

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**COMPORTAMENTO DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA REFORÇADA COM
GEOSSINTÉTICO SOBRE SUBLEITO COM BOLSÃO COMPRESSÍVEL**

TAMYRES KARLA DA SILVA

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G-DM-315/18

BRASÍLIA/DF: AGOSTO/2018

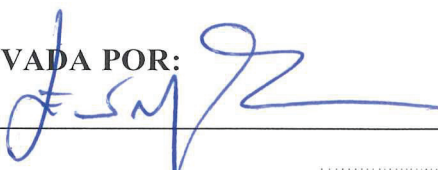
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

COMPORTAMENTO DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA REFORÇADA COM
GEOSSINTÉTICO SOBRE SUBLEITO COM BOLSÃO COMPRESSÍVEL

TAMYRES KARLA DA SILVA

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

APROVADA POR:



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



IVONNE ALEJANDRA M. GUTIÉREZ GÓNGORA, D.Sc.
(COORIENTADOR)



GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



LUCIANA MICHÈLLE DELLABIANCA ARAÚJO, D.Sc. (DNIT)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 24 de AGOSTO de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, TAMYRES KARLA

Comportamento de estrada não pavimentada reforçada com geossintético sobre subleito com bolsão compressível. [Distrito Federal] 2018

xviii, 101 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| 1. Estrada não pavimentada | 2. Reforço Geossintético |
| 3. Bolsão compressível | 4. Carregamento cíclico |
| I. ENC/FT/UnB | II. Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, T. K. (2018). Comportamento de estrada não pavimentada reforçada com geossintético sobre subleito com bolsão compressível. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 101 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Tamyres Karla da Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Comportamento de estrada não pavimentada reforçada com geossintético sobre subleito com bolsão compressível

GRAU/ANO: Mestre/2018

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

Tamyres Karla da Silva

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

tamyreskarla@gmail.com

DEDICATÓRIA

*Dedico esta dissertação à minha família
e à Deus pela conquista.*

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação é uma conquista pessoal, resultado de muito esforço e dedicação. No entanto, nada disso seria possível sem a contribuição de cada pessoa que fez parte desta conquista.

Agradeço à minha família pelo apoio, mesma estando a 1.000 km de distância, e por aceitar minha escolha de vir para Brasília e compreender minha ausência em diversas ocasiões.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Ennio Marques Palmeira, pela oportunidade de realizar este trabalho, por estar sempre disponível para sanar minhas dúvidas e por acreditar na minha capacidade mesmo diante das dificuldades encontradas.

À Ivonne pela solicitude durante todo o trabalho e por suas contribuições como Coorientadora. Sua ajuda foi essencial para que eu pudesse desenvolver essa pesquisa experimental.

Ao meu namorado, André, pelas inúmeras horas despendidas no laboratório, por me ajudar e me apoiar nas minhas decisões. Seu apoio físico na montagem dos ensaios e emocional diante dos percalços encontrados no caminho foi muito importante.

À empresa Huesker pelo apoio à pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia da UnB, em especial ao Saimo. Ao responsável pelo Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Prof. Jefferson Lins da Silva, e os respectivos técnicos pelo apoio na realização dos ensaios de tração das geogrelhas estudadas. Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Mecânica da UnB, em especial ao Wesley, por realizar a manutenção do equipamento de ensaio.

Aos colegas de laboratório, em especial ao Nelson, Ana Carolina e Luiza, que me auxiliaram diversas vezes. Agradeço também pelas amigas que surgiram neste mestrado, em especial à Ana Paola, que esteve sempre presente ao longo desses anos.

Agradeço aos colegas de trabalho Alexandre Gil, Viviane, Marcos, Vagner e aos demais pelo apoio.

Agradeço ao CNPQ pelo apoio financeiro na pesquisa.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma maneira para a realização deste trabalho.

COMPORTAMENTO DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA REFORÇADA COM GEOSSINTÉTICO SOBRE SUBLEITO COM BOLSÃO COMPRESSÍVEL

RESUMO

Os geossintéticos vêm se destacando como soluções para aumentar a vida útil de estradas não pavimentadas, sendo uma alternativa de execução mais prática e rápida, podendo ser mais vantajosa que as soluções convencionais. Além dos problemas que frequentemente afetam o desempenho de estradas não pavimentadas, destaca-se a presença de bolsões compressíveis ou cavidades no subleito. Estes bolsões levam a rupturas localizadas, provocando recalques diferenciais da via e acelerando sua degradação. Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho de estradas não pavimentadas reforçadas com geossintético sobre subleito com bolsão compressível, por meio de ensaios de carregamentos cíclicos em equipamento de grandes dimensões. Foram ensaiadas três configurações de estradas não pavimentadas, a saber, sem bolsão e sem reforço; com bolsão e sem reforço e; com bolsão e com reforço. Foram escolhidas três geogrelhas com propriedades mecânicas semelhantes e características geométricas distintas. Para simular os bolsões compressíveis nos diâmetros de 14 cm, 18 cm e 23 cm, foi empregada uma espuma cilíndrica com 10 cm de altura. A espuma foi posicionada no subleito no eixo de aplicação do carregamento e o reforço geossintético entre as camadas de subleito e aterro, ou seja, imediatamente acima do bolsão compressível. Os critérios adotados para o término dos ensaios foram o afundamento de 75 mm da placa de carregamento ou 270.000 ciclos aplicações de carga. O desempenho dos reforços e a influência dos diferentes diâmetros do bolsão compressível puderam ser avaliados pela comparação dos resultados obtidos em termos de tensões totais transferidas ao subleito, deslocamentos superficiais e fatores de eficiência. Para os ensaios não reforçados, verificou-se que a presença do bolsão de 14 cm de diâmetro pouco afetou no desempenho da estrada simulada. Já a presença dos bolsões de 18 cm e 23 cm de diâmetro provocaram uma redução de até 99,5% no número de ciclos de cargas suportados pela estrada. Nos ensaios reforçados, pôde-se obter uma relação entre o comportamento mecânico da estrada e a abertura da malha das geogrelhas, em função da influência dos diferentes diâmetros adotados para os bolsões. De modo geral, o emprego das geogrelhas levou a resultados satisfatórios, reduzindo o nível de deformações superficiais na via ou elevando o número de repetições de carga suportados pela estrada, o que, para condições reais de campo, resulta num aumento na vida útil da estrada.

BEHAVIOR OF UNPAVED ROAD REINFORCED WITH GEOSYNTHETICS ON SUBGRADE WITH LOCALIZED COMPRESSIBLE REGION

ABSTRACT

Geosynthetics have been standing out as a solution to enhance the service life of unpaved roads, it has been a more practical and fast execution alternative and can be more advantageous than the conventional solutions. In addition to other problems that often affect the performance of unpaved roads, the presence of localized compressible regions or cavities in the subgrade is notable. These cavities lead to localized ruptures, causing differential settlements of the road and accelerating its degradation. In this context, this research aimed to evaluate the performance of unpaved roads reinforced with geosynthetics on a subgrade with compressible localized region, by performing cyclic load tests in a large-scale equipment. Three configurations of unpaved roads were tested: without the compressible localized region without reinforcement; with the compressible localized region and without reinforcement and; with the compressible localized region with reinforcement. Three geogrids with similar mechanical properties and different geometric characteristics were used. To simulate the compressible localized region in the diameters of 14 cm, 18 cm and 23 cm, a cylindrical foam with height of 10 cm was used. The foam was placed on the subgrade in the loading axis and the geosynthetic reinforcement was inserted between the subgrade and the base course, in other words, immediately above the localized compressible region. The criteria adopted to finish the tests were the sinking of 75 mm of the loading plate or 270.000 cycles load applications. The performance of the reinforcements and the influence of the different diameters of the compressible localized region were evaluated by comparing the results obtained in terms of total stresses transferred to the subgrade, surface displacements and values of traffic benefit ratio. For the unreinforced tests, it was verified that the presence of the localized compressible region of 14 cm in diameter had minor effects on the performance of the simulated road. The presence of the pockets of 18 cm and 23 cm in diameter caused a reduction of up to 99,5% in the number of load cycles supported by the road. In the reinforced tests, it was possible to obtain a relation between the mechanical behavior of the road and the geogrid geometry, as well as the influence of the different diameters adopted for the localized compressible region. In general, the use of geogrids has led to satisfactory results by reducing the vertical displacements at the road surface and by increasing the number of loading cycles supported by the road, which, for real conditions, would result in an increase of the road service life.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.3	ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	4
2.1.1	Características técnicas de estradas não-pavimentadas.....	4
2.1.2	Problemas frequentes em estradas não pavimentadas.....	5
2.2	PRESENÇA DE BOLSÕES COMPRESSÍVEIS NO SOLO	8
2.3	GEOSSINTÉTICOS	9
2.3.1	Tipos e principais funções.....	9
2.3.2	Propriedades dos geossintéticos	11
2.4	MECANISMOS DE AÇÃO DO REFORÇO GEOSSINTÉTICO.....	12
2.5	MECANISMOS DE CARREGAMENTO DO GEOSSINTÉTICO SOBRE BOLSÕES COMPRESSÍVEIS	15
2.6	ESTUDOS REALIZADOS ABORDANDO A APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	16
2.7	ESTUDOS REALIZADOS ABORDANDO A APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS SOBRE CAVIDADES EM SOLOS	18
3	MATERIAIS UTILIZADOS E METODOLOGIA	21
3.1	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS.....	21
3.1.1	Subleito.....	21
3.1.2	Aterro	24
3.1.3	Bolsão compressível.....	28
3.1.4	Reforço geossintético	29
3.2	EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE CARREGAMENTO CÍCLICO.....	31

3.3	INSTRUMENTAÇÃO	33
3.3.1	Célula de carga	33
3.3.2	Célula de tensão total	34
3.3.3	Transdutores de deslocamento linear	35
3.3.4	Aquisitor de dados.....	36
3.4	PROGRAMA DE ENSAIOS	36
3.5	DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO	37
3.5.1	Preparação do equipamento de ensaio	39
3.5.2	Disposição da camada de subleito.....	39
3.5.3	Instalação da instrumentação do subleito.....	40
3.5.4	Instalação do reforço geossintético	41
3.5.5	Disposição da camada de aterro	42
3.5.6	Instalação da instrumentação superficial.....	43
3.5.7	Execução dos ensaios de carregamento cíclico.....	44
3.5.8	Determinação do índice de quebra dos grãos (B_g)	45
3.5.9	Determinação do ângulo de espraiamento de tensões (β)	46
3.5.10	Determinação do fator de eficiência.....	47
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	48
4.1	ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS	48
4.1.1	Deslocamentos obtidos para configurações de ensaios reforçados sem a presença de bolsão compressível.....	48
4.1.2	Número de ciclos de carga e deslocamentos obtidos para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 14 cm	50
4.1.3	Número de ciclos de carga e deslocamentos obtidos para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 18 cm	52
4.1.4	Número de ciclos de carga e deslocamentos obtidos para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 23 cm	53

4.2	REFLEXO DA PRESENÇA DO BOLSÃO COMPRESSÍVEL NO DESLOCAMENTO SUPERFICIAL.....	55
4.2.1	Ensaios não reforçados com geossintético	55
4.2.2	Ensaios reforçados com geossintéticos na presença do bolsão compressível de 14 cm de diâmetro	57
4.2.3	Ensaios reforçados com geossintéticos na presença do bolsão compressível de 18 cm de diâmetro	58
4.2.4	Ensaios reforçados com geossintéticos na presença do bolsão compressível de 23 cm de diâmetro	60
4.3	FATOR DE EFICIÊNCIA.....	62
4.4	ANÁLISE DAS TENSÕES TOTAIS NO SUBLEITO	65
4.4.1	Tensões atingidas para configurações de ensaios reforçados sem a presença de bolsão compressível	65
4.4.2	Tensões atingidas para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 14 cm.....	67
4.4.3	Tensões atingidas para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 18 cm.....	68
4.4.4	Tensões atingidas para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 23 cm.....	69
4.5	ÂNGULO DE ESPRAIAMENTO DE TENSÕES PARA OS ENSAIOS REALIZADOS.....	70
4.6	AValiação DA QUEBRA DE GRÃOS DO MATERIAL DE ATERRO.....	71
4.7	INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DO REFORÇO E MATERIAL DE ATERRO	72
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	75
5.1	CONCLUSÕES DESTA DISSERTAÇÃO.....	75
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Extensão da rede rodoviária brasileira (CNT, 2018).....	1
Tabela 2.1: Funções dos principais geossintéticos em obras de engenharia (Bueno & Vilar, 2015).....	10
Tabela 2.2: Correlação entre principais funções e objetivos dos geossintéticos (Aguilar & Vertematti, 2015).	10
Tabela 3.1: Caracterização da Areia.	23
Tabela 3.2: Caracterização da Brita.	25
Tabela 3.3: Propriedades físicas das geogrelhas ensaiadas.....	30
Tabela 3.4: Resultados médios do ensaio de tração das amostras.	31
Tabela 3.5: Variáveis em estudo.	37
Tabela 3.6: Identificação dos ensaios realizados.	37
Tabela 4.1: Fatores de eficiência obtidos para as configurações de ensaio estudadas.....	64
Tabela 4.2: Valores de ângulo de espraiamento medido nos ensaios.	71
Tabela 4.3: Índice de quebra dos grãos do aterro ao final dos ensaios.	72
Tabela 4.4: Relação a_{eq}/D_{50} , $a_{eq}/D_{máx}$ e TBR para os reforços.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Seção transversal imprópria (Baesso & Gonçalves, 2003).....	5
Figura 2.2: Drenagem inadequada (Baesso & Gonçalves, 2003).	6
Figura 2.3: Corrugações (Baesso & Gonçalves, 2003).	6
Figura 2.4: Trilha de roda na BR-163/PA.	7
Figura 2.5: Excesso de pó na pista na BR-163/PA.	7
Figura 2.6: Segregação de agregados na BR-163/PA.	8
Figura 2.7: Presença de buracos na pista (Baesso & Gonçalves, 2003).....	8
Figura 2.8: Efeito membrana produzido pelo geossintético (modificado- Perkins & Ismeik, 1997).....	13
Figura 2.9: Mecanismo de restrição da movimentação lateral (modificado- Perkins & Ismeik, 1997).....	14
Figura 2.10: Aumento da capacidade de carga produzido pelo geossintético (modificado- Perkins & Ismeik, 1997).....	15
Figura 2.11: Geossintético em contato com o fundo da cavidade (modificado- Giroud <i>et al.</i> , 1990).....	16
Figura 2.12: a) Deflexão limitada do geossintético; b) Ruptura do geossintético (modificado- Giroud <i>et al.</i> , 1990).	16
Figura 3.1: Perfil transversal da estrada não pavimentada estudada.	21
Figura 3.2: Areia empregada como material de subleito.	22
Figura 3.3: Distribuição granulométrica da areia.	22
Figura 3.4: Resultados do ensaio de cisalhamento da areia.	24
Figura 3.5: Envoltória de ruptura do solo ensaiado.	24
Figura 3.6: Brita utilizada como material de aterro.	25
Figura 3.7: Distribuição Granulométrica da Brita.	26
Figura 3.8: Equipamento de cisalhamento direto de médio porte.....	26
Figura 3.9: Resultado do ensaio de cisalhamento direto da brita 1.....	27

Figura 3.10: Envoltória de ruptura do agregado graúdo ensaiado.	27
Figura 3.11: Montagem do ensaio de compressibilidade da espuma.	28
Figura 3.12: Avaliação da compressibilidade da espuma.	29
Figura 3.13: Amostra de reforço utilizado (a) R1; (b) R2; (c) R3.	30
Figura 3.14: Ensaio de tração de faixa larga: (a) Ensaio montado; (b) Ensaio em execução.	31
Figura 3.15: Equipamento de ensaio.	32
Figura 3.16: Sistema de aplicação de carga.	32
Figura 3.17: Célula de carga utilizada nos ensaios.	34
Figura 3.18: Célula de tensão total usada na pesquisa.	34
Figura 3.19: Equipamentos empregados na calibração da célula de tensão total (Pires, 2017).	35
Figura 3.20: Transdutor de deslocamento linear adotado nos ensaios.	36
Figura 3.21: Equipamento para aquisição de dados.	36
Figura 3.22: Configuração do ensaio reforçado sem a presença do bolsão compressível.	38
Figura 3.23: Configuração do ensaio reforçado com a presença do bolsão compressível.	38
Figura 3.24: Instalação das camadas de lona para redução do atrito.	39
Figura 3.25: Disposição da camada de subleito.	40
Figura 3.26: Distribuição normal da densidade relativa do material de subleito.	40
Figura 3.27: Instalação das células de tensão total (a) no eixo de aplicação; (b) na lateral.	41
Figura 3.28: Ancoragem do reforço geossintético.	42
Figura 3.29: Instalação da camada de reforço.	42
Figura 3.30: Camada de aterro finalizada.	43
Figura 3.31: Localização da instrumentação superficial.	43
Figura 3.32: Montagem concluída e equipamento preparado para ensaio.	45
Figura 3.33: Medição da área deformada (a) e detalhamento da região deformada.	46

Figura 3.34: Representação do espraio de tensões numa estrada não pavimentada para configurações reforçada e não reforçada (modificado – Antunes, 2008).	46
Figura 4.1: Deslocamentos verticais da placa de carregamento versus o número de ciclos de carga para configurações de ensaio sem bolsão compressível.	49
Figura 4.2: Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para configurações de ensaio sem bolsão compressível ao final do ensaio.	50
Figura 4.3: Deslocamentos verticais da placa de carregamento versus o número de ciclos de carga para configurações de ensaio com bolsão compressível de 14 cm.	51
Figura 4.4: Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para configurações de ensaio com bolsão compressível de 14 cm ao final do ensaio.	51
Figura 4.5: Deslocamentos verticais da placa de carregamento versus o número de ciclos de carga para configurações de ensaio com bolsão compressível de 18 cm.	52
Figura 4.6: Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para configurações de ensaio com bolsão compressível de 18 cm ao final do ensaio.	53
Figura 4.7: Deslocamentos verticais da placa de carregamento versus o número de ciclos de carga para configurações de ensaio com bolsão compressível de 23 cm.	54
Figura 4.8: Deslocamentos verticais da placa de carregamento versus o número de ciclos de carga para configurações de ensaio com bolsão compressível de 23 cm, para N = 12.000.	54
Figura 4.9: Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para configurações de ensaio com bolsão compressível de 23 cm ao final do ensaio.	55
Figura 4.10: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações sem reforço, com e sem bolsão compressível de 14 cm de diâmetro para N = 229.692.	56
Figura 4.11: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações sem reforço, com e sem bolsão compressível de 18 cm de diâmetro para N = 2.307.	56
Figura 4.12: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações sem reforço, com e sem bolsão compressível de 23 cm de diâmetro para N = 1.095.	57
Figura 4.13: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 1, com e sem bolsão compressível de 14 cm de diâmetro para N = 270.000.	57

Figura 4.14: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 2, com e sem bolsão compressível de 14 cm de diâmetro para $N = 270.000$	58
Figura 4.15: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 3, com e sem bolsão compressível de 14 cm de diâmetro para $N = 270.000$	58
Figura 4.16: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 1, com e sem bolsão compressível de 18 cm de diâmetro para $N = 60.920$	59
Figura 4.17: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 2, com e sem bolsão compressível de 18 cm de diâmetro para $N = 86.639$	59
Figura 4.18: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 3, com e sem bolsão compressível de 18 cm de diâmetro para $N = 120.692$	60
Figura 4.19: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 1, com e sem bolsão compressível de 23 cm de diâmetro para $N = 3.600$	61
Figura 4.20: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 2, com e sem bolsão compressível de 23 cm de diâmetro para $N = 6.177$	61
Figura 4.21: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 3, com e sem bolsão compressível de 23 cm de diâmetro para $N = 10.201$	62
Figura 4.22: Projeção do número de ciclos de carga correspondente ao afundamento de 75 mm da placa de carregamento, para configurações de ensaio sem bolsão compressível.....	63
Figura 4.23: Projeção do número de ciclos de carga correspondente ao afundamento de 75 mm da placa de carregamento, para configurações de ensaio com bolsão compressível de 14 cm.63	63
Figura 4.24: Fatores de eficiência conforme diâmetro do bolsão compressível	64
Figura 4.25: Tensões totais transferidas ao subleito no eixo de carregamento <i>versus</i> profundidade para configurações de ensaio sem bolsão compressível.	66
Figura 4.26: Tensões totais transferidas ao subleito a 5 cm da borda da placa de carregamento <i>versus</i> profundidade para configurações de ensaio sem bolsão compressível.	67
Figura 4.27: Tensões totais transferidas ao subleito a 3 cm da borda da placa de carregamento <i>versus</i> profundidade para configurações de ensaio com bolsão compressível de 14 cm.	68
Figura 4.28: Tensões totais transferidas ao subleito a 5 cm da borda da placa de carregamento <i>versus</i> profundidade para configurações de ensaio com bolsão compressível de 18 cm.	69

Figura 4.29: Tensões totais transferidas ao subleito a 7,5 cm da borda da placa de carregamento <i>versus</i> profundidade para configurações de ensaio com bolsão compressível de 23 cm.	70
Figura 4.30: Relação entre os fatores de eficiência obtidos e a_{eq}/D_{50}	73
Figura 4.31: Relação entre os fatores de eficiência obtidos e $a_{eq}/D_{máx.}$	74

LISTA DE ABREVIACOES, NOMENCLATURAS E SMBOLOS

Abreviaoes	Significado
ABNT	Associaao Brasileira de Normas Tcnicas
ASM	Aperture Stability Modulus
ASTM	American Society for Testing Materials
CNT	Confederaao Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
MTS	Material Test System
NBR	Norma Brasileira

Nomenclaturas e Símbolos	Significado
β'	Ângulo de espraçamento de tensões em estrada não pavimentada sem reforço
β''	Ângulo de espraçamento de tensões em estrada não pavimentada reforçada
ΔW_{ki}	Percentagem de material retido em cada peneira antes da execução do ensaio
ΔW_{kf}	Percentagem de material retido em cada peneira após execução do ensaio
$\xi_{m\acute{a}x}$	Deformação máxima na ruptura
ρ_u	Afundamento da placa ao final do ensaio sem reforço
ρ_r	Afundamento atingido no ensaio reforçado quando da sua interrupção
B_g	Índice de quebra dos grãos
C_c	Coefficiente de curvatura
CD	Ensaio na direção transversal de fabricação
CE - 14	Configuração de ensaio com espuma de 14 cm de diâmetro
CE - 18	Configuração de ensaio com espuma de 18 cm de diâmetro
CE - 23	Configuração de ensaio com espuma de 23 cm de diâmetro
C_u	Coefficiente de uniformidade
D_{10}	Diâmetro efetivo
D_{30}	Diâmetro das peneiras que permitem passar 30% do agregado
D_{50}	Diâmetro médio das partículas
D_{60}	Diâmetro das peneiras que permitem passar 60% do agregado
$D_{m\acute{a}x}$	Diâmetro máximo característico
$J_{x\%}$	Rigidez secante no percentual x de deformação
MD	Ensaio na direção longitudinal de fabricação
n	Número de intervalos de dimensões das partículas considerados
N	Número de repetições de carga
N_r	Número de aplicações de carga na estrada reforçada para um afundamento de trilha de roda de projeto
N_u	Número de aplicações de carga na estrada sem reforço para um afundamento de trilha de roda de projeto
R1	Reforço 1
R2	Reforço 2
R3	Reforço 3
SE	Configuração de ensaio sem espuma

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

No Brasil, o modal rodoviário representa o maior contribuinte da matriz de transporte de cargas, resultando em 61,1% dentre os demais modais (CNT, 2018). Da extensão total da malha rodoviária, cerca de 86% é constituída por estradas não pavimentadas, conforme pode ser verificado na Tabela 1.1. Com base neste contexto, é de grande importância para a economia e para o conforto dos usuários que as estradas não pavimentadas possuam adequado funcionamento durante sua vida útil. Um mau dimensionamento ou sua ausência, a construção sobre um subleito pouco resistente, a ação de tráfego intenso e do clima são fatores que levam à necessidade de manutenções com maior frequência e um aumento das despesas operacionais. Os geossintéticos vêm se destacando como soluções para aumentar a vida útil de estradas não pavimentadas e reduzir a frequência das manutenções.

Tabela 1.1: Extensão da rede rodoviária brasileira (CNT, 2018).

Natureza	Rede não pavimentada (km)	Rede pavimentada (km)	Extensão total da rede (km)
Federal	10.729	65.530	76.259
Estadual, Estadual Transitória e municipal	1.353.782	148.061	1.501.843
Total	1.364.511	213.591	1.578.102

De acordo com Aguiar & Vertematti (2015) os geossintéticos podem exercer diferentes funções: drenagem, filtração, proteção, impermeabilização, controle de erosão superficial, separação e reforço. Com relação às obras rodoviárias, quando adequadamente projetados e instalados, os geossintéticos podem diminuir as deformações superficiais das vias e das fundações, aumentar a capacidade de suporte, reduzir a espessura da camada granular e proporcionar melhor distribuição das tensões para o subleito, além de facilitar possíveis trabalhos de pavimentação e manutenção (Trichês *et al.*, 2015). Segundo Costa *et al.* (2008), se comparados às soluções convencionais, o emprego de geossintéticos representa uma alternativa de execução mais prática e rápida, podendo ser economicamente e ambientalmente mais vantajosa.

O presente trabalho visou estudar a aplicação de geossintéticos, em especial as geogrelhas, como elemento de reforço de subleito, na presença de bolsões de solo compressível, com o objetivo de aumentar a vida útil da estrada, reduzir as deformações superficiais e, conseqüentemente, diminuir os custos de manutenção.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho consiste na análise comparativa do desempenho de estradas não pavimentadas sobre subleitos com bolsões compressíveis, para as condições não reforçada e reforçada com geossintético. Para tal, foram realizados ensaios de carregamento cíclico em escala real, de modo a simular as condições de carregamentos reais. Desta forma, a partir deste objetivo geral, são objetivos específicos da dissertação:

- Avaliar a influência da presença de bolsão compressíveis, de diferentes diâmetros, localizados no subleito compacto de estradas não pavimentadas e não reforçadas nos desempenhos das mesmas;
- Avaliar os efeitos da utilização de geossintéticos como reforço em estradas não pavimentadas sujeitas à presença de bolsão compressível;
- Identificar o reforço com desempenho mais adequado, por meio dos resultados obtidos em termos de tensões totais transferidas ao subleito, deslocamentos superficiais e fatores de eficiência para as configurações de ensaio com e sem a presença do bolsão compressível;
- Analisar a influência da presença do bolsão compressível em termos de tensões transferidas nas adjacências do mesmo;
- Determinar a influência da abertura da malha das geogrelhas utilizadas no comportamento mecânico da estrada simulada, para as configurações com e sem a presença do bolsão.

1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos para a melhor compreensão e desenvolvimento do tema proposto, deste modo o Capítulo 2 aborda uma breve revisão bibliográfica sobre o tema, apresentando aspectos de interesse sobre estradas não pavimentadas e geossintéticos, a aplicação destes como reforço de estradas não pavimentadas e sobre bolsões compressíveis, além de destacar alguns estudos presentes na literatura.

O Capítulo 3 compreende os materiais e a metodologia adotada para realização dos ensaios, que permitiram avaliar a aplicação de geogrelhas como elemento de reforço em estradas não

pavimentadas com a presença de bolsões compressíveis no subleito. Estão apresentados os procedimentos de caracterização física e mecânica dos materiais empregados nesta pesquisa a fim de atingir o objetivo proposto pela mesma. Além disso, é apresentada a metodologia desenvolvida para realização dos ensaios nas diferentes configurações, bem como a descrição da instrumentação para o monitoramento.

No Capítulo 4 encontram-se os resultados obtidos nos ensaios de carregamento cíclico para as diferentes configurações, visando avaliar o comportamento dos diferentes geogrelhas como reforço e a influência da variação do diâmetro do bolsão compressível.

Finalmente, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões do presente estudo e sugestões para pesquisas futuras com relação ao tema abordado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem a finalidade de apresentar o embasamento teórico que dará suporte ao estudo que conduzirá ao desenvolvimento dos objetivos propostos.

2.1 ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

2.1.1 Características técnicas de estradas não-pavimentadas

As estradas de terra, também chamadas de estradas não pavimentadas, constituem vias nas quais a superfície de rolamento é geralmente composta por materiais integrantes do próprio leito natural da via. Quando há a necessidade de se melhorar as condições de trafegabilidade e de desempenho da via é disposta uma camada de revestimento primário, devidamente compactada, sobre o subleito da estrada (IPR, 2005).

As estradas não pavimentadas exercem notória função econômica e social. Economicamente devido ao escoamento de insumos produzidos nas zonas rurais e socialmente por permitir o acesso da população rural aos serviços essenciais oferecidos nos municípios ou cidades. Nunes (2003) destaca duas características técnicas fundamentais para garantir a uma estrada condições de tráfego satisfatórias, a saber: boa capacidade de suporte e boas condições de rolamento e aderência.

Góngora (2011) relaciona proporcionalmente a capacidade de suporte do solo à sua capacidade de resistir, sob diferentes condições, aos processos erosivos e ações do tráfego. Ademais, Oda (1995) associa que a capacidade de suporte depende das características do material superficial e da resistência do solo subjacente. Santos *et al.* (1988) e Baesso & Gonçalves (2003) descrevem a capacidade de suporte e as condições de rolamento e aderência, conforme:

- Capacidade de suporte: a capacidade suporte está relacionada à capacidade de deformação da via diante das solicitações do tráfego. Uma estrada com capacidade de suporte insuficiente tende a apresentar ondulações transversais e trilhas de roda, além de formação de lama no período chuvoso. A baixa capacidade de suporte advém da deficiência mecânica do subleito e/ou da camada de reforço do mesmo. Fatores como a utilização de solos adequados ou materiais granulares e uma eficiente compactação são indispensáveis para evitar problemas relacionados à capacidade de suporte.

- Condições de rolamento e aderência: As condições de rolamento relacionam-se à presença de irregularidades que geram consequências negativas para a comodidade e segurança do tráfego. Já a aderência está associada ao nível de atrito superficial. Os principais problemas relacionados a estes fatores estão localizados superficialmente, como o desprendimento de materiais granulares, ondulações transversais, pista escorregadia, formação de buracos, dentre outros. Para se obter condições de rolamento e aderência desejáveis, devem ser observados uma adequada mistura e compactação dos materiais granular e argiloso, este atuando como um ligante das partículas.

2.1.2 Problemas frequentes em estradas não pavimentadas

Os defeitos em estradas não pavimentadas são devidos à combinação de fatores intrínsecos (geometria inadequada, drenagem insuficiente, tipo de solo, dentre outros) e extrínsecos (ação do tráfego, chuva e atividades de manutenção), sendo estes os responsáveis por exercer esforços dinâmicos consideráveis sobre o leito da estrada. O tráfego contribui para deformações e desgaste abrasivo da superfície; a chuva reduz a capacidade de suporte do solo e transporta material superficial; e a atividade de manutenção modifica os perfis da via (Oda, 1995).

De acordo com Baesso & Gonçalves (2003) destacam-se como os principais problemas que afetam o desempenho de estradas não pavimentadas:

- Seção transversal imprópria: contribui para uma drenagem ineficiente das águas superficiais para os dispositivos de captação e escoamento (Figura 2.1).



Figura 2.1: Seção transversal imprópria (Baesso & Gonçalves, 2003).

- Drenagem inadequada: caracterizada pelo acúmulo de água na plataforma em consequência do mau funcionamento dos dispositivos de drenagem superficial e ausência de sistemas de drenagem profunda, conforme Figura 2.2.



Figura 2.2: Drenagem inadequada (Baesso & Gonçalves, 2003).

- Corrugações: também conhecida como “costela de vaca”, consiste em deformações, sulcos ou ondulações, perpendiculares ao sentido de tráfego e regularmente espaçadas (Figura 2.3). Alguns fatores relacionam-se à origem deste defeito: ação contínua do tráfego; perda de agregados finos; subleito com baixa capacidade de suporte; abaulamento insuficiente da pista e revestimento de baixa qualidade aliado a períodos extensos de seca.



Figura 2.3: Corrugações (Baesso & Gonçalves, 2003).

- Trilhas de roda: são depressões geradas ao longo do eixo da estrada, causadas pela deformação permanente do subleito ou da camada de revestimento devido à ação do carregamento repetido do tráfego, exemplificada na Figura 2.4. É evidenciada quando a capacidade de suporte da via é baixa e a drenagem deficiente.



Figura 2.4: Trilha de roda na BR-163/PA.

- Excesso de pó na pista: ocorre por perda de material fino na camada superficial, devido ao excesso desta fração (Figura 2.5). Além do desconforto ao usuário causado pela nuvem de poeira, esta pode reduzir a capacidade visual, acarretando em acidentes, além de afetar a durabilidade dos veículos pela ação das partículas abrasivas suspensas.



Figura 2.5: Excesso de pó na pista na BR-163/PA.

- Segregação de agregados: a ação do tráfego pode promover a segregação da fração grossa de agregados, depositando-os fora das trilhas de rodas ou nas áreas próximas aos bordos ou centro da pista de rolamento, como pode ser observado na Figura 2.6.



Figura 2.6: Segregação de agregados na BR-163/PA.

- Buracos: apresentado na Figura 2.7, sua ocorrência pode estar associada a diversos fatores, a saber, inexistência ou deficiência do revestimento primário; ausência de partículas aglutinadoras na composição dos materiais de superfície e/ou camada; plataforma com drenagem inadequada.

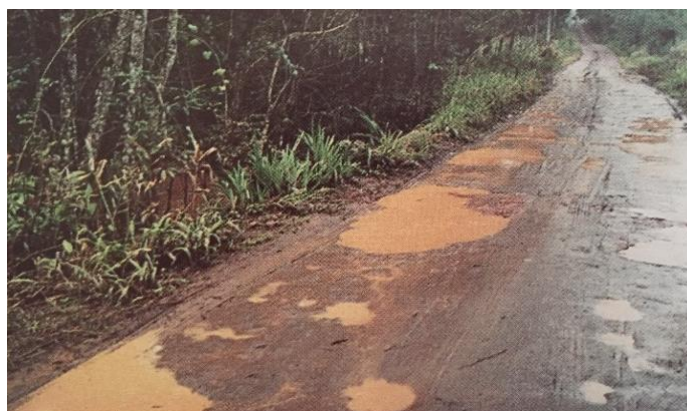


Figura 2.7: Presença de buracos na pista (Baesso & Gonçalves, 2003).

2.2 PRESENÇA DE BOLSÕES COMPRESSÍVEIS NO SOLO

Além dos problemas que frequentemente afetam o desempenho de estradas não pavimentadas, conforme citado, destaca-se também a presença de bolsões compressíveis (heterogeneidade) ou cavidades (vazios) no subleito. Estes bolsões levam a rupturas localizadas, provocando recalques diferenciais da via e acelerando sua degradação. Segundo Giroud *et al.* (1990), o recalque diferencial devido a lentes de solos compressíveis ocorre frequentemente sob aterros rodoviários. Ainda conforme Giroud *et al.* (1990), vazios de outras naturezas podem se desenvolver abaixo da camada de geossintético, quais sejam: fendas de tensão; fissuras e rachaduras na fundação rochosa; buracos provenientes de colapso cárstico; cavidades de dissolução causadas por água em solos contendo gipsita ou por ácido para solos que possuem

o carbonato de cálcio em sua composição; recalque diferencial; subsidência localizada causada, por exemplo, pelo colapso de cavernas naturais, túneis ou tubulação.

Devido às dificuldades de localização de vazios em áreas de risco surge a necessidade de utilizar algum tipo de reforço na construção de rodovias ou linhas férreas, a fim de evitar a propagação da deformação na superfície causada pela ruptura da área acima do buraco localizado. A aplicação de geossintéticos, em uma ou mais camadas, é uma solução de reforço atrativa por ser de fácil implantação e baixo custo (Villard & Briançon, 2008).

Giroud *et al.* (1990) estudaram a aplicação de geossintéticos sobre vazios avaliando os níveis de tensão e deformação atuantes no geossintético quando submetido a pressões subjacentes. O comportamento do geossintético foi analisado conforme a teoria do efeito membrana para determinação do formato do reforço e dos níveis de deformação superficial após carregamento, conforme a rigidez do geossintético e a dimensão da cavidade.

2.3 GEOSSINTÉTICOS

O emprego de geossintéticos, em especial geotêxteis, no âmbito internacional teve início na década de 1950. No Brasil, os geotêxteis e geomembranas começaram a ser aplicados em diversas obras a partir da década de 1970. Com a elaboração do Manual Brasileiro de Geossintéticos, na década de 2000, foi observado o acréscimo no número de publicações internacionais sobre o tema e um aumento na utilização de geossintéticos em obras de grande porte, em diversas aplicações (Aguiar & Vertematti, 2015). A expansão de sua aplicação deve-se, principalmente, à versatilidade de funções para um mesmo tipo de geossintético, à facilidade na instalação quando comparado às soluções convencionais e ao controle de qualidade na fabricação.

2.3.1 Tipos e principais funções

De acordo com Aguiar & Vertematti (2015) os elementos geossintéticos podem desempenhar diferentes funções, algumas até concomitantemente, quais sejam: controle de erosão superficial; drenagem; filtração; atuação como barreira de fluidos; proteção contra danos localizados; reforço para melhorar o comportamento mecânico; e separação de dois materiais adjacentes. Na Tabela 2.1 encontram-se indicados os geossintéticos mais comuns e suas respectivas funções em destaque. Observa-se que a escolha do geossintético mais apropriado

para cada obra de engenharia é baseada na compatibilização das exigências técnicas da mesma com as propriedades dos diferentes tipos de geossintéticos.

Tabela 2.1: Funções dos principais geossintéticos em obras de engenharia (Bueno & Vilar, 2015).

Função 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	

Ao optar pelo emprego do geossintético em detrimento das soluções convencionais de engenharia deve ser observado o princípio de equivalência de funções, ou seja, o geossintético deve possuir propriedades equivalentes de durabilidade, permeabilidade, deformabilidade e resistência, conforme a necessidade da obra. Na Tabela 2.2 encontram-se resumidamente os principais objetivos correspondentes às funções citadas anteriormente.

Tabela 2.2: Correlação entre principais funções e objetivos dos geossintéticos (Aguiar & Vertematti, 2015).

Função	Objetivos
Separação	Separação de materiais com propriedades geotécnicas distintas, de modo a manter a funcionalidade de cada material.
Proteção	Reduzir e homogeneizar os níveis de tensões transmitidos à superfície, camada ou estrutura adjacente.
Filtração	Permitir o livre escoamento do fluido enquanto bloqueia a passagem das partículas de solo, similar a uma filtro de areia.
Drenagem	Coletar e conduzir o fluido através do geossintético.
Erosão	Controlar a erosão superficial contra agentes erosivos: chuvas, fluxo superficial e transporte sedimentar pelo fluxo de águas.
Reforço	Melhorar o comportamento mecânico por meio do ganho de resistência e/ou restrição de deformações.
Impermeabilização	Bloquear a passagem de líquidos ou gases de um meio para outro. Para geotêxteis há a necessidade de impregnação com material asfáltico para cumprir o objetivo.

Quando aplicados em estradas vicinais e de serviços, os geossintéticos exercem como funções relevantes a drenagem, a filtração, a separação e o reforço. Segundo Latha *et al.* (2010), nos últimos 30 anos, geotêxteis poliméricos e geogrelhas vêm sendo empregados como reforço para melhorar o desempenho tanto de estradas pavimentadas quanto não pavimentadas. Nestas, estudos apresentaram benefícios como a redução da deformação plástica e da espessura da camada de base.

Em virtude dos objetivos do presente trabalho, as geogrelhas destacam-se quando aplicadas como reforço em estradas não pavimentadas. A estrutura das geogrelhas permite que a abertura entre seus elementos, longitudinais e transversais, proporcionem uma maior interação com o solo adjacente, promovendo um intertravamento e atrito com o meio onde está inserida.

As geogrelhas podem ser classificadas em três tipos, conforme processo de fabricação. As geogrelhas extrudadas possuem junções integrais devido ao processo de extrusão, sendo normalmente produzidas em polipropileno, polietileno ou um copolímero. As geogrelhas em malha ou tecidas são fabricadas com fibras, geralmente poliéster ou polipropileno. Por fim, as geogrelhas soldadas são fabricadas com poliéster extrudado, polipropileno ou barras de polietileno e recebem solda em pontos de cruzamento (Berg *et al.* 2000). As geogrelhas extrudadas ainda podem ser categorizadas em unidirecionais ou bidirecionais. As unidirecionais possuem a resistência e rigidez à tração muito maiores longitudinalmente, já nas bidirecionais estas propriedades possuem grandezas equivalentes em ambas direções, longitudinal e transversal.

2.3.2 Propriedades dos geossintéticos

Segundo Zornberg & Christopher (2007), as propriedades dos geossintéticos podem ser divididas em dois grandes grupos: as propriedades de índice e as propriedades de desempenho. As propriedades de índice estão relacionadas com o processo de fabricação e controle de qualidade. Já as propriedades relacionadas com o dimensionamento e aplicação correspondem às propriedades de desempenho.

Para que os geossintéticos possam desenvolver corretamente as funções almejadas deve-se observar as propriedades relevantes para cada tipo de aplicação, conforme necessidade da obra. Segundo Bueno & Vilar (2015), as propriedades dos geossintéticos são divididas em físicas,

hidráulicas, mecânicas e de desempenho. Lopes & Lopes (2010) acrescentaram à estas a propriedade de durabilidade.

As propriedades físicas abrangem a massa por unidade de área ou gramatura, a espessura nominal e a densidade relativa dos polímeros ou porosidade. As propriedades hidráulicas compreendem a abertura de filtração, permissividade (permeabilidade à água normal ao plano) e transmissividade (permeabilidade à água paralela ao plano). Já as propriedades mecânicas mais comuns englobam a resistência à tração e à penetração por punção (estático e dinâmico), resistência à propagação de rasgo, resistência ao estouro e fluência. As propriedades de desempenho abrangem a resistência na interface solo-geossintético ao arrancamento, ao cisalhamento direto e ao cisalhamento no plano inclinado, a resistência à abrasão, filtração de longa duração e danos de instalação. As propriedades de durabilidade complementam as propriedades de desempenho pois abrangem a resistência à degradação química, física e biológica e resistência à foto-oxidação.

Para que estruturas reforçadas com geossintéticos exerçam um bom desempenho deve-se observar três fatores, que agem concomitantemente, a saber: características físicas e mecânicas do solo; características físicas e mecânicas do reforço; e a interação solo-geossintético. Essa interação solo-geossintético é responsável por promover o atrito entre as partes e o intertravamento, fazendo com que o sistema funcione como uma estrutura única.

2.4 MECANISMOS DE AÇÃO DO REFORÇO GEOSSINTÉTICO

De acordo com Giroud & Han (2004) a abertura das geogrelhas e sua configuração geométrica permitem o travamento do material granular, restringindo a movimentação lateral do agregado, quando a camada é submetida ao carregamento. Perkins (1999) atribuiu quatro benefícios que este confinamento promove, tanto a estradas pavimentadas quanto não pavimentadas: redução do afundamento superficial; aumento da rigidez da camada; aumento da rigidez à flexão, que proporciona uma redução da tensão vertical máxima transferida ao subleito; e redução da tensão de cisalhamento transmitida para o subleito, o que aumenta sua capacidade de suporte. Giroud & Han (2004) acrescentaram alguns benefícios potenciais para a camada de aterro devido ao reforço: prevenção de ruptura por cisalhamento da camada de base; suporte direto da ação do tráfego via efeito membrana depois de ocorrer afundamento significativo; prevenção da abertura de trincas de tração na parte inferior da base; e prevenção de perda de material granular do aterro para subleito quando no estado fofo.

O ganho de desempenho em estradas não pavimentadas quando reforçadas com geossintéticos deve-se aos seguintes mecanismos (Perkins & Ismeik, 1997):

- Efeito membrana: o efeito membrana requer grandes deformações advindas do tráfego para ser mobilizado, criando uma concavidade no geossintético (Figura 2.8), sendo assim mais frequente onde o tráfego é canalizado e/ou se tratar da condição de pista não pavimentada. A ação conjunta da curvatura e os esforços de tração no reforço atuam reduzindo a tensão normal transferida ao subleito, abaixo da área carregada. O mecanismo também influencia a região fora da área carregada, onde a membrana tensionada pressiona para baixo a região do subleito, propiciando acréscimos de tensões verticais na superfície do subleito, aumentando o confinamento da região e consequentemente sua capacidade de carga (Burd, 1995 e Giroud & Han, 2004).

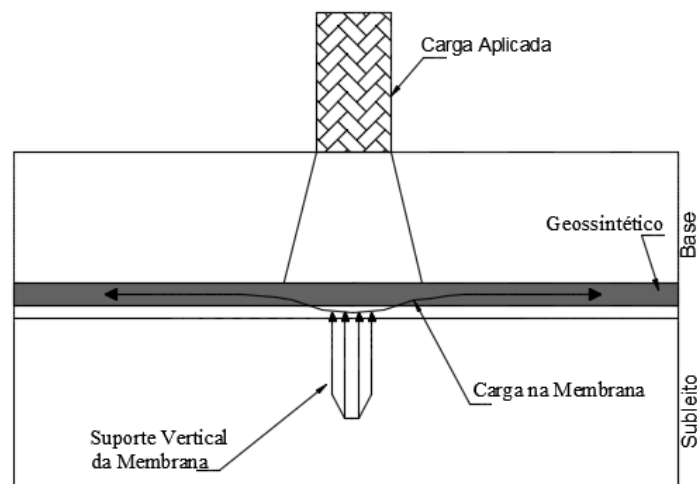


Figura 2.8: Efeito membrana produzido pelo geossintético (modificado- Perkins & Ismeik, 1997).

- Restrição à movimentação lateral: sob a ação de cargas repetidas do tráfego os agregados da camada granular tendem a movimentar-se lateralmente, a menos que sejam restringidos pelo subleito ou pelo reforço geossintético. Conforme teoria da plasticidade, tensões cisalhantes orientadas para fora da seção da pista reduzem a capacidade de suporte do subleito, sendo o caso das tensões transmitidas pelo carregamento veicular, e em contrapartida as tensões orientadas para dentro aumentam esta propriedade. A restrição à movimentação lateral se desenvolve por meio do atrito entre o geossintético e a camada de agregado, formando uma interface resistente ao cisalhamento, rugosa, que leva à formação de tensões cisalhantes orientadas para dentro

(Houlsby *et al.*, 1989). As tensões cisalhantes são transferidas da camada de base para o geossintético colocando-o sob tensão, conforme mostra a Figura 2.9. A rigidez à tração do geossintético limita as deformações laterais na camada de base e, conseqüentemente, reduz as deformações verticais na rodovia (Perkins, 1999).

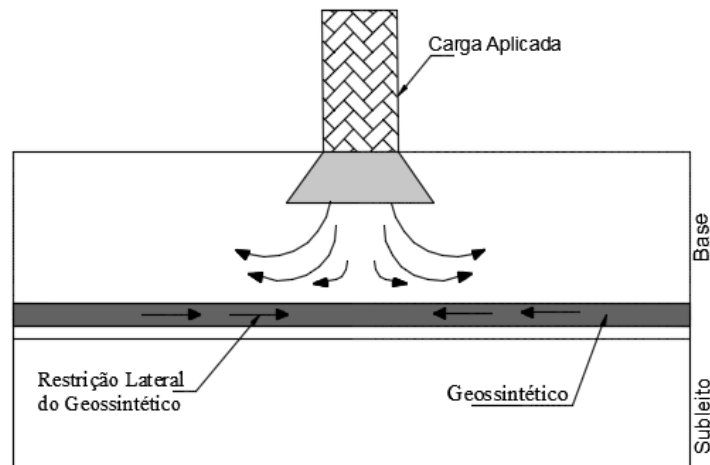


Figura 2.9: Mecanismo de restrição da movimentação lateral (modificado- Perkins & Ismeik, 1997).

- Aumento na capacidade de carga: Quando a tensão vertical supera o limite elástico do solo há a formação de um cisalhamento local. Sob carregamento cíclico as zonas de cisalhamento aumentam, a região da base se deteriora, os níveis de tensões verticais se elevam e ocorre o desenvolvimento de afundamento superficial. Quando se atinge o limite plástico ou a capacidade de suporte limite do subleito a ruptura por cisalhamento ocorre. A utilização de reforço geossintético, entre as camadas de subleito e base, permite com que o subleito suporte tensões próximas ao limite plástico, além de inibir ou reduzir a formação de zonas de cisalhamento locais (Giroud & Noiray, 1981). A presença do geossintético induz à formação de uma superfície de ruptura alternativa, mais resistente. O reforço reduz a transferência de tensões cisalhantes instabilizadoras ao subleito e promove um confinamento vertical fora da área de carregamento. Dessa forma, há uma tendência em ocorrer uma mudança no tipo de ruptura do subleito, passando de uma ruptura local, referente à condição não reforçada, para ruptura generalizada, correspondente ao aterro reforçado (Perkins & Ismeik, 1997 e Zornberg, 2012). A Figura 2.10 ilustra o mecanismo de aumento de capacidade de carga promovido pelo reforço. Ressalta-se que, para o caso de ruptura generalizada, a

superfície de ruptura também pode passar pelo subleito da estrada, conforme espessura e capacidade de suporte da camada de base.

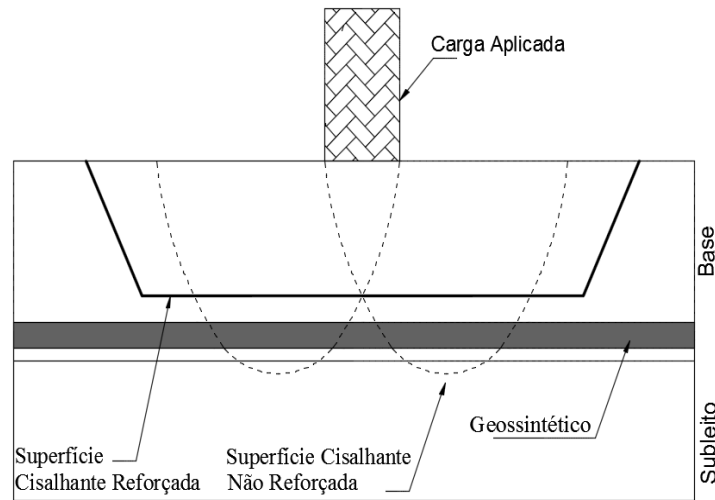


Figura 2.10: Aumento da capacidade de carga produzido pelo geossintético (modificado- Perkins & Ismeik, 1997).

2.5 MECANISMOS DE CARREGAMENTO DO GEOSSINTÉTICO SOBRE BOLSÕES COMPRESSÍVEIS

Giroud *et al.* (1990), em seu estudo sobre a análise e dimensionamento de sistemas solo-geossintéticos sobre vazios, expõem que sob a atuação do peso da camada de solo e do carregamento do tráfego o geossintético sofre deflexão. Esta deflexão pode resultar em dois efeitos: flexão da camada de solo e alongamento da camada de geossintético. A flexão da camada de solo gera o arqueamento do solo, o qual transfere parte do carregamento aplicado para a região fora da área da cavidade. Segundo os autores, desconsiderar o efeito do arqueamento do solo é conservativo em muitos casos. Já o alongamento do geossintético mobiliza parte de sua resistência, ou seja, o efeito membrana é mobilizado. A teoria do efeito membrana é utilizada pelos autores para estabelecer uma relação entre a pressão atuante no reforço, entre a tensão e deformação e sua deflexão. Como resultado da deformação no geossintético, dois casos devem ser considerados:

- No primeiro caso, o geossintético se deforma até entrar em contato com o fundo da cavidade (Figura 2.11). A resistência mobilizada do reforço fica responsável por suportar parte da carga verticalmente aplicada ao geossintético, o restante da carga é transmitido para o fundo da cavidade.

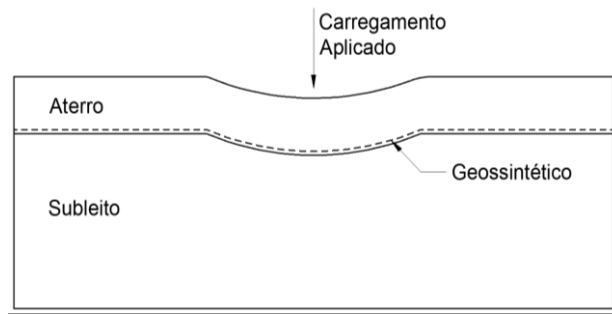


Figura 2.11: Geossintético em contato com o fundo da cavidade (modificado- Giroud *et al.*, 1990).

- No segundo caso, o geossintético não deforma o suficiente para entrar em contato com o fundo da cavidade. Como resultado, o geossintético irá suportar todo o carregamento transmitido (Figura 2.12.a) ou sofrerá ruptura, caso não possua resistência suficiente (Figura 2.12.b).

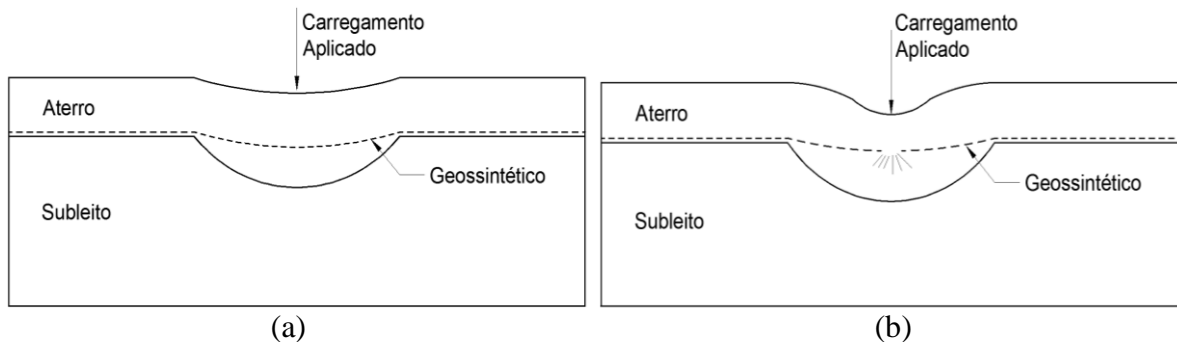


Figura 2.12: a) Deflexão limitada do geossintético; b) Ruptura do geossintético (modificado- Giroud *et al.*, 1990).

2.6 ESTUDOS REALIZADOS ABORDANDO A APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Vários pesquisadores têm estudado os efeitos positivos advindos do emprego de geossintéticos como reforço de aterros sobre solos de baixa capacidade de carga, especialmente para estradas não pavimentadas, a saber: Palmeira (1981), Ramalho-Ortigão & Palmeira (1982), Love *et al.* (1987), Fannin & Sigurdsson (1996), Giroud & Noiray (1981), Palmeira (1998), Leng (2002), Giroud & Han (2004), Hufenus *et al.* (2006), Subaida *et al.* (2009), Latha *et al.* (2010), Palmeira & Antunes (2010), Nair & Latha (2013), Góngora & Palmeira (2016), Palmeira & Góngora

(2016). A seguir são sumariados os benefícios encontrados em alguns destes estudos, resultados do uso de reforço geossintético em estradas não pavimentadas sobre solo de baixa capacidade de suporte.

Leng (2002) estudou o comportamento de estradas não pavimentadas reforçadas por geogrelhas, submetidas ao carregamento cíclico, por meio de ensaios em laboratório em grande escala, análise teórica e análise estática por elementos finitos. A pesquisa enfatizou a análise de deformação permanente, distribuição de tensões e interação solo e geossintético. Em acréscimo ao trabalho foi proposto um método de dimensionamento com base nos mecanismos de reforço das geogrelhas, degradação da camada de aterro e mobilização da capacidade de carga do subleito. De modo geral o reforço promoveu uma melhora na distribuição de tensões para o subleito, redução da degradação da camada de base e da deformação superficial acumulada.

Giroud & Han (2004) desenvolveram uma metodologia de dimensionamento de estradas não pavimentadas reforçadas com geogrelhas baseando em fatores considerados em métodos anteriormente publicados; a saber: distribuição de tensões, resistência do material de base e de subleito, rigidez do geossintético, número de repetições de carga (eixo padrão de caminhão), deslocamento vertical no eixo de carregamento no fim da vida útil e a influência do reforço geossintético sobre o modelo de ruptura; e em fatores adicionais, como intertravamento entre o geossintético e o aterro, módulo de estabilidade da abertura da geogrelha (ASM) e módulo resiliente do agregado do aterro. Este método foi teoricamente embasado e experimentalmente calibrado. No entanto, várias críticas à utilização do módulo de estabilidade da abertura da geogrelha neste tipo de aplicação têm sido apresentadas na literatura, conforme exposto em Palmeira & Góngora (2016), Góngora & Palmeira (2016), Tang *et al.* (2008) e Cuelho *et al.* (2014).

Latha *et al.* (2010) realizou estudos de campo sobre estradas não pavimentadas reforçadas, submetidas a um baixo volume de tráfego e construídas sobre um subleito com baixa capacidade de suporte. Para isto, diferentes materiais, quais sejam: geotêxtil, geogrelhas uniaxial e biaxial, geocélulas e fragmentos de pneus, foram avaliados em termos de aumento da capacidade de suporte do subleito, redução na profundidade da trilha de roda, fator de eficiência e separação de material de base.

Palmeira & Góngora (2016) avaliaram o desempenho de estradas não pavimentadas com subleito compressível, reforçada e não reforçada com geogrelhas, por meio de ensaios

carregamento cíclico em grande escala. O desempenho do sistema é influenciado pela combinação de propriedades físicas e mecânicas do reforço. Além da influência exercida pela a rigidez à tração, foi observado que a interação entre o reforço e solo também afeta no desempenho. Resultantes desta interação, fatores como espessura da geogrelhas e a relação entre abertura da malha e o diâmetro do material granular do aterro mostraram-se relevantes.

Góngora & Palmeira (2016) estudaram o desempenho do sistema aterro granular e subleito com baixa capacidade de suporte, para as condições reforçada e não reforçada com diferentes geogrelhas, com ênfase no comportamento do aterro depois de ser submetido à manutenção superficial. A presença da geogrelhas propiciou uma melhora de desempenho do sistema em ambos estágios de carregamento, sendo o segundo estágio referente ao aterro recuperado. Foram observadas correlações entre o desempenho do aterro em termos de TBR (*Traffic Benefit Ratio*) e a rigidez a tração do reforço, no entanto não foram observadas correlações com o ASM.

2.7 ESTUDOS REALIZADOS ABORDANDO A APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS SOBRE CAVIDADES EM SOLOS

Com relação aos benefícios proporcionados pelo emprego de geossintéticos sobre cavidades em solos, diversos pesquisadores publicaram sobre o assunto, dentre os quais: Giroud *et al.* (1988), Giroud *et al.* (1990), Villard & Briançon (2008), Tahmasebipoor *et al.* (2012), Feng & Lu (2015), Huckert *et al.* (2016), Villard *et al.* (2016) e Tano *et al.* (2018).

Giroud *et al.* (1990) apresentaram uma abordagem sobre o dimensionamento da camada aterro-geossintético sobre vazios (fissuras de tensão, poços, cavidades de dissolução e depressões em solos de fundações devido a recalques diferenciais ou subsidências localizadas) sob condições de carregamento do tipo normal e uniformemente distribuído. O estudo se baseou na combinação das teorias do efeito membrana do reforço e de arqueamento do solo. Foram expostos exemplos de dimensionamento, de modo a ilustrar a solução de problemas típicos, a saber: propriedades geossintéticas necessárias, determinação do tamanho máximo do vazio e a avaliação da capacidade de carga de um sistema. A análise mostrou que a associação da espessura da camada do aterro com as propriedades do geossintético representam um papel significativo no dimensionamento, em contrapartida as propriedades mecânicas do solo não afetam significativamente.

De modo a complementar métodos de dimensionamento anteriores, Briançon & Villard (2008) propuseram levar em consideração aos mecanismos usuais o alongamento do geossintético nas áreas de ancoragem e o aumento da tensão nas bordas da cavidade. Um estudo paramétrico mostrou que os parâmetros geométricos, como o diâmetro da cavidade e altura do aterro sobre a mesma e alguns parâmetros físicos, como o coeficiente de expansão ou coeficiente de atrito entre a interface solo-geossintético, foram os que mais influenciaram no dimensionamento.

Tahmasebipoor *et al.* (2012) investigaram o comportamento do solo reforçado com geotêxtil sobre uma cavidade subterrânea por meio de uma análise bidimensional por elementos finitos, na condição de deformação plana. Os resultados dos estudos concluíram que ao se utilizar apenas uma camada de reforço há uma profundidade crítica, na qual o deslocamento é máximo. Estes deslocamentos reduzem com o aumento da rigidez do reforço e o mesmo ocorre quando se elevam o número de camadas e/ou o comprimento do reforço, no entanto para esta condição há um valor que limita a influência. Ademais, o aumento do comprimento do geossintético, para um dado carregamento e rigidez à tração, será mais influente quanto maior o diâmetro da cavidade.

Feng & Lu (2015) estudaram um modelo para análise do comportamento do reforço geossintético sobre dois vazios adjacentes submetidos a um carregamento vertical distribuído. Para o estudo foram considerados os métodos de análise de deformação de geossintéticos, o efeito do arqueamento do solo de modo a determinar a carga subjacente imposta ao reforço, e uma simplificação com relação ao atrito nas interfaces superior e inferior da camada de reforço com o solo. Propriedades físicas e mecânicas do solo, a altura da camada subjacente, tensão e atrito na interface solo-geossintético, bem como o tamanho e distância entre vazios podem afetar o comportamento do reforço.

Villard *et al.* (2016) fizeram um estudo numérico sobre o comportamento mecânico de aterros granulares reforçados com geossintéticos em áreas susceptíveis a formação de buracos. A verificação do modelo foi realizada comparando-se o mecanismo de distribuição de carga e deflexão do geossintético com dados experimentais. Como resultado, verificou-se que o modo com que a cavidade se expande influencia significativamente no formato de distribuição das tensões transmitidas ao reforço sobre a cavidade e no mecanismo de expansão do solo.

Huckert *et al.* (2016) estudaram o efeito da aplicação de geotêxteis quando inseridos abaixo da camada de aterro e acima de um vazio de 2,2 m de diâmetro. Para algumas configurações de

ensaio estudadas, foi associado ao carregamento a aplicação de dez ciclos de 20 kN de carga. Observou-se que o geotêxtil impediu o colapso do aterro acima do vazio, além de não permitir deflexões significativas na superfície do aterro.

Tano *et al.* (2018) estudaram experimentalmente a eficiência do reforço geossintético sobre uma cavidade de 0,5 m de largura, para limitação de deformações de um sistema de revestimento geossintético, por meio de um equipamento de grande escala. Duas configurações de ensaio foram estudadas: a primeira envolveu um revestimento geossintético de argila, um geotêxtil não tecido e uma geomembrana de alta densidade; já na segunda configuração foi inserida uma geogrelha dentro da camada de areia, abaixo do revestimento geossintético, com objetivo de reforçar a camada acima da cavidade. Após a aplicação de um carregamento, variando-se de 10 a 100 kPa no topo do sistema de revestimento geossintético, os resultados mostraram que houve uma redução na deformação interna máxima da geomembrana, em média de 25%, quando empregada a geogrelha como reforço.

Observa-se nos estudos citados que as considerações de carregamento impostas ao sistema foram adotadas como constantes e uniformemente distribuído na superfície, com exceção de Huckert *et al.* (2016). Em consequência, atualmente, há um déficit na literatura de trabalhos envolvendo carregamento constante e cíclico sobre cavidades/bolsões compressíveis no solo, condição da presente pesquisa.

3 MATERIAIS UTILIZADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as principais informações sobre os materiais utilizados nesta pesquisa. Será descrita a metodologia empregada para a montagem e realização dos ensaios de carregamento cíclico visando a simulação do comportamento de estradas não pavimentadas submetidas ao tráfego de veículos, para as condições reforçadas e não reforçadas com geossintético, na presença de um bolsão compressível localizado no interior do subleito da mesma.

3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

Para simulação do comportamento de uma estrada não pavimentada reforçada com geossintético, na presença do bolsão compressível, foi adotado o perfil transversal apresentado na Figura 3.1. Nesta, observa-se que a estrada simulada é composta por uma camada de subleito de 30 cm de espessura e uma camada de aterro de 22 cm de espessura, a qual representa a camada de base. Com exceção do material de reforço, os ensaios de caracterização dos materiais do subleito, bolsão e aterro foram realizados nas dependências do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília e do Laboratório de Infraestrutura Rodoviária, ambos localizados na Universidade de Brasília. Os materiais empregados nesta pesquisa serão descritos de acordo com a sua aplicação.

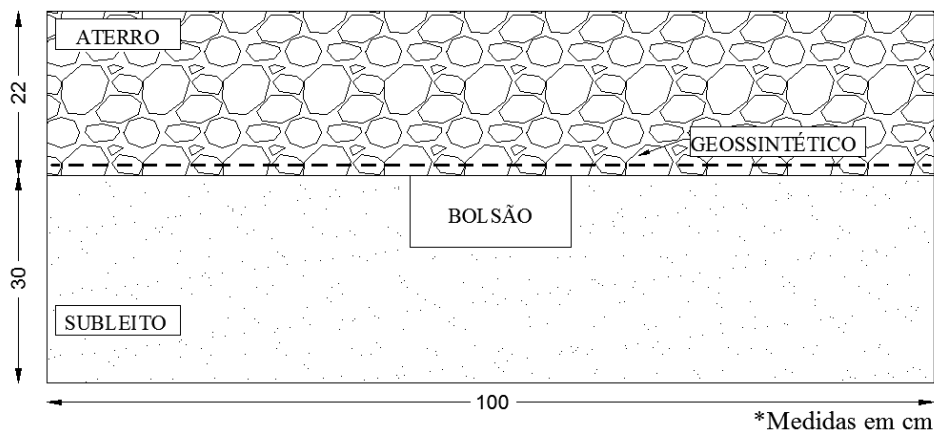


Figura 3.1: Perfil transversal da estrada não pavimentada estudada.

3.1.1 Subleito

O solo utilizado como material de subleito foi uma areia seca, de granulometria fina à média (Figura 3.2), classificada como SP conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos. A curva de distribuição granulométrica do solo pode ser observada na Figura 3.3.

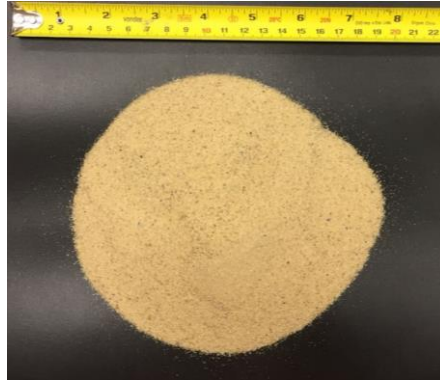


Figura 3.2: Areia empregada como material de subleito.

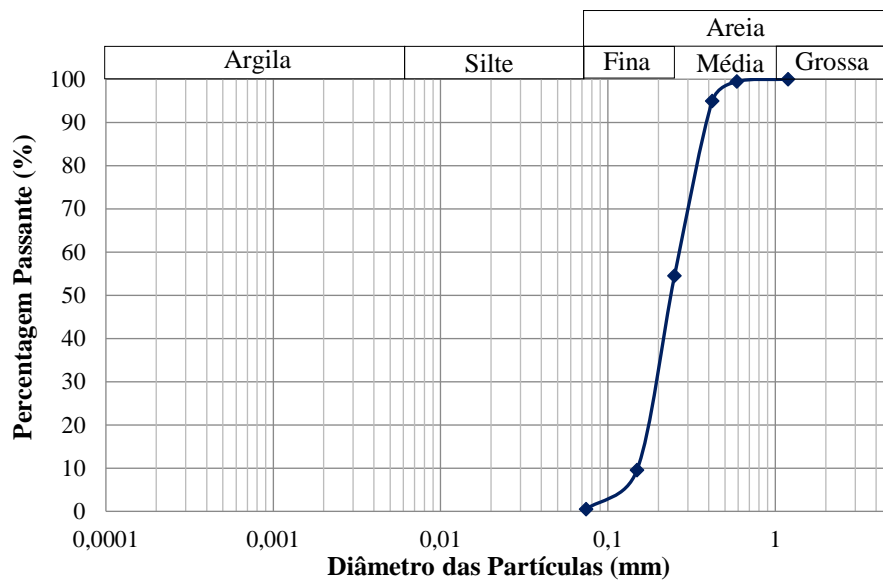


Figura 3.3: Distribuição granulométrica da areia.

As propriedades relevantes deste material encontram-se na Tabela 3.1, as quais foram determinadas por meio de ensaio em laboratório conforme as recomendações de suas respectivas normas técnicas. De acordo com os coeficientes de uniformidade e de curvatura obtidos, observa-se que a areia emprega é classificada como uniforme e mal graduada.

Tabela 3.1: Caracterização da Areia.

Normatização	Ensaio	Resultado
	Análise Granulométrica	Figura 3.1
NBR 7181/1984	D ₁₀ (mm)	0,16
	D ₃₀ (mm)	0,20
	D ₅₀ (mm)	0,24
	D ₆₀ (mm)	0,27
	C _u	1,69
	C _c	0,93
NBR 6508/1984	Peso Específico dos Sólidos (kN/m ³)	26,15
	Índice de Vazios Mínimo	0,54
NBR 3388/1990	Peso Específico condição de índice de vazios mínimo (kN/m ³)	16,97
	Índice de Vazios Máximo	0,79
NBR 3324/1990	Peso Específico condição de índice de vazios máximo (kN/m ³)	14,59

A caracterização mecânica foi realizada por meio do ensaio de resistência ao cisalhamento direto, conforme as recomendações da norma ASTM D 3080, para obtenção da envoltória de resistência sob tensões compatíveis com as atingidas nos ensaios de carregamento cíclico. Para preparação da amostra atentou-se em manter a mesma compacidade relativa média adotada no ensaio em modelo, ou seja, 72%. O ensaio foi realizado sob uma velocidade constante de 0,5 mm/min e foi adotada a caixa de 10.000 mm² para a preparação das amostras. Os comportamentos tensões cisalhantes-deslocamentos obtidos podem ser observados na Figura 3.4. Já a Figura 3.5 apresenta a envoltória obtida a partir dos níveis de tensão normal aplicados de 50, 100, 150 e 200 kPa, onde pode-se notar a forma curva da envoltória. Como consequência, o ângulo de atrito interno médio obtido para o solo foi de 36,8°.

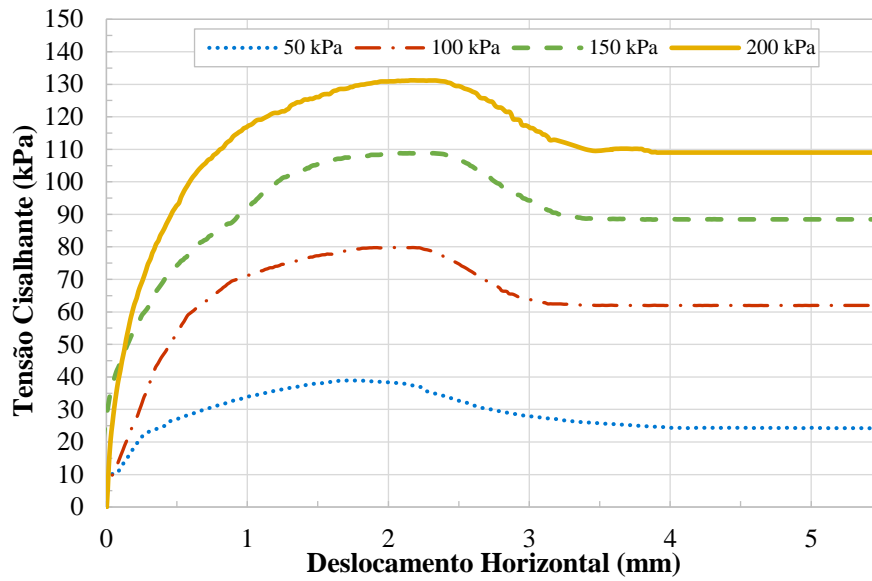


Figura 3.4: Resultados do ensaio de cisalhamento da areia.

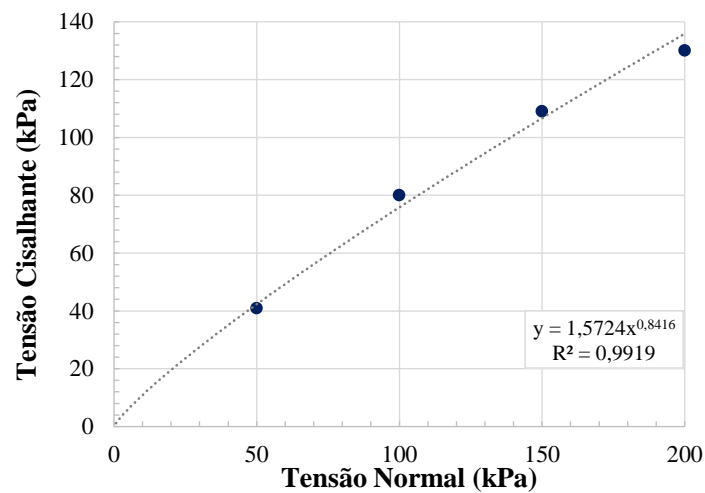


Figura 3.5: Envoltória de ruptura do solo ensaiado.

3.1.2 Aterro

Empregou-se como material de aterro a brita 1 (Figura 3.6), de origem calcária, proveniente da fornecedora Bela Vista, localizada no Distrito Federal. As propriedades relevantes do agregado encontram-se na Tabela 3.2, as quais foram determinadas à luz das respectivas especificações técnicas. A distribuição granulométrica do agregado está apresentada na Figura 3.7.



Figura 3.6: Brita utilizada como material de aterro.

Tabela 3.2: Caracterização da Brita.

Normatização	Ensaio	Resultado
	Análise Granulométrica	Figura 3.7
NBR 7217/1987	D ₅₀ (mm)	14,0
	D _{máx} característico (mm)	19,0
	C _u	1,60
	C _c	0,98
DNER 195/1997	Peso Específico dos Sólidos (kN/m ³)	27,61
	Absorção (%)	0,44
NBR 3388/1990	Índice de Vazios Mínimo	0,67
	Peso Específico condição de índice de vazios mínimo (kN/m ³)	16,55
NBR 3324/1990	Índice de Vazios Máximo	0,88
	Peso Específico condição de índice de vazios máximo (kN/m ³)	14,71
DNER 035/1998	Abrasão "Los Angeles" (%)	14,03

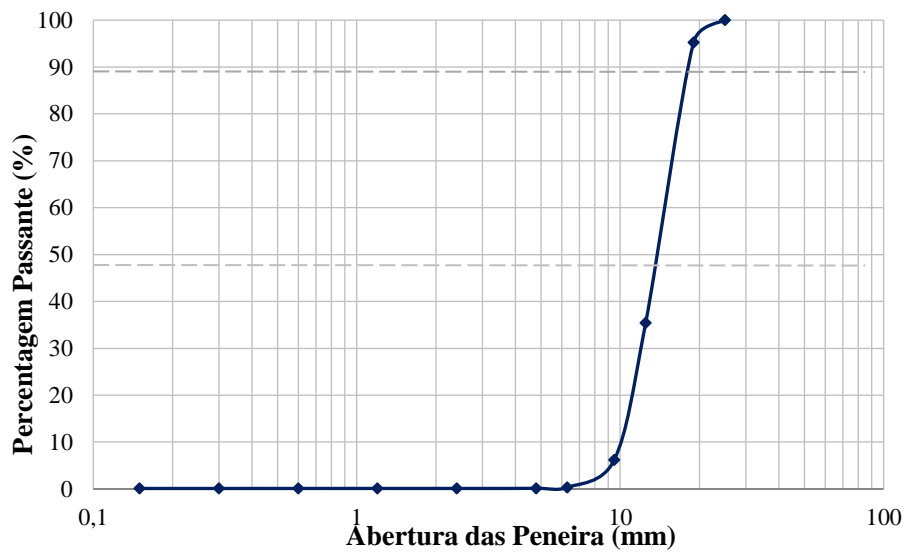


Figura 3.7: Distribuição Granulométrica da Brita.

Para a caracterização mecânica da brita foi empregado o ensaio de cisalhamento direto de médio porte, cujas dimensões da caixa são 300 mm x 300 mm x 220 mm, para permitir a representatividade da amostra, visto que a dimensão máxima característica do agregado é 19,0 mm. O equipamento encontra-se no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (Figura 3.8) e maiores informações sobre ele podem ser obtidas em Sánchez (2018).



Figura 3.8: Equipamento de cisalhamento direto de médio porte.

Em função da limitação da tensão aplicada pelo equipamento, foram ensaiadas amostras sob pressão normal de 30, 50, 75 e 100 kPa para a obtenção da envoltória de resistência do agregado. Atentou-se em dispor o agregado de modo a manter o grau de compactação adotado para o ensaio de carregamento cíclico, a saber 95%. O comportamento força cisalhante versus

deslocamento horizontal, para os níveis de tensão normal ensaiadas, pode ser observado na Figura 3.9.

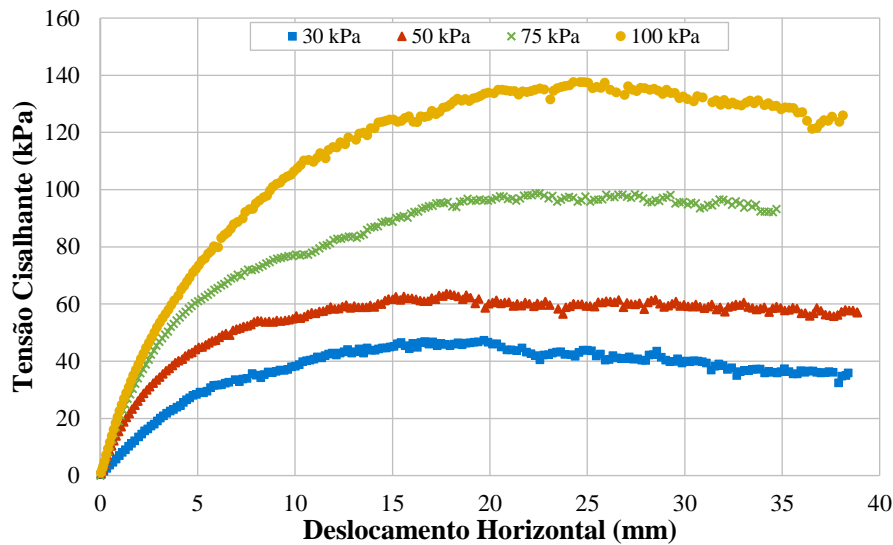


Figura 3.9: Resultado do ensaio de cisalhamento direto da brita 1.

Partindo-se das tensões cisalhantes máximas e suas correspondentes tensões normais pôde-se obter a envoltória de resistência do material de aterro, conforme Figura 3.10, onde o ângulo de atrito médio obtido para o material de aterro foi de $53,9^\circ$. De acordo com Malysz (2004), o grau de compactação e a granulometria influenciam no comportamento mecânico do agregado, partindo-se deste princípio pode-se inferir que o valor elevado do ângulo de atrito obtido foi coerente para o grau de compactação elevado empregado no ensaio.

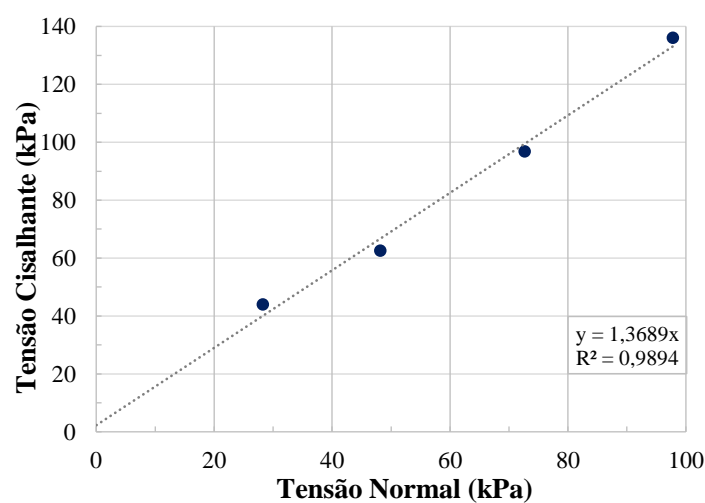


Figura 3.10: Envoltória de ruptura do agregado graúdo ensaiado.

3.1.3 Bolsão compressível

Com o objetivo de simular o comportamento de um bolsão compressível no subleito foi utilizada uma espuma flexível em formato cilíndrico, com espessura de 10 cm e em diferentes diâmetros, localizada sob o eixo de aplicação do carregamento. A compressibilidade da espuma foi avaliada por meio do ensaio de compressão adaptado, de modo a obter o seu comportamento tensão-deformação. Este ensaio foi executado manualmente devido à falta de sensibilidade dos equipamentos de compressão, pelo fato de a espuma ser altamente deformável se comparada a amostras de solo. As amostras foram limitadas lateralmente por um cilindro rígido, visto que esta será a condição mais próxima à submetida durante os ensaios, ou seja, confinada pelo subleito. De modo a reduzir o atrito lateral com a amostra, foram aplicadas duas camadas de parafina e filme plástico no cilindro. O procedimento de ensaio consistiu no carregamento das amostras por meio de pesos e posterior medição da altura após cada carregamento, conforme Figura 3.11. Os resultados médios dos ensaios de compressão podem ser observados na Figura 3.12.



Figura 3.11: Montagem do ensaio de compressibilidade da espuma.

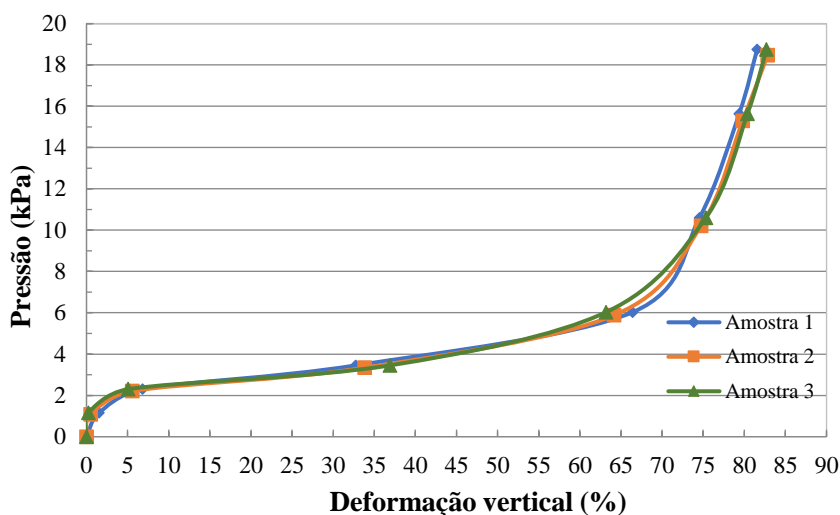


Figura 3.12: Avaliação da compressibilidade da espuma.

A escolha dos diâmetros da espuma teve como referência o diâmetro de 18 cm da placa de carregamento utilizada nos ensaios de carregamento cíclico. Obedecendo-se a variação de aproximadamente 30% foram adotados os diâmetros de 14cm, 18 cm e 23 cm. Esta variação teve por objetivo avaliar a influência desta característica geométrica no comportamento mecânico da estrada simulada, bem como avaliar o impacto na interação entre a geogrelha e o material de aterro.

3.1.4 Reforço geossintético

As geogrelhas selecionadas para avaliar a atuação como reforço são geogrelhas biaxiais, flexíveis, especificamente desenvolvidas para reforço de base e sub-base de pavimentos. Têm como características principais a alta tenacidade e baixa fluência, as quais possibilitam a obtenção de elevadas resistências e baixas deformações. A escolha do reforço baseou-se na fixação de uma das propriedades e na variação de outra, para avaliar a influência daquela. Desta forma, foram selecionadas três geogrelhas com diferentes aberturas de malha e com valores de catálogo de rigidez à tração próximos, identificadas como Reforço 1 (R1), Reforço 2 (R2) e Reforço 3 (R3), respectivamente (Figura 3.13). Já os valores de aberturas equivalentes das geogrelhas, definidos como a média geométrica das medidas da abertura nas duas direções e demais propriedades físicas das geogrelhas estão listados na Tabela 3.3.

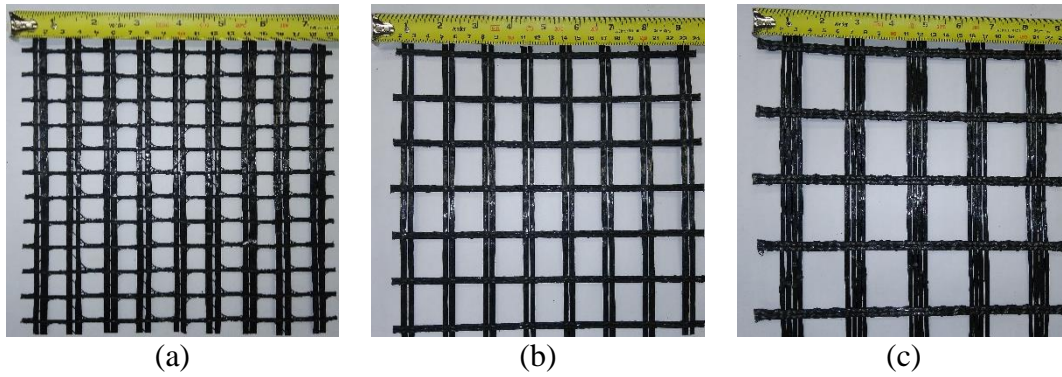


Figura 3.13: Amostra de reforço utilizado (a) R1; (b) R2; (c) R3.

Tabela 3.3: Propriedades físicas das geogrelhas ensaiadas.

Propriedades	Geogrelha		
	R1	R2	R3
Abertura direção transversal (mm)	14,6	25,3	39,8
Abertura direção longitudinal (mm)	13,2	21,3	31,7
Abertura equivalente (mm)	13,9	23,2	35,5
Largura dos membros transversais (mm)	7,9	8,9	15,1
Largura dos membros longitudinais (mm)	2,4	4,3	6,7
Espessura dos membros transversais (mm)	0,8	0,9	1,5
Espessura dos membros longitudinais (mm)	1,2	1,3	2,2

As geogrelhas foram submetidas ao ensaio de tração de faixa larga com vídeo extensômetro na prensa Instron, de capacidade de 250 kN, conforme recomendações da norma brasileira NBR ISO 10319/2013. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP. Para cada reforço foram ensaiados cinco corpos de prova em cada sentido de fabricação (longitudinal- MD e transversal- CD). Na Figura 3.14 observa-se o ensaio montado e o ensaio em execução onde a amostra encontra-se deformada, respectivamente. Os resultados médios obtidos para o ensaio de tração de faixa larga podem ser observados na Tabela 3.14.

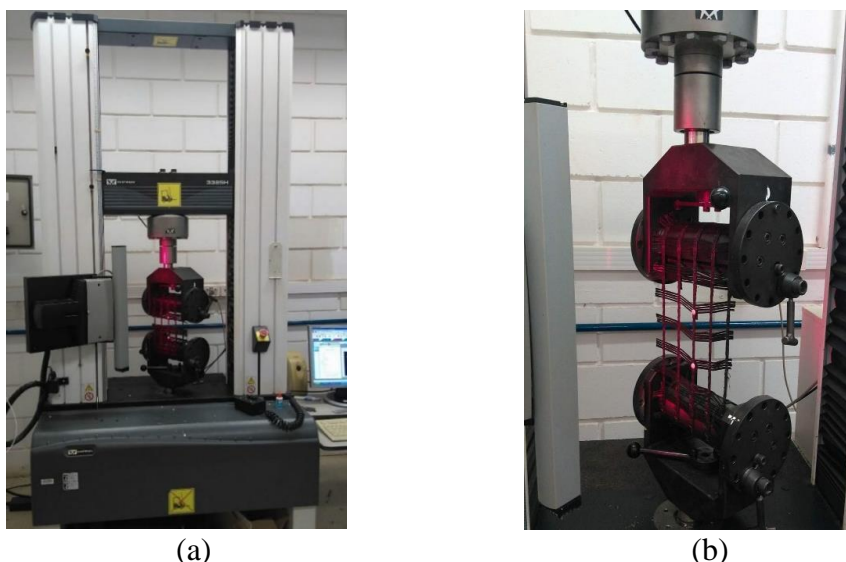


Figura 3.14: Ensaio de tração de faixa larga: (a) Ensaio montado; (b) Ensaio em execução.

Tabela 3.4: Resultados médios do ensaio de tração das amostras.

Reforço		J _{2%} (kN/m)	J _{5%} (kN/m)	T _{máx.} (kN/m)	ξ _{máx.} (%)
R1	MD	840	594	33,7	7,0
	CD	715	506	28,6	6,4
R2	MD	525	478	29,4	6,6
	CD	590	476	35,6	7,0
R3	MD	984	660	43,1	5,9
	CD	1144	710	47,0	4,6

Onde: $J_{x\%}$ = Rigidez secante no percentual x de deformação; $\xi_{máx.}$ = Deformação máxima na ruptura; $T_{máx.}$ = Resistência máxima à tração; MD = Ensaio na direção longitudinal de fabricação; CD = Ensaio na direção transversal de fabricação.

3.2 EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE CARREGAMENTO CÍCLICO

Os ensaios de carregamento cíclico foram realizados no equipamento de grandes dimensões desenvolvido por Góngora (2015), de modo a simular, de maneira mais próxima, o comportamento de uma estrada não pavimentada, conforme mostra a Figura 3.15. O equipamento consiste em um tanque cilíndrico de concreto armado com diâmetro interno de 1,00 m, altura de 0,52 m e uma estrutura de reação. A aplicação do carregamento se dá por meio de um cilindro hidráulico, acoplado à estrutura, uma célula de carga para obtenção da carga aplicada e uma placa rígida com diâmetro de 0,18 m (Figura 3.16). A adoção deste diâmetro da placa de carregamento deve-se à equivalência das áreas do círculo e do retângulo que representa

a área de contato típica entre o pneu e a pista, responsável pela transmissão do carregamento referente ao eixo padrão simples de roda dupla em estradas não pavimentadas reforçadas com geossintético, conforme Giroud & Noiray (1981).



Figura 3.15: Equipamento de ensaio.

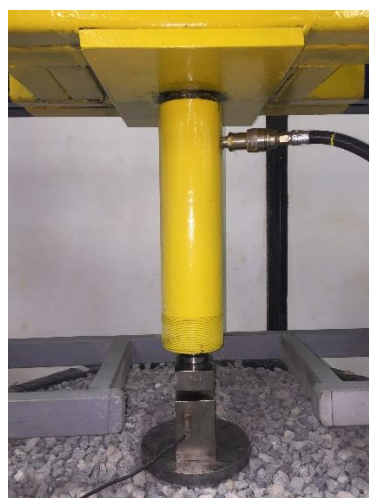


Figura 3.16: Sistema de aplicação de carga.

O sistema hidráulico de aplicação do carregamento cíclico é composto por:

- Conjunto motor-bomba: promove a circulação do fluido e possibilita o ajuste do nível de pressão desejado no cilindro hidráulico;
- Mangueira hidráulica de alta pressão: transporta o fluido do conjunto motor-bomba para o cilindro hidráulico;
- Válvula de alívio: protege o circuito contra pressões excessivas;
- Válvula solenoide e direcional: permite o controle da circulação do fluido no circuito, proporcionando assim um sistema carregado, quando o fluido segue para o cilindro hidráulico, e descarregado, quando há uma despressurização do fluido;
- Cilindro hidráulico: responsável pela aplicação do carregamento;
- Manômetro: permite o ajuste da carga a ser aplicada conforme pressão aplicada no circuito;
- Temporizador: responsável por controlar a frequência de aplicação da carga.

3.3 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação utilizada no modelo reduzido da estrada não pavimentada simulada teve por objetivo monitorar grandezas relevantes para o estudo, a saber: carga aplicada, tensões totais e deslocamentos superficiais. Para tanto, em todos os ensaios foram utilizados célula de carga, células de tensões totais e medidores de deslocamento linear, todos previamente calibrados junto ao sistema de aquisição de dados.

3.3.1 Célula de carga

Para medir a carga aplicada pelo cilindro hidráulico sobre a placa metálica de carregamento foi utilizada uma célula de carga com capacidade máxima de 100 kN (Figura 3.17). A calibração foi realizada no Laboratório de Fadiga, Fratura e Materiais do Laboratório de Engenharia Mecânica da UnB, numa prensa hidráulica do tipo MTS (*Material Test System*) com capacidade de carga máxima de 65 kN.



Figura 3.17: Célula de carga utilizada nos ensaios.

3.3.2 Célula de tensão total

Foram posicionadas no interior do subleito cinco células de tensão total, com a finalidade de registrar tensões totais verticais no solo, em diferentes profundidades. Tratam-se de células tipo diafragma, fabricadas pela empresa Micro Sensores Industrial, com diâmetro de 75 mm, sendo duas de capacidade máxima de 600 kPa e as demais com capacidade máxima de 300 kPa, ambos modelos com uma acurácia de 1%. A Figura 3.18 apresenta uma das células utilizada nos ensaios.



Figura 3.18: Célula de tensão total usada na pesquisa.

Para a calibração das células de tensão total foi utilizado o equipamento apresentado na Figura 3.19, que permite a calibração da célula imersa no solo a ser utilizado nos ensaios. Conforme apresentado em Pires (2017), o equipamento é composto por três partes: uma caixa rígida de aço com dimensões 300 mm x 300 mm x 300 mm e dois sistemas de ar-água, sendo um reservatório cilíndrico de água conectado à instalação de ar comprimido. A aplicação de incrementos de pressão no solo foi feita por injeção de água na membrana de borracha, fixada

na parte inferior da tampa. As pressões aplicadas eram controladas pelos manômetros existentes no regulador do sistema de ar comprimido e na tampa da caixa.

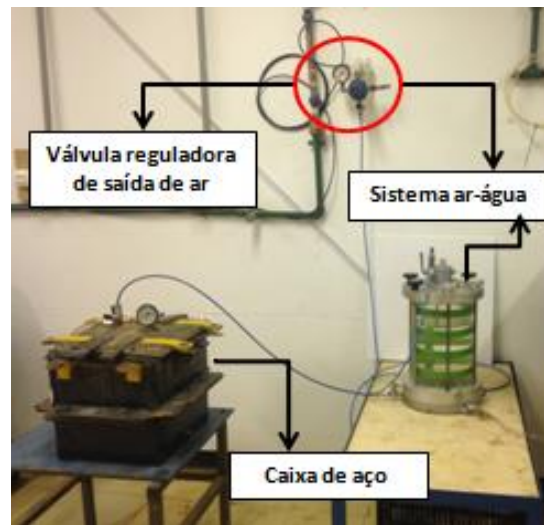


Figura 3.19: Equipamentos empregados na calibração da célula de tensão total (Pires, 2017).

Previamente à preparação do ensaio de calibração de cada célula de tensão foram aplicadas duas camadas de filme plástico, intercaladas com vaselina, para redução do atrito lateral com a camada de areia. A metodologia adotada para preenchimento da caixa com a areia foi a mesma utilizada para disposição da camada de subleito, conforme será apresentado em 3.5.2, de modo a garantir a mesma compacidade relativa. A areia foi disposta até a metade da altura da caixa, onde foi instalada a célula de tensão total e posteriormente preencheu-se a caixa com o restante do material. Para uniformizar a distribuição da tensão aplicada na superfície da amostra foram dispostas algumas membranas de borracha sobre a camada final da areia. As pressões aplicadas eram verificadas no manômetro acoplado à tampa enquanto o aquisitor de dados registrava a voltagem resultante na célula de tensão total, correspondente a cada pressão aplicada.

3.3.3 Transdutores de deslocamento linear

A determinação do afundamento da placa de carregamento e da superfície do aterro foi realizada por transdutores de deslocamento linear do tipo potenciômetro (Figura 3.20), com deslocamento máximo de 100 mm, suficiente para os objetivos do trabalho. Esse transdutor converte o deslocamento mecânico em uma saída elétrica em forma de tensão, que é registrada pelo sistema de aquisição de dados. Cada um dos medidores empregados foi devidamente calibrado com o auxílio de um micrômetro.



Figura 3.20: Transdutor de deslocamento linear adotado nos ensaios.

3.3.4 Aquisitor de dados

Para a conversão das leituras analógicas dos sensores em leituras digitais foi necessário a utilização de um sistema de aquisição de dados. O aquisitor empregado foi fabricado pela empresa LYNX, modelo ADS 2000, que utiliza software específico (AqDados 7) para aquisição e processamento dos sinais da instrumentação, Figura 3.21. O software permite a aquisição simultânea de dados de todos os canais, além de possibilitar a programação da frequência com que os dados são arquivados.

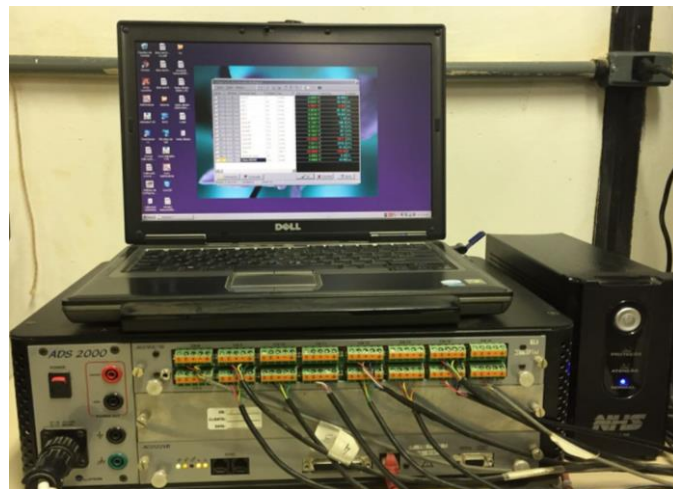


Figura 3.21: Equipamento para aquisição de dados.

3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS

O programa experimental desta pesquisa consistiu na realização de ensaios em grande escala, variando-se o tipo de reforço e o diâmetro do bolsão compressível, este representado pela espuma. Na Tabela 3.5 estão indicadas as variáveis em estudo e suas respectivas simbologias.

Tabela 3.5: Variáveis em estudo.

Variável	Simbologia
Tipo de reforço	R1
	R2
	R3
Diâmetro do bolsão compressível (cm)	CE-14
	CE-18
	CE-23

A nomenclatura dos ensaios identifica primeiramente o tipo de reforço e posteriormente o tamanho do bolsão compressível. Para os ensaios sem reforço e/ou sem espuma foram utilizadas como identificação SR e SE, respectivamente. Foram realizados 16 ensaios, conforme pode ser observado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Identificação dos ensaios realizados.

Ensaio	Identificação	Descrição
1	SR-SE	Ensaio sem reforço e sem espuma
2	R1-SE	Ensaio com reforço 1, sem espuma
3	R2-SE	Ensaio com reforço 2, sem espuma
4	R3-SE	Ensaio com reforço 3, sem espuma
5	SR-CE-14	Ensaio sem reforço, com espuma de 14 cm de diâmetro
6	SR-CE-18	Ensaio sem reforço, com espuma de 18 cm de diâmetro
7	SR-CE-23	Ensaio sem reforço, com espuma de 23 cm de diâmetro
8	R1-CE-14	Ensaio com reforço 1, com espuma de 14 cm de diâmetro
9	R2-CE-14	Ensaio com reforço 2, com espuma de 14 cm de diâmetro
10	R3-CE-14	Ensaio com reforço 3, com espuma de 14 cm de diâmetro
11	R1-CE-18	Ensaio com reforço 1, com espuma de 18 cm de diâmetro
12	R2-CE-18	Ensaio com reforço 2, com espuma de 18 cm de diâmetro
13	R3-CE-18	Ensaio com reforço 3, com espuma de 18 cm de diâmetro
14	R1-CE-23	Ensaio com reforço 1, com espuma de 23 cm de diâmetro
15	R2-CE-23	Ensaio com reforço 2, com espuma de 23 cm de diâmetro
16	R3-CE-23	Ensaio com reforço 3, com espuma de 23 cm de diâmetro

3.5 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

A metodologia aplicada para a montagem dos ensaios compreendeu as seguintes etapas: disposição e instrumentação do solo de subleito; colocação da espuma, quando fosse o caso;

instalação do reforço, quando aplicável; disposição da camada de aterro e instrumentação superficial.

Para melhor compreensão, a Figura 3.22 contém o esquema do ensaio que permitiu avaliar o desempenho do geossintético aplicado como reforço. Já a Figura 3.23 expõe a configuração com a presença do bolsão compressível, representado pela espuma, diferenciando-se da configuração anterior na localização das células de tensão total.

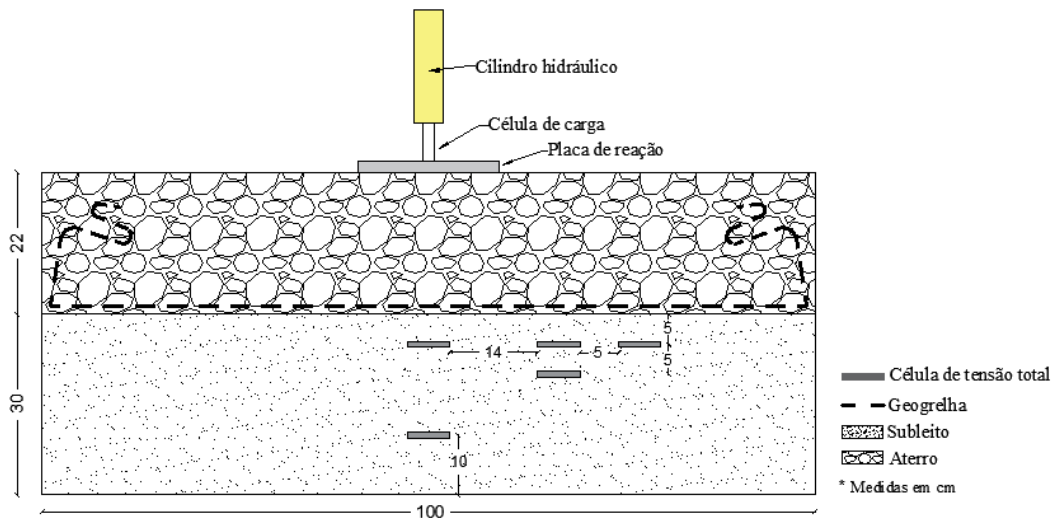


Figura 3.22: Configuração do ensaio reforçado sem a presença do bolsão compressível.

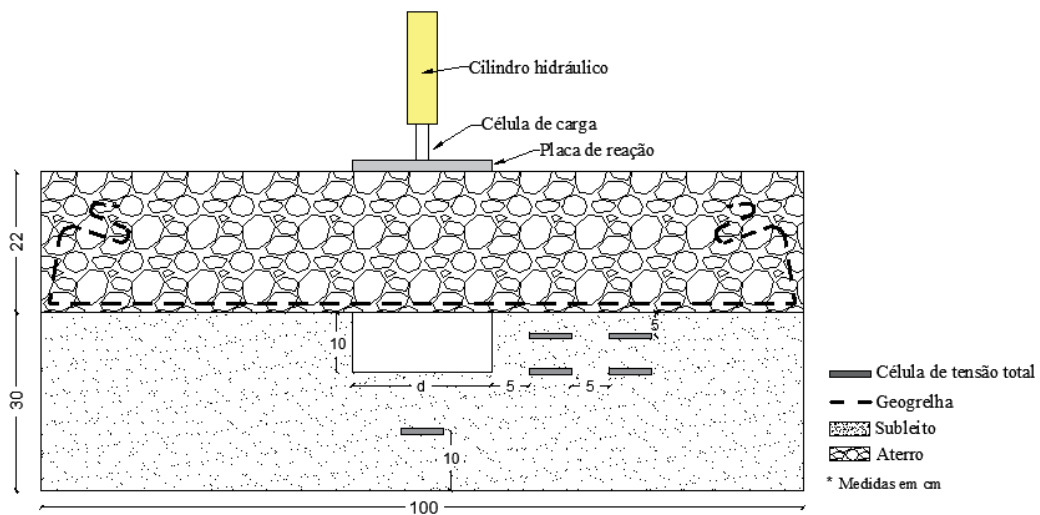


Figura 3.23: Configuração do ensaio reforçado com a presença do bolsão compressível.

Para atender aos objetivos da presente pesquisa, conforme já exposto, foram realizados ensaios variando-se as geogrelhas e os diâmetros da espuma cilíndrica. A propriedade determinante de

diferenciação das geogrelhas foi a abertura da malha, cuja influência na interação com o material de aterro foi avaliada. Já para os bolsões compressíveis a variação do diâmetro permitiu avaliar o impacto no comportamento mecânico da estrada simulada e também na interação solo-geossintético.

3.5.1 Preparação do equipamento de ensaio

Previamente à montagem do ensaio foi necessário preparar o tanque rígido com a finalidade de minimizar o atrito lateral entre a parede interna do tanque e os agregados utilizados no ensaio. Para tal, foram instaladas duas camadas de lona plástica, lubrificadas com vaselina sólida e líquida, como pode ser observado na Figura 3.24.

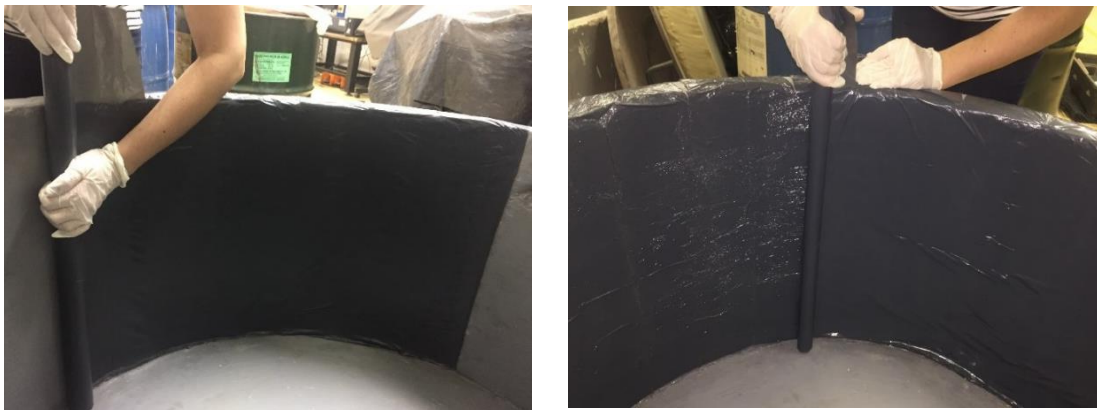


Figura 3.24: Instalação das camadas de lona para redução do atrito.

3.5.2 Disposição da camada de subleito

O material de subleito foi disposto de modo a representar uma camada final de areia no estado denso, cuja compacidade relativa foi aproximadamente 70% e espessura de 30 cm. Optou-se em adotar tal compacidade para que o bolsão representasse uma zona bem mais compressível quando comparada ao restante da camada de subleito. Para atingir a compacidade referida foi necessário adaptar a metodologia de chuva de areia para as limitações impostas pela geometria do equipamento do ensaio. Desta forma, a areia foi disposta manualmente, conforme exposto na Figura 3.25, em três camadas de 10 cm, fixando-se a altura de queda em aproximadamente 50 cm. Para validar a metodologia utilizada, com relação a homogeneidade da compacidade do subleito, foram coletadas amostras em diferentes pontos nas três camadas, totalizando 52 amostras. Na Figura 3.26 observa-se a distribuição da frequência dos resultados de densidade relativa, onde 92,5% dos resultados encontram-se entre 70% e 74%. Conseqüentemente, para

os limites citados, o peso específico variou de $16,66 \text{ kN/m}^3$ a $16,77 \text{ kN/m}^3$, adotando-se como valor médio para a camada de subleito o valor de $16,71 \text{ kN/m}^3$.



Figura 3.25: Disposição da camada de subleito.

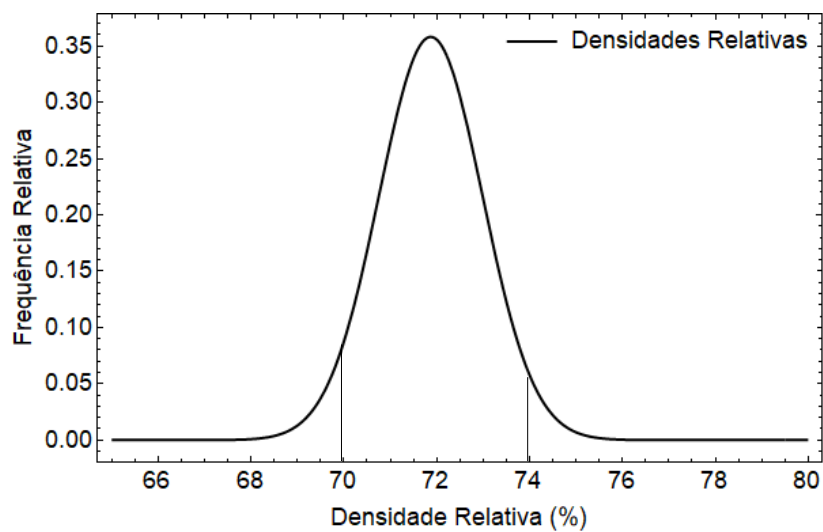


Figura 3.26: Distribuição normal da densidade relativa do material de subleito.

3.5.3 Instalação da instrumentação do subleito

Conforme apresentado nas Figuras 3.22 e 3.23, foram instaladas células de tensão total em três profundidades do subleito. As células foram posicionadas no eixo de aplicação de carga e na lateral. Para a condição sem a presença do bolsão foi colocada uma célula no eixo de carregamento, na profundidade de 5 cm com a interface subleito-base, para quantificar a tensão que chegaria na espuma para a configuração de ensaio com o bolsão compressível. Na Figura 3.27.a é mostrada a instalação da célula de tensão total no eixo de aplicação e nas laterais

(Figura 3.27.b). Para avaliar a influência da espuma na distribuição de tensões laterais as células laterais foram posicionadas a 5 cm de distância da espuma, independente do diâmetro adotado para a mesma.

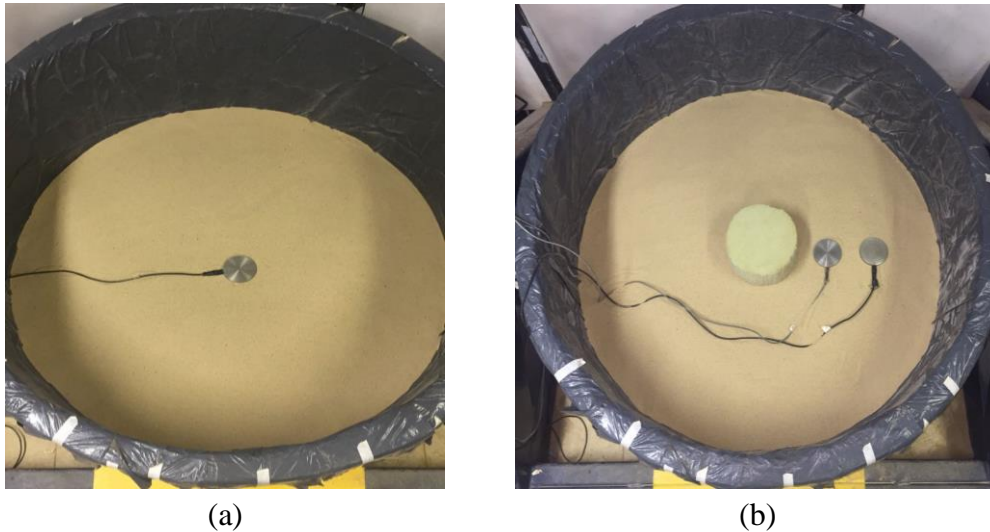


Figura 3.27: Instalação das células de tensão total (a) no eixo de aplicação; (b) na lateral.

3.5.4 Instalação do reforço geossintético

Segundo Trichês *et al.* (2015) ao posicionar a geogrelha na interface subleito-base, para camadas de base entre 15 e 25 cm, sua eficiência como reforço de estradas pavimentadas é considerável. No presente trabalho a camada de base possui 22 cm de espessura, conseqüentemente a geogrelha foi instalada entre as camadas de subleito e base para as configurações de ensaio em que foi analisada a condição de estrada não pavimentada reforçada. Para propiciar a devida ancoragem das extremidades do reforço foi adotado o diâmetro de 150 cm para o mesmo, uma vez que o diâmetro interno do tanque cilíndrico é 100 cm. Conforme pode ser observado na Figura 3.28, a ancoragem foi feita dobrando-se verticalmente cerca de 10 cm da amostra, embutindo-se obliquamente o restante no aterro e dobrando-se novamente em formato de “S”. Na Figura 3.29 é apresentada a instalação do reforço.

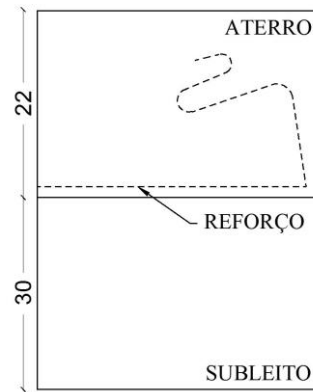


Figura 3.28: Ancoragem do reforço geossintético.



Figura 3.29: Instalação da camada de reforço.

3.5.5 Disposição da camada de aterro

A disposição do material de aterro ocorreu em duas camadas, compactadas estaticamente, totalizando numa camada com espessura final de 22 cm. A densidade relativa média obtida foi de 95%, resultando no peso específico médio da camada de $16,45 \text{ kN/m}^3$. A Figura 3.30 mostra a camada de aterro finalizada.



Figura 3.30: Camada de aterro finalizada.

3.5.6 Instalação da instrumentação superficial

Após montagem do aterro foi instalada a instrumentação superficial, a saber, medidores de deslocamento linear e célula de carga, com o propósito de monitorar o deslocamento vertical da placa de reação e da superfície do aterro e aferir o carregamento aplicado pelo cilindro hidráulico, respectivamente. Foram empregados 5 medidores de deslocamento linear, 2 situados na placa de carregamento e o outros 3 distanciados em 14 cm, 19 cm e 31 cm do centro da placa de carregamento, todos alinhados com o eixo de carregamento. Para instalação da instrumentação foram utilizadas bases de fixação magnética numa estrutura metálica anexada ao equipamento. Na Figura 3.31 verifica-se a disposição da instrumentação superficial.



Figura 3.31: Localização da instrumentação superficial.

3.5.7 Execução dos ensaios de carregamento cíclico

Após instalação da instrumentação superficial, foi posicionada uma célula de carga no eixo de aplicação do carregamento, de modo a monitorar a carga aplicada durante todo o ensaio. Após realizar a configuração do aquisitor de dados e conectar todos os elementos de instrumentação no mesmo, procedeu-se o início do carregamento cíclico. O conjunto motor-bomba foi configurado para que aplicasse o carregamento de 14,3 kN, para simular o carregamento proveniente da roda de um veículo com carga por eixo de 80 kN, correspondendo à pressão de 560 kPa. Adotou-se a frequência de carregamento de 1 Hz para simular a passagem de veículos, considerando a velocidade média em estradas vicinais não pavimentadas. O critério de parada utilizado nos ensaios foi a ocorrência de um afundamento da placa de carregamento igual a 75 mm. De acordo com Giroud & Han (2004), este critério de trilha de roda máxima permitida é amplamente utilizado para estradas não pavimentadas. Já para os ensaios onde o afundamento não atingiu os 75 mm, adotou-se como critério de parada a duração de 270.000 ciclos de carregamento. Optou-se em adotar os 270.000 ciclos, visto que este foi o número de ciclos aplicados para que houvesse o afundamento de 75 mm da placa de carregamento para a configuração convencional de estradas não pavimentadas, ou seja, não reforçada. Na Figura 3.32 encontra-se a configuração completa do ensaio previamente à execução do mesmo. Após realização dos ensaios avaliou-se o índice de quebra dos grãos e a estimativa do ângulo de espraiamento de tensões para todas as configurações estudadas.

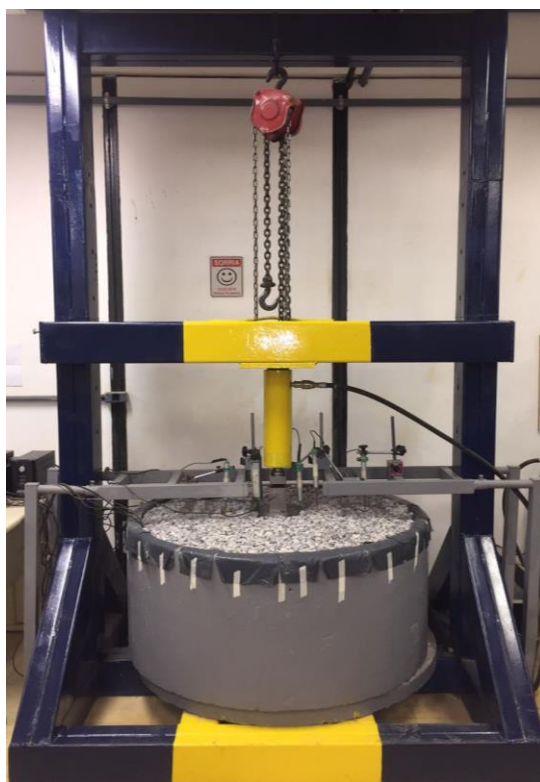


Figura 3.32: Montagem concluída e equipamento preparado para ensaio.

3.5.8 Determinação do índice de quebra dos grãos (B_g)

O índice de quebra dos grãos corresponde à percentagem em peso dos grãos que sofreram fragmentação. O índice foi determinado no eixo de aplicação da carga, em duas profundidades, na superfície onde situava o afundamento da placa e na interface aterro-subleito. A avaliação deste fator tem sua importância, visto que o afundamento da placa de carregamento ocorre também pela combinação entre os fatores rearranjo e quebra dos grãos. Para o cálculo do índice de quebra (B_g) foi necessário realizar ensaios de granulometria antes e após o ensaio, conforme metodologia de cálculo de Marsal (1967), expressada pela Equação 3.1

$$B_g = \sum_1^n (\Delta W_{ki} - \Delta W_{kf}), \text{ para valores } (\Delta W_{ki} - \Delta W_{kf}) > 0 \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde B_g é o índice de quebra dos grãos; ΔW_{ki} percentagem de material retido em cada peneira antes da execução do ensaio; ΔW_{kf} percentagem de material retido em cada peneira após execução do ensaio e n é o número de intervalos de dimensões das partículas considerados.

3.5.9 Determinação do ângulo de espraiamento de tensões (β)

A determinação do ângulo de espraiamento tem como objetivo avaliar a influência do reforço na propagação de tensões para o subleito da estrada. Para sua determinação, após a retirada do material de aterro, foi medida a largura da área deformada na superfície do subleito, resultante da aplicação do carregamento no ensaio, conforme pode ser observado na Figura 3.33. Dispondo-se dessa largura, da altura da camada de base e da largura da placa metálica de carregamento foi estimado o ângulo do tronco de cone (β). O ângulo de espraiamento foi estimado para as condições de estrada não pavimentada sem reforço (β') e reforçada (β''). A Figura 3.34 ilustra o mecanismo de propagação de tensões no interior de uma estrada devido à aplicação de carregamento externo, para as configurações sem reforço e reforçada.

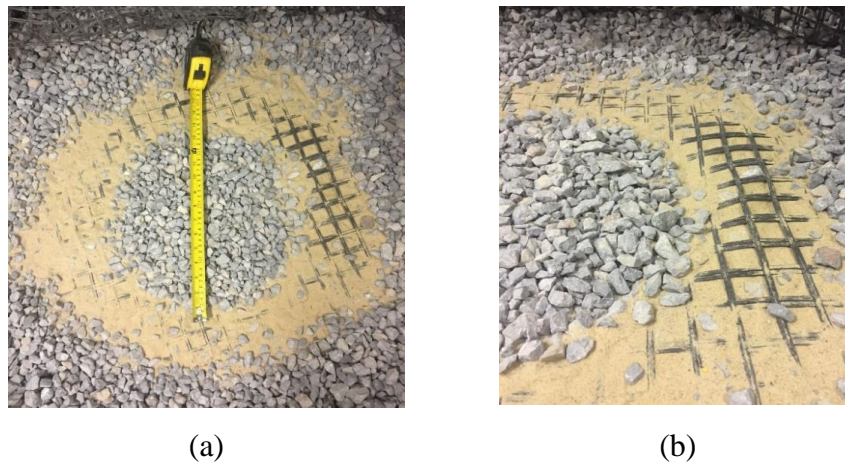


Figura 3.33: Medição da área deformada (a) e detalhamento da região deformada.

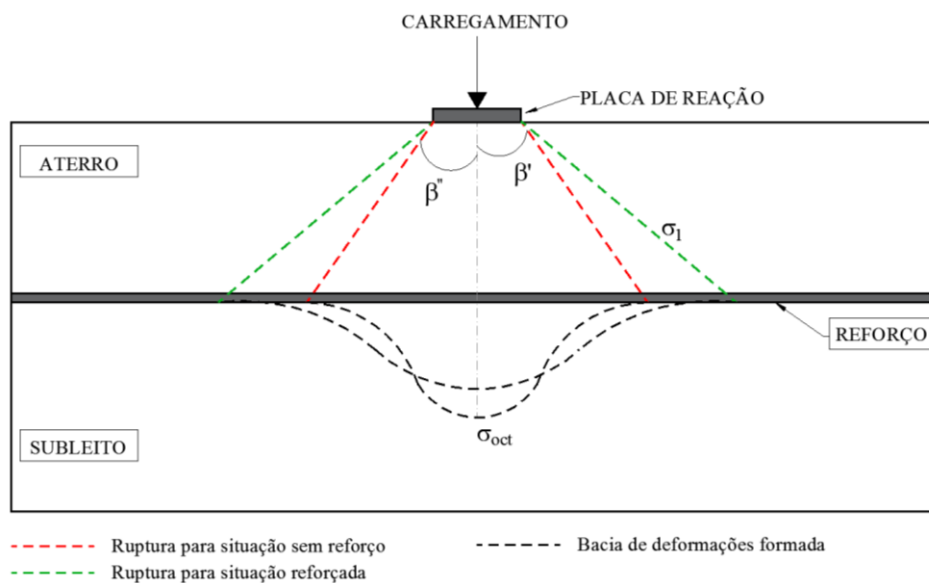


Figura 3.34: Representação do espraiamento de tensões numa estrada não pavimentada para configurações reforçada e não reforçada (modificado – Antunes, 2008).

3.5.10 Determinação do fator de eficiência

Com o intuito de avaliar a eficiência do reforço, foi calculado o fator de eficiência (TBR, *Traffic Benefit Ratio*) para cada um dos reforços empregados na pesquisa. Segundo Perkins & Ismeisk (1997), conforme Equação 3.2, este fator é definido como a razão entre o número de repetições de carga (N_r) necessário para se atingir um determinado afundamento na estrada reforçada e o número de repetições de carga (N_u) para se atingir o mesmo afundamento na estrada não reforçada, no presente estudo, 75 mm.

$$TBR = \frac{N_r}{N_u} \quad \text{Equação 3.2}$$

Na qual, TBR é o fator de eficiência; N_r o número de aplicações de carga na estrada reforçada para um afundamento de trilha de roda de projeto e N_u o número de aplicações de carga na estrada sem reforço para um afundamento de trilha de roda de projeto.

Pelo fato de alguns ensaios não atingirem o afundamento referencial de 75 mm e, conseqüentemente, finalizados pelo critério de número máximo de ciclos (270.000), foi necessário estabelecer um TBR modificado (TBR^*), conforme Equação 3.3. Para determinação do TBR^* fez-se uma projeção do número de ciclos de carregamento que seriam atingidos para o afundamento final da placa de carregamento de 75 mm. Ressalta-se que as extrapolações dos resultados são apenas projeções, podendo o número de ciclos não ser atingido nas condições de campo, devido à quebra dos grãos do aterro.

$$TBR^* = \frac{N_r^*}{N_u} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde TBR^* é o fator de eficiência modificado; N_r^* a projeção do número de aplicações de carga na estrada reforçada para um afundamento de trilha de roda de projeto e N_u o número de aplicações de carga na estrada sem reforço para um afundamento de trilha de roda de projeto.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa para as configurações de ensaio que simularam o comportamento de estradas não pavimentadas, a saber: estradas não reforçadas; reforçadas com geossintético; não reforçadas e com a presença de um bolsão compressível no subleito; e estradas reforçadas na presença do bolsão. Consequentemente, os resultados serão apresentados conforme as configurações ensaiadas. Foram avaliados nos ensaios três geogrelhas como reforço e três diâmetros de espuma para simular o bolsão compressível. Para avaliar a influência destes fatores serão apresentados separadamente os resultados obtidos quanto ao comportamento das deformações atingidas na superfície do aterro, as tensões medidas no subleito em diferentes posições e a influência dos diferentes tamanhos de bolsões no que diz respeito aos deslocamentos superficiais. Posteriormente, serão avaliadas de modo geral propriedades como o fator de eficiência do reforço, ângulo de espraiamento de tensões no subleito, índice de quebra dos grãos e as relações entre a abertura das malhas e o diâmetro dos grãos do aterro.

4.1 ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS

A análise dos deslocamentos superficiais será feita por meio da avaliação do afundamento da placa de carregamento com a aplicação do carregamento cíclico e do perfil de deslocamento superficial ao final de cada ensaio de carregamento cíclico.

4.1.1 Deslocamentos obtidos para configurações de ensaios reforçados sem a presença de bolsão compressível

Nos ensaios onde não houve a simulação de um bolsão compressível pôde-se concluir que, para um mesmo número de aplicações de carga ($N=270.000$), a presença dos geossintéticos proporcionou deformações inferiores no eixo de carregamento, conforme mostra a Figura 4.1. Os resultados mostram que o critério de parada para os mesmos foi o número N de aplicações de carga, uma vez que a deformação superficial não atingiu os 75 mm estabelecidos como a deformação limite para estradas não pavimentadas. O comportamento apresentado no ensaio sem reforço mostra um bom desempenho da estrada simulada, justificado pela adoção de um subleito e base compactos. O reforço que melhor restringiu as deformações superficiais na estrada simulada foi o R2, atingindo 39 mm de afundamento ao final do ensaio. Pode-se concluir que a dimensão da abertura da malha do Reforço 2 promoveu melhor interação com o meio, conferindo maior capacidade de suporte à estrada. Góngora (2015) correlacionou

parâmetros geométricos das geogrelhas e do material de aterro com o desempenho das estradas não pavimentadas reforçadas estudadas em seu trabalho. As duas geogrelhas que proporcionaram melhor desempenho como reforço apresentaram os valores de 1,54 e 1,87 para a relação entre a abertura equivalente da geogrelha e diâmetro médio das partículas do aterro (D_{50}). No presente trabalho foi obtido o valor de 1,66 para a referida propriedade, o que vai ao encontro dos resultados encontrados por Góngora (2015).

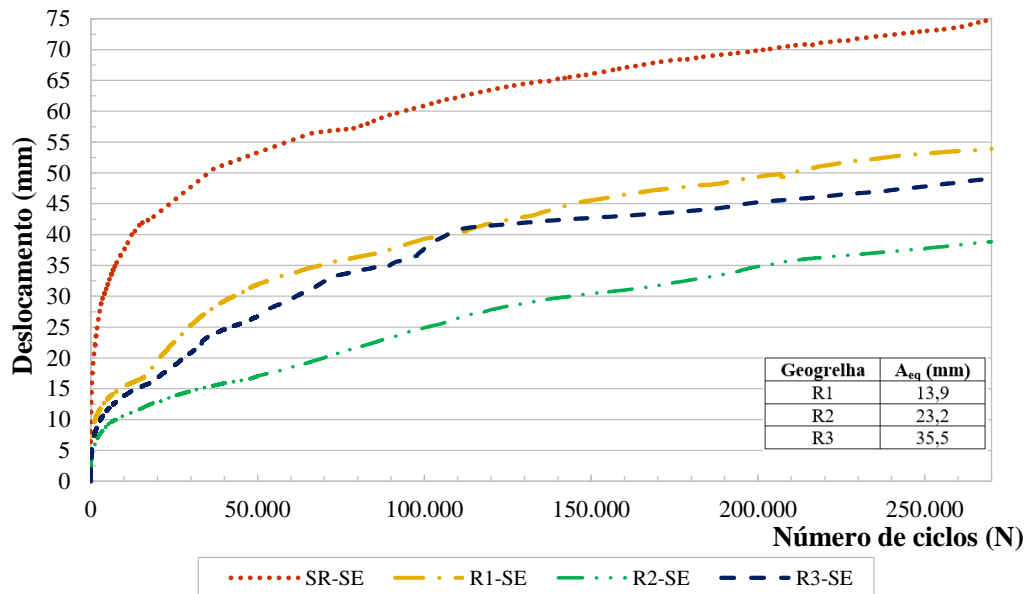


Figura 4.1: Deslocamentos verticais da placa de carregamento versus o número de ciclos de carga para configurações de ensaio sem bolsão compressível.

Além de avaliar a influência do comportamento das deformações na placa de carregamento, foram monitorados pontos distantes do eixo de carregamento em 14, 19 e 31 cm. Na Figura 4.2 são mostrados os perfis de deslocamentos dos ensaios realizados com e sem reforço para a configuração sem o bolsão localizado. Nota-se que para a distância de 31 cm não houve variação considerável nos deslocamentos para os ensaios. Este fato sugere que há pouca influência das fronteiras laterais no comportamento da estrada simulada. Para distâncias de 14 cm e 19 cm percebe-se uma discreta elevação provocada pela interação entre as geogrelhas e o material de aterro devido à restrição do afundamento causada pelo reforço combinada com o efeito de dilatância da brita.

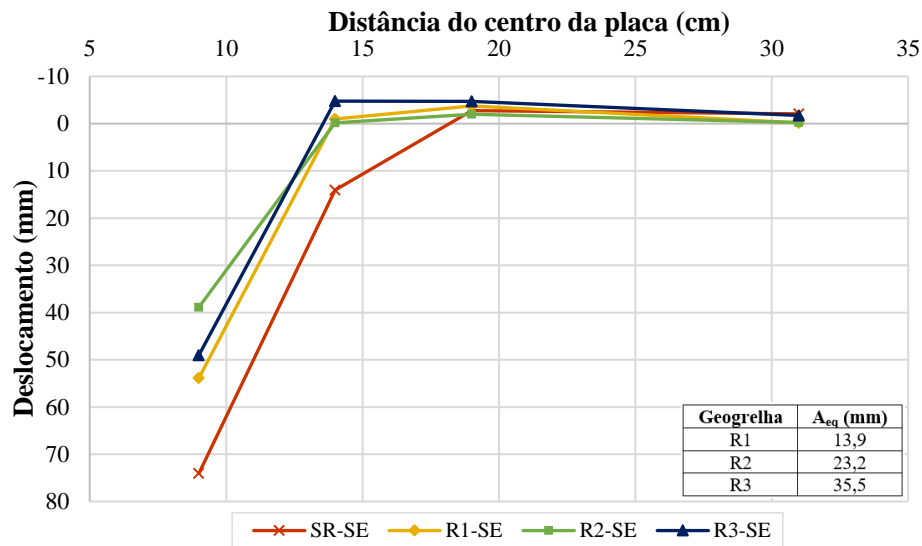


Figura 4.2: Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para configurações de ensaio sem bolsão compressível ao final do ensaio.

4.1.2 Número de ciclos de carga e deslocamentos obtidos para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 14 cm

Nos ensaios onde houve a simulação do bolsão compressível com diâmetro inferior ao da placa de carregamento, ou seja, 14 cm, pôde-se concluir que a presença do bolsão não afetou significativamente o comportamento da estrada não pavimentada. No ensaio sem reforço e com a presença do bolsão foram atingidos os 75 mm referenciais de afundamento para um $N = 229.692$ ciclos, resultando numa redução aproximada de 15% na vida útil da estrada quando comparado com a configuração de ensaio sem o bolsão. A presença dos reforços permitiu que as simulações de estradas alcançassem os 270.000 ciclos com o afundamento da placa inferior aos 75 mm, conforme pode ser observado na Figura 4.3. Com base nos resultados, percebe-se que o reforço R2, assim como nos ensaios sem a presença do bolsão, foi o reforço que melhor interagiu com o meio, proporcionando menores deformações superficiais para um mesmo número de ciclos de carregamento.

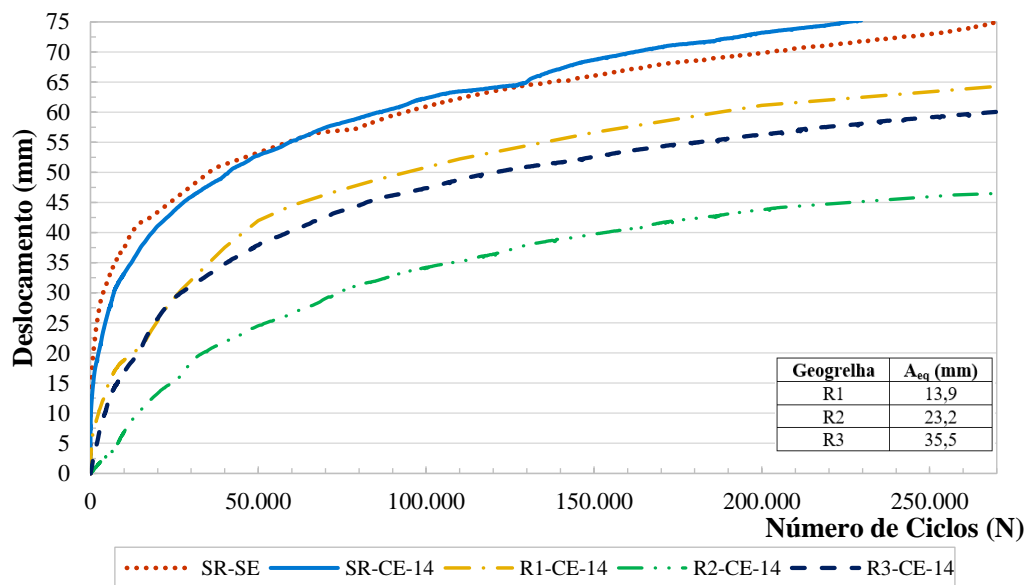


Figura 4.3: Deslocamentos verticais da placa de carregamento versus o número de ciclos de carga para configurações de ensaio com bolsão compressível de 14 cm.

Na Figura 4.4 observam-se os perfis de deslocamento superficial ao final de cada ensaio. Para distâncias a partir de 14 cm do eixo de carregamento percebe-se que, com exceção da situação sem reforço com a espuma, os demais ensaios apresentaram comportamentos similares. A presença da espuma na estrada simulada sem reforço levou à uma ruptura mais localizada, como pode ser verificado no perfil SR-CE-14, que se encontra mais íngreme que os demais nas proximidades do eixo de carregamento.

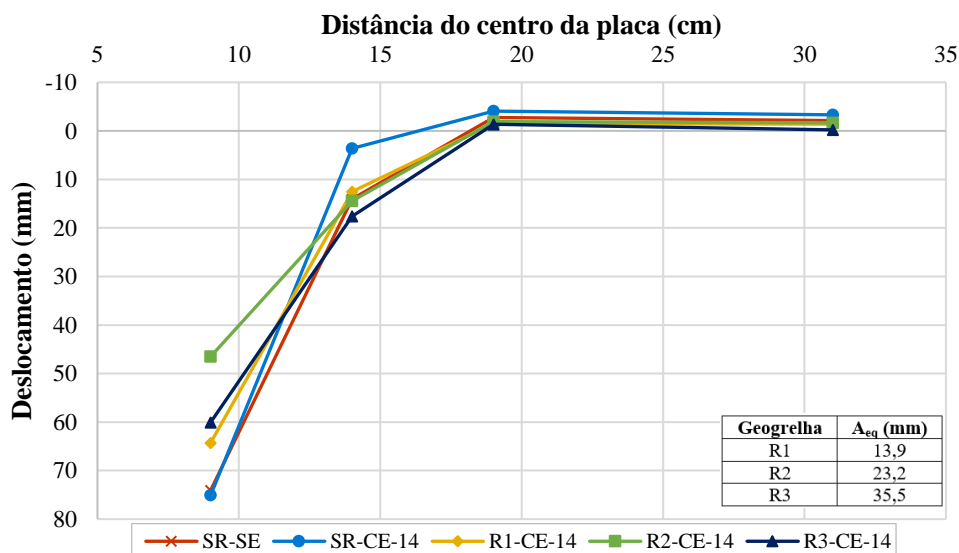


Figura 4.4: Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para configurações de ensaio com bolsão compressível de 14 cm ao final do ensaio.

4.1.3 Número de ciclos de carga e deslocamentos obtidos para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 18 cm

Na Figura 4.5 são observados os afundamentos da placa de carregamento para as configurações que possuíam em seus subleitos o bolsão compressível com o diâmetro igual ao da placa de carregamento. Nota-se que a presença da espuma levou à uma redução de 99% no número de ciclos suportados pela estrada não pavimentada sem reforço estudada, atingindo $N=2307$. Já a presença dos reforços aumentou o número de ciclos suportados, para o mesmo afundamento referencial de 75 mm. Ao analisar os comportamentos dos ensaios reforçados constata-se que o Reforço 3 apresentou melhor comportamento dentre os demais. O ensaio com R3 suportou 120.692 ciclos de carregamento, cerca de 52 vezes mais que a condição não reforçada. Ao comparar este resultado com os resultados apresentados nos ensaios reforçados sem espuma e com a espuma de 14 cm conclui-se que o aumento no diâmetro da espuma proporcionou alguma alteração no comportamento de interação entre a geogrelha e o material de aterro.

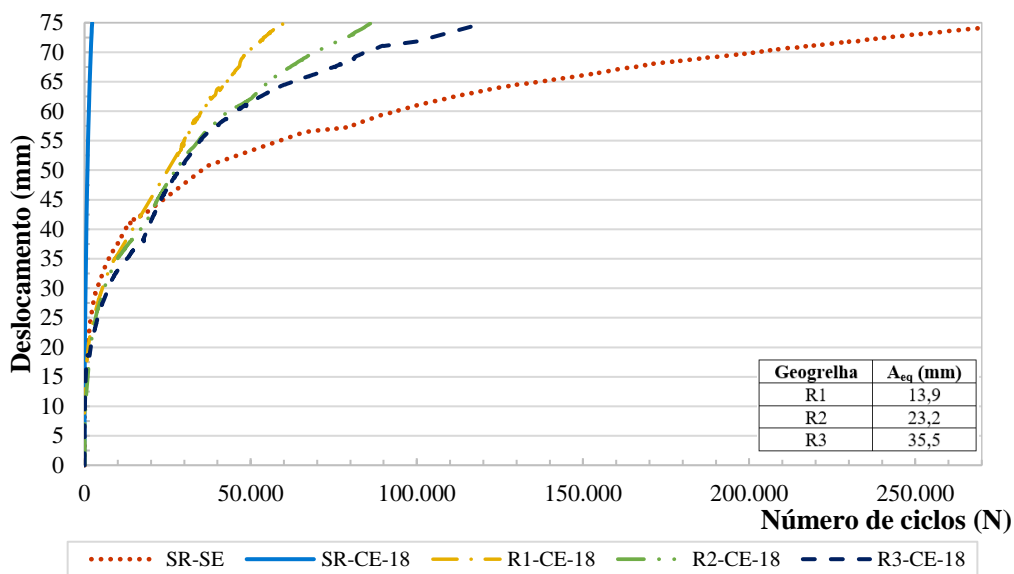


Figura 4.5: Deslocamentos verticais da placa de carregamento versus o número de ciclos de carga para configurações de ensaio com bolsão compressível de 18 cm.

Na Figura 4.6 verificam-se os perfis de deslocamentos superficiais ao final de cada ensaio, com e sem a presença da espuma de 18 cm de diâmetro. Nota-se que os perfis sem reforço com espuma e perfil com reforço R1 encontram-se praticamente sobrepostos, o que reafirma os resultados apresentados na Figura 4.5, em que o R1 apresentou o pior desempenho dentre os reforços no que se refere ao perfil de deslocamentos, mas ainda assim com valor de N bem superior ao da estrada não reforçada. O perfil de deslocamentos gerado no ensaio com o R3

ratifica o fato deste reforço ter apresentado melhor comportamento quanto ao número de ciclos de carregamento suportados. O aumento da capacidade de suporte promovido pelo R3 proporcionou uma bacia de deformação superficial menos acentuada nas proximidades da placa.

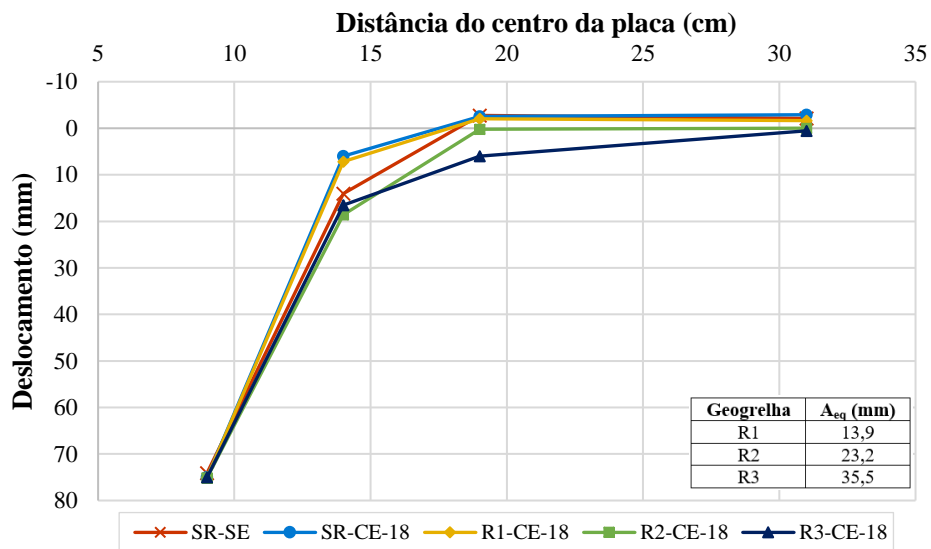


Figura 4.6: Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para configurações de ensaio com bolsão compressível de 18 cm ao final do ensaio.

4.1.4 Número de ciclos de carga e deslocamentos obtidos para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 23 cm

Os resultados obtidos para os comportamentos de deslocamento por número de ciclos de carregamento para os ensaios com a espuma de 23 cm de diâmetro encontram-se na Figura 4.7. Para melhor apresentação destes resultados, na Figura 4.8, encontram-se plotados os deslocamentos para 12.000 ciclos de carregamento. A curva apresentada para o ensaio sem reforço com espuma mostra que o número de ciclos suportados pela estrada não pavimentada, até atingir os 75 mm de deslocamento da placa de carregamento, não representa 0,5% do número de ciclos ($N=1.095$) suportados para configuração de ensaio sem espuma. Quando reforçadas, as estradas não pavimentadas estudadas apresentaram uma melhora mínima de desempenho em 3,3 vezes e máxima de 9,3 vezes. Conforme foi observado para os ensaios com espuma de 18 cm de diâmetro, para a espuma de 23 cm o Reforço R3 também apresentou um melhor comportamento promovido pela interação solo-geossintético.

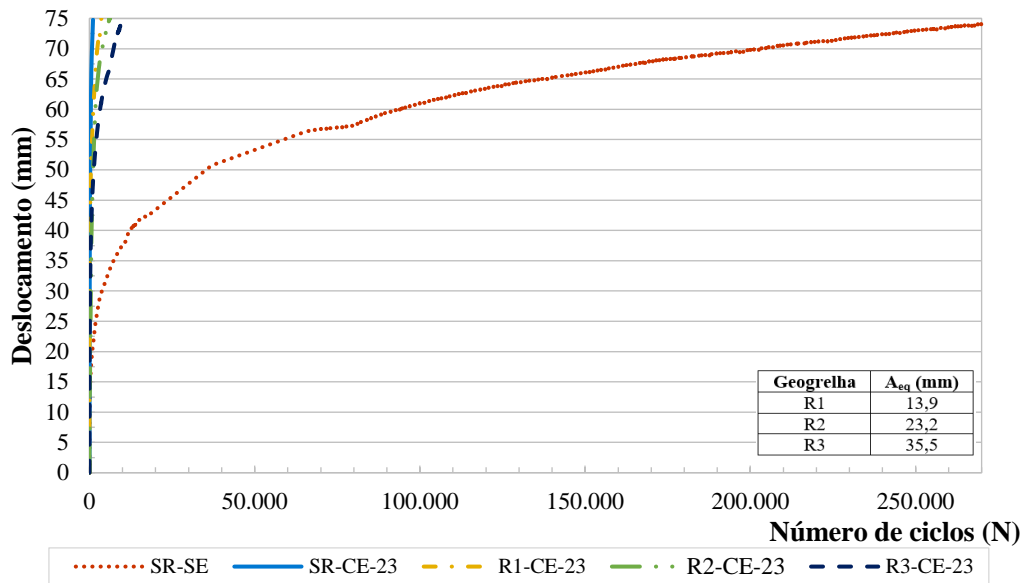


Figura 4.7: Deslocamentos verticais da placa de carregamento versus o número de ciclos de carga para configurações de ensaio com bolsão compressível de 23 cm.

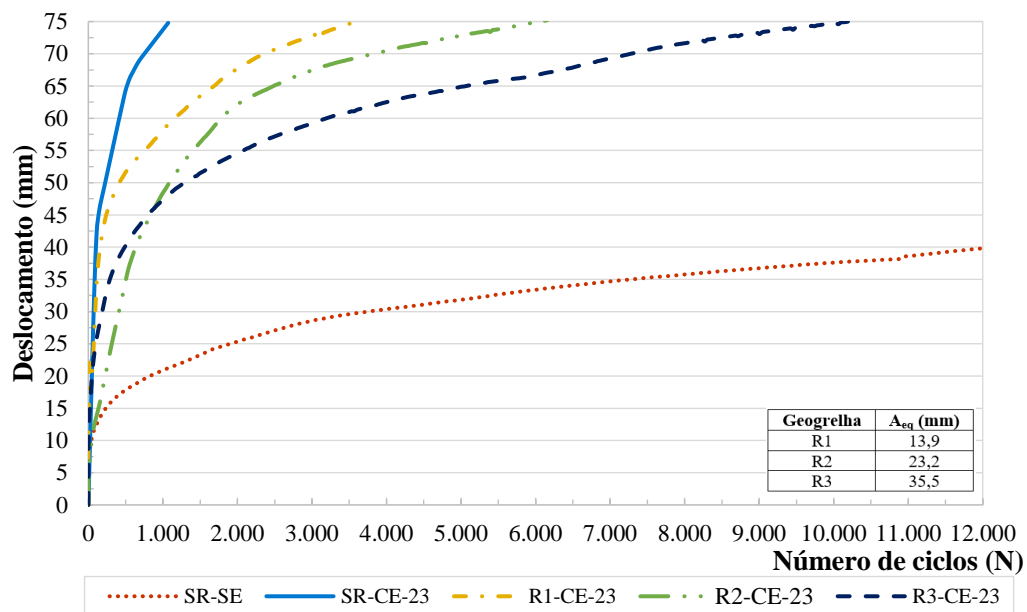


Figura 4.8: Deslocamentos verticais da placa de carregamento versus o número de ciclos de carga para configurações de ensaio com bolsão compressível de 23 cm, para N = 12.000.

Os perfis de deslocamentos, a diferentes distâncias da placa de carregamento, para os ensaios com a espuma de 23 cm podem ser observados na Figura 4.9. Os perfis para as três situações reforçadas apresentaram comportamentos similares.

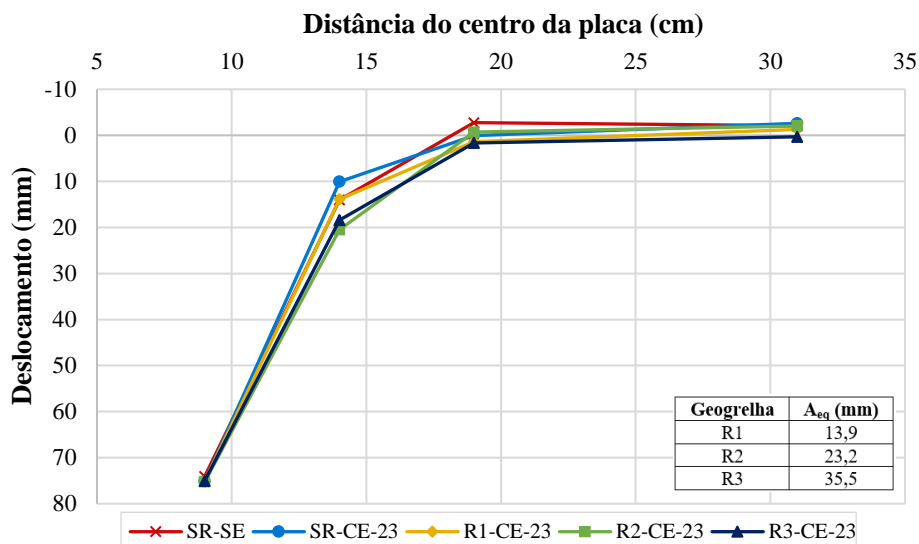


Figura 4.9: Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para configurações de ensaio com bolsão compressível de 23 cm ao final do ensaio.

4.2 REFLEXO DA PRESENÇA DO BOLSÃO COMPRESSÍVEL NO DESLOCAMENTO SUPERFICIAL

Com o propósito de avaliar a influência da presença da espuma no deslocamento superficial da estrada não pavimentada, foram plotados gráficos de deslocamentos comparando-se as situações com espuma e sem espuma, para cada configuração de ensaio. Ressalta-se que a influência da espuma no comportamento dos deslocamentos pode ocorrer devido à compressão da mesma e/ou impacto no índice de quebra dos grãos. O número de repetições de carregamento adotados corresponde ao “N” atingido ao final do ensaio em cada configuração com espuma. Consequentemente, plotaram-se os deslocamentos superficiais para as configurações com e sem espuma, para esse mesmo “N”. Os marcos referenciais de deslocamento superficial distanciam-se do eixo de carregamento em 9, 14, 19 e 31 cm, sendo o diâmetro da placa de carregamento de 18 cm.

4.2.1 Ensaios não reforçados com geossintético

A influência no deslocamento superficial devido à presença da espuma no subleito de estradas não pavimentadas e não reforçadas pode ser verificada nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12. Ao final do ensaio com o bolsão de 14 cm de diâmetro, nota-se que este tamanho de espuma pouco afetou no comportamento do perfil dos deslocamentos superficiais. Já para os ensaios com a presença das espumas de 18 cm e 23 cm de diâmetro, observa-se que houve uma alteração

considerável nos deslocamentos para seus respectivos “N”. Com o aumento do diâmetro do bolsão o reflexo negativo no deslocamento superficial torna-se mais evidente.

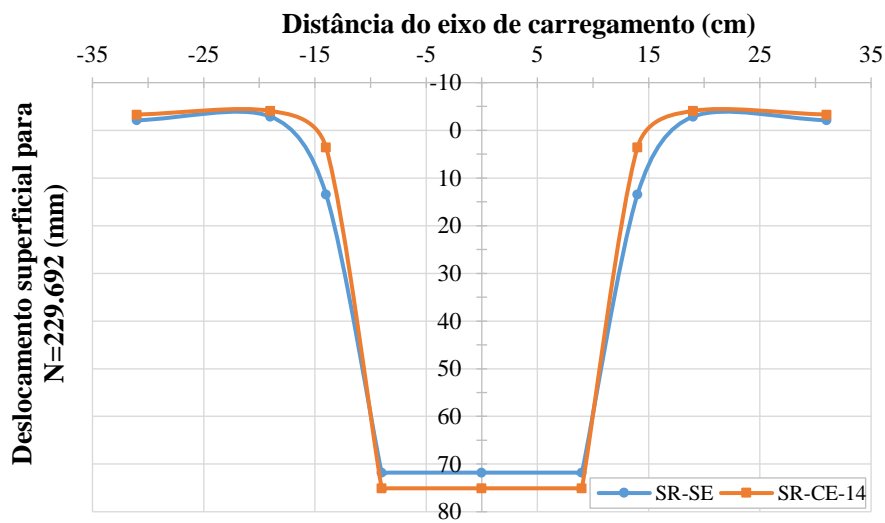


Figura 4.10: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações sem reforço, com e sem bolsão compressível de 14 cm de diâmetro para $N = 229.692$.

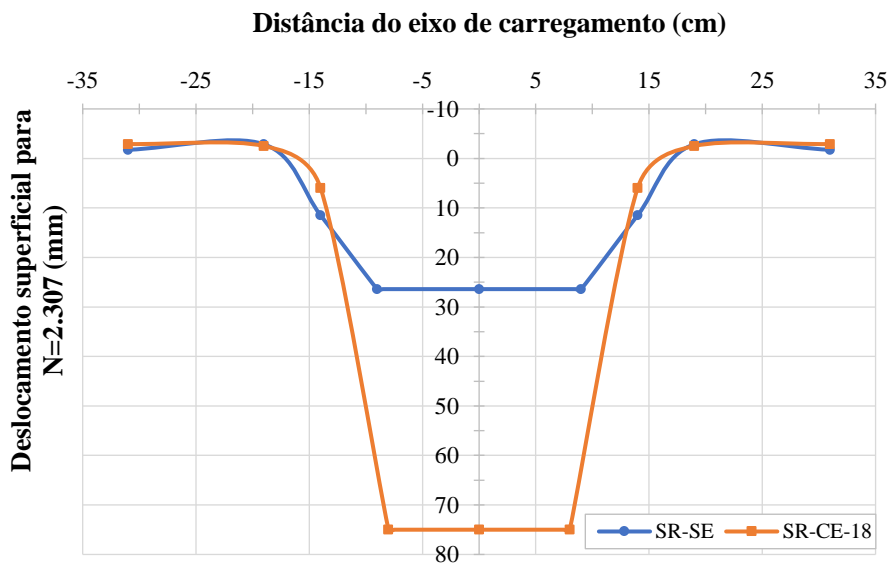


Figura 4.11: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações sem reforço, com e sem bolsão compressível de 18 cm de diâmetro para $N = 2.307$.

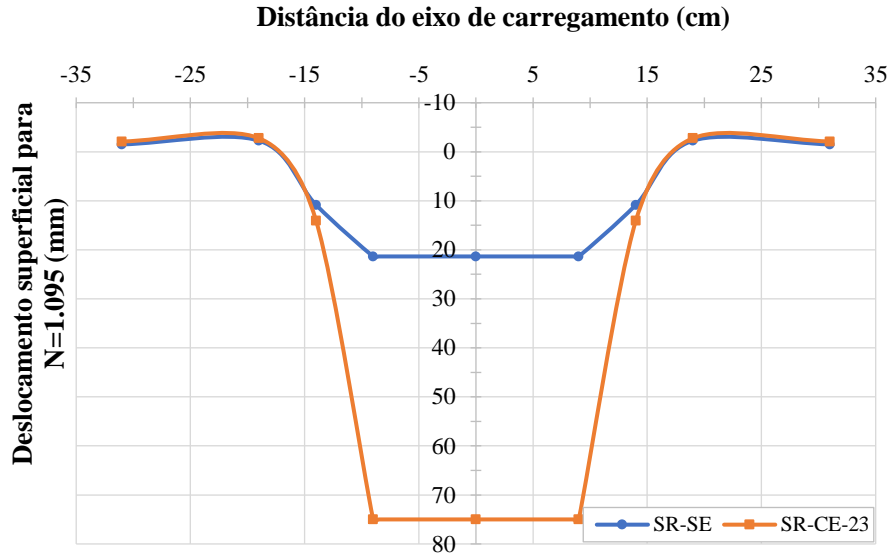


Figura 4.12: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações sem reforço, com e sem bolsão compressível de 23 cm de diâmetro para $N = 1.095$.

4.2.2 Ensaios reforçados com geossintéticos na presença do bolsão compressível de 14 cm de diâmetro

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam os perfis de deslocamentos ao final dos 270.000 ciclos de carregamento para os ensaios reforçados e com a presença do bolsão compressível de 14 cm de diâmetro. Como informado anteriormente, o reforço R2 apresentou o melhor desempenho na limitação de deslocamentos superficiais neste caso. Para este reforço o acréscimo de deslocamento devido a presença da espuma foi de apenas 7,6 mm.

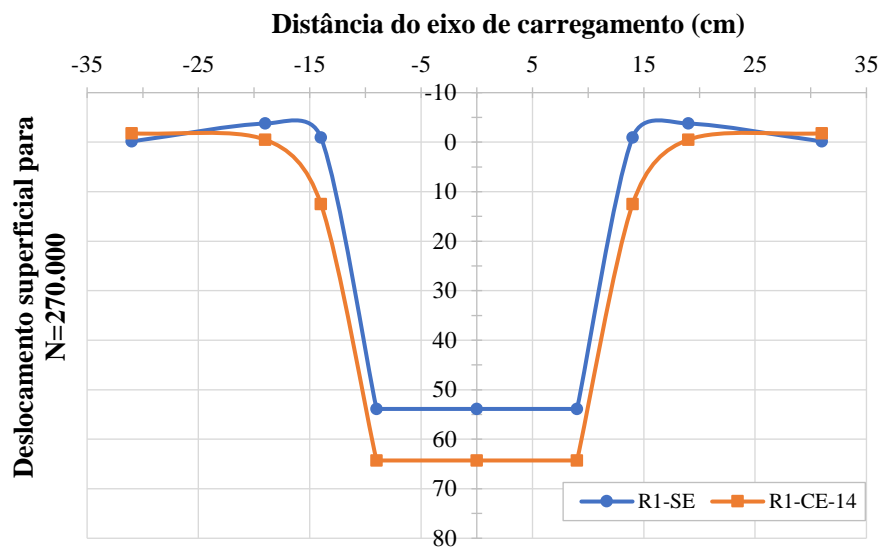


Figura 4.13: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 1, com e sem bolsão compressível de 14 cm de diâmetro para $N = 270.000$.

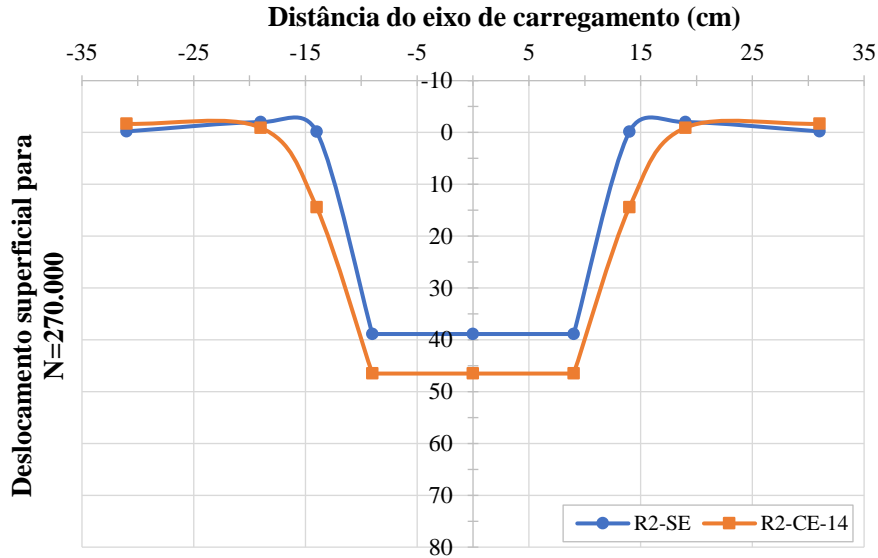


Figura 4.14: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 2, com e sem bolsão compressível de 14 cm de diâmetro para $N = 270.000$.

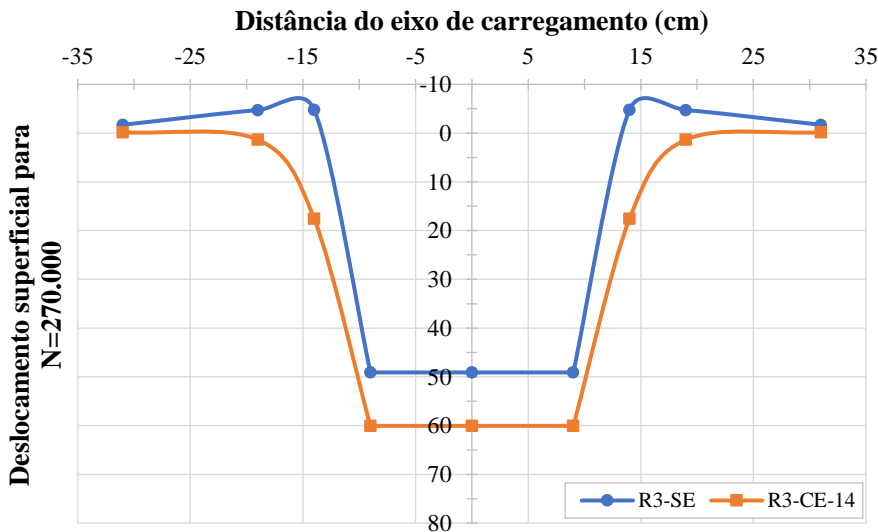


Figura 4.15: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 3, com e sem bolsão compressível de 14 cm de diâmetro para $N = 270.000$.

4.2.3 Ensaios reforçados com geossintéticos na presença do bolsão compressível de 18 cm de diâmetro

Nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 podem ser observados o reflexo da presença da espuma de 18 cm de diâmetro nos deslocamentos superficiais quando utilizados os reforços R1, R2 e R3, respectivamente.

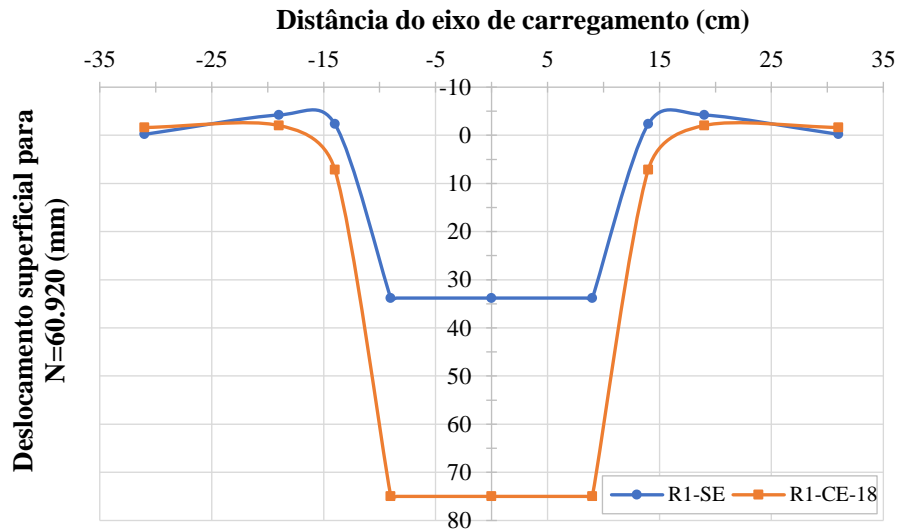


Figura 4.16: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 1, com e sem bolsão compressível de 18 cm de diâmetro para $N = 60.920$.

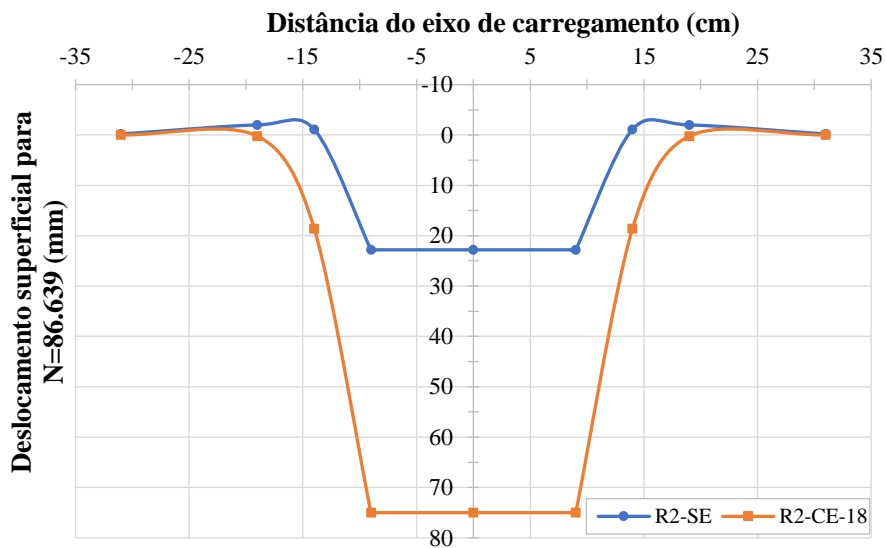


Figura 4.17: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 2, com e sem bolsão compressível de 18 cm de diâmetro para $N = 86.639$.

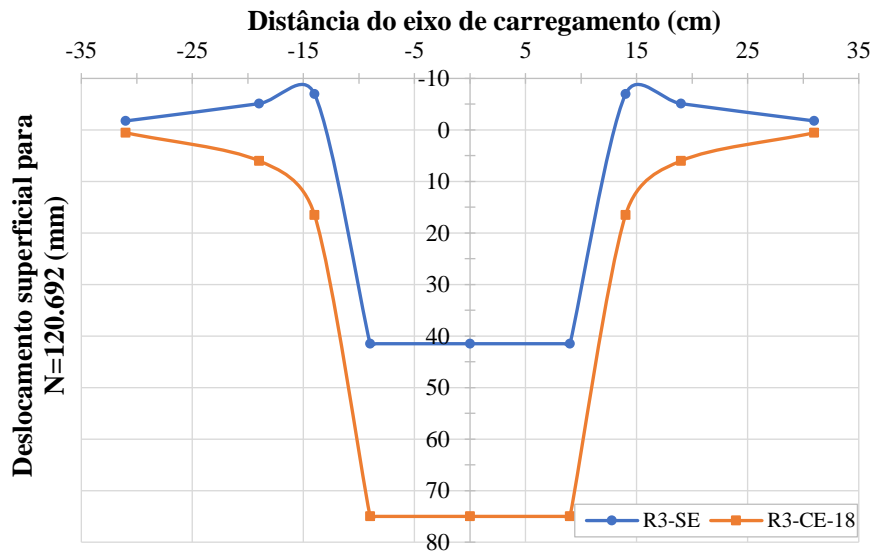


Figura 4.18: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 3, com e sem bolsão compressível de 18 cm de diâmetro para $N = 120.692$.

Os resultados dos ensaios que visaram avaliar o comportamento de estradas não pavimentadas, reforçadas e não reforçadas, com a presença de bolsão compressível de 18 cm de diâmetro mostraram que o reforço que apresentou melhor eficiência foi o Reforço 3. Esse fato pôde ser observado também na Figura 4.18, onde o R3 reduziu a influência da presença da espuma no deslocamento superficial, além de aumentar o número de ciclos suportados.

4.2.4 Ensaios reforçados com geossintéticos na presença do bolsão compressível de 23 cm de diâmetro

Os resultados apresentados nas Figuras 4.19 a 4.21 mostram os comportamentos observados para os deslocamentos superficiais ao final de cada ensaio reforçado com e sem a presença do bolsão de 23 cm de diâmetro e o respectivo “N” obtido. Apesar do Reforço 3 ter apresentado melhor desempenho quanto ao número de ciclos suportados, nota-se que a influência no comportamento dos deslocamentos superficiais deste bolsão foi praticamente a mesma para as os três reforços.

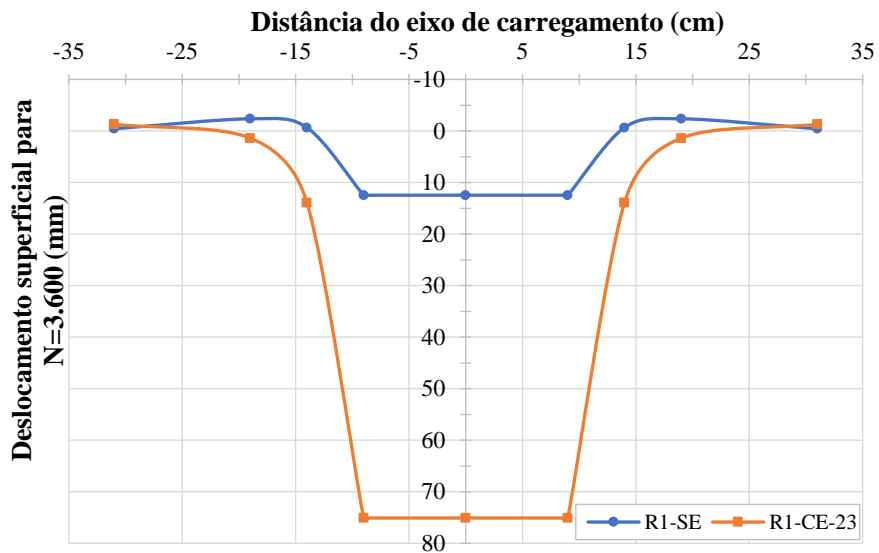


Figura 4.19: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 1, com e sem bolsão compressível de 23 cm de diâmetro para N = 3.600.

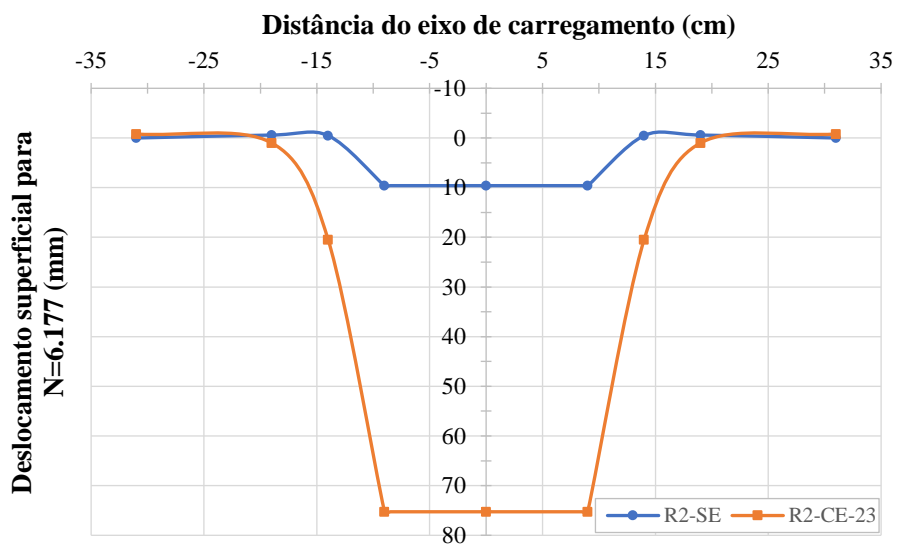


Figura 4.20: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 2, com e sem bolsão compressível de 23 cm de diâmetro para N = 6.177.

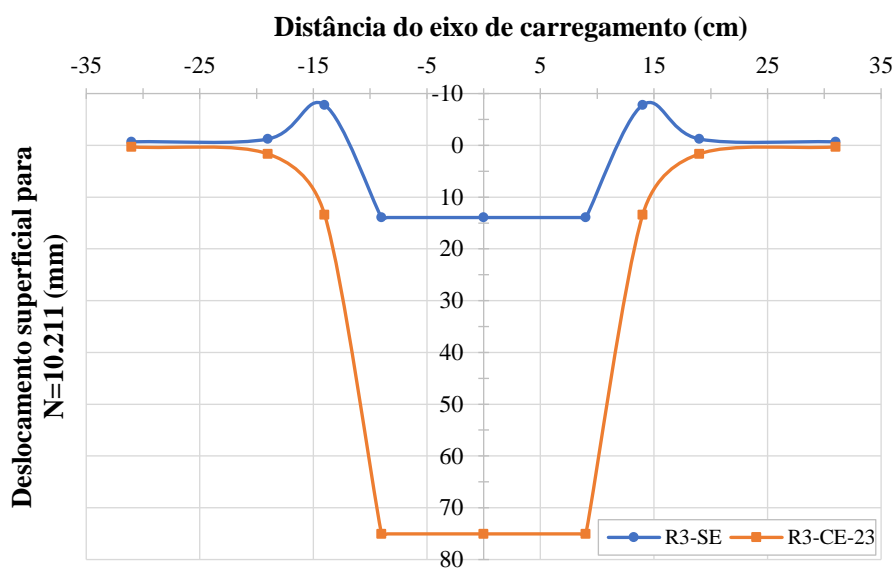


Figura 4.21: Perfis de deslocamentos superficiais para configurações com Reforço 3, com e sem bolsão compressível de 23 cm de diâmetro para $N = 10.201$.

4.3 FATOR DE EFICIÊNCIA

Para as configurações sem espuma e com a presença da espuma de 14 cm de diâmetro o deslocamento superficial da placa de carregamento não atingiu os 75 mm referenciais, ou seja, estes ensaios foram finalizados ao atingirem 270.000 ciclos de carregamento. Partindo-se dos resultados apresentados nas Figuras 4.1 e 4.3 foram feitas projeções do número de ciclos de carga até se atingir os 75 mm de deslocamento, conforme Figura 4.22 e Figura 4.23, respectivamente. Salienta-se que as extrapolações dos resultados estão condicionadas aos índices de quebra dos grãos do aterro.

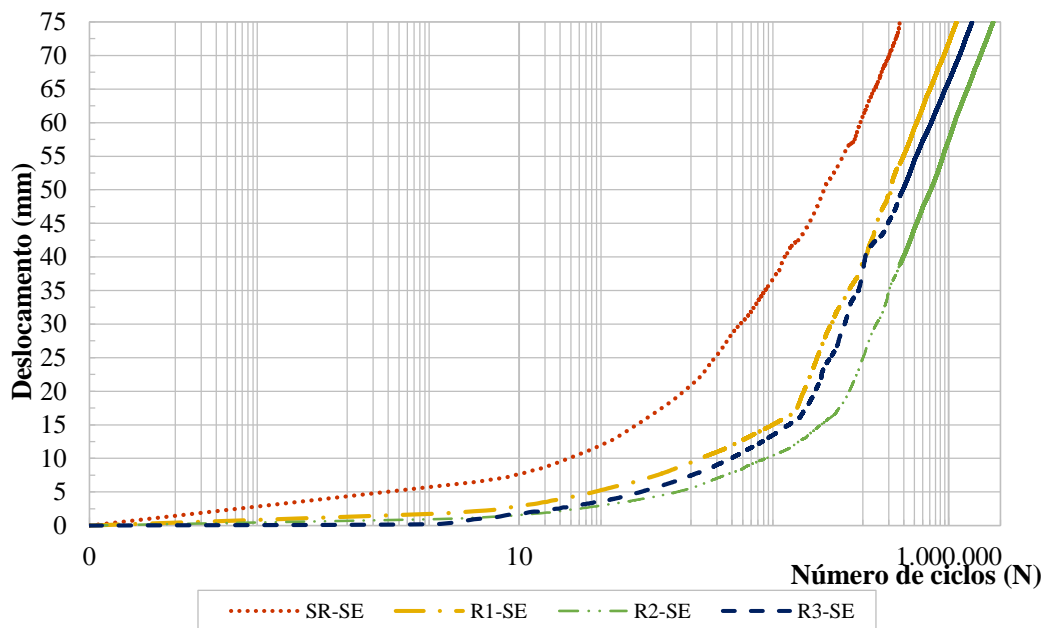


Figura 4.22: Projeção do número de ciclos de carga correspondente ao afundamento de 75 mm da placa de carregamento, para configurações de ensaio sem bolsão compressível.

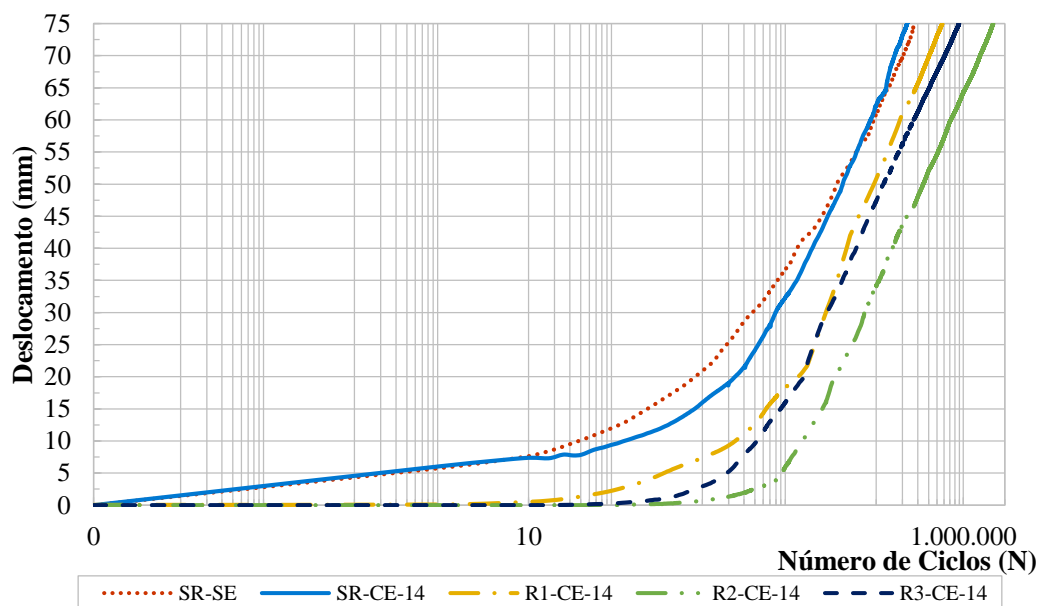


Figura 4.23: Projeção do número de ciclos de carga correspondente ao afundamento de 75 mm da placa de carregamento, para configurações de ensaio com bolsão compressível de 14 cm.

A Tabela 4.1 apresenta os valores obtidos para os fatores de eficiência e fatores de eficiência modificados para as configurações de ensaio estudadas, juntamente com os respectivos

números de aplicações de carga na estrada reforçada (N_r) e a projeção do números de aplicações de carga na estrada reforçada (N_r^*), além do número de aplicações de carga na estrada sem reforço (N_u) para o afundamento de trilha de roda de projeto de 75 mm. Na Figura 4.24 observam-se os valores de fatores de eficiência conforme diâmetros dos bolsões compressíveis.

Tabela 4.1: Fatores de eficiência obtidos para as configurações de ensaio estudadas

Ensaio	N	N*	TBR	TBR*
R1-SE	-	1.233.925	-	4,6
R2-SE	-	3.307.429	-	12,2
R3-SE	-	1.872.373	-	6,9
R1-CE-14	-	573.440	-	2,5
R2-CE-14	-	2.206.373	-	9,6
R3-CE-14	-	896.126	-	3,9
R1-CE-18	60.920	-	26,4	-
R2-CE-18	86.639	-	37,6	-
R3-CE-18	120.692	-	52,3	-
R1-CE-23	3.600	-	3,3	-
R2-CE-23	6.177	-	5,6	-
R3-CE-23	10.211	-	9,3	-

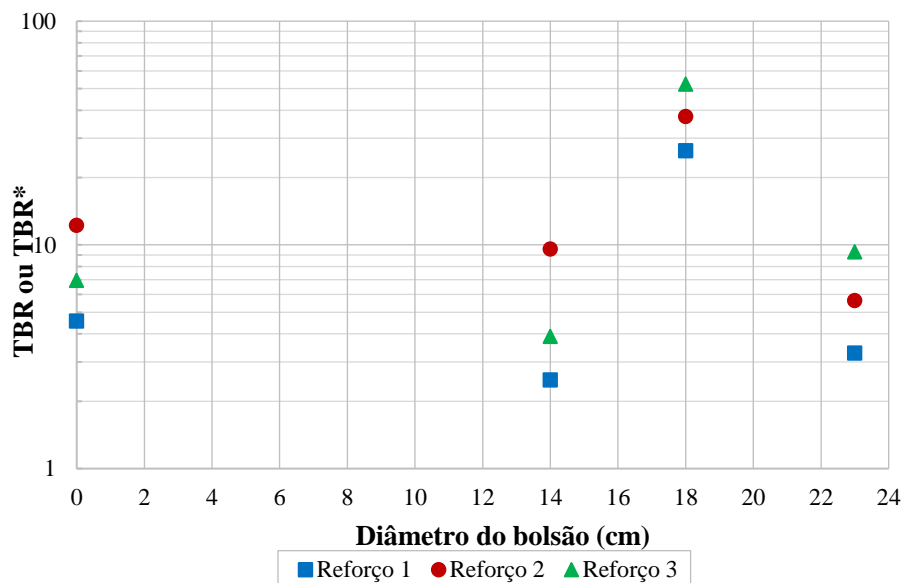


Figura 4.24: Fatores de eficiência conforme diâmetro do bolsão compressível

Os resultados mostram que os fatores de eficiência obtidos para as configurações na presença do bolsão compressível de 14 cm de diâmetro foram inferiores aos obtidos para as configurações sem espuma. Para os ensaios reforçados e na presença da espuma de 18 cm verificou-se considerável aumento na vida útil da estrada, chegando ao TBR de 52,3 para o Reforço R3. Esse ganho deveu-se principalmente pela combinação interação solo-aterro,

ativação do efeito membrana e baixo índice de quebra. Para as configurações de ensaio que continham a espuma de 23 cm de diâmetro nota-se um TBR máximo de 9,3, devido ao Reforço R3 que promoveu boa interação com as partículas dos grãos do aterro. Com base nos resultados de fatores de eficiência conclui-se que os melhores benefícios foram observados nas situações cuja espuma possuiu diâmetro igual ao da placa de carregamento.

4.4 ANÁLISE DAS TENSÕES TOTAIS NO SUBLEITO

Neste tópico serão apresentadas as tensões totais medidas em diferentes profundidades e localizações no subleito. Os valores apresentados correspondem aos níveis máximos de tensão atingidos nos respectivos ensaios. Para cada configuração de ensaio há uma representação, na própria figura, da localização das respectivas células de tensão totais. Nas configurações com a presença de bolsão manteve-se a distância de 5 cm da borda da espuma.

4.4.1 Tensões atingidas para configurações de ensaios reforçados sem a presença de bolsão compressível

Para ensaios sem a presença do bolsão compressível foi possível avaliar as tensões no subleito tanto no eixo de carregamento quanto nas adjacências. No eixo foram medidas as tensões nas profundidades de 5 cm e 20 cm no subleito. Na Figura 4.25 observa-se uma redução máxima no nível de tensões de 33% na profundidade de 5 cm e de 55% para a profundidade de 20 cm, para o reforço R2. Essa redução deve-se à melhor distribuição de tensões transferidas ao subleito proporcionada pela atuação deste reforço.

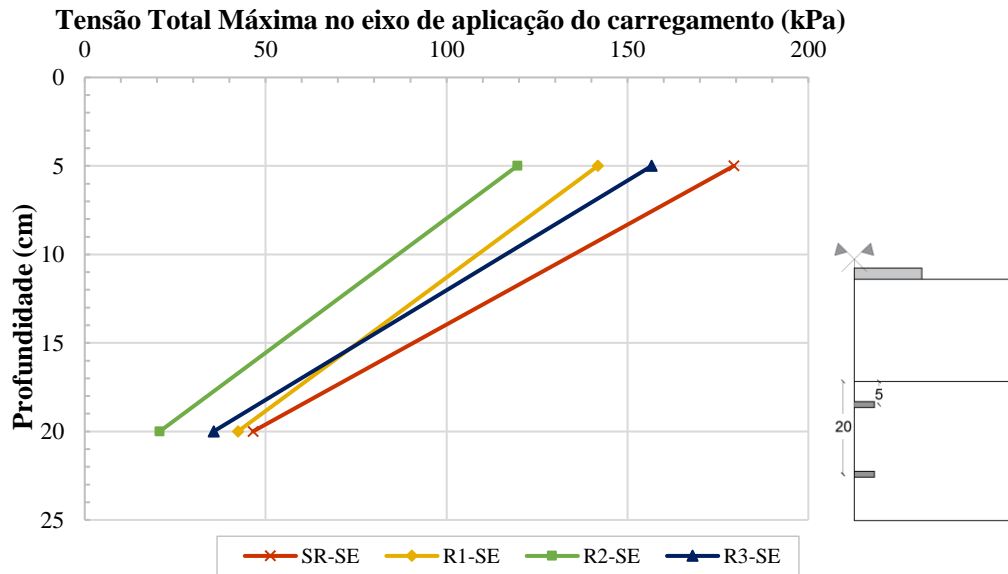


Figura 4.25: Tensões totais transferidas ao subleito no eixo de carregamento *versus* profundidade para configurações de ensaio sem bolsão compressível.

Nos ensaios onde foi avaliada a presença do bolsão compressível no eixo de carregamento não foi possível posicionar a célula de tensão total na profundidade de 5 cm no subleito no eixo, apenas nas adjacências. Dessa forma, também foram medidas as tensões nas adjacências do eixo de carregamento para as situações sem a presença da espuma com o objetivo de avaliar a influência da espuma no comportamento das tensões no subleito nos demais ensaios. Nesta configuração as células foram distanciadas em 5 cm da borda da placa de carregamento e instaladas nas profundidades de 5 cm e 10 cm. A Figura 4.26 contém as tensões computadas para os ensaios reforçado e não reforçado, sem a presença do bolsão compressível. Observa-se uma redução média de 30% nos níveis de tensões transferidas ao subleito quando se utiliza o reforço R2.

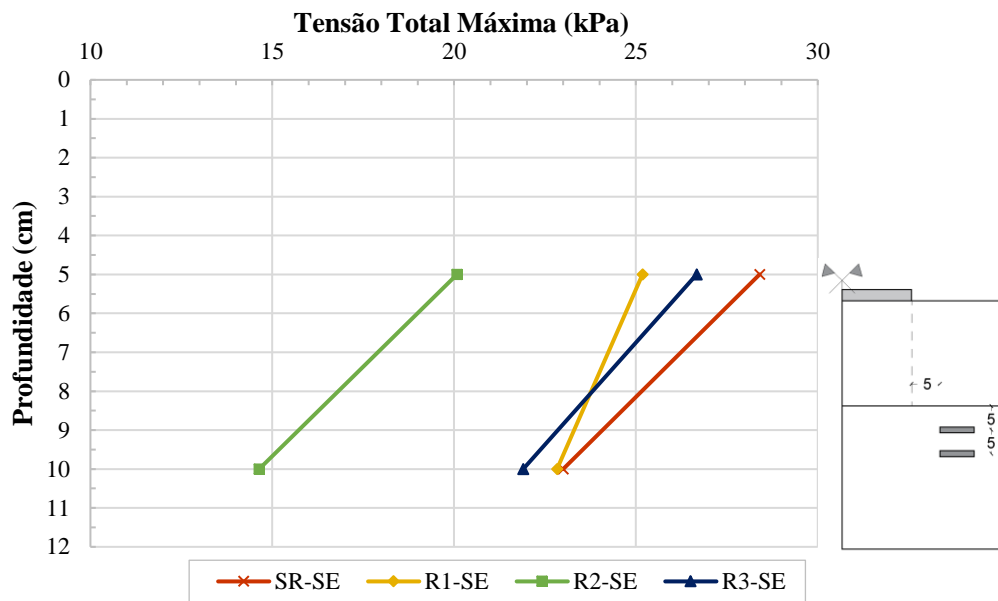


Figura 4.26: Tensões totais transferidas ao subleito a 5 cm da borda da placa de carregamento *versus* profundidade para configurações de ensaio sem bolsão compressível.

4.4.2 Tensões atingidas para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 14 cm

Ao se analisar o comportamento em termos de tensões totais transferidas ao subleito para configurações de ensaio sem reforço com e sem o bolsão compressível de 14 cm de diâmetro, Figura 4.27, constata-se que a presença da espuma afetou o comportamento de tensões em sua adjacência. As tensões foram computadas à 3 cm da borda da placa de carregamento. Houve um acréscimo de aproximadamente de 47% na profundidade de 5 cm no subleito e de 58% na profundidade de 10 cm. Dessa forma, pode-se inferir que a presença da espuma de 14 cm, mesmo influenciando pouco os deslocamentos superficiais ao final do ensaio, conforme mostrado na Figura 4.10, promoveu uma concentrações de tensões nas adjacências devido à diferença de rigidez entre o solo e a espuma. Nos ensaios reforçados e com a presença da espuma notou-se uma redução das tensões verticais quando comparado com a situação sem reforço, assim como foi observado para os ensaios reforçados sem a presença do bolsão.

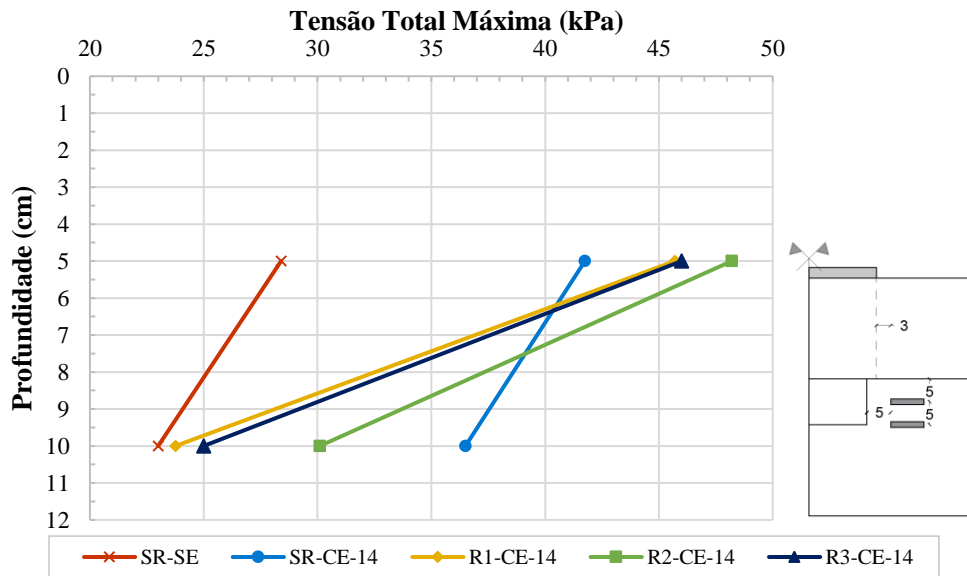


Figura 4.27: Tensões totais transferidas ao subleito a 3 cm da borda da placa de carregamento *versus* profundidade para configurações de ensaio com bolsão compressível de 14 cm.

4.4.3 Tensões atingidas para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 18 cm

A Figura 4.28 contém os comportamentos observados em termos de tensões totais atingidas no subleito, nas adjacências da espuma de 18 cm de diâmetro. As células foram posicionadas à 5 cm da borda da placa de carregamento. No ensaio não reforçado com a presença da espuma percebe-se um aumento nas tensões, sendo mais evidente na profundidade de 10 cm no subleito, devido à distribuição de tensões em meios com valores de rigidez diferentes. Para os três ensaios reforçados foi constatado um aumento nas tensões verticais obtidas, justificado pela ativação do efeito membrana. Conforme informado na revisão de literatura, para haver ativação do efeito membrana é necessário que haja grandes deformações no eixo de carregamento. O fato desta espuma possuir o mesmo diâmetro da placa de carregamento promoveu um afundamento considerável e localizado da superfície mesmo nas configurações reforçadas, como pôde ser observado nos resultados apresentados no item 4.2.3. A ativação deste efeito promove uma redução nas tensões transferidas logo abaixo da área carregada e fora desta área a membrana tracionada pelo soerguimento do solo (efeito dilatância) pressiona para baixo a região do subleito e conseqüentemente proporciona um aumento nas tensões verticais transferidas.

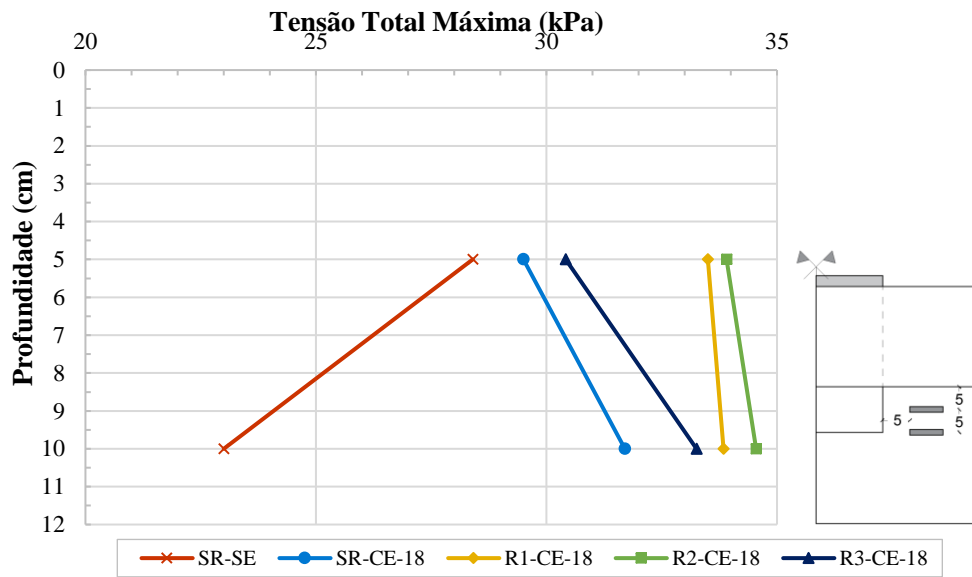


Figura 4.28: Tensões totais transferidas ao subleito a 5 cm da borda da placa de carregamento *versus* profundidade para configurações de ensaio com bolsão compressível de 18 cm.

4.4.4 Tensões atingidas para configurações de ensaios reforçados com a presença de bolsão compressível de 23 cm

Com relação aos resultados obtidos para os ensaios não reforçados (Figura 4.29), com e sem espuma de 23 cm de diâmetro, pode-se corroborar a tendência do comportamento no aumento das tensões nas adjacências ao inserir um bolsão compressível no subleito. No entanto, mesmo ocorrendo a influência significativa da espuma no perfil de deslocamentos superficiais, conforme apresentado anteriormente, não houve a ativação significativa do efeito membrana. Isto provavelmente se deve ao fato da deformação de uma maior área deformada na interface aterro-subleito. Há que se considerar também a maior distância entre as células de tensões e a borda da placa de carregamento superficial, que para esta configuração de ensaio foi de 7,5 cm.

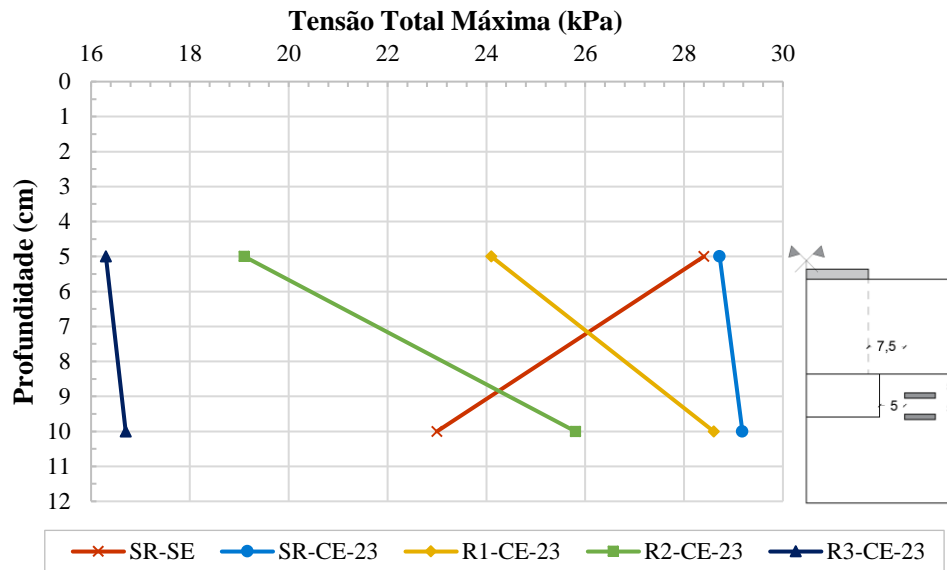


Figura 4.29: Tensões totais transferidas ao subleito a 7,5 cm da borda da placa de carregamento *versus* profundidade para configurações de ensaio com bolsão compressível de 23 cm.

4.5 ÂNGULO DE ESPRAIAMENTO DE TENSÕES PARA OS ENSAIOS REALIZADOS

Após a conclusão de cada ensaio foram realizadas algumas medidas da área deformada na superfície do subleito para a determinação do ângulo de espraiamento médio, conforme metodologia apresentada em 3.5.9. Os valores médios obtidos encontram-se na Tabela 4.2. De modo geral, com o aumento do diâmetro das espumas, nos ensaios não reforçados, houve o aumento no ângulo de espraiamento ao se comparar com o ângulo obtido no ensaio sem reforço e sem espuma. Por se tratar de um subleito compacto, os resultados obtidos para os ensaios reforçados não apresentaram grande variação. Nota-se uma pequena redução no ângulo de espraiamento nos ensaios reforçados com a presença da espuma quando comparados com os resultados obtidos nos ensaios reforçados sem a presença do bolsão.

Tabela 4.2: Valores de ângulo de espraio medido nos ensaios.

Ensaio	Ângulo de espraio (β)
SR-SE	11
R1-SE	30
R2-SE	32
R3-SE	31
SR-CE-14	13
SR-CE-18	16
SR-CE-23	21
R1-CE-14	28
R2-CE-14	30
R3-CE-14	29
R1-CE-18	29
R2-CE-18	27
R3-CE-18	29
R1-CE-23	27
R2-CE-23	27
R3-CE-23	28

4.6 AVALIAÇÃO DA QUEBRA DE GRÃOS DO MATERIAL DE ATERRO

Conforme metodologia exposta em 3.5.8, foram determinados os índices de quebra dos grãos na superfície do aterro e na interface aterro-subleito, Tabela 4.3. Para configurações de ensaio de estradas não pavimentadas a quebra de grãos está associada ao número de ciclos de carregamento suportados para uma mesma deformação. No presente trabalho, para os ensaios reforçados sem a presença de espuma, o menor índice foi observado para o Reforço 2, justamente o que melhor mais reduziu os deslocamentos superficiais. Nos ensaios não reforçados e com a presença da espuma os índices de quebra obtidos foram menores, sugerindo que a presença da espuma atenua os mecanismos de quebra de grãos. Nos ensaios reforçados e com a presença das espumas verificou-se uma redução ainda maior nos índices de quebra devido à ação combinada entre a eficiência do reforço e a compressão da espuma.

Tabela 4.3: Índice de quebra dos grãos do aterro ao final dos ensaios.

Ensaio	Posição no aterro	Índice de quebra (B_g)%	B_g médio (%)
SR-SE	Superfície	14,9	15,5
	Interface	16,1	
R1-SE	Superfície	8,9	8,3
	Interface	7,7	
R2-SE	Superfície	6,9	6,4
	Interface	5,8	
R3-SE	Superfície	7,5	7,2
	Interface	6,8	
SR-CE-14	Superfície	6,7	5,6
	Interface	4,5	
SR-CE-18	Superfície	5,1	4,4
	Interface	3,7	
SR-CE-23	Superfície	4,3	3,9
	Interface	3,5	
R1-CE-14	Superfície	6,1	5,5
	Interface	4,8	
R2-CE-14	Superfície	4,2	4,1
	Interface	3,9	
R3-CE-14	Superfície	5,3	4,9
	Interface	4,5	
R1-CE-18	Superfície	4,7	4,3
	Interface	3,9	
R2-CE-18	Superfície	4,5	4,1
	Interface	3,7	
R3-CE-18	Superfície	3,9	3,6
	Interface	3,3	
R1-CE-23	Superfície	4,0	3,7
	Interface	3,3	
R2-CE-23	Superfície	3,8	3,6
	Interface	3,4	
R3-CE-23	Superfície	3,8	3,4
	Interface	2,9	

4.7 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DO REFORÇO E MATERIAL DE ATERRO

Para melhor interpretar os resultados obtidos nesta pesquisa, associou-se o *Traffic Benefit Ratio* às propriedades físicas das geogrelhas e do material de aterro. Os resultados obtidos em função da relação entre abertura equivalente das malhas das geogrelhas e diâmetro médio das partículas do aterro e a relação entre abertura equivalente das malhas das geogrelhas (a_{eq}) e o diâmetro

máximo característico do material de aterro encontram-se na Tabela 4.4. Para avaliar uma possível tendência estes resultados foram dispostos nas Figuras 4.30 e 4.31.

Tabela 4.4: Relação a_{eq}/D_{50} , $a_{eq}/D_{máx}$ e TBR para os reforços.

Ensaio	Abertura eq./ D_{50} (mm)	Abertura eq./ $D_{máx}$ (mm)	TBR ou TBR*
R1-SE	0,99	0,73	4,6
R2-SE	1,66	1,22	12,2
R3-SE	2,54	1,87	6,9
R1-CE-14	0,99	0,73	2,5
R2-CE-14	1,66	1,22	9,6
R3-CE-14	2,54	1,87	3,9
R1-CE-18	0,99	0,73	26,4
R2-CE-18	1,66	1,22	37,6
R3-CE-18	2,54	1,87	52,3
R1-CE-23	0,99	0,73	3,3
R2-CE-23	1,66	1,22	5,6
R3-CE-23	2,54	1,87	9,3

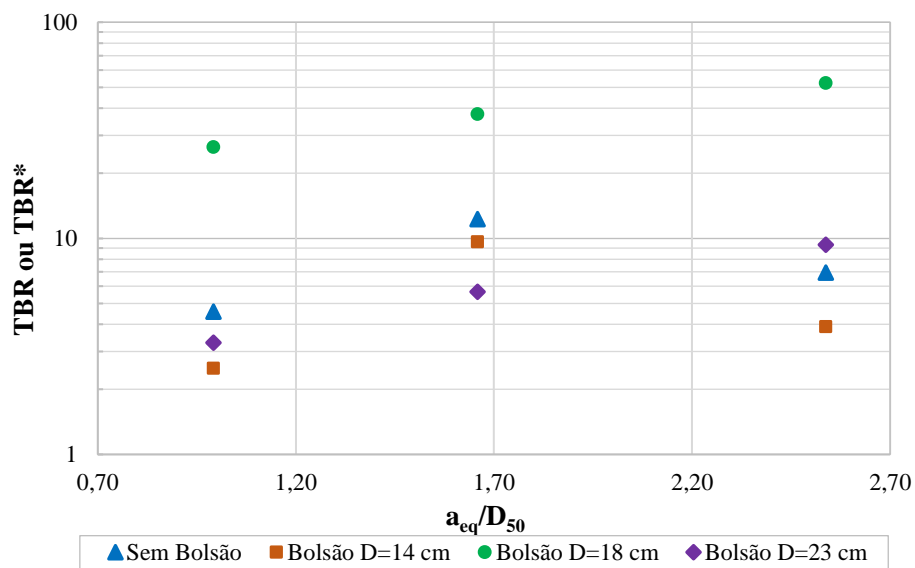


Figura 4.30: Relação entre os fatores de eficiência obtidos e a_{eq}/D_{50} .

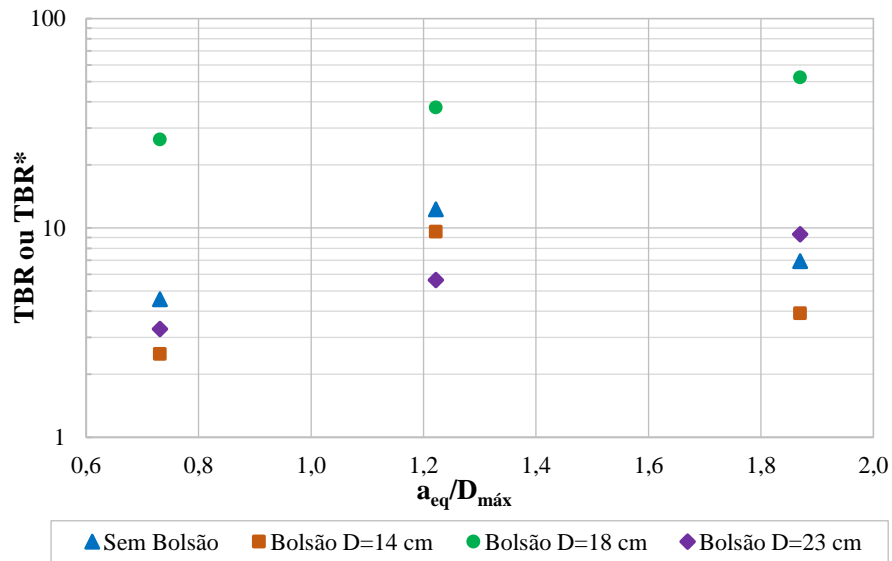


Figura 4.31: Relação entre os fatores de eficiência obtidos e $a_{eq}/D_{m\acute{a}x}$.

Para as configurações de estradas não pavimentadas reforçadas com geossintético sem a presença de bolsão compressível e com a presença de um bolsão com diâmetro inferior ($D=14$ cm) ao da placa de carregamento verifica-se que o maior valor de TBR foi obtido para a relação de 1,66 para abertura a_{eq}/D_{50} e 1,22 para abertura $a_{eq}/D_{m\acute{a}x}$. Já com o aumento do diâmetro da espuma nota-se uma alteração no comportamento de interação entre as geogrelhas e os grãos do aterro. Para os diâmetros de 18 cm e 23 cm observa-se uma tendência do aumento do TBR com o aumento das relações geométricas citadas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo apresentam-se as considerações finais do trabalho e as principais conclusões das atividades de pesquisa desenvolvidas, nas quais foram avaliados os comportamentos da estrada não pavimentada, reforçada e não reforçada com geossintético, sobre subleito com bolsão compressível de diferentes diâmetros. Foram avaliadas três geogrelhas como reforço (R1, R2 e R3) e espumas de três diâmetros (14 cm, 18 cm e 23 cm) para simular os bolsões compressíveis no subleito. As diferentes configurações de estradas não pavimentadas foram submetidas ao carregamento cíclico, no qual adotou-se como critério de término de ensaio o afundamento máximo da placa de carregamento de 75 mm ou o número de ciclos de carga aplicados de $N = 270.000$. Ainda neste capítulo são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Quanto à análise dos resultados apresentados, em função dos deslocamentos superficiais e do número de ciclos de carregamento, pode-se concluir que:

- Nos ensaios onde não houve a simulação bolsão compressível verificou-se que, para um mesmo número de aplicações de carga, $N = 270.000$, o emprego das geogrelhas como reforço promoveu uma redução no afundamento da placa de carregamento. Esta redução deve-se à interação solo-geossintético, que proporciona maior capacidade de suporte à estrada não pavimentada. O reforço que melhor restringiu os deslocamentos superficiais foi o reforço R2, para o qual houve afundamento de 39 mm na placa de carregamento. No ensaio sem reforço o deslocamento da placa chegou a 74 mm;
- Para as configurações de ensaio onde buscou-se avaliar o comportamento do bolsão compressível de 14 cm de diâmetro pôde-se observar que a presença deste não afetou significativamente o comportamento da estrada não pavimentada. A utilização dos reforços permitiu um aumento no número de ciclos de carregamento suportados pela estrada até se atingir os 75 mm referenciais de afundamento da placa de carregamento. Além disto, a atuação dos reforços resultou em perfis de deslocamentos superficiais mais suaves, indicando uma ruptura menos localizada. Dentre os reforços avaliados verificou-se que o reforço R2 apresentou melhor interação com o meio, limitando o deslocamento da placa de reação a 49 mm.
- A presença do bolsão compressível de 18 cm de diâmetro promoveu uma redução de 99% no número de ciclos suportados pela estrada não reforçada. O emprego dos reforços

geossintéticos resultou num aumento considerável no número de ciclos de carga suportados pela estrada. O reforço R3 promoveu os melhores desempenhos, tanto em ganho no número de ciclos de carregamento suportados, de 2.307 para 120.692, quanto no aumento da capacidade suporte, que refletiu numa bacia de deformação superficial menos acentuada nas proximidades da placa.

- Quando simulada a estrada não reforçada sobre um bolsão compressível de 23 cm de diâmetro, verificou-se que sua presença reduziu para menos de 0,5% da vida útil da estrada, $N = 1.095$ ciclos. Dentre os reforços estudados, o reforço R3 apresentou melhores resultados quanto ao número de ciclos suportados, $N = 10.211$. Quanto aos deslocamentos, verificou-se que todos os reforços promoveram formas semelhantes de perfis de deslocamentos superficiais.

A respeito da influência da presença do bolsão compressível, em termos de tensões transferidas ao subleito, pode-se concluir que:

- Nos ensaios sem a presença do bolsão compressível, o emprego das geogrelhas como reforço proporcionou uma melhor distribuição das tensões e conseqüente redução nos níveis de tensões transferidas ao subleito, tanto no eixo de carregamento quanto nas adjacências da placa de carregamento. Em ambas posições, o reforço R2 promoveu uma maior redução nas tensões transmitidas.
- A presença da espuma de 14 cm, para o ensaio sem reforço, provocou um aumento nas tensões nas adjacências do mesmo. Isto deve-se à diferença de valores de rigidez do solo de subleito e da espuma. A utilização dos reforços proporcionou uma redução nas tensões transferidas ao subleito, sendo o reforço R2 o que apresentou melhor desempenho.
- Na configuração de ensaio sem reforço e com a presença do bolsão de 18 cm de diâmetro também foi observado o aumento nas tensões adjacente à espuma. Nos três ensaios reforçados foi constatado um aumento nas tensões verticais transferidas ao subleito nas adjacências da placa de carregamento. Atribui-se este comportamento à ativação do efeito membrana, provocado pelo afundamento considerável e localizado da superfície do aterro.
- O aumento nas tensões nas adjacências do bolsão compressível também foi verificado no ensaio não reforçado e com a presença do bolsão de 23 cm de diâmetro. Para os ensaios reforçados, mesmo ocorrendo a influência significativa da espuma no perfil de

deslocamentos superficiais, não houve a ativação significativa do efeito membrana, visto que não foi verificado o aumento nas tensões transferidas ao subleito. Isto deve-se, provavelmente, ao fato da área deformada ser maior na superfície do subleito. Além do mais, deve-se levar em consideração que as células de tensões totais estão mais distantes da borda placa de carregamento, onde já há menor influência do carregamento aplicado.

Foram determinados os fatores de eficiências dos reforços estudados nesta pesquisa. Estes mostraram que os valores obtidos para as configurações com bolsão compressível de 14 cm de diâmetro foram inferiores aos obtidos para as configurações sem espuma. Ao analisar a influência da espuma de 18 cm de diâmetro no desempenho de estradas foram alcançados fatores de eficiência consideráveis. O reforço que apresentou melhor comportamento no desempenho da estrada foi o reforço R3, promovendo um TBR de 52,3. Este desempenho está associado à interação reforço e material de aterro, ativação do efeito membrana e baixo índice de quebra dos grãos de aterro. Já para as configurações de ensaio com a presença do bolsão de 23 cm de diâmetro notou-se um TBR máximo de 9,3, devido ao desempenho do reforço R3, que promoveu uma boa interação com o meio.

Com relação aos valores obtidos para os ângulos de espraiamento de tensões verificou-se que, para as situações não reforçadas, a presença do bolsão compressível provocou um aumento no ângulo, conforme aumento do diâmetro da espuma. Para as situações reforçadas e com o bolsão notou-se uma pequena redução nos ângulos de espraiamento quando comparadas às situações reforçadas e sem a presença do bolsão.

Foram avaliados os índices de quebra dos grãos de aterro na superfície do mesmo e na interface com o subleito. De modo geral os índices obtidos na interface foram ligeiramente inferiores. Nos ensaios não reforçados e com a presença do bolsão foi verificado que os índices de quebra foram menores, sugerindo que a presença da espuma atenua os mecanismos de quebra dos grãos. Nos ensaios reforçados e com a espuma observou-se uma redução ainda maior neste índice, devido à ação combinada entre a eficiência dos reforços e a compressão da espuma.

A influência da abertura da malha das geogrelhas no comportamento mecânico da estrada simulada foi analisada por meio das relações entre a abertura equivalente (a_{eq}) e os diâmetros D_{50} e $D_{máx}$ do material de aterro com os valores de TBR obtidos. Concluiu-se que a alteração no diâmetro da espuma provocou alteração na interação do reforço com o material de aterro.

Para os ensaios reforçados, sem e com a presença da espuma de 14 cm de diâmetro, o maior valor de TBR está associado ao a_{eq}/D_{50} de 1,66 e $a_{eq}/D_{máx}$ de 1,22. Já para os ensaios onde utilizaram-se as espumas de 18 cm e 23 cm os maiores valores de TBR foram observados para as relações a_{eq}/D_{50} de 2,54 e $a_{eq}/D_{máx}$ de 1,87.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Partindo-se dos resultados e conclusões obtidos nesta pesquisa, as sugestões para pesquisas futuras sobre a avaliação de reforços geossintéticos em estradas não pavimentadas na presença de bolsão compressível no subleito, são listadas a seguir:

- Avaliar o desempenho da estrada por meio de simulações numéricas para efeito de comparação com os resultados obtidos experimentalmente.
- Realizar ensaios de carregamento monotônico, para as configurações de estradas estudadas, com o objetivo de se estabelecer correlações matemáticas entre os resultados obtidos nos ensaios de carregamentos monotônicos e cíclicos.
- Monitorar a deformação dos reforços durante a execução do ensaio por meio da instalação de extensômetros nas geogrelhas.
- Desenvolver diferentes metodologias de ancoragem dos reforços e avaliar seus respectivos impactos no desempenho da estrada para diferentes diâmetros do bolsão.
- Avaliar a relação entre o fator de eficiência dos reforços com as propriedades geométricas das geogrelhas e do material de aterro para configurações de ensaio com outros diâmetros de bolsão compressível.
- Avaliar a relação custo-benefício ao empregar geogrelhas como reforço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, P.R.; VERTEMATTI, J. C. (2015). Introdução. In: VERTEMATTI, J. C. (coord.). Manual Brasileiro de Geossintéticos. Blucher, São Paulo, SP, 2 Ed., p. 17-30.
- ABNT (1984). Determinação de massa específica de sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6508, 8 p.
- ABNT (1984). Solo – Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7181, 13 p.
- ABNT (1987). Agregados – Determinação da composição granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7217, 3 p.
- ABNT (1990). Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR MB 3324, 6 p.
- ABNT (1990). Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR MB 3388, 14 p.
- ABNT (2013). Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR ISO 10319, 6 p.
- ASTM, (1998). Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. American Society for Testing and Materials – ASTM D 3080, 6p.
- BAESSO, D.P, GONÇALVES, F.L. (2003). Estradas Rurais: Técnicas Adequadas de Manutenção. Manual Técnico, Florianópolis, 236 p.
- BERG, R.R., CHRISTOPHER, B.R.; PERKINS, S.W. (2000). Geosynthetic reinforcement of the aggregate base/subbase courses of flexible pavement structures - GMA white paper II. Geosynthetic Materials Association, Roseville, MN, USA, 176 p.
- BUENO, B. S. & VILAR, O. M. (2015). Propriedades, ensaios e normas. In: VERTEMATTI, J. C. (coord.). Manual Brasileiro de Geossintéticos. Blucher, São Paulo, SP, 2 Ed., p. 47-84.
- BURD, H. J. (1995). Analysis of Membrane Action in Reinforced Unpaved Roads. Canadian Geotechnical Journal, v. 32, p. 946- 956.
- CNT. Confederação Nacional do Transporte - Boletim Estatístico de 2018. Disponível: <<http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/BOLETIM%20ESTAT%20C3%8DSTICO/BOLETIM%20ESTAT%20C3%8DSTICO%202018/Boletim%20Estat%20C3%ADstico%20-%2001%20-%202018.pdf>>. Acesso em 05 jul. 2018.

- COSTA, C.M.L.; LODI, P.C.; COSTA, Y.D.J; BUENO, B.S. (2008) Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, v.18, n.2, p.158-169.
- CUELHO, E.; PERKINS, S.; MORRIS, Z. (2014). Relative operational performance of geosynthetic used as subgrade stabilization. Final Project Report, FHWA/MT-14-002/7712-251. Research Programs, State of Montana Department of Transportation, Montana, USA.
- DNER (1997). Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem ME 195, 6 p.
- DNER (1998). Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem ME 035, 6 p.
- FANNIN R.J., SIGURDSSON O. (1996). Field observations on stabilization of unpaved roads with geosynthetics. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE, v. 122, n. 7, p. 544–553.
- FENG, S-J. & LU, S-F. (2015). Deformation analysis of a geosynthetic material subjected to two adjacent voids. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 43, n. 4, p. 317-331.
- GIROUD, J. & HAN, J. (2004). Design method for Geogrid-Reinforced unpaved roads. I. Development of Design Method. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 130, n. 8, p. 775-786.
- GIROUD, J. P., BONAPARTE, R., BEECH, J. F. & GROSS, B. A. (1988). Load carrying capacity of a soil layer supported by a geosynthetic located on a void. In *Proceedings of the International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement*, Fukuoka/Kyushu, Japan. Balkema, Rotterdam, p. 185-90.
- GIROUD, J.P., BONAPARTE, R., BEECH, J.F. & GROSS, B.A. (1990). Design of soil layer-geosynthetic systems overlying voids. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 9, p. 11-50.
- GIROUD, J.P.; NOIRAY, L. (1981). Geotextile-Reinforced Unpaved Road Design. *Proceedings ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 107, n. GT9, p. 1233-1254.
- GÓNGORA, I. A. G. (2011). Utilização de Geossintéticos como Reforço de Estradas não Pavimentadas: Influência do Tipo de Reforço e do Material de Aterro. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76 p.
- GÓNGORA, I.A.M.G. (2015). Estradas não Pavimentadas Reforçadas com Geossintéticos: Influência de Propriedades Físicas e Mecânicas do Reforço. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96 p.

- GONGORA, I.A.M.G. & PALMEIRA, E.M. (2016). Assessing the influence of some soil–reinforcement interaction parameters on the performance of a low fill on compressible subgrade. Part II: Influence of surface maintenance. *Int J Geosynth Ground Eng*. DOI: 10.1007/s40891-015-0042-2.
- HOULSBY, G.T.; MILLIGAN, G.W.E.; JEWELL, R.A.; BURD, H.J. (1989). A new approach to the design of unpaved roads - Part I. *Ground Engineering*, v. 22, n. 3, p. 25-29.
- HUCKERT, A.; BRIANÇON, L.; VILLARD, P.; GARCIN, P. (2015). Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: Experimental and analytical approaches. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 44, n. 3, p. 442-456.
- HUFENUS, R.; RUEEGGER, R.; BANJAC, R.; MAYOR, P.; SPRINGMAN, S.M.; BRÖNNIMANN, R. (2006). Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade. *Geotext Geomembr*, v. 24, n.1, p. 21-37.
- IPR (2005). Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Conservação Rodoviária. Rio de Janeiro, 2 Ed., Publ. 710, 564 p.
- LATHA, G., NAIR, A., HEMALATHA, M. (2010). Performance of geosynthetics in unpaved roads. *International of Geotechnical Engineering*, v. 4, n. 3, p. 337-349, DOI:10.3328/IJGE.2010.04.03.337-349.
- LENG, J. (2002). Characteristics and behavior of geogrid reinforced aggregate under cyclic load. Doctoral thesis. Department of Civil Engineering North Caroline State University, USA, 152 p.
- LOPES, M. P. & LOPES, M. L. (2010). A Durabilidade dos geossintéticos. Capítulo 2, FEUP Edições, Porto, p. 105-127.
- LOVE, J.T.; BURD, H.J.; MILLIGAN, G.W.E.; HOULSBY, G.T. (1987). Analytical and model studies of reinforcement of a granular layer on a soft clay subgrade. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 24, p. 611-622.
- MALYSZ, R. (2004). Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 168 p.
- MARSAL, R. J. (1967). Large scale testing of rock fill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, v. 93, n. SM2, p. 27-43.
- NAIR, A.M. & LATHA, G.M. (2013). Cyclic loading behaviour of reinforced soil–aggregate bases *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Ground Improvement* v. 167, n. 2, p. 88-98.

- NUNES, T.V.L (2003). Método de previsão de defeitos em estradas vicinais de terra com base no uso de redes neurais artificiais: Trecho de Aquiraz – CE. Dissertação de mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 118 p.
- ODA, S. (1995). Caracterização de uma rede municipal de estradas não pavimentadas. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 176 p.
- PALMEIRA E.M. (1998). Geosynthetic reinforced unpaved roads on very soft soils: construction and maintenance effects. In: Proceedings of the 6th international conference on geosynthetics, IGS/IFAI, Atlanta, v. 2, p. 885-890.
- PALMEIRA, E.M. & ANTUNES, L.G.S. (2010). Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance. *Geotext Geomembr*, v. 28, p. 547-558.
- PALMEIRA, E.M. & GONGORA, I.A.M.G. (2016). Assessing the influence of some soil–reinforcement interaction parameters on the performance of a low fill on compressible subgrade. Part I: Fill performance and relevance of interaction parameters. *Int J Geosynth Ground Eng*, v. 2, n. 1, 17 p. DOI: 10.1007/s40891-015-0041-3.
- PALMEIRA, E.M. (1981). Utilização de geotêxteis como reforço de aterros sobre solos moles. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 282 p.
- PERKINS, S.W. & ISMEIK, M., (1997). A Synthesis and Evaluation of Geosynthetic Reinforced Base Layers in Flexible Pavements: Part 1. *Geosynthetics International*, v. 4, n.6, p. 549-604.
- PERKINS, S.W. (1999). Mechanical Response of Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements. *Geosynthetics International*, v. 6, n. 5, p. 347-382.
- PIRES, A.C.G (2017). Proteção de tubulações enterradas contra sobrecargas com utilização de geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 p.
- RAMALHO ORTIGÃO, J.A., PALMEIRA, E.M. (1982). Geotextile performance at an access road on soft ground near Rio de Janeiro. In: Proceedings of the 2nd international conference on geotextiles. IFAI, St. Paul, v. 1, p. 353-358.
- SÁNCHEZ, N.P. (2018). Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais, Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160 p.
- SANTOS, A.R., PASTORE E.L., AUGUSTO, F., CUNHA, M.A. (1988). Estradas vicinais de terra: Manual técnico para conservação e recuperação. Instituto de Pesquisas Tecnológicas São Paulo, SP, 125 p.

- SUBAIDA, E.A., CHANDRAKARAN, S., SANKAR, N. (2009). Laboratory performance of unpaved roads reinforced with woven coir geotextiles. *Geotext Geomembr*, v. 27, n. 3, p. 204-210.
- TAHMASEBIPOOR, A.; NOORZAD, R.; SHOOSH PASHA, E.; BARARI, A. (2012). A parametric study of stability of geotextile-reinforced soil above an underground cavity. *Arab J Geosci*, v. 5, p. 449-456.
- TANG, X.; CHEHAB, G.R.; PALOMINO, A. (2008). Evaluation of geogrids for stabilizing weak pavement subgrade. *Int J Pavement Eng*, v. 9, n.6. p. 413-429.
- TANO, B. F. G.; STOLTZ, G.; COULIBALY, S. S.; BRUHIER, J.; DIAS, D.; OLIVIER, F.; TOUZE-FOUZE, N. (2018). Large-scale tests to assess the efficiency of a geosynthetic reinforcement over a cavity. *Geosynthetics International*, v. 25, n. 2, p. 242-258.
- TRICHÊS, G.; KUCHIISHI, A. K.; VIEIRA, T.; BERNUCCI, L. B. (2015). Aplicações em reforço de solos: Reforço de base de pavimentos. In: VERTEMATTI, J. C. (coord.). *Manual brasileiro de geossintéticos*. Blucher, São Paulo, SP, 2 Ed., p. 201-221.
- VILLARD, P., BRIANÇON, L. (2008). Design of geosynthetic reinforcements for platforms subjected to localized sinkholes. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 45, n. 2, p. 196-209.
- VILLARD, P.; HUCKERT, A.; BRIANÇON, L. (2016). Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: Numerical approach and design. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 44, p. 381-395.
- ZORNBERG, J. G. & CHRISTOPHER, B.R. (2007). *The Handbook of Groundwater Engineering*, Chapter 37: Geosynthetics, 2 Ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 36 p.
- ZORNBERG, J.G. (2012). Geosynthetic-reinforced Pavement Systems. Keynote paper, Fifth European Geosynthetics Conference, EuroGeo5, Valencia, Spain, Keynote Lectures Volume, p. 49-61.