ser comparados com o trabalho desenvolvido por Perkins (2000). Nesse trabalho foi empregado um geotêxtil com as propriedades mostradas na Tabela 4.4 e solo de subleito com as propriedades mostradas na Tabela 4.5.

Tabela 4.4. Propriedades do geotêxtil utilizado por Perkins (2000)

Tipo de polímero	Polipropileno
Estrutura	Tecido
Massa por unidade de área (g/m ²)	250
Tensão última a tração (kN/m)	31

Tabela 4.5. Propriedades do solo de subleito utilizado por Perkins (2000)

Peso específico seco máx. com energia normal(kN/m ³)	16
Humidade ótima (%)	20
CBR com humidade 45% (%)	1.5
Classificação ASTHO	A7

Resultados por Perkins (2000) mostram que os ensaios realizados com geotêxtil também diminuiram os deslocamentos verticais. Em ambas pesquisas a tendência dos deslocamentos é similar. Inicialmente ocorrem deslocamentos elevados com tendência à estabilização. Porém, no ensaio sem geotêxtil os deslocamentos continuam aumentando como apresentado na Figura 4.7.

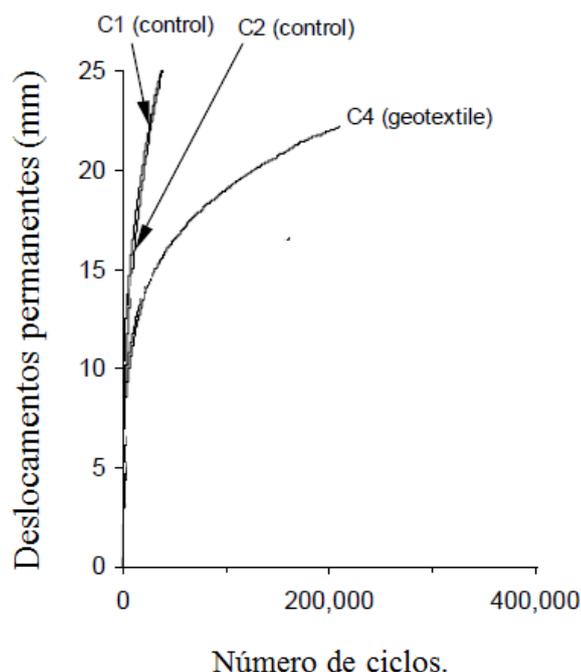


Figura 4.7. Resultados obtidos por (Perkins, 2000).

4.2. POROPRESSÕES.

Foram instalados dois piezômetros no subleito com o intuito de se medirem poropressões. Os piezômetros foram colocados dentro da camada de subleito, distanciados de 8 cm entre si, como mostrado na Figura 4.8. O piezômetro P1 é o que fica mais perto da interface brita-subleito e o piezômetro P2 é o mais profundo. Esses piezômetros permitiram comparar a influência da presença do elemento separador na geração de poropressões no subleito.

Durante cada ciclo de carga do ensaio, os solos passaram pelos seguintes estágios de carga e descarga:

1. O ensaio é iniciado com a configuração indicada na Figura 4.8a.
2. A carga é aplicada sobre a placa de aço, como mostrado na Figura 4.8b, e o solo é comprimido, diminuindo os seus vazios e elevando as poropressões.
3. Quando ocorre a fase de descarregamento durante o ciclo, o solo se expande e absorve água. Com a mudança de volume se gera sucção dentro do solo, fazendo com que as poropressões diminuam, com a possibilidade de atingirem valores negativos (Figura 4.8c).
4. No momento que os deslocamentos atingem seu nível máximo, as poropressões tendem a se estabilizar.

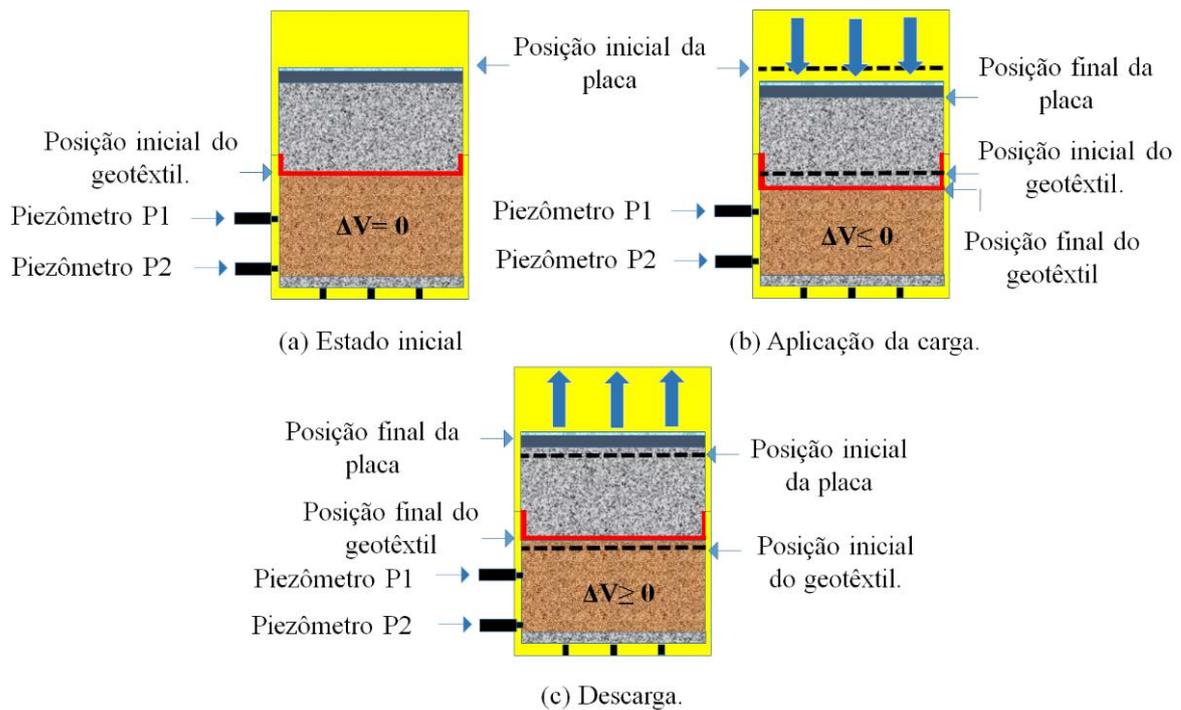


Figura 4.8. Mecanismo de deformação em cada ciclo de carga.

4.2.1. POROPRESSÕES DA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS

Inicialmente, a metodologia seguida na primeira etapa dos ensaios procurou a saturação do subleito. No entanto, comprovou-se mediante a medição de umidades finais do solo que a saturação não foi atingida, como é mostrado na Tabela 4.6. A saturação de 100% não foi atingida, apesar dos 5 dias em que o solo ficou submerso. Assim, na primeira etapa os ensaios foram realizados com solo compactado e não saturado.

Tabela 4.6. Valores de umidade e grau de saturação médios dos ensaios da 1ª etapa.

Umidade (%)	25.1
Grau de Saturação (%)	84

A Figura 4.9 mostra as variações de poropressões obtidas nos quatro ensaios realizados na primeira etapa. Nessa etapa, as pressões do piezômetro 1 são menores do que as obtidas pelo piezômetro 2 (mais profundo). Esse fato deve-se a que o P1 encontra-se mais perto da interface brita-subleito, com maior possibilidade de drenagem, além do efeito de carga e descarga descritos anteriormente.

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

As Figura 4.10 e 4.11 apresentam os valores de poropressões medidas nos piezômetros 1 e 2 em cada ensaio, mostrando que as poropressões no ensaio sem geotêxtil (C-SG) são maiores que aquelas dos ensaios com geotêxtil. Tal fato demonstra que os geotêxteis contribuíram para a dissipação de poropressões.

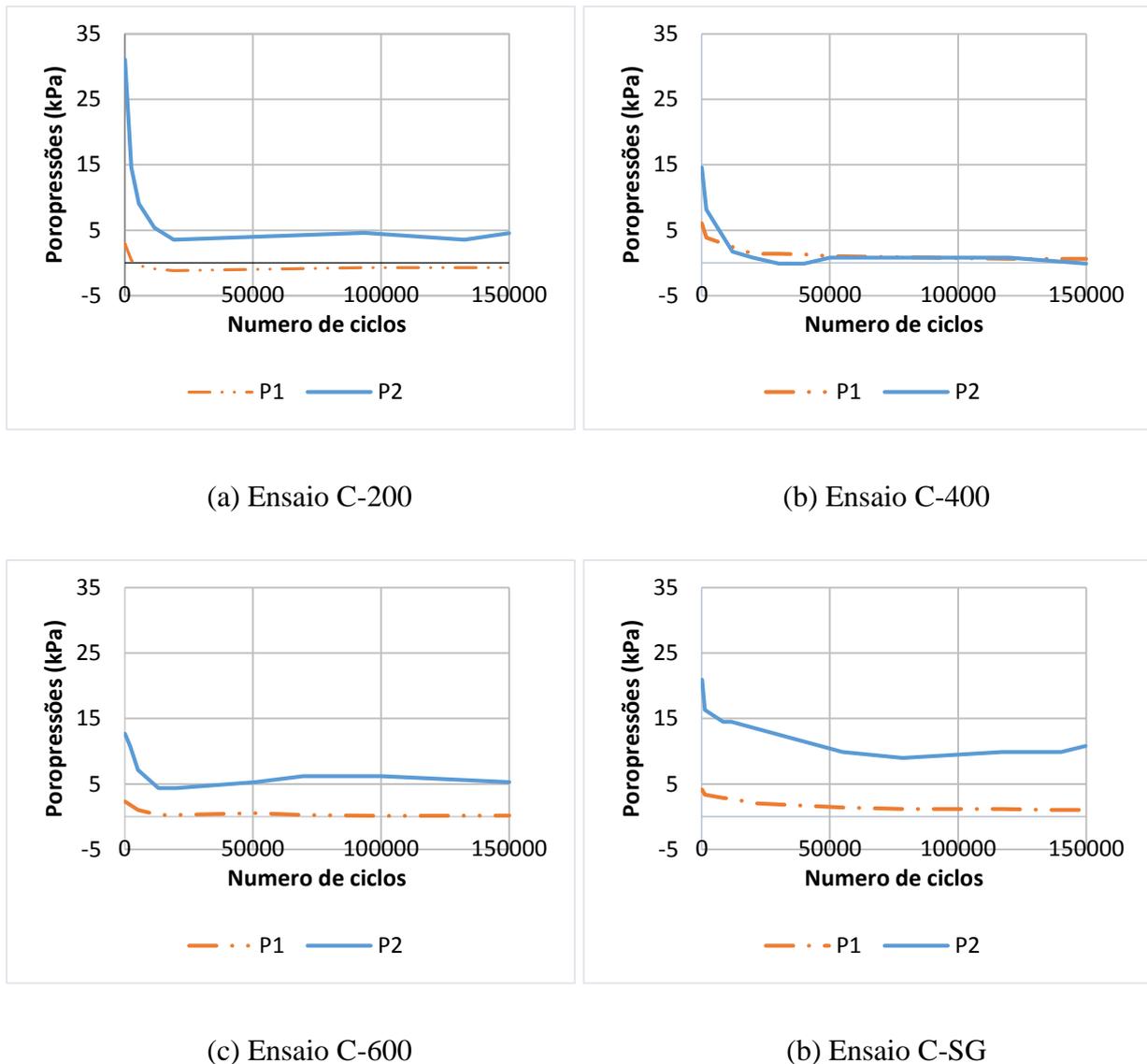


Figura 4.9. Poropressões *versus* número de ciclos da primeira etapa.

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram todos os resultados de variação de poropressão com número de ciclos de carga para todos os ensaios. Nota-se que os ensaios com geotêxtil resultaram em poropressões bem baixas (menores que 7 kPa), ou ligeiramente negativas, após cerca de 2000 repetições de carga.

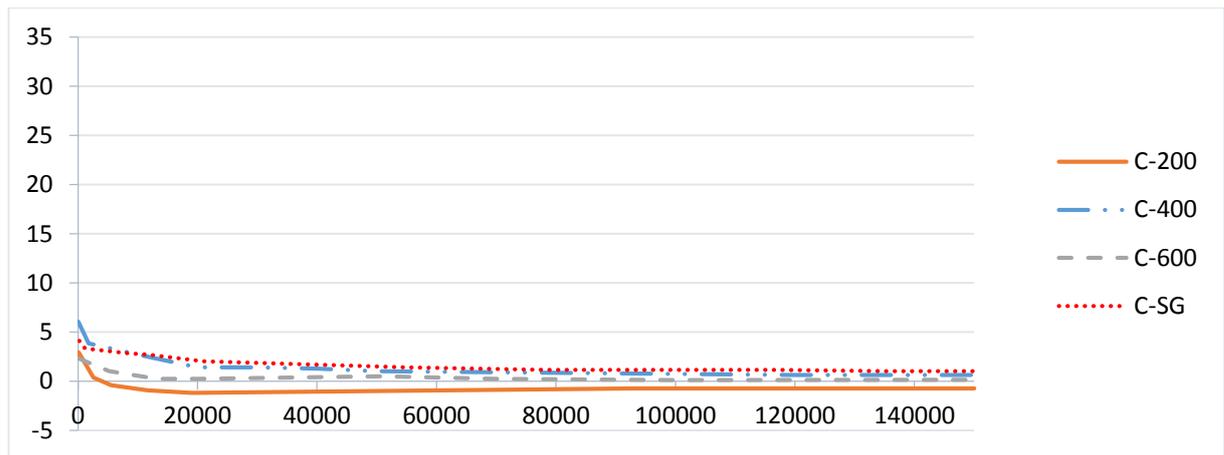


Figura 4.10. Poropressões medidas no piezômetro P1 – 1ª Etapa.

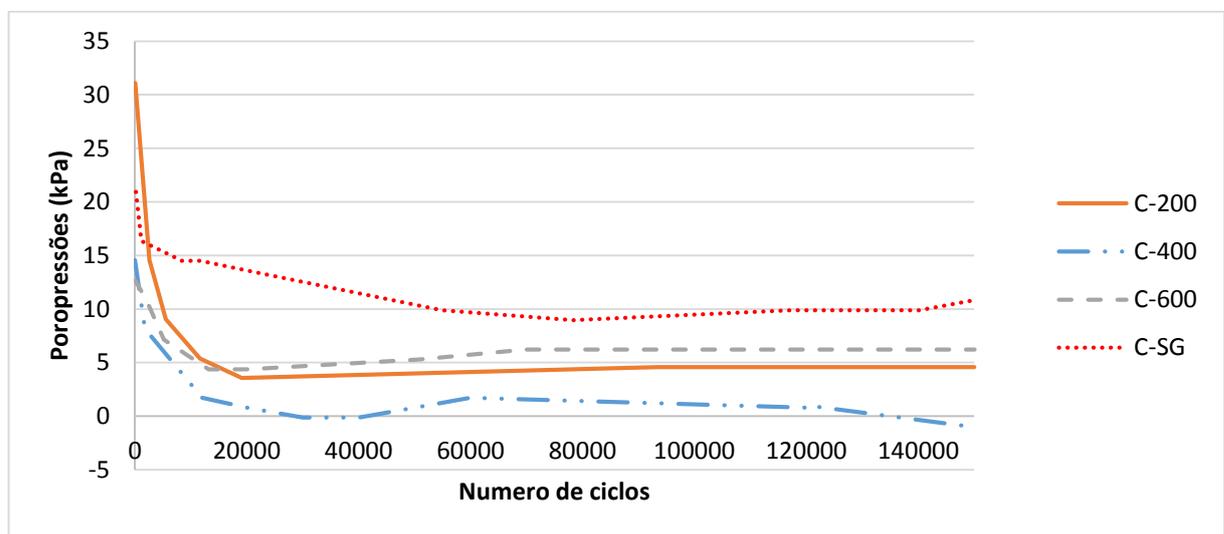
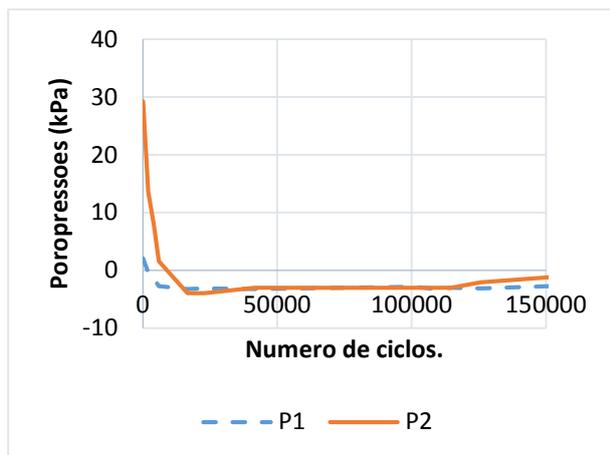


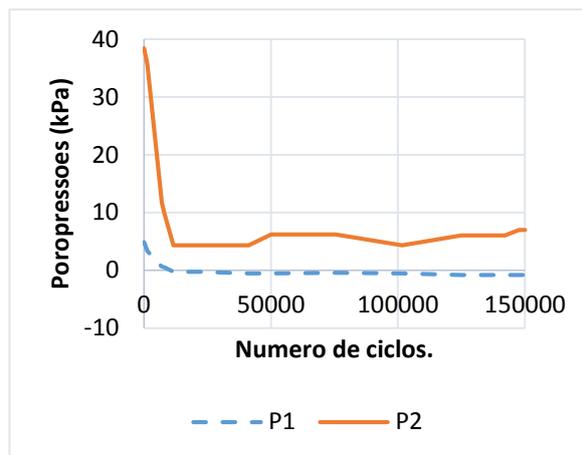
Figura 4.11. Poropressões medidas no piezômetro P2 – 1ª Etapa.

4.2.2. POROPRESSÕES NA SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS.

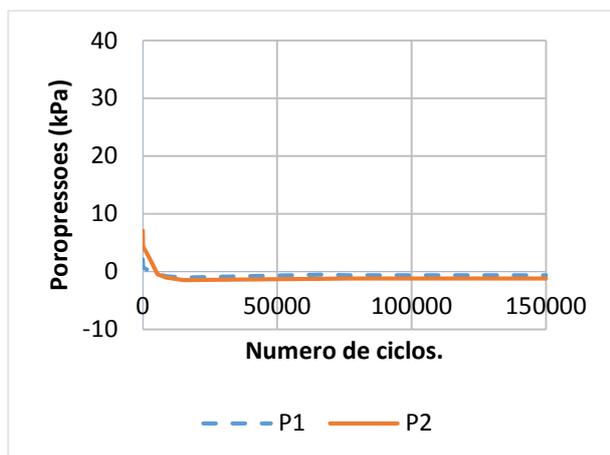
Na segunda etapa dos ensaios o solo de subleito foi saturado em decorrência do processo de preparação da amostra descrito anteriormente. Semelhantemente ao observado nos ensaios com subleito compactado (primeira etapa), o piezômetro P1 apresentou pressões menores que P2 na maioria dos casos. As poropressões geradas inicialmente (baixos valores de números de ciclos de carga) foram em geral maiores nos ensaios da segunda etapa, em decorrência do maior grau de saturação e maior compressibilidade do subleito neste caso. Também neste caso, a partir de 2000 ciclos de carga se observam valores de poropressões baixas, ou ligeiramente negativos.



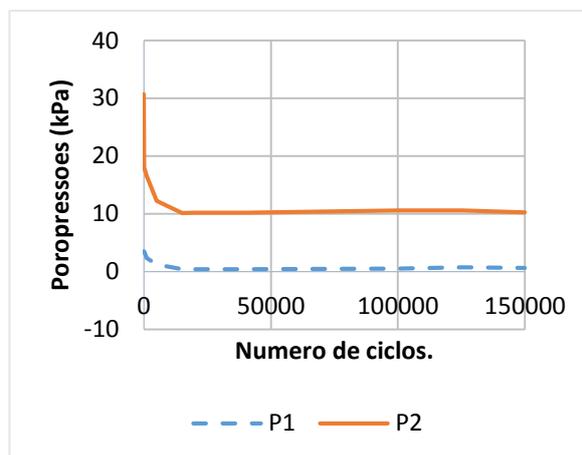
(a) Ensaio S-200



(b) Ensaio S-400



(c) Ensaio S-600



(d) Ensaio S-SG

Figura 4.12. Poropressões *versus* Número de ciclos - Segunda etapa.

As poropressões no ensaio sem geotêxtil foram maiores que nos ensaios com geotêxtil tanto no piezômetro P1 como no P2, o que pode ser observado nas

Figura 4.13 e 4.14. Assim, também na segunda etapa de ensaios a presença do geotêxtil contribuiu para a dissipação de poropressões geradas pelo carregamento.

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS



Figura 4.13. Poropressões *versus* número de ciclos no piezômetro P1- Segunda etapa.

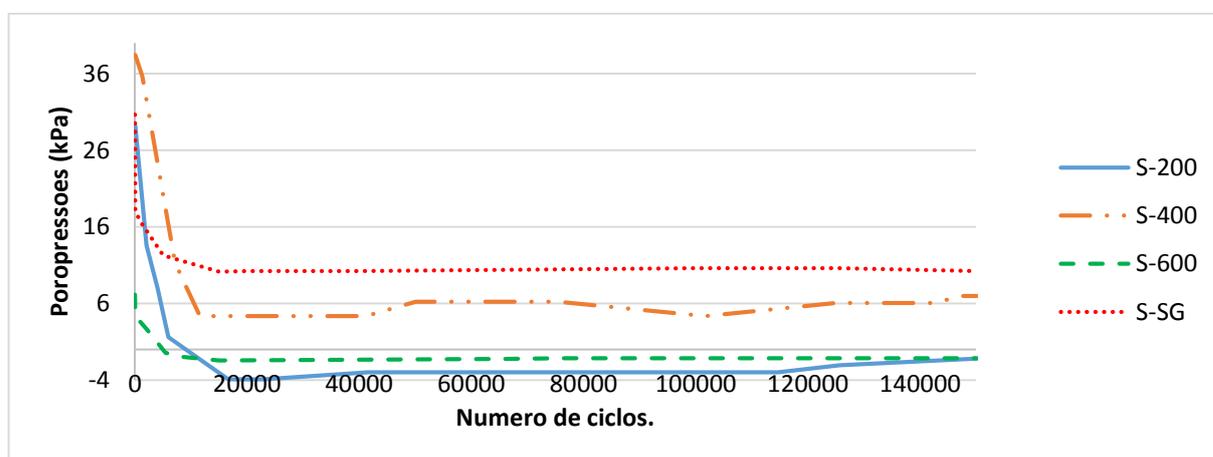


Figura 4.14. Poropressões *versus* número de ciclos no piezômetro P2 - Segunda etapa.

Por não terem sido encontrados na literatura ensaios similares aos descritos nesta dissertação que tenha medidas de poropressões, as pressões obtidas foram comparadas com resultados de ensaios oedométricos com carga cíclica. As variações de poropressões com o número de ciclos de carga obtidos nos ensaios oedométricos com carga cíclica reportados por Xiao-Yun *et al.* (1995) foram semelhantes às encontradas nessa dissertação. A Figura 4.15 apresenta o gráfico de poropressões versus deslocamento obtido pelo autor supracitado. Também nesse caso se observam significativa redução de poropressões, tendendo a zero.

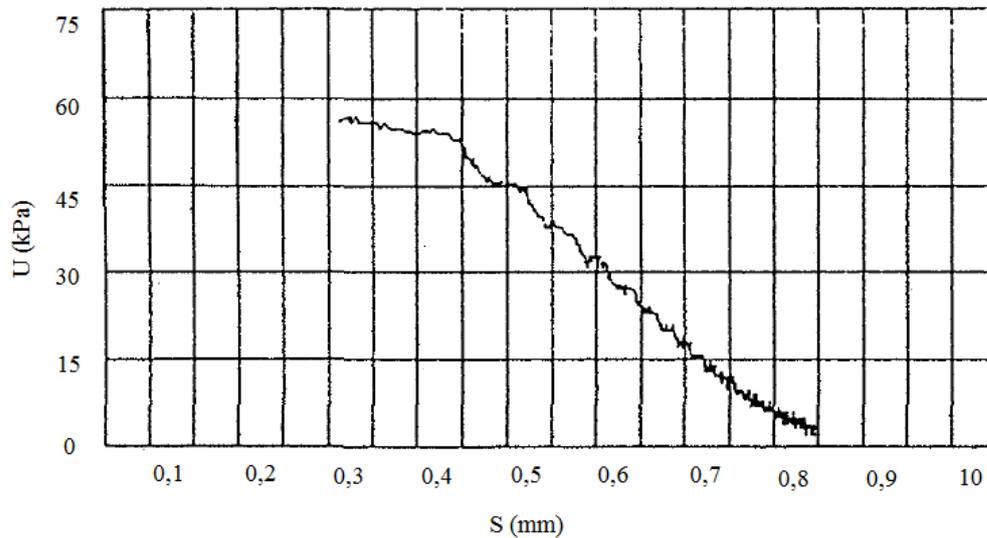


Figura 4.15. Poropressões versus deslocamento vertical (Xiao-Yun *et al.*, 1995)

A Figura 4.16 apresenta variações de poropressões com o número de ciclos de carga obtidas por Xie *et al.* (2006) em simulações numéricas de ensaios oedométricos (sem drenagem). Também nesse caso observou-se a geração de poropressões negativas.

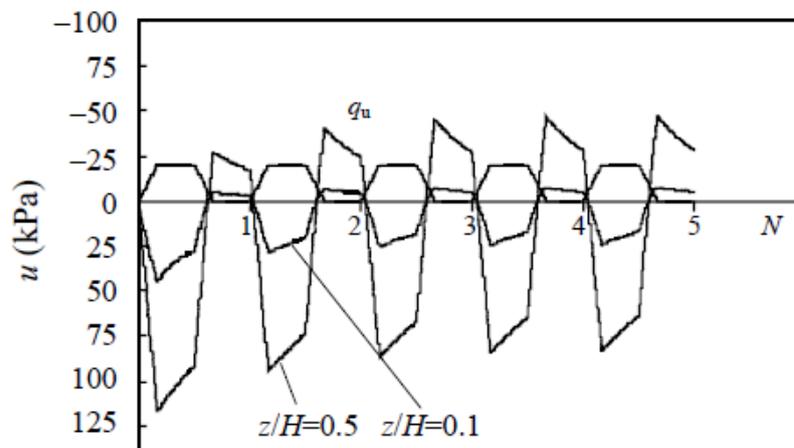


Figura 4.16. Poropressões versus número de repetições de carga (Xie *et al.* 2006).

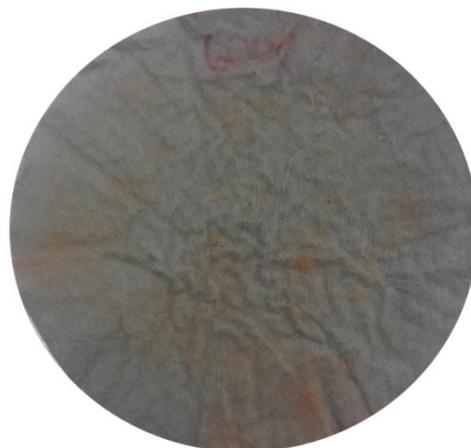
4.3. INSPEÇÃO VISUAL DOS GEOTÊXTEIS APÓS ENSAIO

A avaliação visual realizada sem a ajuda de nenhum equipamento, permitiu estabelecer se o geotêxtil foi danificado pela brita durante os ensaios. O geotêxtil foi lavado suavemente para tirar os restos visíveis de solo antes de se observar os possíveis danos. É possível observar na

Figura 4.17 o espécime do geotêxtil com 600 g/m^2 em três situações, quais sejam: (a) após o ensaio com o subleito não compactado; (b) após o ensaio com o subleito compactado; e, (c) a amostra virgem.



(a). Geotêxtil utilizado no ensaio S-600



(b). Geotêxtil utilizado no ensaio C-600



(c). Geotêxtil 600 g/m^2 virgem.

Figura 4.17. Imagens do geotêxtil 600 g/m^2 sob três condições.

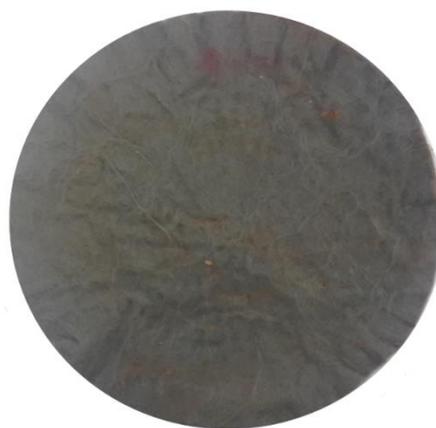
Na Figura 4.17 é possível observar que, após o ensaio, os geotêxteis apresentam marcas dos grãos de brita, mas nenhum tipo de rasgo ou dano foi identificado. A amostra S-600 apresentou uma coloração vermelha, indicando a presença de finos nos seus vazios.

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

Na Figura 4.18, apresentam-se imagens do espécime do geotêxtil com 400 g/m² antes e após os ensaios das etapas 1 e 2. A amostra S-400 apresenta maior coloração vermelha. Ambas as amostras ficaram com marcas e fios soltos após os ensaios, mas não apresentaram rasgos ou danos visíveis.



(a). Geotêxtil utilizado no ensaio S-400



(b). Geotêxtil utilizado no ensaio C-400



(c). Geotêxtil 400g/m² Virgem.

Figura 4.18. Imagens do geotêxtil de 400g/m² sob três condições.

Na Figura 4.19, são mostrados os espécimes do geotêxtil de 200 g/m² antes e depois dos ensaios. Foi possível observar nos geotêxteis uma coloração vermelha, mas também sem danos visíveis.



(a). Geotêxtil utilizado no ensaio S-200



(b). Geotêxtil utilizado no ensaio C-200



(c). Geotêxtil 200g/m² Virgem.

Figura 4.19. Imagens do geotêxtil de 200g/m² sob três condições.

Em geral, todas as amostras dos geotêxteis apresentaram alguns filamentos soltos e impressões da brita após os ensaios, mas sem danos visíveis. Nos ensaios realizados com o subleito não compactado foi possível observar uma maior coloração vermelha nos espécimes de geotêxtil após os ensaios.

4.4. IMPREGNAÇÃO DOS GEOTÊXTEIS E DA BRITA

4.4.1. ÍNDICE DE IMPREGNAÇÃO DO GEOTÊXTEL

As propriedades hidráulicas do geotêxtil são afetadas pela retenção de finos nos seus vazios. O índice de impregnação do geotêxtil é definido como a razão entre a massa de finos retidos dentro do geotêxtil e a massa do geotêxtil limpo.

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

A Tabela 4.7 apresenta os valores de índice de impregnação dos diferentes espécimes de geotêxteis após ensaios. Podem-se observar valores baixos de índice de impregnação, consequência da natureza coesiva do solo de subleito.

Tabela 4.7. Índice de impregnação dos geotêxteis.

Amostra	Índice de impregnação de finos
C-200	0,57
S-200	0,80
C-400	0,63
S-400	0,84
C-600	0,44
S-600	0,54

As Figura 4.20, 4.21 e 4.22 apresentam graficamente os índices de impregnação dos geotêxteis em ensaios com o solo de subleito compactado e não compactado. É possível observar maiores valores de índice de impregnação do geotêxtil no caso de subleito não compactado, associado a uma maior facilidade de migração de finos na direção do geotêxtil durante os ensaios.

O geotêxtil que teve uma maior diferença de índice de retenção de finos entre o ensaio compactado e o não compactado foi o de gramatura 200 g/m², tendo uma diferença de 0,23. Os geotêxteis de gramatura média e alta obtiveram a mesma diferença de índice sendo 0,1.

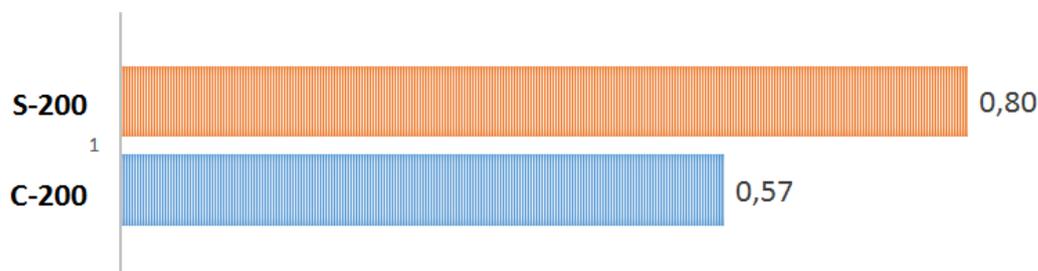


Figura 4.20. Índice de impregnação do geotêxtil com 200g/m².

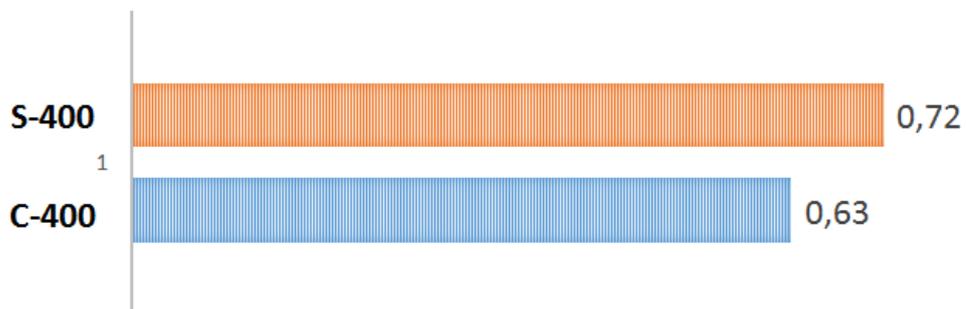


Figura 4.21. Índice de impregnação do geotêxtil com 400g/m².

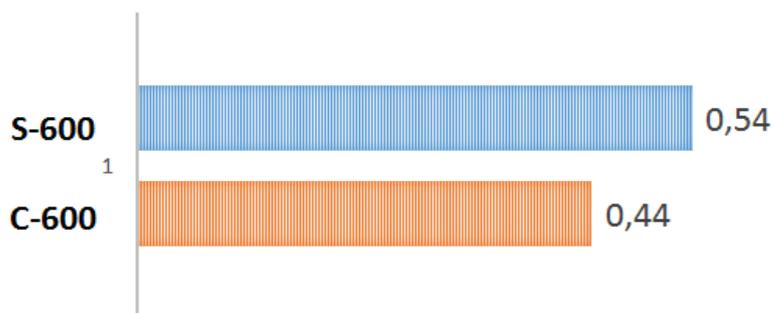


Figura 4.22. Índice de impregnação do geotêxtil com 600g/m².

4.4.2. IMPREGNAÇÃO DA BRITA NOS ENSAIOS SEM GEOTÊXTEL.

A Figura 4.23 apresenta a massa de finos que impregnou a brita ao final de ensaios sem a camada de geotêxtil separador. Pode-se observar que também nesse caso houve uma maior impregnação no ensaio com subleito não compactado. No caso dos ensaios com geotêxtil as massas de finos empregando a brita ao final dos ensaios pode ser considerada desprezível.

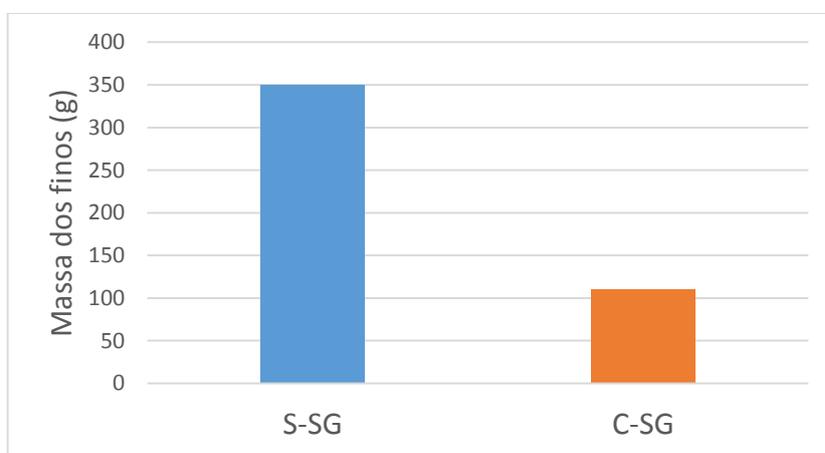


Figura 4.23. Massa dos finos que impregnaram à brita.

4.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS ESPÉCIMES DE GEOTÊXTIL APÓS ENSAIOS DE CARGA REPETIDA

Foram realizados ensaios de tração em faixa larga para a obtenção da resistência à tração dos espécimes geotêxteis utilizados nos ensaios de carregamento repetido, bem como em espécimes virgens visando verificar o nível de perda de resistência após ensaio. As Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 apresentam as curvas carga *versus* deformação obtidas para cada geotêxtil no estado virgem. Para cada tipo de geotêxtil foram realizados vários testes com o material virgem, e o valor médio é apresentado como valor final.

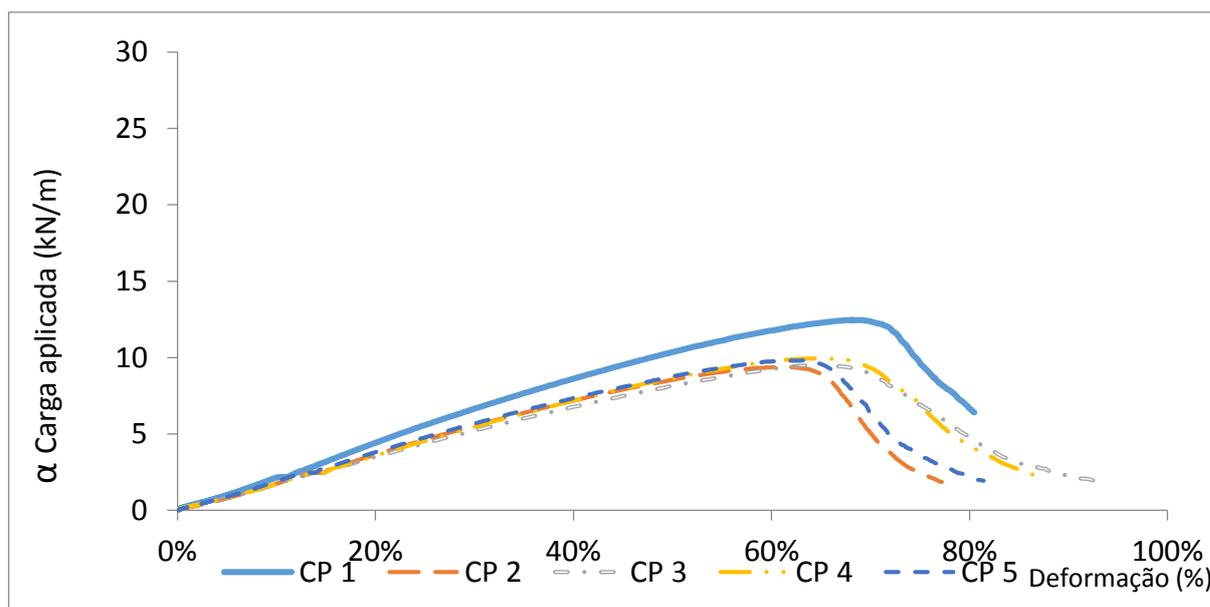


Figura 4.24. Curvas carga *versus* deformação do ensaio à tração no geotêxtil virgem com 200 g/m².

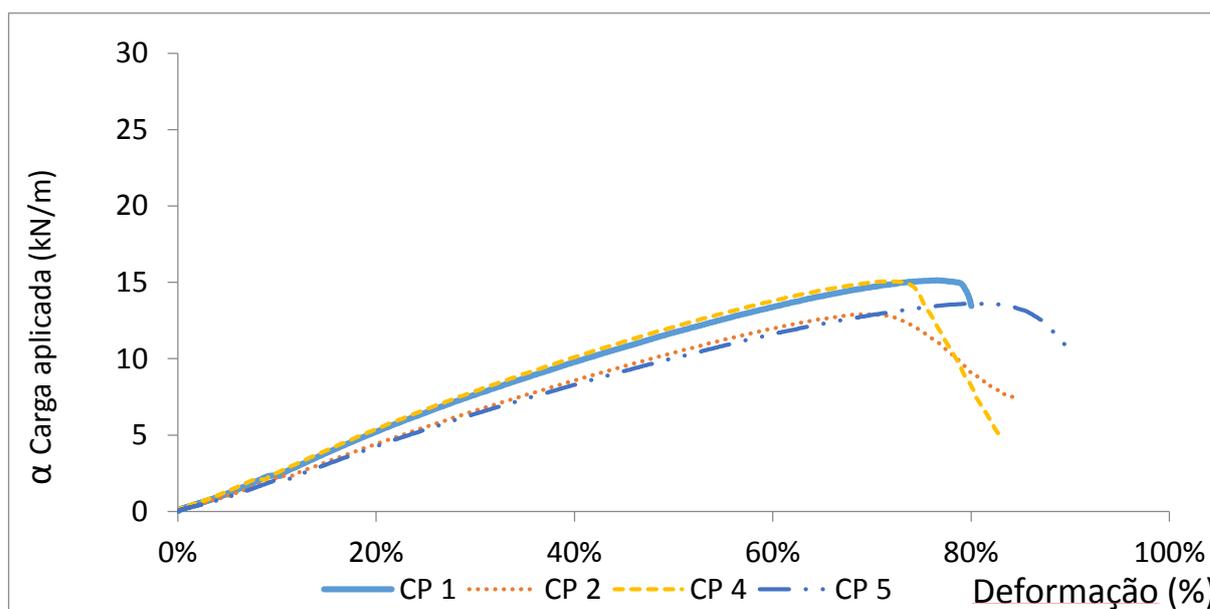


Figura 4.25. Curvas carga *versus* deformação do ensaio à tração no geotêxtil virgem com 400 g/m².

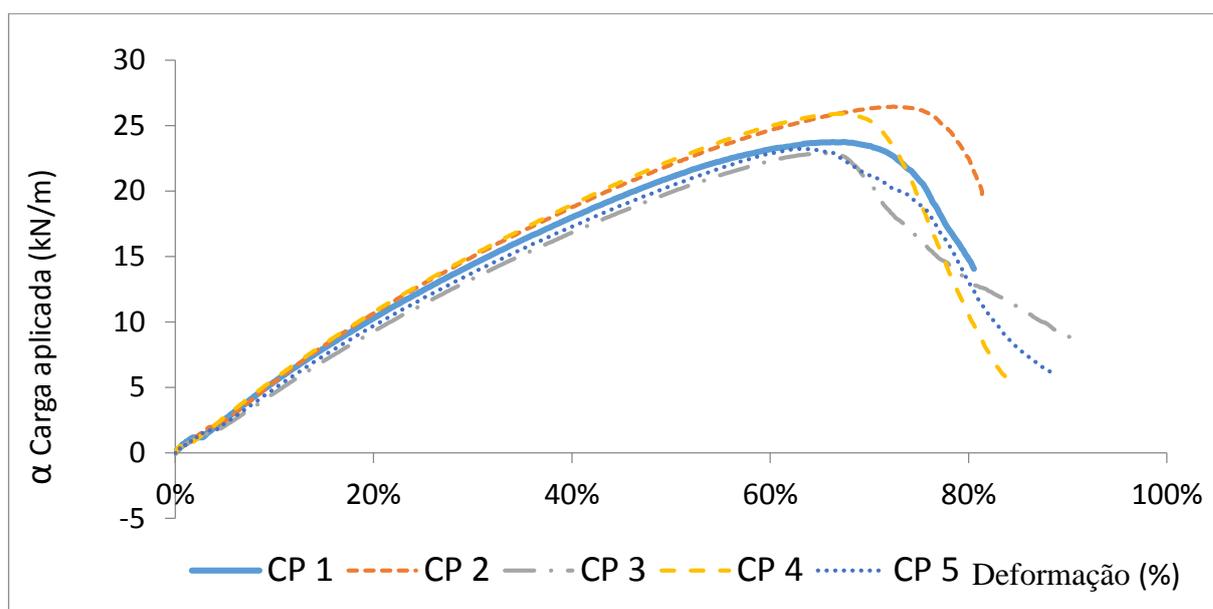


Figura 4.26. Curvas carga *versus* deformação do ensaio à tração no geotêxtil virgem com 600 g/m².

As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam os resultados de ensaios de tração nos espécimes de geotêxtil utilizados nas duas etapas de ensaios sob carga repetida. As Figuras 4.29 à 4.31 comparam os resultados de resistência à tração dos espécimes após ensaio de carregamento cíclico e em condições virgens. Pode-se observar que a maior redução de resistência à tração ocorreu para o geotêxtil com 200 g/m², no ensaio com subleito não compactado. Tal resultado é coerente, já que esse geotêxtil é o mais fino e o solo não compactado favorece a intrusão de grãos da brita no subleito, solicitando de forma mais significativa o geotêxtil a danos. Quanto maior a gramatura do geotêxtil, menor foi a diferença entre resistências à tração após ensaio e sob condições virgens.

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

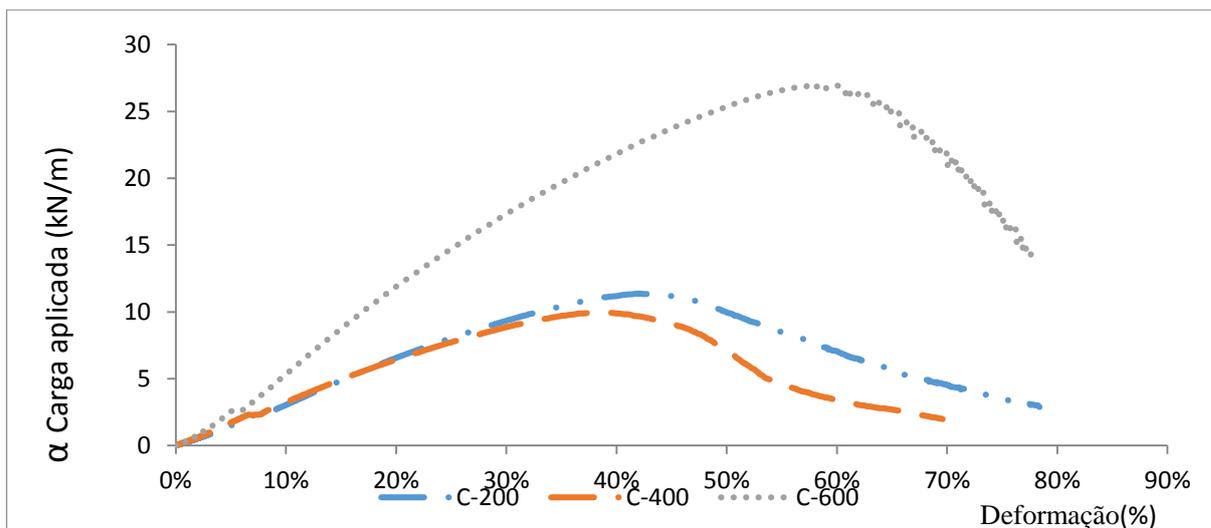


Figura 4.27. Curvas Carga Aplicada *versus* Deformação do ensaio a tração dos geotêxteis utilizado na primeira etapa de ensaios.

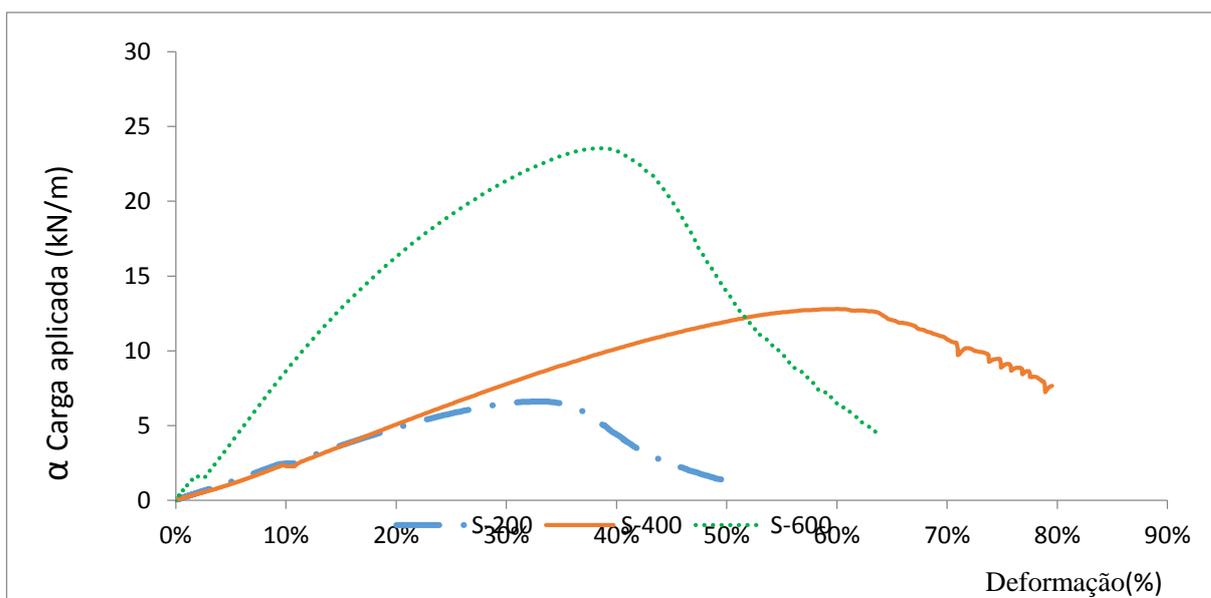


Figura 4.28. Curvas Carga Aplicada *versus* Deformação do ensaio a tração dos geotêxteis utilizado na segunda etapa de ensaios.

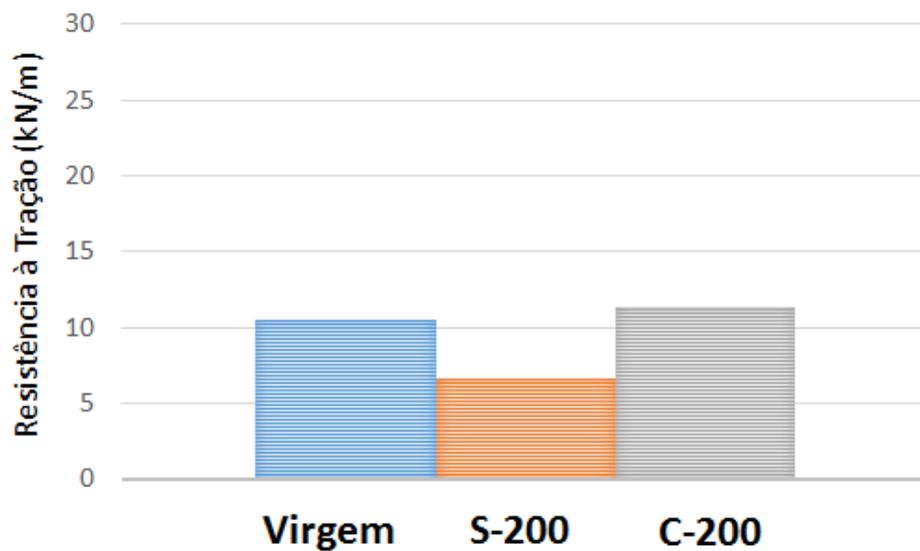


Figura 4.29. Resistência à tração dos geotêxteis com 200g/m².

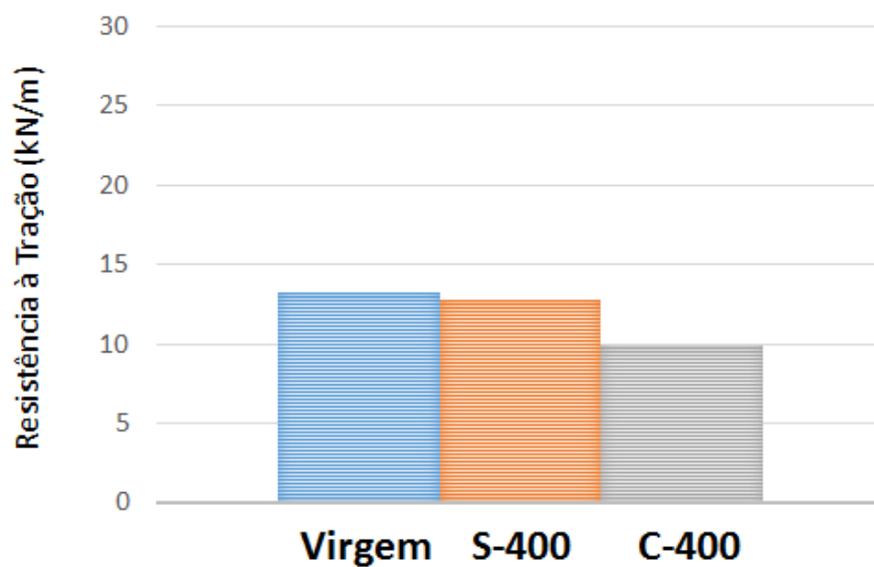


Figura 4.30 Resistência à tração dos geotêxteis com 400g/m².

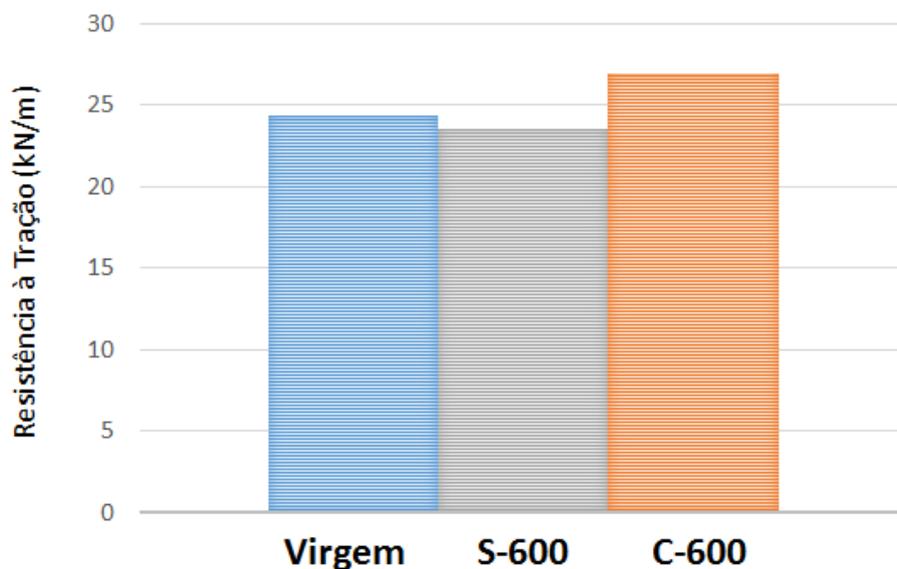


Figura 4.31. Resistência à tração dos geotêxteis com 600g/m².

A Figura 4.32, apresenta as deformações na ruptura observadas em ensaios em espécimes virgens e após ensaio de carregamento repetido. Nesse caso, não se observa uma tendência bem definida dos resultados.

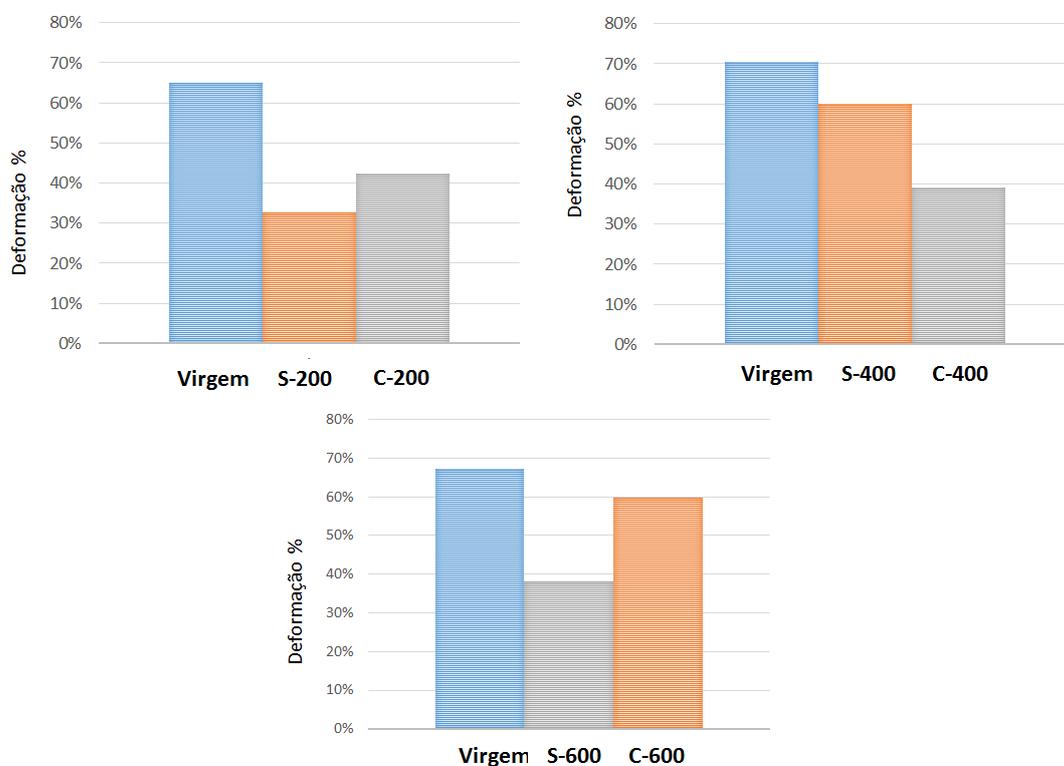


Figura 4.32. Deformações na ruptura em ensaios de tração em espécimes virgens e após ensaio de carga repetida.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.

5.1. CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou o desenvolvimento de equipamento, metodologia e resultados de ensaios em sistemas brita-geotêxtil (quando presente) -subleito visando o estudo do desempenho de geotêxteis não tecidos na função de separação. Três geotêxteis com diferentes gramaturas e duas condições de solo de subleito (com e sem compactação) foram utilizados nos ensaios. O sistema foi submetido a carregamento cíclico com frequência de 1 Hz. Dos experimentos realizados e das análises efetuadas foram obtidas as seguintes conclusões:

- Nas duas fases dos ensaios, a utilização de um geotêxtil não tecido como elemento separador diminuiu as deformações do sistema brita-geotêxtil-subleito. O geotêxtil não tecido utilizado como elemento separador sobre um solo fino minimizou a migração das partículas do subleito para a camada base e a mistura dos solos das camadas.
- Nas duas etapas de ensaios, nos testes com geotêxtil, a brita se mostrou praticamente limpa ao final do ensaio. No entanto, nos ensaios sem geotêxtil, a brita penetrou no solo de subleito.
- Com base a os resultados obtidos na segunda fase se pode evidenciar que com um solo não compactado qualquer geotêxtil como elemento separador ajuda a diminuir as deformações.
- Nos ensaios com geotêxtil não se evidenciou uma diferença significativa entre deslocamentos totais no topo do sistema.
- As poropressões resultantes dos ensaios demonstraram que a utilização de um geotêxtil não tecido como elemento separador promoveu uma melhor dissipação de poropressões geradas durante os carregamentos.
- Em termos de índice de impregnação, o geotêxtil que apresentou menor retenção de partículas finas foi o de maior gramatura (600 g/m^2). A baixa impregnação pode ser um bom indicador de uma menor susceptibilidade à colmatação, assegurando o bom funcionamento do geotêxtil como elemento drenante e separador.

- Nas duas etapas dos ensaios, o geotêxtil de maior gramatura foi o que apresentou menor perda de resistência à tração após os ensaios de carregamento cíclico. No ensaio com subleito não compactado, o geotêxtil de menor gramatura (200 g/m²) foi o que apresentou maior perda de resistência à tração, chegando a reduções de até 60% em relação ao resultado para o mesmo geotêxtil no estado virgem.
- A deformação máxima no ensaio à tração em faixa larga após o carregamento cíclico foi alterada para todos os geotêxteis.
- Na comparação dos resultados obtidos nos ensaios com os três geotêxteis foi possível observar um comportamento similar nos valores de deslocamentos no topo do sistema e geração/dissipação de poropressões. No entanto, no que se refere à retenção de partículas do subleito, resistência à tração após os ensaios e deformação máxima à tração, a melhor resposta foi a dos geotêxteis de maior gramatura (600 g/m² e 400 g/m², respectivamente). Levando-se em conta que o geotêxtil utilizado para a separação de camadas deve sobreviver durante toda a vida útil, os resultados obtidos nessa pesquisa, e para os tipos de geotêxteis ensaiados, mostram que na função de separação eles devem ter gramaturas não inferiores a 400 g/m², preferencialmente não inferiores a 600 g/m² para solos finos como o utilizado nesta pesquisa.

5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

São as seguintes as sugestões para a continuidade de pesquisas sobre a utilização de geotêxteis na função de separação:

- Avaliar a utilização de outros tipos de geotêxteis não tecidos, com base na mudança de gramatura, na resistência a tração e no processo de fabricação.
- Realizar ensaios da granulometria das partículas finas passantes e retidas no geotêxtil. Esta é uma das sugestões mais importantes, uma vez que permitirá avaliar a capacidade de retenção do geotêxtil no que se refere à migração das partículas do subleito para a camada de base.
- Executar ensaios com esferas de aço, ao invés de brita, a fim de eliminar as partículas finas advindas da quebra de grãos da camada de brita que possam se depositar sobre o geotêxtil.

- Utilizar diferentes tipos de materiais. Mudar a granulometria da brita com o intuito de observar se outro tipo de brita danifica ainda mais o geotêxtil. Mudar o tipo de solo de base para se observar como se comporta o geotêxtil diante de outras situações de subleito.
- Realizar ensaios com diferentes intensidades de carga e frequência de aplicação do carregamento superficial.
- Realizar ensaios de campo sob condições mais próximas às encontradas em um pavimento rodoviário.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, P. R. & Vertematti, J. C. (2004). Introdução. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Editora Edgard Blucher, São Paulo, pp. 1-12.
- Andrade, H. (2010). Avaliação de geotêxteis como elementos de separação em camadas de pavimentos. Seminário de doutorado. Universidade de Brasília. 21 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 6459. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7181. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). NBR 7182. Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987). NBR 9895. Solo - Ensaio de expansão. Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987). NBR 9895. Solo - Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR 6508. Solo – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1982). NBR 7207. Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, RJ.
- American Society for Testing Materials (1996). ASTM D5261 - 10. Standard test method for measuring mass per unit area of geotextil. U.S.A.
- American Society for Testing Materials (1996). ASTM D3786 - 01. Standard Test Method for Hydraulic Bursting Strength of Textile Fabrics—Diaphragm Bursting Strength Tester Method. U.S.A.
- Bidim Mexichem (2009). Soluções em geossintéticos 40 anos. São Jose dos campos, SP.
- Bueno, B.S. & Vilar, O.M. (2004). Propiedades, ensaios e normas. Manual Brasileiro de geossintéticos, São Paulo, pp. 25–62.
- Christopher, B.R. & Holtz, R.D. (1985). Geotextile Engineering Manual. Federal Highway Administration FHWA, 1044 p.
- Departamento Nacional de Estradas De Rodagem (1998). DNER-ME 035/98. Agregados-determinação da abrasão“los angeles.”. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas De Rodagem (1994). DNER-ME 086/94. Agregado - determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2003). DNIT 005/2003. Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos Terminologia. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2004). DNIT 061/2004. Pavimento rígido - Defeitos - Terminologia. Rio de Janeiro, RJ.

- Eichernauer, T., Gobel, T. & Lieberenz, K. (1994). Performance of geotextiles in railroad laboratory testing. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, Singapore.
- Fajardo, A. & Rodriguez, S. (1999). Diseño Racional de Elementos Filtrantes para Sistemas de Subdrenaje. Pontificia Universidad Javeriana.
- Fannin, R. & Sigurdsson, O. (1996). Observações de campo sobre a estabilização de estradas não pavimentadas com geossintéticos. *Rev. Eng. Geotec.*, 122: 544–553.
- Faure, Y. H., Gourc, J.P. and Gendrin, P. (1990). Geosynthetics: Microstructure and Performance. Philadelphia, 171 p.
- Figueiredo, P. (2009). Reforço de subestruturas de vias férreas com geossintéticos. Universidade do Porto, 66 p.
- Giroud, J.P. & Noray, L. (1984). Geotextiles and geomembranes, definitions, Properties and disigns. *Ind. Fabr. Assoc. Int.*
- Giroud, J. P. Raymond, G.P. (1996). Granular filters and geotextile filters. *Geofilters*, Jean Lafleur, A.L.R. (Ed.), Montreal, Quebec, pp. 680.
- Black, P. J. & Holtz R. D. (1996). Performance of geotextile separators five years after installation.
- IGS. (2015). Classificação dos Geossintéticos [WWW Document]. URL <http://igsbrasil.org.br/os-geossinteticos>.
- IGS. (2011). Folletos educativos sobre geosintéticos y sus aplicaciones. I seminario argentino sobre aplicacion de geosinteticos., Buenos Aires, 29.
- IPEA (2010). Rodovias Brasileiras: Gargalos, Investimentos, Concessões e preocupações com o futuro, Série Eixos do Desenvolvimento Brasileiro, comunicados do IPEA nº 52, Brasília, DF, 1 – 20 p.
- IPEA (2012). Rodovias brasileiras: investimentos, concessões e tarifas de pedágio. , comunicados do IPEA nº 144, Brasília, DF, 1 – 6 p.
- Koerner, R. (2005). Designing with geotextiles. *Designing with Geosynthetics*, Svendsen, E. (Ed.), pp. 796.
- Bernucci, L.B., Goretti L. Pereira, J.B., & Barbosa, J. (2008). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros, PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, pp. 501 p.
- Lopes, L.G.R. (1992). Aplicação de geotêxteis à pavimentação rodoviária. Seminário sobre aplicação de geossintéticos em geotecnia. Universidade de Brasilia, 301–330 p.
- Lynx. (2003). Manual do usuario. Aqdados 7,02.
- Mendes, M.J.A. (2006). Comportamento Carga-Alongamento de Geotêxteis Não Tecidos Submetidos à Tração Confinada. Universidade de Brasilia, 152 p.
- Obando Ante, J.R. (2012). Geossintéticos como reforço de revestimentos em pavimentação. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasilia, 99 p.
- Palmeira, E. (1996). Notas de aula. Instrumentação geotécnica. 37p.
- Palmeira, E. & Cardoso, E. (2004). Aplicações em separação de materiais. Manual Brasileiro de geossintéticos, Vermatti, J. (Ed.), São Paulo, pp. 413.
- Palmeira, E.M. (2013). Notas de aula. Estradas não pavimentadas. 18p.

- Palmeira, E. M. (2013). Notas de aula. Apresentação sobre geossintéticos. 28p
- Palmeira, E. M. (2013). Ensaaios em geossintéticos. 39p.
- Palmeira, E.M. & Gardoni, M.G. (2000). Geotextiles in filtration: a state-of-the-art review and remaining challenges. International symposium Geosynthetics-GeoEng, Melbourne, Australia, 85–110p.
- Pavco, D. de ingenieria-G. (2012). Manual de Diseño con Geosinteticos. Bogota D.C. Colombia, 474 p.
- Perkins, S.W. (2000). Mechanical response of geosynthetic-reinforced flexible pavements. *Geosynth. Int.*, 6(5): 347–382.
- Potti, J.J. (2014). IX jornada nacional de asefma. *Asf. y Pavimentación* n. 1, Volume 4. 60p.
- Rufo, R. (2013). Avaliação do comportamento de geotêxteis como elementos de separação em camadas de pavimentos. exame de qualificação. Universidade de Brasilia. 50 p.
- Sanjay Kumar Shukla. (2002). *Geosynthetics and their Applications*. London, 414 p.
- Souza, B.B. (2007). Um panorama do desempenho de geossintéticos comercializados no país sob a ótica de ensaios de laboratório. *Dep. Geotec. Univ. São Paulo, São Carlos, Bras.*, : 8.
- Souza, L. (2008). Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos. Dissertação de Doutorado. Universidade de Brasilia, 158 p.
- Tatto, J. (2010). Comportamento Filtrante de Geotêxteis Não Tecidos Sob Diferentes Condições de Apoio. Universidade de Brasilia, 172 p.
- Vidal, D.M. (n.d.). Manual técnico geossinteticos Bidim.
- Villibor, D.F., Fortes, R.M., Fortes, F.Q. & Nogueira, C. (2005). Deterioração estrutural de bases de solo-cimento e granulares. *Reunião Anual de Pavimentação – 36ª RAPv*, Curitiba.
- Wilmers., W. (2007). The use of geosynthetics as separators in civil engineering. *Geosynthetics in Civil Engineering.*, Sarsby, R.W. (Ed.), Germany, pp. 295.
- Xiao-Yun, G., Da-Neng, X. & Deng, W. (1995). A computing model based on cyclic consolidation test. *The Fifth International symposium on Land Subsidence*, The Hague, 295–303.
- Xie, K., Qi, T. & Dong, Y. (2006). Nonlinear analytical solution for one-dimensional consolidation of soft soil under cyclic loading.
- Zornberg, J.G., Prozzu, J., Gupta, R., Rong, L., McCartney, J.S., Ferreira, J.Z. & Nogueira, C. (2008). *Validating Mechanisms in Geosynthetic Reinforced Pavements*. University of texaas at Austin, 267 p.