

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

**ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS REFORÇADAS COM
GEOSSINTÉTICOS: INFLUÊNCIA DE PROPRIEDADES
FÍSICAS E MECÂNICAS DO REFORÇO**

IVONNE ALEJANDRA M. GUTIÉRREZ GÓNGORA

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD - 105/15

BRASÍLIA - DF: 30 de Março de 2015

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

**ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS REFORÇADAS COM
GEOSSINTÉTICOS: INFLUÊNCIA DE PROPRIEDADES
FÍSICAS E MECÂNICAS DO REFORÇO**

IVONNE ALEJANDRA M. GUTIÉRREZ GÓNGORA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

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

**XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX, D.Sc. (XXX)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**ANA CRISTINA CASTRO FONTENLA SIEIRA, D.Sc. (UERJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA - DF, 30 DE MARÇO DE 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

GÓNGORA, IVONNE ALEJANDRA M. GUTIÉRREZ

Estradas não Pavimentadas Reforçadas com Geossintéticos: Influência de Propriedades Físicas e Mecânicas do Reforço. [Distrito Federal] 2015

xxiii, 96 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2015)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|--|----------------------------|
| 1. Geogrelha | 2. Estrada não Pavimentada |
| 3. Módulo de estabilidade à abertura (ASM) | 4. Carregamento Cíclico |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GÓNGORA, I. A. M. G (2015). Estradas não Pavimentadas Reforçadas com Geossintéticos: Influência de Propriedades Físicas e Mecânicas do Reforço. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-105/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ivonne Alejandra M. Gutiérrez Góngora

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Estradas não Pavimentadas Reforçadas com Geossintéticos: Influência de Propriedades Físicas e Mecânicas do Reforço.

GRAU / ANO: Doutor / 2015

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

Ivonne Alejandra M. Gutiérrez Góngora

Scln 407 Bloco C apto 202, Bairro Asa Norte.

CEP.: 70855-530 – Brasília/DF – Brasil.

DEDICATORIA

Dedico este trabalho, em especial, a Deus, aos meus pais, irmãos e ao meu namorado, por terem sempre acreditado em mim. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

À Deus pela presença em todos os momentos de minha vida. Realmente sem ele não teria vencido os obstáculos que surgiram ao longo do caminho.

À minha mãe e ao meu pai, **Rubby** e **Libardo**, por sempre me incentivarem a seguir em frente, pelo amor oferecido em todos os momentos. Realmente, vocês são os meus exemplos e o meu orgulho! Agradeço-os por nunca pouparem esforços para que eu pudesse realizar todos os meus sonhos, por terem me apoiado em todos os momentos e por nunca terem deixado de acreditar no meu potencial.

Aos meus irmãos, **Catalina** e **Juan David**, por serem amigos verdadeiros. Obrigada por todo o amor que vocês me oferecem, pela confiança e pelos conselhos. Amo vocês!

Ao meu amigo, namorado, colega e cúmplice Jaime pelo apoio e confiança ao longo destes anos. Obrigada por me incentivar e ajudar ao longo da minha pesquisa, realmente você foi fundamental. Agradeço por ter me acompanhado nesta jornada, por estar comigo em cada momento e por me fazer sempre rir. Obrigada por tudo!

Ao meu orientador, **prof. Ennio Palmeira**, pela orientação oferecida nesta pesquisa, além da amizade e dos conselhos dados ao longo desses anos. Realmente, me sinto afortunada de ter sido orientada pelo senhor. Tenho-o como exemplo de profissional e ser humano. Obrigada por ter acreditado no meu potencial e pela disposição a me ajudar sempre que foi necessário. Aproveito a ocasião para agradecer também a Dona Deusa, por ter sido sempre tão atenciosa comigo.

A toda minha família, pela confiança depositada em mim. Aos meus avôs, pelo carinho oferecido em todos os momentos, especialmente à minha avó **Teodomira**, por ter-me sempre presente nas suas orações.

À minha amiga **Nina Rosa**, pela amizade sincera oferecida nestes anos. Sei que posso contar sempre com você.

À meu amigo **Robinson** pela amizade e ajuda na elaboração do programa de seleção de dados dos ensaios.

Aos colegas e amigos, **Oisy, Claudia, Tania, Elier, Elizabeth, Raydel, Alejandra, Ivan, Gabriel, Lucia, Ewerton, Cristina, David, Juan Gabriel, Janaina, Vanilson, Rosely, Sonia, Antônio, Maria de los Angeles, Diana e Maria Cristina**, pelos bons momentos compartilhados no decorrer desses anos. Agradeço também a todos aqueles que fizeram parte de minha vida, mas que por falta de memória, talvez, tenha esquecido de cita-los aqui.

Aos senhores **Arthur e Moacyr**, por terem me auxiliado na construção do equipamento utilizado nesta pesquisa. Sem a ajuda e boa vontade dos senhores o trabalho não teria sido possível.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia da UnB, **Thiago e Jonas**, pela colaboração constante durante a realização dos ensaios e na elaboração das geogrelhas. Agradeço em especial ao Thiago pela amizade e por sempre estar disposto a me ajudar em tudo o que foi necessário.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, pela contribuição em minha formação profissional e pelas dúvidas esclarecidas durante a pesquisa.

À **Cida**, pela colaboração com as coisas que precisei por parte da Secretaria. Agradeço-a pela amizade oferecida ao longo desses anos.

À **Universidade de Brasília**, pela oportunidade que me foi concedida de realizar meu doutorado em uma instituição de grande qualidade e reconhecimento.

Agradeço também a **CAPES** e ao **CNPq** pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram na realização deste trabalho. Muito obrigada!

RESUMO

No Brasil e na maioria de países do mundo, grande parte da rede viária é formada por estradas não pavimentadas. Este tipo de estradas é de grande importância econômica e social, posto que com elas é possível acessar a diversos serviços disponíveis nos grandes centros urbanos, além de servir para transporte de bens e mercadorias. O estudo do comportamento destas estradas, e sua correta manutenção, geralmente encontram-se relegados a segundo plano. Nos últimos tempos, geossintéticos vêm sendo usados como elementos de reforço deste tipo de estrada, visando melhorar seu desempenho e prolongar sua vida útil. Apesar disso, os estudos realizados acerca da influência das propriedades mais relevantes do reforço no comportamento da estrada ainda são poucos, sendo necessárias mais investigações sobre este tema. Assim sendo, esta pesquisa estudou o comportamento de estradas não pavimentadas reforçadas com diferentes tipos de reforço, simuladas num equipamento de grande porte construído especialmente para a pesquisa. Doze tipos de geogrelha (6 encontradas comercialmente e 6 fabricadas em laboratório especialmente para a pesquisa) foram utilizadas como reforço, além de um geotêxtil tecido. As geogrelhas avaliadas apresentavam diferentes características, tais como dimensões das aberturas, rigidez à tração, módulo de estabilidade à abertura (ASM) e resistência à tração, entre outras. Os ensaios simularam uma estrutura comum de estrada não pavimentada sob material compressível, no caso areia fofa. Como aterro, utilizou-se brita. Para a execução dos testes, foi aplicado carregamento cíclico, sob uma frequência de 1 Hz e com uma pressão máxima sobre a superfície da estrada de 560 kPa. Durante a execução dos ensaios foram realizadas manutenções superficiais para representar de forma mais autêntica a situação das estradas não pavimentadas na prática, tendo como critério para essa manutenção a ocorrência de trilha de roda com 75 mm de profundidade. Foram medidos deslocamentos ao longo da superfície do aterro e as tensões no solo de subleito durante os ensaios. Os resultados obtidos mostraram a influência da geometria e da rigidez à tração das geogrelhas no desempenho das estradas e os significativos aumentos dos números de ciclos de carga suportados pelas estradas reforçadas, em relação a aquelas sem reforço. Também observou-se que, para as condições dos ensaios, não houve correlação entre módulo de estabilidade à abertura (ASM) e o desempenho das estradas reforçadas.

ABSTRACT

In Brazil and in most of the countries a large fraction of the road network consists of unpaved roads. This type of road is of great economic and social importance because it allows access to several services available in great urban centers, besides serving for transportation of goods. The study on the behaviour of such roads and their proper maintenance are usually neglected. In the last decades, geosynthetics have been used as reinforcement to improve the performance of unpaved roads and to increase their lives. Nevertheless, further research is needed on the influence of relevant properties of the reinforcement on the behaviour of the road. Thus, this thesis aims at investigating the behaviour of unpaved roads reinforced with different types of reinforcements, simulated in an large scale apparatus specially commissioned for this research. Twelve types of geogrids (6 commercially available and 6 manufactured in the laboratory) and a woven geotextile were tested. The geogrids presented different characteristics, such as aperture dimensions, tensile stiffness, aperture stability modulus (ASM) and tensile strength, among others. The tests simulated roads built on a compressible material, being loose sand used as compressible subgrade. Cyclic load was applied on the road with a frequency of 1 Hz and with a maximum vertical stress on the road surface equal to 560 kPa. During the tests road surface maintenance was also carried out when a rut depth of 75 mm was reached in order to better simulate what happens in a real unpaved road during its service life. Vertical displacements along the road surface and total stresses in the subgrade were measured. The results obtained showed the influence of the geometry and tensile stiffness of the geogrids on the performance of the reinforced road. It was also observed that, for the conditions of the tests, there was no correlation between the grid aperture stability modulus (ASM) and the performance of the geogrid reinforced unpaved roads.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	ESTRUTURA DA TESE.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	4
2.1.1	Aspectos relevantes de uma estrada não pavimentada	5
2.1.2	Defeitos apresentados por estradas não pavimentadas	6
2.1.3	Manutenção de estradas.....	8
2.2	GEOSINTÉTICOS USADOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	8
2.2.1	Funções principais desempenhadas por geossintéticos em estradas não pavimentadas.....	9
2.3	MECANISMOS DE FUNCIONAMENTO DO REFORÇO.....	10
2.3.1	Restrição à movimentação lateral.....	10
2.3.2	Aumento da capacidade de carga	11
2.3.3	Efeito membrana	12
2.4	EFEITOS DA APLICAÇÃO DE CARGA CICLICA EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	12
2.5	MÓDULO DE ESTABILIDADE À ABERTURA (ASM)	13
2.6	INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DO REFORÇO.....	14
2.7	ENSAIOS REALIZADOS EMPREGANDO CARREGAMENTO CICLICO E GEOSINTÉTICOS COMO REFORÇO	14
2.7.1	Ensaios realizados em laboratório	14
2.7.2	Trechos experimentais reforçados com geossintéticos.....	18
2.8	MÉTODOS DE PROJETO DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	24
2.8.1	Método de Hammitt 1970.....	24
2.8.2	Método de Giroud e Noiray (1981).....	25
2.8.3	Método de Oxford (1989).....	25

2.8.4	Método de Giroud e Han (2004)	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	28
3.1.1	Material de aterro: Brita	28
3.1.2	Material de subleito	30
3.1.3	Geossintéticos empregados na pesquisa.....	32
3.1.4	Determinação do módulo de estabilidade à abertura (ASM) das geogrelhas usadas ...	37
3.2	EQUIPAMENTOS.....	38
3.2.1	Equipamento de ensaio.....	39
3.2.2	Instrumentação	41
3.2.3	Sistema de Aquisição de Dados	43
3.3	PROCEDIMENTO ADOTADO PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO CICLICO.....	44
3.3.1	Preparação do equipamento de ensaio.....	44
3.3.2	Disposição da camada de subleito.....	44
3.3.3	Colocação da instrumentação no solo de subleito	45
3.3.4	Instalação da camada de reforço.....	46
3.3.5	Colocação da camada de aterro	47
3.3.6	Instalação da instrumentação.....	48
3.3.7	Execução do ensaio (Primeiro estágio de carga).....	48
3.3.8	Restauração do aterro (segundo estágio de carga)	49
3.4	DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUEBRA DOS GRÃOS DO MATERIAL DE ATERRO	49
3.5	DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE ESPRAIAMENTO DE TENSÕES (β)	50
4	RESULTADOS.....	52
4.1	PRIMEIRO ESTÁGIO DE CARGA	52
4.1.1	Análises dos deslocamentos no primeiro estágio de carga.....	52
4.1.2	Fator de eficiência para cada um dos reforços usados - Primeiro estágio de carga	59
4.1.3	Análises das tensões totais no primeiro estágio de carga.....	60

4.2	SEGUNDO ESTÁGIO DE CARGA	66
4.2.1	Análises dos deslocamentos no segundo estágio de carga	66
4.2.2	Fator de eficiência calculado para cada um dos reforços – segundo estágio de carga .	72
4.2.3	Tensões totais no segundo estágio de carga	73
4.3	ANÁLISES DA QUEBRA DE GRÃOS DO MATERIAL DE ATERRO.....	78
4.4	ÂNGULO DE ESPRAIAMENTO DE TENSÕES PARA OS ENSAIOS REALIZADOS	80
4.5	INFLUÊNCIA DE PROPRIEDADES RELEVANTES DOS REFORÇOS NOS RESULTADOS OBTIDOS.....	80
4.5.1	Verificação visual da influência do módulo de estabilidade à abertura (ASM) no comportamento mecânico de uma estrada não pavimentada	86
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	89
5.1	CONCLUSÕES.....	89
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	91
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Extensão da malha rodoviária (km) – Brasil	4
Tabela 2.2 Localização do reforço nos ensaios realizados por Perkins <i>et al.</i> (1999).....	16
Tabela 2.3 Resultados experimentais obtidos por Cuelho <i>et al</i> (2014).....	21
Tabela 3.1 Propriedades relevantes da brita empregada nos ensaios.	29
Tabela 3.2 Características da areia utilizada nos ensaios.....	31
Tabela 3.3 Propriedades dos reforços utilizados.....	33
Tabela 3.4 Aberturas equivalentes calculadas para as geogrelhas comerciais e fabricadas no laboratório	33
Tabela 3.5 Propriedades das geogrelhas fabricadas em laboratório.....	34
Tabela 3.6 Módulos de estabilidade à abertura obtidos para as geogrelhas comerciais usadas na pesquisa.	38
Tabela 3.7 Módulos de estabilidade à abertura obtidos para as geogrelhas fabricadas empregadas na pesquisa.	38
Tabela 4.1 Fatores de eficiência obtidos para os reforços usados na pesquisa – Primeiro estágio de carga.	59
Tabela 4.2 Fatores de eficiência obtidos para as geogrelhas empregadas – Primeiro estágio de carga.	72
Tabela 4.3 Índice de quebra dos grãos ao final dos ensaios.....	79
Tabela 4.4 Valores de ângulos de espraiamento nos ensaios realizados.....	80
Tabela 4.5 Relação de abertura equivalente/D ₅₀ para os reforços usados na pesquisa.	82
Tabela 4.6 Módulo de estabilidade à abertura (ASM) e número de repetições de carga para os reforços usados na pesquisa.	82
Tabela 4.7 Rigidez à tração a 5% deformação e número de repetições de carga para os reforços utilizados na pesquisa.....	84
Tabela 4.8 Fração de área sólida em planta (α_s) dos reforços empregados.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Excesso de pó na estrada.	6
Figura 2.2 Ondulações na estrada.	7
Figura 2.3 Afundamento de trilhas de roda numa estrada.....	7
Figura 2.4 Formação de buracos na estrada.	8
Figura 2.5 Geotêxtil como elemento de separação em estradas.....	10
Figura 2.6 Mecanismo de restrição da movimentação lateral (modificado - Perkins and Ismeik, 1997).....	11
Figura 2.7 Aumento da capacidade de carga produzido pelo geossintético (modificado - Perkins and Ismeik, 1997).....	11
Figura 2.8 Efeito Membrana produzido pelo geossintético (modificado - Perkins and Ismeik, 1997).....	12
Figura 2.9 Equipamento utilizado para obter o módulo de estabilidade à abertura (ASM)-Projeto de norma ASTM.....	14
Figura 2.10 Equipamento em grande escala para simulação de uma estrutura de pavimento (modificado - Perkins e Ismeik, 1997).....	15
Figura 2.11 Seções de pavimento ensaiadas por Perkins <i>et al.</i> (1999).	16
Figura 2.12 Deslocamentos verticais no pavimento <i>versus</i> número de ciclos de carga (modificado Perkins <i>et al.</i> , 1999).	16
Figura 2.13 Fator de eficiência para os reforços usados <i>versus</i> módulo de estabilidade à abertura (ASM) - Trilha de Roda de 25 mm – Dados obtidos de Cuelho <i>et al.</i> (2014)	22
Figura 2.14 Fator de eficiência para os reforços usados <i>versus</i> módulo de estabilidade à abertura (ASM) para uma Trilha de Roda de 63,5 mm – Dados obtidos de Cuelho <i>et al.</i> (2014).....	22
Figura 2.15 Fator de eficiência para os reforços usados <i>versus</i> rigidez a tração a 2% de deformação (J _{2%}) para uma Trilha de Roda de 63,5 mm – Dados obtidos de Cuelho et al	23
Figura 2.16 Fator de eficiência para os reforços usados <i>versus</i> rigidez a tração a 5% de deformação (J _{5%}) para uma Trilha de Roda de 63,5 mm – Dados obtidos de Cuelho et al (2014).	23
Figura 3.1 Brita utilizada na pesquisa.	28
Figura 3.2 Curva granulométrica da brita empregada nos ensaios.	29
Figura 3.3 Equipamento de cisalhamento direto de médio porte: a) vista geral do equipamento, b) Caixa para colocação de amostras.	30
Figura 3.4 Areia usada como solo de subleito.	31

Figura 3.5 Curva granulométrica da areia empregada como subleito.....	31
Figura 3.6 Geogrelhas comerciais utilizadas na pesquisa: a) Geogrelha 1 (G1), b) Geogrelha 2 (G2), c) Geogrelha 3(G3), d) Geogrelha 4 (G4), e) Geogrelha 5 (G5), f) Geogrelha 6 (G6).	35
Figura 3.7 Geogrelhas fabricadas em laboratório: a) Geogrelha fabricada 1 (GF1), b) Geogrelha fabricada colada 1 (GFC1), c) Geogrelha fabricada 2 (GF2), d) Geogrelha fabricada colada 2 (GFC2), e) Geogrelha fabricada verde 1 (GFV1), f) Geogrelha fabricada verde 2 (GFV2).	36
Figura 3.8 Montagem usada para a determinação do módulo de estabilidade à abertura.....	37
Figura 3.9 Equipamento para execução dos ensaios.....	40
Figura 3.10 Célula de carga usada nos ensaios.....	41
Figura 3.11 Célula de tensão total usada na pesquisa.....	42
Figura 3.12 Medidor de deslocamento linear empregado nos ensaios.....	43
Figura 3.13 Sistema de aquisição de dados usado nos ensaios.....	43
Figura 3.14 Colocação de camada de plástico para evitar atrito lateral.....	44
Figura 3.15 Disposição da camada de subleito.....	45
Figura 3.16 Colocação das células de tensão total.....	45
Figura 3.17 Localização das células de tensão nos ensaios.....	46
Figura 3.18 Ancoragem do reforço.....	46
Figura 3.19 Preparação do reforço.....	47
Figura 3.20 Instalação do reforço.....	47
Figura 3.21 Colocação da camada de aterro.....	48
Figura 3.22 Localização dos medidores de deslocamento linear.....	49
Figura 3.23 Restauração do aterro.....	50
Figura 3.24 Espreadimento de tensões numa estrada não pavimentada reforçada e sem reforço (modificado – Antunes, 2008).....	51
Figura 4.1 Deslocamentos verticais da placa de carregamento <i>versus</i> o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Primeiro estágio de carga.....	53
Figura 4.2 Deslocamentos verticais da placa de carregamento <i>versus</i> o número de ciclos de Carga para geogrelhas fabricadas – Primeiro estágio de carga.....	54
Figura 4.3 Deslocamentos verticais da placa de carregamento <i>versus</i> o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Primeiro estágio de carga. Para N = 2.810 (final do ensaio sem reforço).....	55
Figura 4.4 Deslocamentos verticais da placa de carregamento <i>versus</i> o número de ciclos de carga para geogrelhas fabricadas– Primeiro estágio de carga. Para N = 2.810 (final do ensaio sem reforço).....	56

Figura 4.5 Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro para reforços comerciais - Primeiro estágio de carga.	56
Figura 4.6 Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro para geogrelhas fabricadas - Primeiro estágio de carga.	57
Figura 4.7 Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro para reforços comerciais - Primeiro estágio de carga. Para N = 2.810 (ao final do ensaio não reforçado).	58
Figura 4.8 Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro para geogrelhas fabricadas - Primeiro estágio de carga. Para N = 2.810 (ao final do ensaio não reforçado).	58
Figura 4.9 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,35 m <i>versus</i> o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Primeiro estágio de carga.	60
Figura 4.10 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,45 m <i>versus</i> o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Primeiro estágio de carga.	61
Figura 4.11 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,35 m <i>versus</i> o número de ciclos de carga para geogrelhas fabricadas– Primeiro estágio de carga.	62
Figura 4.12 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,45 m <i>versus</i> o número de ciclos de carga para geogrelhas fabricadas– Primeiro estágio de carga.	62
Figura 4.13 Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade para as estradas construídas com reforços comerciais - Primeiro estágio de carga.	63
Figura 4.14 Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade para as estradas construídas com geogrelhas fabricadas - Primeiro estágio de carga.	64
Figura 4.15 Tensões totais máximas para as estradas construídas com reforços comerciais <i>versus</i> profundidade - Primeiro estágio de carga. Para N = 2.810 (ao final do ensaio não reforçado).	65
Figura 4.16 Tensões totais máximas para as estradas construídas com geogrelhas fabricadas <i>versus</i> profundidade - Primeiro estágio de carga. Para N = 2.810 (Ao final do ensaio não reforçado).	65
Figura 4.17 Deslocamentos verticais da placa de carregamento <i>versus</i> o número de ciclos de	67
Figura 4.18 Deslocamentos verticais da placa de carregamento <i>versus</i> o número de ciclos de	67
Figura 4.19 Deslocamentos verticais da placa de carregamento <i>versus</i> o número de ciclos de carga para geogrelhas comerciais – Segundo estágio de carga. Para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço).	68

Figura 4.20 Deslocamentos verticais da placa de carregamento <i>versus</i> o número de ciclos de carga para geogrelhas fabricadas – Segundo estágio de carga. Para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço).....	69
Figura 4.21 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para reforços comerciais - Segundo estágio de carga.....	69
Figura 4.22 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para geogrelhas fabricadas - Segundo estágio de carga.....	70
Figura 4.23 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para reforços comerciais - Segundo estágio de carga. Para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço).	71
Figura 4.24 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para geogrelhas fabricadas - Segundo estágio de carga. Para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço).	71
Figura 4.25 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,35 m <i>versus</i> o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Segundo estágio de carga.	74
Figura 4.26 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,45 m <i>versus</i> o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Segundo estágio de carga.	74
Figura 4.27 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,35 m <i>versus</i> o número de ciclos de carga para reforços fabricados– Segundo estágio de carga.....	75
Figura 4.28 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,45 m <i>versus</i> o número de ciclos de carga para reforços fabricados– Segundo estágio de carga.....	75
Figura 4.29 Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade para as estradas construídas com reforços comerciais - Segundo estágio de carga.	76
Figura 4.30 Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade para as estradas construídas com reforços fabricados - Segundo estágio de carga.	77
Figura 4.31 Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade para as estradas construídas com reforços comerciais - Segundo estágio de carga. Para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço).	77
Figura 4.32 Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade para as estradas construídas com geogrelhas fabricadas - Segundo estágio de carga. Para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço).....	78
Figura 4.33 Relação de abertura / D50 para as geogrelhas usadas na pesquisa <i>versus</i> número de repetições de carga – Primeiro estágio de carga	81
Figura 4.34 Módulo de estabilidade à abertura (ASM) <i>versus</i> número de ciclos – Primeiro estágio de carga.	83

Figura 4.35 Rigidez à tração a 5% de deformação ($J_{5\%}$) <i>versus</i> número de ciclos de carga – Primeiro estágio de carga.	84
Figura 4.36 Fração de área sólida <i>versus</i> número de ciclos – Primeiro estágio de carga.	86
Figura 4.37 Montagem do ensaio para verificar a forma deformada da geogrelha após carregamento.	87
Figura 4.38 Ensaio 1 para determinação da influência do ASM.	88
Figura 4.39 Ensaio 2 para determinação da influência do ASM.	88

LISTA DE SIMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACOES

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASM: Aperture Stability Modulus

ASTM: American Section of the International Association for Testing Materials

Bg: ndice de quebra

CBR: Califórnia Bearing Ratio

Cc: Coeficiente de Curvatura

cm: Centímetro

cm²: Centímetro quadrado

cm³: Centímetro cúbico

Cu: Coeficiente de Uniformidade

D50: Diâmetro das partículas correspondente a 50 % passante em peso

DEM: Método dos Elementos Discretos

E*: Fator de eficiência modificado

E: Fator de eficiência

e: ndice de vazios

f^r: coeficiente de fadiga, determinado pela expressão

g/cm³: Grama por Centímetro Cúbico

g: Grama

H espessura do aterro;

h: Hora

Hz: Hertz

J2%: Rigidez a tração a 2% de deformação

J5%: Rigidez a tração a 5% de deformação

kg: Kilogramas

Km: Quilmetros

kN/m: QuiloNewton por metro

kN/m³: QuiloNewton por metro cúbico

kPa: Quilopascal

lb: Libra

m: Massa

M: Mega

m: Metro

m²: Metro quadrado

m³: Metro cúbico

min: Minuto

mm: Milímetro

MPa: MegaPascal

N: Número de ciclos de carga

N: número de repetições de carga.

NBR: Norma Brasileira

Nr: Número de aplicações para o pavimento com reforço geossintético atingir uma determinada trilha de roda.

Nu: Número de aplicações para o pavimento sem reforço geossintético atingir uma determinada trilha de roda.

°: Grau

p = pressão aplicada na superfície do aterro

R: raio da área circular onde é aplicada a carga

s : Segundo

Su = resistência não drenada do solo de subleito

TBR: Traffic Bearing Ratio

UnB: Universidade de Brasília

β: ângulo de espraçamento de tensões

γ_{d max}: Peso específico seco máximo

ΔW: Diferença entre porcentagens retidas entre peneiras

%: Porcentagem

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A maior parte da rede rodoviária brasileira é constituída por estradas não pavimentadas. Segundo estatísticas do *International Road Federation (IRF)*, em 2006, no Brasil tinham-se 88% de estradas não pavimentadas e 12 % de rodovias pavimentadas. As estradas não pavimentadas são normalmente utilizadas para suportar baixos volumes de tráfego e servir como vias de acesso. Este tipo de estrada desempenha um papel muito importante na economia rural, contribuindo para o escoamento da produção agrícola e para a exploração de recursos naturais (florestas, mineração, energia). Além disso, proporcionam às comunidades que moram em setores rurais acesso a alguns serviços disponíveis nas cidades, tais como saúde, lazer, educação, entre outros.

Apesar da grande extensão das estradas não pavimentadas e de sua importância econômica e social, este tipo de estradas constitui geralmente um tema relegado a segundo plano. Além disso, muitos usuários de estradas não pavimentadas acreditam que só existe uma solução para os problemas de manutenção dessas vias: a pavimentação asfáltica. Todos parecem ignorar que o custo de pavimentação é alto e, que uma manutenção adequada é capaz de resolver grande parte dos problemas (Oda *et al.*, 2001). É importante então realizar um adequado dimensionamento, construção e manutenção periódica das estradas não pavimentadas, visando ter estradas mas duráveis e funcionais ao longo de suas vidas úteis.

Quando as estradas não pavimentadas são construídas sobre solos moles ou de baixa resistência mecânica, ocorrerão grandes deformações devido à baixa capacidade de suporte do solo de subleito. Isso aumenta os custos de manutenção e em ocasiões de chuva/alta pluviosidade pode levar a prováveis interrupções do tráfego, dependendo do estado da estrada.

O emprego de geossintéticos como materiais de reforço tem crescido bastante nas últimas décadas, principalmente em países com alto nível de desenvolvimento econômico e social. Já em países como o Brasil, que encontram-se em desenvolvimento, o emprego destes materiais em obras rodoviárias tem aumentado notavelmente nos últimos anos, especialmente pela necessidade de rodovias com maior resistência e durabilidade. O uso de geossintéticos em

estradas não pavimentadas constitui-se numa prática relevante, pois pode melhorar a capacidade de suporte do sistema em comparação com a situação sem reforço.

Tendo presente os benefícios e o grande potencial que apresentam os geossintéticos quando usados como reforço em obras geotécnicas, torna-se necessário um número maior de pesquisas que incrementem o conhecimento sobre o assunto. No que se refere a estradas não pavimentadas, tais estudos poderiam viabilizar novas metodologias de projeto para estas estradas. É importante destacar que para o estudo do comportamento do reforço na estrada não pavimentada, surgem variáveis importantes a serem consideradas, tais como geometria do geossintético, interação material de aterro-reforço, rigidez a tração do reforço, e outras pouco estudadas, como o módulo de estabilidade à abertura de geogrelha (ASM).

Analisando as estatísticas apresentadas acerca das estradas não pavimentadas e valorizando o importante serviço que elas prestam para a comunidade, nesta pesquisa optou-se por estudar vários tipos de reforço que contribuam para construir estradas de terra mais resistentes e duradouras. Nesta pesquisa foi utilizado um equipamento de grandes dimensões, projetado e construído especialmente para a pesquisa, onde foram realizadas simulações do tráfego por meio da aplicação de carregamentos cíclicos.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo Geral: Avaliar os fatores que influenciam o desempenho de estradas não pavimentadas construídas sobre solos fracos, reforçadas com geossintéticos.

Objetivos específicos:

- Determinar a influência das características geométricas do reforço (particularmente geogrelhas) no comportamento mecânico de estradas não pavimentadas.
- Analisar a influência de características como resistência e rigidez à tração de alguns geossintéticos usados como reforço de estradas não pavimentadas.
- Comparar os desempenhos de diferentes tipos de reforços no comportamento mecânico de estradas não pavimentadas simuladas.

- Avaliar a relevância do módulo de estabilidade à abertura (ASM) de geogrelhas usadas como reforço no comportamento mecânico de estradas não pavimentadas.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está dividida em 5 capítulos. Uma breve descrição do conteúdo apresentado em cada capítulo é feita a seguir.

O primeiro capítulo introduz o tema da pesquisa, apresentando como motivação para sua realização a importância das estradas não pavimentadas para a economia do país e do mundo.

O segundo capítulo exibe uma revisão bibliográfica sobre o assunto, onde se aborda o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

No capítulo três são expostos os materiais e a metodologia seguida nos ensaios. Apresenta o equipamento construído para a pesquisa, as características mais relevantes dos materiais usados e finalmente os geossintéticos utilizados para cada um dos ensaios.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados e as análises dos mesmos, visando determinar a influência das características geométricas do reforço, rigidez e módulo de estabilidade à abertura (ASM). Pode-se, desta forma, ter uma ideia mais precisa das características inerentes aos reforços que interferem no comportamento mecânico de uma estrada não pavimentada.

No quinto capítulo apresentam-se as conclusões obtidas no estudo e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

As estradas não pavimentadas, por vezes também chamadas estradas de terra, são aquelas que permitem o fluxo de mercadorias e serviços na zona rural dos municípios. Geralmente este tipo de estrada é procedente do aproveitamento de trilhas e caminhos existentes, condicionadas a um traçado geométrico carregado de fortes rampas e curvas acentuadas (Carvalho, 1992). Estes tipos de estradas não são revestidas por qualquer tipo de tratamento superficial, betuminoso ou de cimento Portland. A superfície é geralmente constituída por solo local, às vezes misturado com agregado. De forma geral essas estradas são de baixo volume de tráfego e, quase sempre, carentes de uma adequada manutenção.

Na atualidade, no Brasil existem mais de um milhão de quilômetros em estradas não pavimentadas, correspondentes a 87% da extensão da malha viária, como é apresentado na Tabela 2.1. Elas garantem o fluxo de grande parcela da riqueza nacional, além do atendimento social aos habitantes das zonas rurais. É importante destacar que tais estradas são muito empregadas em todo o mundo também em funções temporárias, como acesso a obras e por motivos de segurança ou militares. Assim, contribuem de forma importante para o desenvolvimento e a melhoria da qualidade de vida das comunidades beneficiadas pela sua existência.

Tabela 2.1 Extensão da malha rodoviária (km) – Brasil

Brasil-Extensão da Rede Rodoviária (km)	Rede não pavimentada	Rede pavimentada	Extensão total da rede
Federal	12.808,600	64.721,300	77.529,900
Estadual	111.333,700	110.841,800	222.175,500
Municipal	1.234.918,300	26.826,700	1.261.745,000
Coincidente Federal	5.196,100	17.456,700	22.652,800
Extensão Total (km)	1.364.256,700	219.846,500	1.584.103,200
Rede Planejada			107.112,70
TOTAL			1.691.215,900

Fonte: DNIT - DPP/CG PLAN/Coordenação de Planejamento - 28/12/2012

A importância das estradas não pavimentadas deve-se, principalmente, ao fato de apresentar baixo custo de construção, tolerância a grandes deformações e a outros aspectos técnico-econômicos. Entretanto, destaca-se que as estradas não pavimentadas merecem melhores e mais

amplios estudos técnicos para serem melhoradas e manutenções frequentes e eficientes para garantir um bom serviço.

As manutenções em estradas são indispensáveis, porque elas provêm uma contribuição crucial para o desenvolvimento e crescimento econômico e trazem benefícios sociais importantes. Estradas não pavimentadas mal conservadas restringem a mobilidade, aumentam significativamente os custos operacionais dos veículos, as taxas de acidentes, agravam o isolamento, a pobreza, os problemas de saúde e o analfabetismo das comunidades rurais.

Segundo evidências constatadas em vários países, é notório o papel vital desempenhado pelas estradas vicinais de terra no desenvolvimento da agricultura e de atividades extrativistas, dentre outras. Estudos do Banco Mundial (1993) concluíram que a implantação de melhorias na rede viária tem um efeito imediato, não somente na redução do custo operacional de veículos, como também na expansão dos serviços públicos nas áreas rurais (Baesso e Gonçalves, 2003).

2.1.1 Aspectos relevantes de uma estrada não pavimentada

As estradas não pavimentadas, para serem consideradas aptas para o serviço, devem apresentar quatro aspectos importantes, os quais contribuem para que elas possam cumprir adequadamente a função para a qual foram projetadas. O primeiro deles é uma boa capacidade de suporte, a qual depende das características do material da superfície e da resistência do subleito. Tem-se que quanto maior a capacidade de suporte do solo, maior também será a sua capacidade de resistir aos processos erosivos e desgastes provenientes do tráfego sob as condições mais adversas. Oda (1995) descreve que a capacidade de suporte depende das características do material da superfície (expansibilidade, compressibilidade, permeabilidade, entre outros) e da resistência do solo subjacente. Destaca-se que a maioria dos problemas ou defeitos encontrados em estradas não pavimentadas, tais como trilhas de rodas e ondulações, são produto da falta de capacidade de suporte do material de aterro.

Já o segundo aspecto refere-se às condições de rolamento e aderência, as quais estão profundamente relacionadas com a presença de defeitos na estrada, os quais, em dado momento, podem chegar a interferir na segurança e conforto dos veículos que por ela transitam. Dentre estes defeitos incluem-se: excesso de pó, ondulações transversais, afundamentos de trilhas de rodas, buracos, etc.

Outro aspecto a ser considerado é o sistema de drenagem, o qual deve ser adequado para evitar que a ação erosiva da água danifique a superfície de rolamento e o solo de fundação. Geralmente um sistema de drenagem ineficiente provoca a formação de defeitos na estrada nas épocas de chuvas.

2.1.2 Defeitos apresentados por estradas não pavimentadas

Existe uma série de defeitos que, quando presentes numa estrada, interferem na trafegabilidade dos veículos que por ela transitam. Estes ocasionam alterações na superfície de rolamento da estrada ou em seu contorno, que influenciam negativamente as condições de rolamento da pista. A seguir serão descritos alguns dos defeitos existentes em estradas não pavimentadas, abordados por Santos *et al.* (1988).

- **Excesso de pó:** a presença de material fino na estrada gera a formação de nuvens de poeira, especialmente nas épocas de seca. Isto acontece em consequência da passagem de veículos que geram uma ação abrasiva na estrada, fazendo com que as partículas de solos aglutinantes se soltem da superfície de rolamento. Este problema compromete a segurança da estrada e a durabilidade dos veículos que transitam por ela (Figura 2.1)



Figura 2.1 Excesso de pó na estrada.

- **Ondulações:** são irregularidades que ocorrem na superfície da estrada, consistindo em uma série de sulcos medianamente espaçados que ocorrem em intervalos bastante regulares, perpendiculares à direção do tráfego. De forma geral, o material granular de diâmetro entre 5 e 10 mm se acumula, formando pequenos “morros” sucessivos, causando instabilidade e desconforto ao usuário (Figura 2.2).



Figura 2.2 Ondulações na estrada.

- **Afundamento de trilhas de roda:** são depressões geradas na superfície da estrada, que aparecem na direção de passagem dos pneus dos veículos. O afundamento é causado por uma deformação permanente em qualquer camada da estrada ou do subleito, provocado pela compressibilidade dos solos e pela ação das cargas repetidas dos veículos que transitam pela estrada, principalmente quando a capacidade de suporte é baixa e em períodos de chuva (Figura 2.3).



Figura 2.3 Afundamento de trilhas de roda numa estrada.

- **Buracos:** Os buracos (Fig. 2.4) são decorrentes da plataforma mal drenada, provavelmente sem abaulamento transversal. Constituem pequenas depressões em forma de bacia na superfície da estrada, produzidas quando o tráfego desgasta pequena parte da superfície da estrada e têm o crescimento acelerado pela umidade (Nunes, 2003).



Figura 2.4 Formação de buracos na estrada.

2.1.3 Manutenção de estradas

O propósito da manutenção é preservar a estrada e aumentar a sua vida útil. A manutenção de estradas não pavimentadas deve ser realizada com certa regularidade. O processo de manutenção compreende uma série de atividades para manter a superfície da estrada, as estruturas de drenagem e todas as outras estruturas que compreendem a mesma. Esta inclui pequenos reparos e melhorias para eliminar a causa dos defeitos presentes e, para evitar a repetição excessiva de trabalhos de manutenção.

A manutenção de estradas é classificada como de rotina, periódica ou urgente. A manutenção de rotina visa manter o funcionamento da estrada de forma adequada, evitando ou corrigindo desgastes que ocorrem de forma prematura, pelo menos uma vez por mês. Já a manutenção periódica tem como objetivo preservar a integridade estrutural da estrada, exigindo equipamentos especializados e pessoal qualificado. Finalmente, tem-se a manutenção urgente, a qual geralmente aparece de forma inesperada, precisando intervenção imediata, como é o caso dos deslizamentos de terra que bloqueiam a estrada.

2.2 GEOSSINTÉTICOS USADOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Os geossintéticos mais usados em estradas não pavimentadas são as geogrelhas, os geotêxteis tecidos e não tecidos e, em menores proporções, os geocompostos e as geocélulas. Esses últimos ainda são empregados com menor frequência devido a seu alto custo para este tipo de aplicação. Entretanto, em situações onde o material de aterro ou de base é caro ou escasso, podem resultar

em soluções econômicas e ambientalmente atrativas. A inserção do geossintético no solo ajuda a obter um material composto mais resistente e menos deformável do que o solo isolado.

Os benefícios da utilização de geotêxteis em estradas não pavimentadas são atribuídos à função executada pelo geotêxtil quando colocado na interface aterro-subleito. Os geotêxteis são conhecidos por desempenhar as funções de separação, reforço, drenagem e filtração. A importância relativa de cada função depende muito das propriedades do subleito e do material de aterro, carregamento aplicado e das propriedades dos geotêxteis utilizados para o projeto específico.

Já as geogrelhas são mais conhecidas pelos benefícios oferecidos em termos de reforço deste tipo de estradas. Em pesquisas realizadas por diversos autores (Al-Qadi et al. 1997, Cancelli *et al.* 1996, Miura 1990, Webster 1993, entre outros) foi encontrado que os tempos de vida útil de pavimentos reforçados com geogrelhas podem ser de 15 a 20 vezes maiores que dos pavimentos sem presença de reforço. A presença deste elemento permite a utilização de bases com menor espessura e com o mesmo desempenho de pavimentos não reforçados com maior espessura.

2.2.1 Funções principais desempenhadas por geossintéticos em estradas não pavimentadas

Os geossintéticos têm várias áreas de aplicação em engenharia civil. Particularmente em pavimentação, eles podem desempenhar algumas funções básicas quando utilizados em contato com solo, rocha ou qualquer outro material. Dentre as principais funções, tem-se: reforço, separação, drenagem e filtração. Este trabalho contempla a função de reforço e, eventualmente, separação.

- **Reforço:** Os geossintéticos podem desempenhar a função de reforço, melhorando as propriedades do composto solo-reforço, como resultado da sua inclusão. Os geossintéticos aplicados como reforço têm a principal tarefa de resistir a esforços aplicados e impedir deformações inadmissíveis nas estruturas.

As estradas não pavimentadas sobre subleito com baixa capacidade de suporte apresentam normalmente dificuldade para resistir as tensões horizontais induzidas pelo tráfego. Nesse caso, a presença do reforço aumenta o confinamento lateral, melhorando o desempenho da estrada.

- **Separação:** Em alguns casos é necessária a presença de algum elemento que cumpra a função de separação entre os materiais, com o propósito de evitar sua mistura e um comportamento indesejável. Em pavimentação, em alguns casos tem-se uma camada granular sobre um solo fino. Um geotêxtil pode ser usado como elemento de separação visando minimizar a impregnação do solo de base pelos finos do solo de subleito (Figura 2.5).

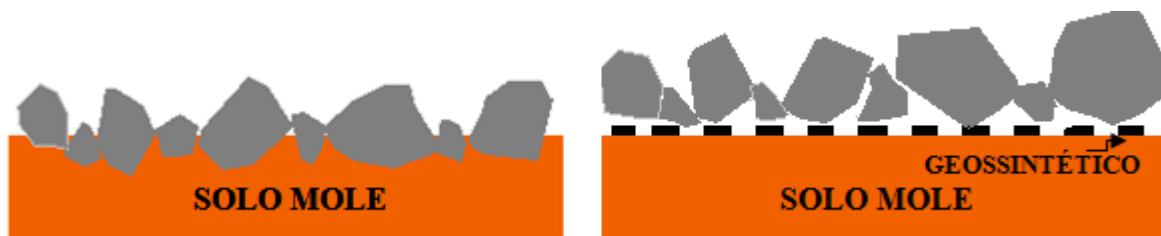


Figura 2.5 Geotêxtil como elemento de separação em estradas.

2.3 MECANISMOS DE FUNCIONAMENTO DO REFORÇO

É importante destacar os principais mecanismos que desenvolve o geossintético quando usado como elemento de reforço em estradas não pavimentadas e, em alguns casos, em pavimentos. Segundo Perkins e Ismeik (1997), podem ser identificados três mecanismos básicos: a restrição à movimentação lateral do solo, o aumento da capacidade de carga e o efeito membrana.

2.3.1 Restrição à movimentação lateral

Este mecanismo é causado pela interação por atrito e intertravamento entre o solo de aterro e o geossintético, que restringe a sua movimentação lateral. As cargas repetidas do tráfego geram movimentação da camada de aterro, a qual pode ser reduzida com a presença da camada de reforço (Figura 2.6). As cargas geradas pelos veículos sobre a superfície da estrada impõem tensões horizontais e verticais elevadas. Parte das tensões horizontais serão suportadas pela camada de base ou aterro, resultando num movimento lateral do material de base fora da região carregada. O resto das tensões horizontais será transferido para o subleito fraco. Os geossintéticos reduzem as deformações horizontais da camada de base e do subleito, que se encontram em contato com ele. Sabe-se que o geossintético mantém o material de base e o de subleito em contato devido ao atrito desenvolvido na interface entre os três materiais.

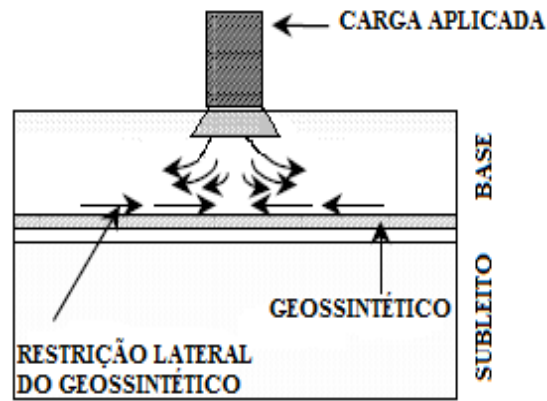


Figura 2.6 Mecanismo de restrição da movimentação lateral (modificado - Perkins and Ismeik, 1997).

2.3.2 Aumento da capacidade de carga

A maior capacidade de carga do solo provocada pela presença do geossintético deve-se ao fato de que o aterro reforçado pode absorver maiores cargas aplicadas, devido à redução das tensões cisalhantes instabilizadoras transmitidas ao subleito. (Figura 2.7).

A primeira abordagem racional para estimar a capacidade de suporte de uma camada de solo foi fornecida por Terzaghi, em 1943. Em sua formulação de capacidade de carga, ele diferencia o mecanismo de ruptura como geral, caracterizado por superfície de ruptura identificável, que se desenvolve a partir da borda da área carregada, ou como localizado (ruptura localizada), onde o mecanismo de ruptura causa grande afundamento do carregamento no interior do solo de fundação, mas sem uma superfície de ruptura claramente identificável e nem protuberâncias visíveis na superfície. A presença da camada de reforço tende a provocar mecanismo de ruptura generalizado no sistema aterro-reforço-subleito.

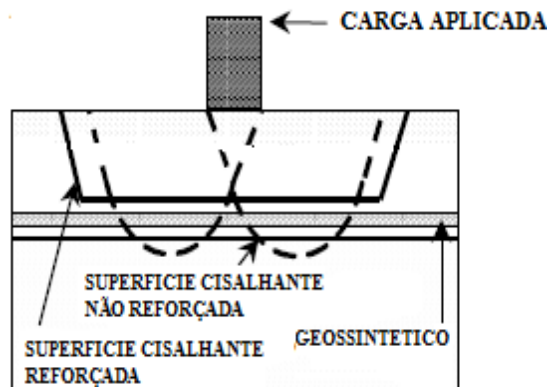


Figura 2.7 Aumento da capacidade de carga produzido pelo geossintético (modificado - Perkins and Ismeik, 1997).

2.3.3 Efeito membrana

O efeito membrana é o principal mecanismo de atuação do reforço em estradas não pavimentadas reforçadas construídas sobre subleitos muito compressíveis. Este efeito é função da deformação do geossintético e da sua rigidez à tração (Figura 2.8) e tende a reduzir as tensões normais transmitidas ao subleito, aumentando a capacidade de carga do conjunto. Segundo Giroud e Han (2004), o efeito membrana faz com que as solicitações de tráfego sejam melhor suportadas após significativos afundamentos por trilhas de rodas quando o tráfego é canalizado.

A aplicação de cargas concentradas produz a compressão do aterro, junto com deslocamentos na camada de aterro e no geossintético colocado na interface aterro-subleito. Como resultado da deformação do geossintético, as forças de tração são desenvolvidas e as suas componentes verticais agem contra a continuidade do movimento descendente.

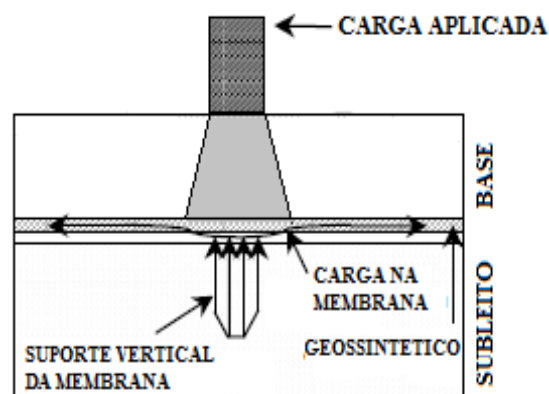


Figura 2.8 Efeito Membrana produzido pelo geossintético (modificado - Perkins and Ismeik, 1997).

2.4 EFEITOS DA APLICAÇÃO DE CARGA CICLICA EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Além dos mecanismos de funcionamento do reforço anteriormente descritos, existem dois mecanismos específicos para estradas não pavimentadas, quando aplicadas cargas cíclicas provenientes da passagem de veículos. Estes podem ser: compactação adicional da camada de aterro e melhoria do intertravamento de grãos de solo.

A compactação adicional da camada de aterro é produzida pelas cargas repetidas do tráfego, resultando num incremento da rigidez e resistência do material granular. Em estruturas de

estradas não pavimentadas, o efeito membrana e o mecanismo de restrição lateral são providos pelo reforço geossintético. Quando são apresentados estes dos mecanismos, surge uma compactação adicional da camada superior ou camada de aterro. Tem-se que a presença do reforço impede a ocorrência de grandes afundamentos nos primeiros ciclos de carregamento, pela interação agregado - reforço.

O intertravamento dinâmico é um mecanismo típico em geogrelhas usadas em estradas não pavimentadas, isso quando elas estão atuando como elemento de reforço. É importante ressaltar que após aplicar o carregamento na estrada, as partículas de agregado exercem um bloqueio nas aberturas da geogrelha e impedem que a parte submetida aos esforços de tração, seja recuperada totalmente durante a fase de descarga. Como resultado do processo anterior, o reforço permanece tracionado e o confinamento lateral da camada de aterro é aumentado. (McGown *et al.*, 1990).

2.5 MÓDULO DE ESTABILIDADE À ABERTURA (ASM)

O módulo de estabilidade à abertura (ASM) foi concebido para medir a rigidez no plano de uma geogrelha, em função do momento necessário para provocar torção na interseção entre membros transversais e longitudinais da geogrelha. Vários pesquisadores (Webster 1992, Kinney 2000, GRI 2004, Leng *et al.* 2002) têm tentado estudar e definir um método de execução de ensaio para obter este módulo, assim como também avaliar a influência que ele tem no comportamento mecânico de uma estrada reforçada com geogrelha. Giroud e Han (2006) preconizam o uso do ASM como uns dos parâmetros de dimensionamento de uma estrada não pavimentada, baseados em comparações entre previsões e medições de fatores de eficiência (TBR) obtidos para estradas não pavimentadas reforçadas (Watts *et al.* 2004). Na Figura 2.9 é apresentado o equipamento utilizado para obter o módulo de estabilidade à abertura segundo projeto de norma da ASTM.

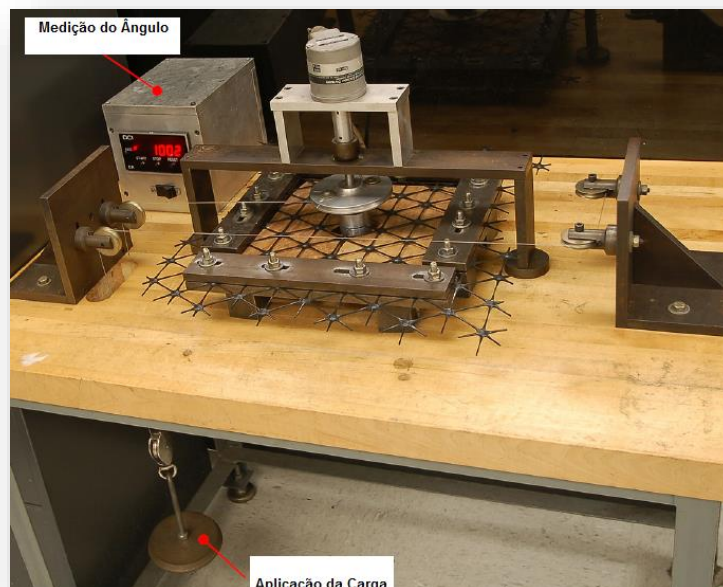


Figura 2.9 Equipamento utilizado para obter o módulo de estabilidade à abertura (ASM)- Projeto de norma ASTM.

2.6 INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DO REFORÇO

Pesquisadores como Webster e Watkins (1977, *apud* KOERNER1999) estudaram a influência da rigidez do reforço geossintético na vida útil de pavimentos. Estes autores encontraram que o emprego de geossintéticos aumenta o número de ciclos de carga resistidos pelo pavimento até se atingir deformações consideráveis, além da melhoria no desempenho do pavimento é melhor quanto maior for a rigidez à tração do reforço.

2.7 ENSAIOS REALIZADOS EMPREGANDO CARREGAMENTO CICLICO E GEOSSINTÉTICOS COMO REFORÇO

Vários pesquisadores têm estudado a utilização de geossintéticos como reforço de estradas pavimentadas e não pavimentadas. Nestes estudos foram simuladas estradas em laboratório, em equipamentos em escala real e/ou reduzida, além de monitoramentos de trechos experimentais.

2.7.1 Ensaios realizados em laboratório

Perkins (1998) avaliou o efeito do reforço em pavimentos reforçados com materiais geossintéticos por meio de ensaio em grande escala. Ele empregou uma caixa de ensaio construída em concreto armado, com dimensões de 2,0 m x 2,0 m e 1,5 m de altura (Figura

2.10). Nestes testes o carregamento máximo aplicado foi de 40 kN, resultando em uma pressão máxima de 550 kPa sobre a superfície do pavimento. Como resultados este autor encontrou que as seções com reforço resistiram a aproximadamente 600.000 ciclos de carga, enquanto as seções sem reforço suportaram 100.000 repetições de carga, para a mesma deformação permanente final.

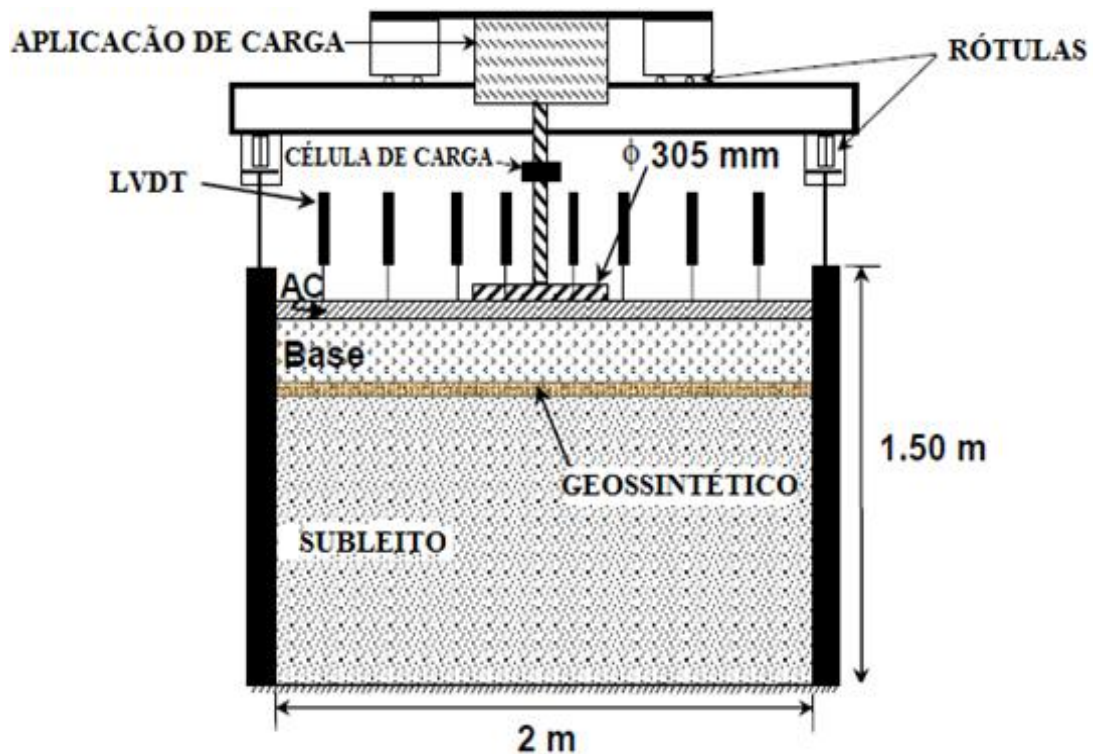


Figura 2.10 Equipamento em grande escala para simulação de uma estrutura de pavimento (modificado - Perkins e Ismeik, 1997).

Perkins *et al.* (1999) executaram ensaios usando a mesma caixa mencionada no parágrafo anterior, só que neste caso foram construídas três seções de pavimento com distintos tipos de solo de base, subleito e características da capa de rolamento. Além disso, nestes testes foi empregado um tipo de geogrelha como reforço, localizada a diferentes profundidades na estrutura do pavimento, como mostrado na Tabela 2.2. Para melhor entendimento dos ensaios realizados por estes autores, na Figura 2.11 é apresentado um esquema de cada uma das configurações de ensaio realizadas.

Tabela 2.2 Localização do reforço nos ensaios realizados por Perkins *et al.* (1999)

Seção	Tipo de Reforço	Localização do Reforço	Carregamento (kPa)
1	Nenhum	Nenhum	549
2	Geogrelha	Interface Base - Subleito	549
3	Geogrelha	100 mm acima da interface Base - Subleito	549

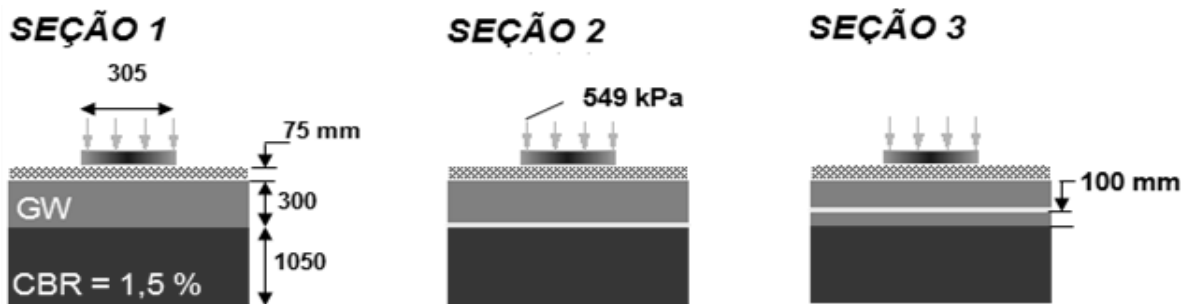


Figura 2.11 Seções de pavimento ensaiadas por Perkins *et al.* (1999).

Na Figura 2.12 são apresentados alguns dos resultados obtidos nos ensaios executados por estes pesquisadores, onde se mostra a evolução do afundamento da superfície do pavimento imediatamente abaixo da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga. Uma melhoria significativa pode ser observada nas seções 2 e 3, quando a geogrelha é colocada na parte inferior da camada de base. Na seção 3, a geogrelha foi localizada 100 milímetros acima da interface base-subleito, sendo esta a configuração que apresentou melhor desempenho.

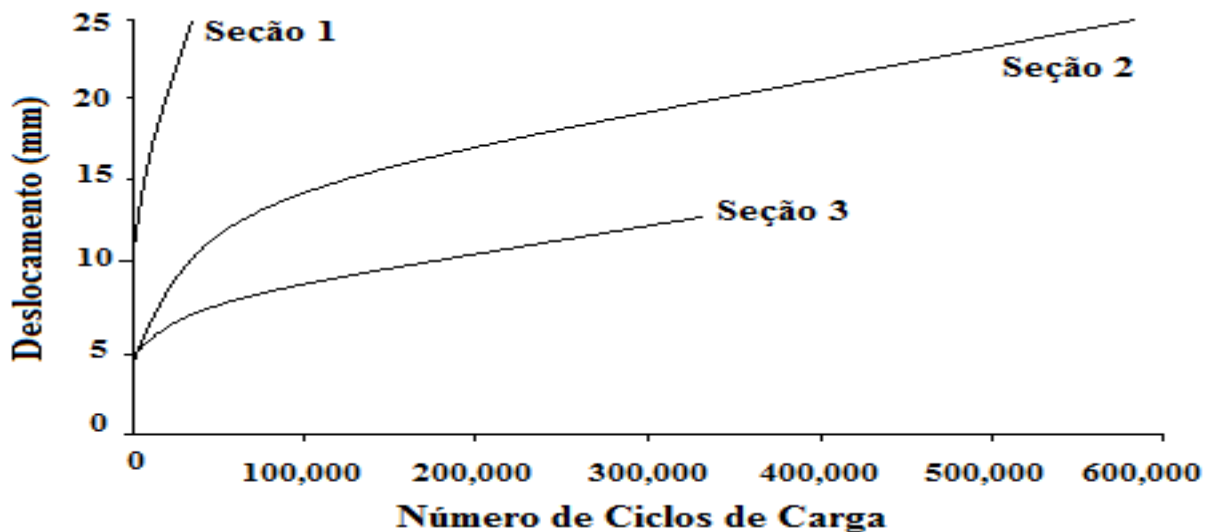


Figura 2.12 Deslocamentos verticais no pavimento *versus* número de ciclos de carga (modificado Perkins *et al.*, 1999).

Abu-Farsakh *et al.* (2010) simularam uma seção de pavimento numa caixa aço com dimensões internas de 2,0 m (comprimento) x 2,0 m (largura) x 1,7 m (altura). Na estrutura de pavimento foi aplicada uma carga cíclica de 40 kN por meio de um atuador hidráulico, sobre uma placa de aço de 305 mm de diâmetro. O pavimento simulado tinha a base reforçada com uma geogrelha. Os parâmetros investigados nestes testes incluíam a geometria, localização e rigidez à tração das geogrelhas. Além disso, foi estudada a distribuição de tensões, a tensão permanente vertical, a poro pressão desenvolvida no subleito, assim como a distribuição das deformações ao longo das geogrelhas empregadas. Os resultados dos testes mostram que a inclusão da geogrelha pode melhorar significativamente o desempenho de um pavimento flexível e que o fator de eficiência do pavimento pode ser aumentado 15,3 vezes para uma trilha de roda de 19,1 mm. No trabalho destes autores foi observado melhor desempenho do pavimento quando a geogrelha foi colocada no terço superior da camada de base. Os resultados também demonstraram que a geogrelha ajuda na redistribuição da carga aplicada na camada de aterro, resultando assim numa diminuição da deformação permanente no aterro.

Cancelli *et al.* (1996) empregaram uma caixa metálica para simular uma estrada. Como material de subleito foi usado um solo arenoso solto. Na interface subleito-base foi colocada uma camada de reforço e como camada de base foi utilizada brita compactada. Além disso, foi instalada uma camada superficial de revestimento com ligante asfáltico. As dimensões da caixa de ensaios utilizada foram 1,8 m x 0,9 m x 0,9 m. No ensaio foram aplicados até 300.000 ciclos de carga por meio de uma placa circular com 0,3 m de diâmetro. O carregamento foi aplicado numa frequência de 5 ou 10 Hz, e o intervalo de carga foi de 0 a 40 kN, com um máximo de pressão equivalente aplicada de 570 kPa. Os afundamentos verticais foram registrados em função do número de ciclos, juntamente com a deformação permanente na superfície da estrada. Os deslocamentos da camada de asfalto sob a placa de carga foram medidos durante os ensaios a cada 100 ciclos. Nos ensaios conduzidos por estes pesquisadores foram realizados diversos testes, com e sem reforço, empregando-se solo de subleito com distintos valores de CBR. Os resultados obtidos por estes pesquisadores mostram que a geogrelha localizada na interface subleito-base, efetivamente aumenta a vida útil de uma estrada pavimentada. Além disso, o reforço gera uma distribuição de carga mais uniforme e uma redução no afundamento acelerado da superfície do pavimento.

Góngora (2011) utilizou um equipamento de grandes dimensões para realizar ensaios com carregamentos cíclicos onde se simularam estradas com e sem reforço. Avaliou-se também a

influência do material de aterro e da abertura da geogrelha no comportamento mecânico da estrada não pavimentada reforçada. Os resultados obtidos mostraram a significativa contribuição da presença da camada de reforço no aumento do número de ciclos de carga suportados pela estrada e o benefício em se utilizar materiais alternativos de aterro.

Leng (2002) investigou o comportamento de uma estrada não pavimentada reforçada submetida a carregamento cíclico em ensaios de laboratório utilizando uma caixa de aço com dimensões de 1,5 m × 1,5 m × 1,35 m. Nos ensaios foram testados diferentes espessuras de aterro e vários tipos de reforços geossintéticos colocados entre a camada de aterro e de subleito. Os resultados indicaram que o reforço melhorou a distribuição de tensões transferidas para o subleito, diminuiu o desgaste da camada de aterro e a magnitude de deformações na superfície do mesmo.

Nair *et al.* (2013) avaliaram o comportamento de uma estrada não pavimentada simulada em laboratório num equipamento em escala reduzida. O equipamento consistiu de uma prensa capaz de aplicar carregamento cíclico sinusoidal. O sistema usado por estes pesquisadores foi um sistema servo controlado de aplicação de cargas. Foi utilizado um cilindro para a realização de ensaios, ou seja, para a simulação da estrutura de estrada não pavimentada. O referido cilindro possuía 300 mm de diâmetro e 175 mm de altura e, adicionalmente, tinha um colarinho de 50 mm de altura. Nos testes foi aplicada uma carga de 100 kN a 10 Hz de frequência. Foram empregados três tipos de reforços, um geotêxtil tecido, uma geogrelha e uma georede para avaliar a eficiência de cada um destes materiais. Para cada um dos ensaios foram medidas as deformações elásticas (módulo resiliência) e plásticas para 100 ciclos de carregamento. Os resultados obtidos indicaram que o melhor reforço em termos de capacidade de suporte foi a geogrelha, porque ela apresentou menos deformações plásticas.

2.7.2 Trechos experimentais reforçados com geossintéticos

Na literatura destacam-se alguns trabalhos realizados por pesquisadores, que buscaram entender um pouco o comportamento de estradas submetidas à ação do tráfego. A seguir são descritas algumas pesquisas.

Palmeira (1981) investigou pioneiramente a utilização combinada de material de aterro fora das especificações usuais e reforço geotêxtil em 6 trechos experimentais de uma estrada não pavimentada sobre argila mole orgânica na Baixada Fluminense, Rio de Janeiro. Os resultados

obtidos mostraram que a utilização de reforço promoveu menores deformações na estrada e redução da altura de aterro em até 25%, mesmo com o aterro construído com material fino (66% passando na peneira No. 200).

Souwan *et al.* (1982) relataram resultados de estudos feitos para cargas de veículos leves e pesados. No caso de cargas baixas, eles observaram que a presença do geotêxtil ajudou a manter a propagação da carga só no aterro, evitando a intrusão de partículas deste no subleito, além de proporcionar confinamento da camada de aterro. Para cargas altas e deformações excessivas, foi observado o efeito membrana e sua influência no aumento da capacidade de carga do conjunto.

Em ensaios em trechos experimentais, Al-Qadi *et al.* (2007) observaram também que a utilização de reforço geossintético reduziu os movimentos laterais da camada de base.

Bhandari e Han (2010) estudaram a interação solo-geotêxtil sob a ação de uma carga de roda cíclica usando o Método dos Elementos Discretos (MED). No estudo foi pesquisada a influência da profundidade de colocação do reforço e da rigidez à tração do geotêxtil sobre o desempenho da base reforçada. Os resultados mostraram que a profundidade do geotêxtil afetou significativamente o grau de interação entre o geotêxtil e o solo. A presença do reforço contribuiu para a diminuição das deformações da superfície, quando este foi colocado em uma posição mais profunda.

Latha *et al.* (2010) estudaram alguns trechos experimentais de estradas não pavimentadas reforçadas com diferentes materiais geossintéticos, entre eles, um geotêxtil, dois tipos de geogrelha (biaxial e uniaxial), geocélulas e pedaços de pneus. Cada um dos trechos ensaiados tinham uma seção de 2 m x 1 m e o solo de subleito apresentava um CBR de 1%. Para cada trecho foi avaliado o progresso de afundamento na superfície ou formação de trilho de roda para 250 passagem de veículos. No total foram estudados 5 trechos experimentais, incluindo a seção de referência (estrada sem reforço). Os resultados obtidos mostraram que a estrada que resistiu menos passagens de veículos foi a que não tinha reforço, suportando apenas 17 repetições. Já os outros trechos reforçados conseguiram suportar bem mais que 250 passagens de veículos, excetuando a estrada reforçada com geotêxtil que suportou 100 passagens

Finalmente, foi encontrado que a estrada não pavimentada que melhor se comportou em termos de eficiência do reforço foi a reforçada com geocélula.

Cuelho *et al* (2014), construíram seções testes em escala real, as quais foram submetidas à ação do tráfego de veículos e devidamente monitoradas. O objeto da pesquisa foi comparar o desempenho operacional de cada um dos trechos, relativo ao uso de geossintéticos empregados como reforço, assim como determinar que propriedades do reforço afetaram mais o desempenho da estrada. No total, foram estudados dezessete trechos, quatorze com presença de reforço e 3 sem a presença do mesmo. O solo de subleito para os trechos experimentais foi preparado com um CBR de 1.7%, a exceção de 2 trechos, que foram construídos com um CBR de 1.4 e 2%, respectivamente. A espessura da camada de aterro usada foi de aproximadamente 27,7 cm para quase todos os trechos, com exceção de duas seções de controle que apresentaram uma espessura um pouco maior, com o propósito de avaliar o efeito da espessura da camada no comportamento mecânico da estrada. O tráfego de veículos foi dado pela passagem de caminhões com 3 eixos, com carga por eixo de 200 kN. Ao longo dos testes foram medidas as deformações no reforço, poro pressões no solo de subleito, deslocamentos na camada de aterro e as trilhas de roda formadas. No total foram empregados 14 tipos de reforços, entre geogrelhas e geotêxteis. Os resultados deste estudo indicaram que a resistência à tração de cada um dos membros das geogrelhas e a rigidez a tração das mesmas contribuíram significativamente no comportamento mecânico das estradas simuladas. Além disso, destacam que existem outras propriedades dos geossintéticos que podem interferir na interação com o material de aterro ou base. Os autores enfatizaram que devem ser realizados mais estudos que levem a ter uma percepção mais precisa do assunto.

A partir dos resultados obtidos por Cuelho *et al.* (2014), foram construídos alguns gráficos com as propriedades mais relevantes dos reforço (Tabela 2.3), tais como rigidez à tração a 5 % e 2 % de deformação e módulo de estabilidade à abertura (ASM) *versus* fator de eficiência (razão entre os números de repetições de carga em ensaios reforçados e sem reforço para uma mesmo deslocamento superficial) dos reforço usados. Tal exercício foi realizado com o intuito de entender quais características mais relevantes foram encontradas nos ensaios realizados por estes pesquisadores.

Tabela 2.3 Resultados experimentais obtidos por Cuelho *et al* (2014)

Reforço	ASM (N-m/°)	J2% (kN/m)	J5% (kN/m)	Fator de Eficiência (E) - 25 mm Trilha de Roda	Fator de Eficiência (E) - 63 mm Trilha de Roda
BX Type 2	0,78	424,86	314,19	3,40	10,40
Secugrid 30/30 Q1	1,15	705,18	528,23	3,00	8,40
Enkagrid Max 30	1,57	730,00	592,18	2,70	6,50
SF 11	0,25	289,81	200,02	2,60	6,10
SF 12	0,27	289,81	208,20	1,70	2,90
Mirafi BXG 11	0,35	470,12	402,08	2,60	6,30
Fornit 30	1,09	485,45	416,10	1,60	2,50
Tenax MS 330	0,36	415,37	306,02	2,40	5,40
TX 140	0,28	24,82	51,98	2,40	5,20
TX 160	0,55	50,37	75,92	1,90	3,40
Mirafi RS580i	NA	365,00	376,10	4,10	14,80
Geotex 801	NA	32,12	35,62	2,90	7,90

A Figura 2.13 apresenta o fator de eficiência para cada um dos reforços empregados *versus* o módulo de estabilidade à abertura ASM para uma trilha de roda de 25 mm. No gráfico percebe-se que não existe uma relação clara entre o ASM e o fator de eficiência da estrada. Ou seja, os dados obtidos por estes pesquisadores não revelam a existência de alguma influência do módulo de estabilidade da abertura no comportamento mecânico das estradas simuladas.

Na Figura 2.14 é mostrada a variação do fator de eficiência para cada um dos reforços empregados *versus* o módulo de estabilidade à abertura ASM para uma trilha de roda de 63,5 mm. Como na figura anterior, não se observa nenhum tipo de relação entre o ASM e o desempenho da estrada.

Nas Figuras 2.15 e 2.16 são exibidos gráficos relacionando o fator de eficiência para cada um dos reforços empregados *versus* a rigidez à tração do reforço para 2 % e 5 % de deformação para uma trilha de roda de 63,5 mm. Apesar da dispersão dos dados ser um relativamente grande, nota-se uma certa tendência entre os valores de Fator de Eficiência e a rigidez a 2 % (Figura 2.15). A medida que aumenta a rigidez do reforço, as estradas simuladas tendem a suportar maiores repetições de carga, quando comparadas com as seções sem reforço. A Figura 2.16 também sugere a mesma tendência, com aumento da resistência da estrada com o aumento da rigidez à tração do reforço a 5% de deformação.

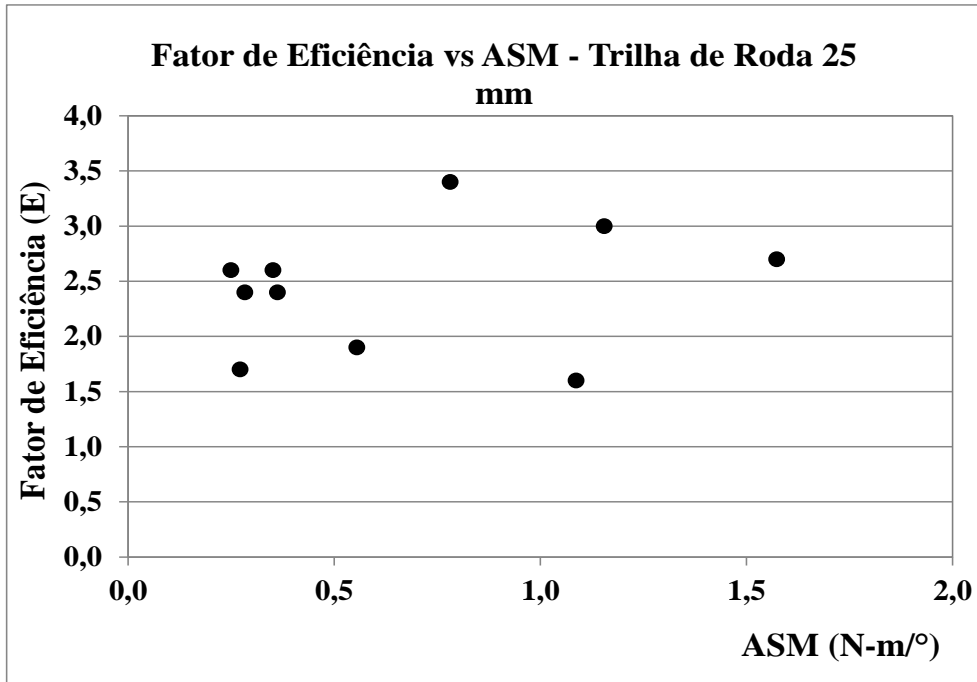


Figura 2.13 Fator de eficiência para os reforços usados *versus* módulo de estabilidade à abertura (ASM) - Trilha de Roda de 25 mm – Dados obtidos de Cuelho *et al.* (2014)

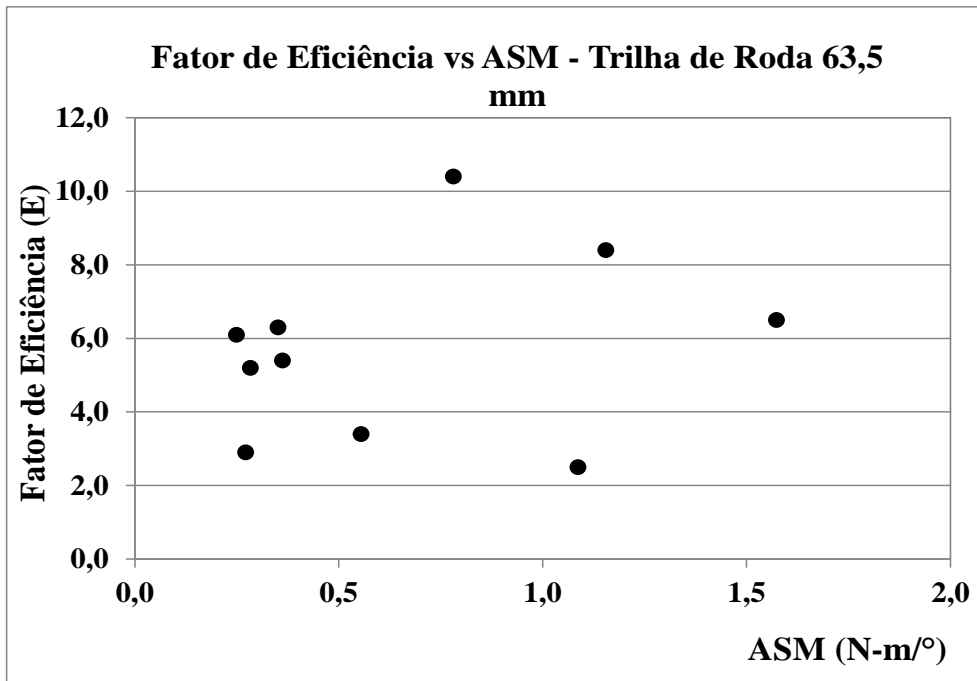


Figura 2.14 Fator de eficiência para os reforços usados *versus* módulo de estabilidade à abertura (ASM) para uma Trilha de Roda de 63,5 mm – Dados obtidos de Cuelho *et al.* (2014).

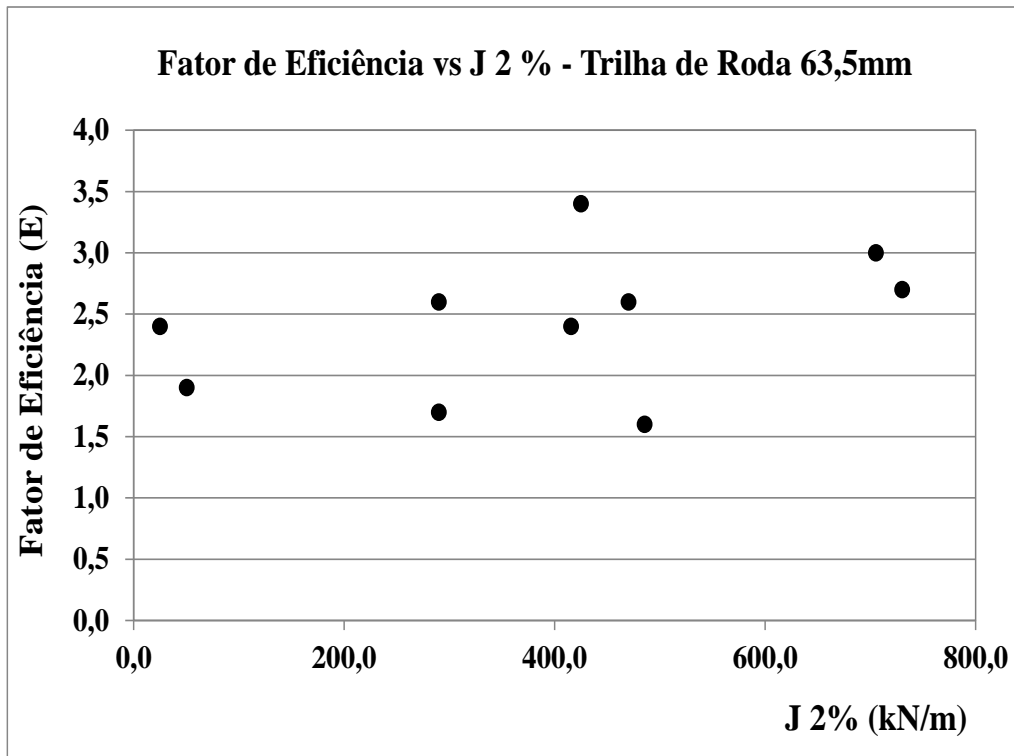


Figura 2.15 Fator de eficiência para os reforços usados *versus* rigidez a tração a 2% de deformação ($J_{2\%}$) para uma Trilha de Roda de 63,5 mm – Dados obtidos de Cuelho et al (2014).

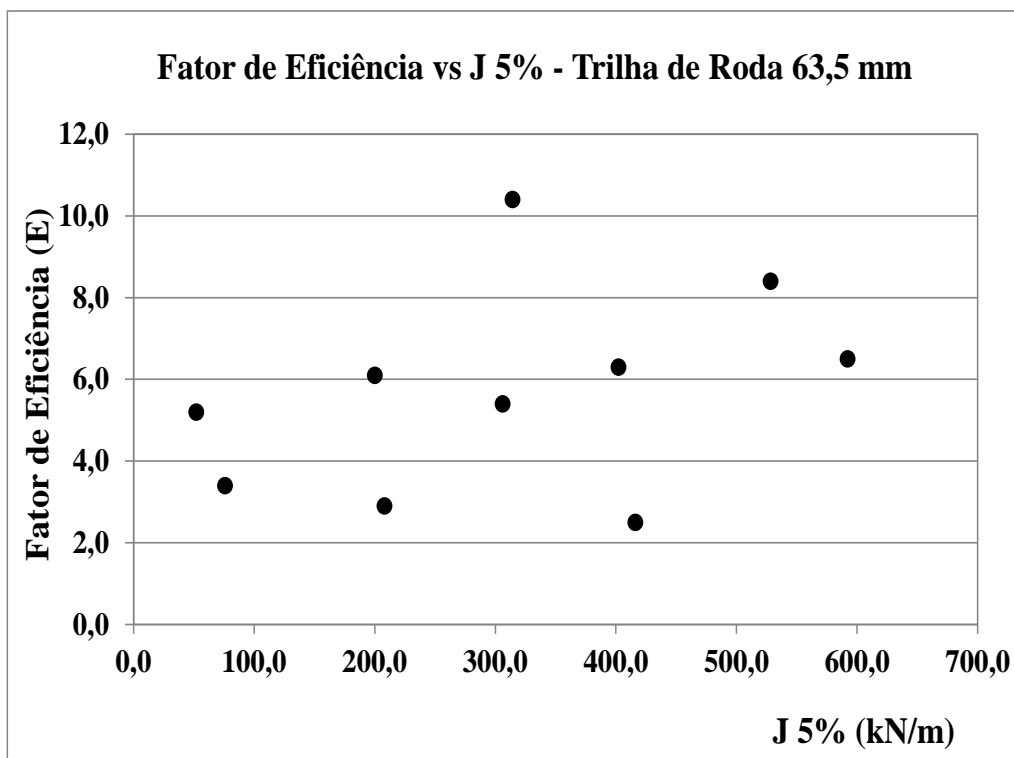


Figura 2.16 Fator de eficiência para os reforços usados *versus* rigidez a tração a 5% de deformação ($J_{5\%}$) para uma Trilha de Roda de 63,5 mm – Dados obtidos de Cuelho et al (2014).

2.8 MÉTODOS DE PROJETO DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Na atualidade existem vários métodos de dimensionamento de estradas não pavimentadas, os quais visam estabelecer a altura de aterro adequada para a distribuição dos carregamentos impostos pelo tráfego de veículos. É importante ressaltar que não é recomendável que métodos de projeto desenvolvidos para estradas pavimentadas sejam utilizados em estradas não pavimentadas e vice-versa (Giroud *et al.*, 1984). Isto se deve ao fato de que os mecanismos de ruptura e a magnitude das deformações são diferentes para os dois tipos de estradas. No caso das estradas não pavimentadas, são toleráveis grandes deformações, dando espaço para manutenções na superfície do aterro. Já estradas pavimentadas, comparativamente, só são aceitáveis pequenas deformações. A seguir serão apresentados sucintamente alguns métodos comumente empregados para o dimensionamento de estradas não pavimentadas.

2.8.1 Método de Hammitt 1970

O método de Hammitt, de 1970 (Jewell, 1996), é aplicado no dimensionamento de estradas não pavimentadas sem uso de reforço. A expressão matemática empírica empregada por Hammitt relaciona a espessura de aterro requerida (h) com a pressão aplicada na superfície do aterro (p). Neste método considero-se que a carga aplicada na estrada encontra-se uniformemente distribuída numa área circular de raio R . Também utiliza-se a relação empírica $\text{CBR} = S_u/30$, onde CBR corresponde ao Índice de Suporte Califórnia (“*California Bearing Ratio*”) e S_u corresponde à resistência não drenada da camada de argila que compõe o solo de subleito. Desta forma, o método estabelece a seguinte expressão:

$$\frac{h}{R} = f' \sqrt{\left(\left(1,687 \frac{p}{S_u} - 1 \right) \right)} \quad (2.1)$$

Onde:

h = espessura do aterro;

R = raio da área circular onde é aplicada a carga;

p = pressão aplicada na superfície do aterro;

S_u = resistência não drenada do solo de subleito;

f' = coeficiente de fadiga, determinado pela expressão: $f' = 0,176 \log(N) + 0,120$

N = número de repetições de carga.

Este método apresenta como principal desvantagem o fato de não considerar diretamente as propriedades de resistência do material de aterro e o espraio da carga no aterro (Pimentel, 2007).

2.8.2 Método de Giroud e Noiray (1981)

Giroud e Noiray (1981) foram uns dos primeiros em propor um método de dimensionamento de estradas não pavimentadas sem reforço e com reforço instalado na base do aterro. Este método permite o cálculo da espessura necessária da camada de aterro e a especificação do geotêxtil a ser utilizado. O dimensionamento é feito por meio da comparação entre uma análise estática, realizada com e sem a presença do reforço (geotêxtil), e uma análise dinâmica sem ser considerado o reforço. Este método leva em conta o efeito membrado proporcionado pelo reforço. Portanto, necessitam-se de grandes deslocamentos para que o método seja válido. Esta metodologia considera o volume de tráfego, força aplicada pelas rodas dos veículos, pressão dos pneus, resistência do solo de subleito, profundidade das trilhas de rodas e influência do reforço de geossintético no modo de ruptura da estrada ou área com revestimento primário.

O método de Giroud e Noiray (1981) pode ser aplicado para subleitos constituídos por solos finos saturados e para estradas sujeitas a tráfego leve a médio (≤ 10.000 passadas de eixo com carga igual a 80 kN), além de assumir o material de aterro com um CBR não inferior a 80%. Os autores apresentam ábacos de dimensionamento para pressão de calibragem dos pneus igual a 480 kPa. Apesar do método ter sido concebido baseado em estudos realizados com geotêxteis, ele também pode ser empregado para o dimensionamento de estradas não pavimentadas reforçadas com geogrelhas.

2.8.3 Método de Oxford (1989)

Milligan *et al.* (1989, *apud* Shukla 2012), propuseram um método de projeto para estradas não pavimentadas não reforçadas e reforçadas com geotêxteis ou geogrelhas. Este método de análise resultou de um extenso programa de pesquisa conduzido na Universidade de Oxford, Reino Unido. As investigações consistiram em experimentos em modelos de estradas não-reforçadas e reforçadas sob carregamento monotônico e cargas cíclicas, bem como em análises pelo método dos elementos finitos.

O método parte do princípio de que o carregamento oriundo do tráfego transmite para subleito tanto tensões normais quanto tensões cisalhantes. A presença desse esforço cisalhante externo reduz a capacidade de carga da argila saturada de subleito. Com a inclusão do geossintético estes esforços cisalhantes são, em parte, absorvidos pelo reforço, sendo predominantemente tensões verticais transmitidas para o subleito. Nesse caso, admite-se para o fator de capacidade de carga o valor clássico $N_c = 2 + \pi$. Os autores consideram a argila de subleito como sendo solicitada de forma não-drenada, com resistência constante com a profundidade, e a camada granular como seca (Lage *et al.*, 2003).

Finalmente tem-se que o método Oxford admite o carregamento cíclico por meio de uma correção empírica. Como o cálculo da carga que leva à ruptura do aterro é baseada em carregamento estático, os autores recomendam para o cálculo da relação entre uma carga estática e o carregamento cíclico a correlação proposta por De Groot *et al.* (1986), obtida a partir de ensaios em grande escala (Shukla, 2012).

Este método é mais adequado para pequenas deformações da superfície de aterro, uma vez que despreza o efeito membrana, e reforços com alta rigidez à tração.

2.8.4 Método de Giroud e Han (2004)

Giroud e Han (2004) propuseram um método analítico que foi calibrado baseado em alguns resultados de ensaios realizados em campo e em laboratório disponíveis na literatura. O método visa calcular a espessura da camada de aterro de estradas não pavimentadas. Este método considera a distribuição de esforços, a resistência do material de aterro, o intertravamento entre o geossintético e o material de aterro e a rigidez do geossintético, além do módulo de estabilidade da abertura à geogrelha (ASM). Além disso, leva também em conta as condições consideradas por outros métodos, tais como: volume de tráfego, carga por eixo, pressão dos pneus, resistência do solo de subleito e a influência da presença de um reforço geossintético. Neste método, a espessura de aterro requerida para uma estrada não pavimentada reforçada é calculada usando uma única equação. O método foi desenvolvido para estradas não pavimentadas reforçadas com geogrelhas. No entanto, ele pode ser usado para estradas não pavimentadas reforçadas com geotêxtil e para estradas sem reforço, com valores apropriados para parâmetros relevantes. O método estabelece as seguintes equações para o cálculo da espessura da camada de aterro:

$$h = \frac{1.26 + (0.96 - ASM^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} - \log N}{f_E} \left[\sqrt{\frac{P}{\pi r^2 m N_c c_u}} - 1 \right] r \quad (2.2)$$

Onde:

h = espessura do aterro;

r = raio da área de contato do pneu equivalente, determinado pela expressão: $r = \sqrt{\frac{P}{\pi p}}$

P = carga da roda;

p = pressão de contato do pneu.

c_u = coesão não drenada do solo de subleito; $c_u = f_c CBR$, onde: CBR: Índice de suporte de Califórnia do solo de subleito e f_c , fator igual a 30 kPa.

f_E = fator de razão entre os módulos, calculado a partir da seguinte expressão: $f_E = 1 + 0.204 (R_E - 1)$, sendo R_E a relação de limitação do módulo. Para o cálculo do R_E , é usada a seguinte equação:

$R_E = \min \left(\frac{3.48 CBR_{AT}^{0.3}}{CBR_{SB}}, 5.0 \right)$, onde CBR_{AT} é o índice de suporte de Califórnia do material de aterro e CBR_{SB} , é o índice de suporte de Califórnia no solo de subleito.

N = número de repetições de carga.

N_c = fator de capacidade de carga, deve ser usado: $N_c = 3.14$ para estradas não pavimentadas sem reforço, e $N_c = 5.14$ por estradas não pavimentadas reforçadas com geotêxteis, e $N_c = 5.71$ para estradas não pavimentadas reforçadas com geogrelha.

ASM: módulo de estabilidade à abertura (ASM=0 para estradas não pavimentadas sem reforço e reforçadas e reforçadas com geotêxtil).

m : coeficiente de mobilização de capacidade de carga, o qual pode ser estimado utilizando a seguinte expressão:

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as características e propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados neste trabalho, visando a simulação do comportamento de uma estrada não pavimentada submetida ao tráfego de veículos. Também são descritos os ensaios executados e os procedimentos adotados para a elaboração de cada um deles.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Material de aterro: Brita

Nesta pesquisa foi empregada brita como material de aterro (conhecida comercialmente como brita 1). A espessura considerada para a simulação do aterro foi de 23 cm. A seguir, serão descritas as características do material usado.

A brita utilizada tem origem calcária e é procedente da pedreira Guapó, localizada no estado de Goiás. A Figura 3.1 mostra a brita usada. Já na Tabela 3.1 são apresentadas algumas de suas propriedades geotécnicas relevantes e na Figura 3.2 é exibida a sua curva granulométrica.



Figura 3.1 Brita utilizada na pesquisa.

Para a obtenção do ângulo de atrito da brita empregada nos ensaios, foi necessário fazer o ensaio de cisalhamento direto num equipamento de médias dimensões (amostra com 300 mm x 300 mm x 175 mm) existente no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), como mostrado na Figura 3.3. As tensões utilizadas para a obtenção da envoltória de resistência deste material foram 50, 100, 150 e 200 kPa. Estas tensões foram escolhidas em função do nível de

tensões esperado durante os ensaios de carregamento cíclico. O material ensaiado foi preparado mantendo a granulometria empregada nos ensaios realizados nesta pesquisa.

Tabela 3.1 Propriedades relevantes da brita empregada nos ensaios.

PROPRIEDADE	VALOR
Densidade relativa dos sólidos (Gs)	2,65
Massa específica seca (g/cm^3)	1,76
Absorção de Água (%)	0,50
Abrasão Los Angeles (%)	36,00
Ângulo de atrito ($^\circ$)	43,20
Coesão (kPa)	0,00
Umidade nos ensaios (%)	2,00
Índice de vazios mínimo ($e_{\text{mín}}$)	0,86
Índice de vazios máximo ($e_{\text{máx}}$)	0,88
Densidade relativa da areia nos ensaios D_r (%)	83,00

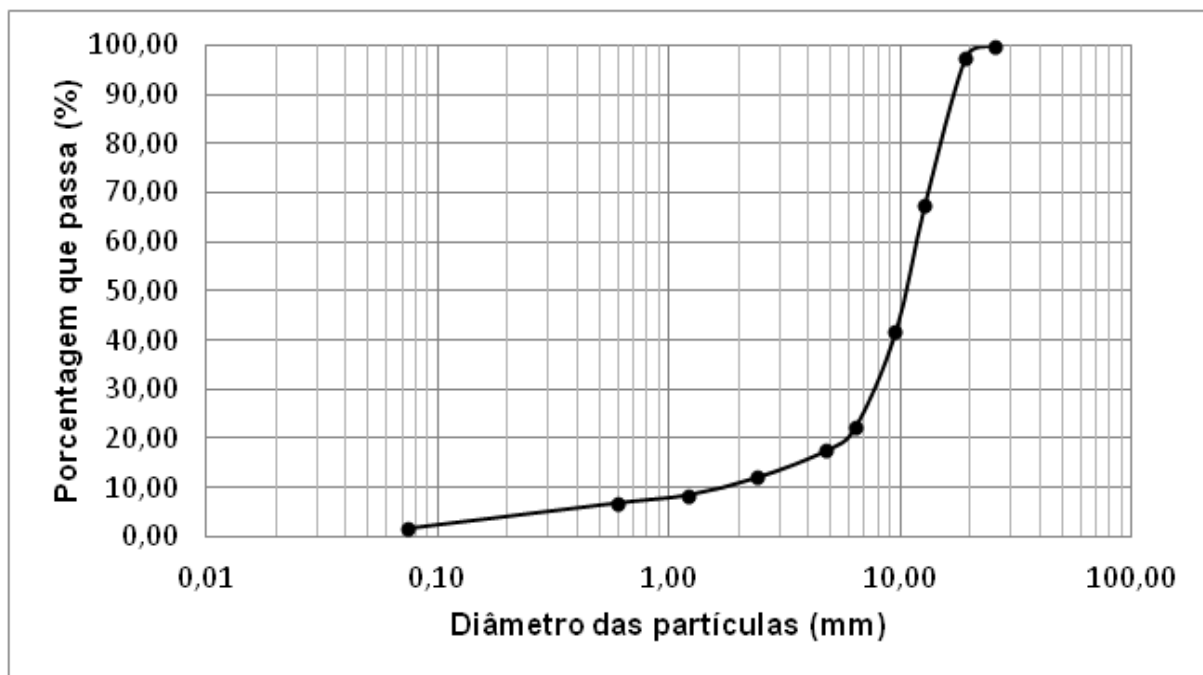


Figura 3.2 Curva granulométrica da brita empregada nos ensaios.

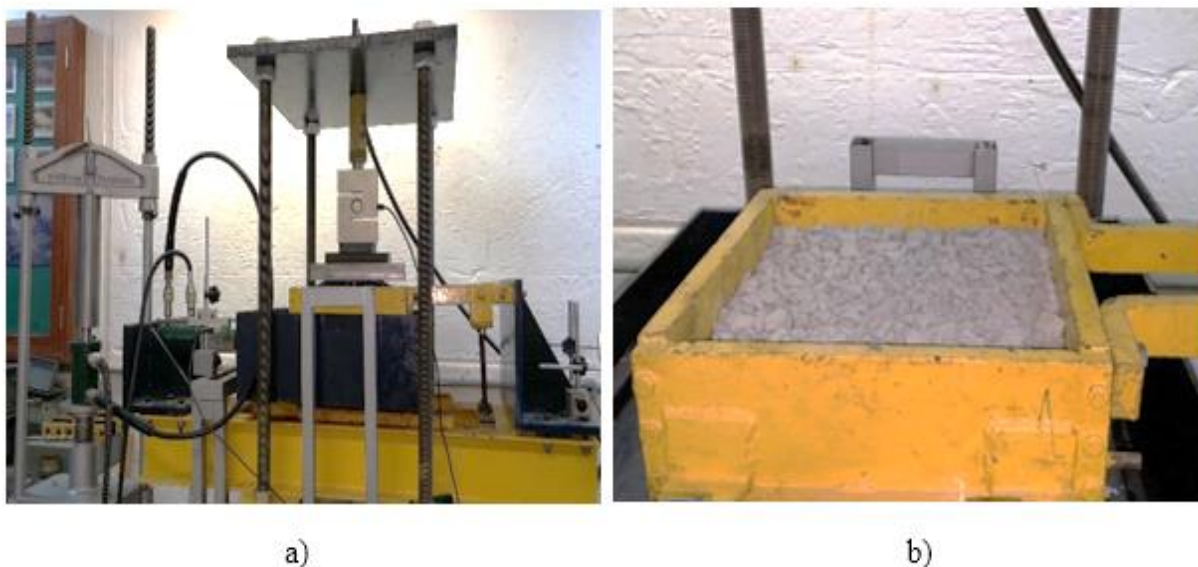


Figura 3.3 Equipamento de cisalhamento direto de médio porte: a) vista geral do equipamento, b) Caixa para colocação de amostras.

3.1.2 Material de subleito

O material de subleito usado foi uma areia uniforme de quartzo hialino, com grãos de formato geral arredondado (Figura 3.4). As principais características da areia utilizada são encontradas na Tabela 3.2 e sua curva de distribuição granulométrica é apresentada na Figura 3.5. Na medida em que um dos objetivos dessa pesquisa foi analisar o comportamento de uma estrada não pavimentada, construída sobre um solo de baixa capacidade de suporte, submetida a condições de carregamento cíclico, a areia foi depositada no tanque de ensaios a uma altura de queda de aproximadamente 10 cm, tudo isso com o propósito de se obter uma areia fofa.

Nos ensaios de capacidade de suporte do material (Índice de suporte de Califórnia – CBR) foi obtido um índice 1,6 %, constatando assim a baixa capacidade de suporte do subleito. A obtenção deste índice de suporte é de vital importância no caso de métodos de projetos de estradas não pavimentadas, isso porque permite, junto com outros parâmetros, o cálculo da espessura do aterro. A decisão de usar areia fofa e não um solo mole saturado de subleito foi tomada devido a facilidade e rapidez que este material confere para a realização de um maior número de ensaios.



Figura 3.4 Areia usada como solo de subleito.

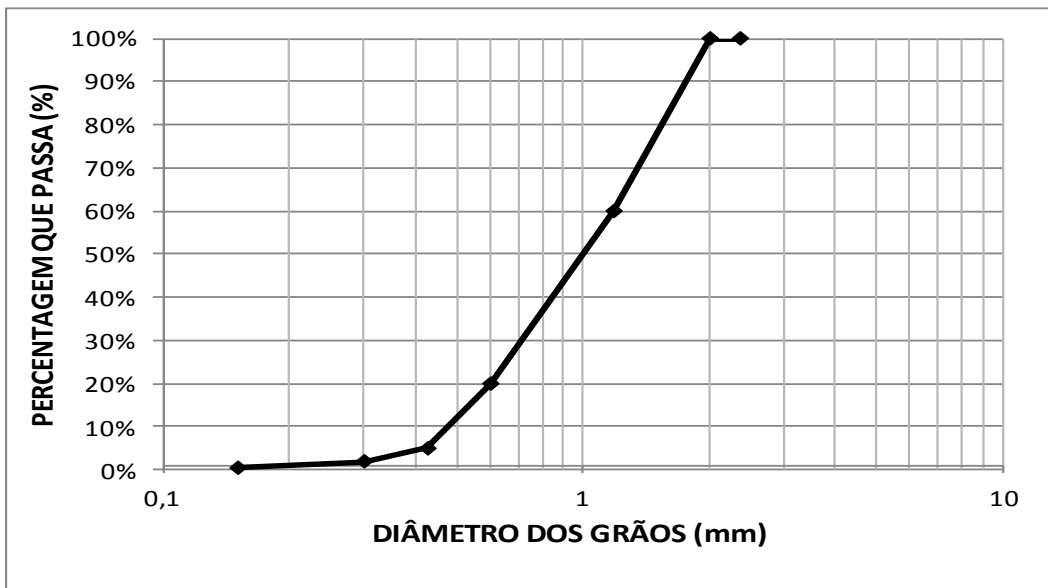


Figura 3.5 Curva granulométrica da areia empregada como subleito.

Tabela 3.2 Características da areia utilizada nos ensaios

PROPRIEDADE
Diametro médio das partículas D50 (mm)
Coefficiente de uniformidade (Cu)
Coefficiente de curvatura (Cc)
Classificação pelo SUCS
Peso específico dos sólidos (kN/m ³)
Índice de vazios mínimo ($e_{\text{mín}}$)
Índice de vazios máximo ($e_{\text{máx}}$)
Densidade relativa da areia nos ensaios D_r (%)
Índice de suporte de Califórnia (CBR) (%)
Coesão (kPa)
Ângulo de atrito ($^\circ$)

3.1.3 Geossintéticos empregados na pesquisa

A fim de avaliar a influência que tem as diferentes características dos geossintéticos, tais como forma e dimensões das aberturas, módulo de estabilidade à abertura (ASM) e rigidez e resistência à tração no comportamento de uma estrada não pavimentada, nesta pesquisa foram usados geossintéticos que apresentam variações dessas propriedades. Além disso, foram empregadas algumas geogrelhas feitas no laboratório, com tiras plásticas. O anterior foi realizado com o objetivo de variar algumas das propriedades da geogrelha, como dimensões da abertura da malha, enquanto se mantinham fixas outras (por exemplo, a rigidez a tração e o módulo de estabilidade à abertura).

A seguir serão ilustrados cada um dos geossintéticos empregados durante a execução desta pesquisa, tanto as geogrelhas usadas existentes no mercado (comerciais) como aquelas desenvolvidas no laboratório (fabricadas). Também será descrito o tipo de geotêxtil tecido usado na pesquisa.

- **Geogrelhas comerciais**

Foram empregadas seis tipos de geogrelhas existentes comercialmente no mercado de geossintéticos. Na Tabela 3.3 apresentam-se as principais características dos elementos de reforço utilizados nesta pesquisa e na Figura 3.6 são mostrados cada um deles. Para cada um dos geossintéticos usados foi realizado ensaio de resistência à tração em faixa larga, de acordo com a norma de ensaio ASTM D4595-11

Como as geogrelhas comerciais não apresentam necessariamente aberturas regulares, foram calculadas as suas aberturas equivalentes. Esta definição foi introduzida por Khaja (2010), e a abertura equivalente é definida como a média geométrica dos lados da abertura da geogrelha. Os valores de abertura equivalente para as geogrelhas usadas encontram-se listados na Tabela 3.4.

Tabela 3.3 Propriedades dos reforços utilizados.

REFORÇO PROPRIEDADES	Geogrelha 1 (G1)	Geogrelha 2 (G2)	Geogrelha 3 (G3)	Geogrelha 4 (G4)	Geogrelha 5 (G5)	Geogrelha 6 (G6)	Geotextil 1
Abertura da malha(mm x mm)	18,4 x 21,0	23,0 x 35,0	11,6 x 15,0	14,1 x 18,5	40,0 x 40,0	15,0 x 15,0	-----
Material de fabricação	Poliéster	Poliéster	Polipropileno	Poliéster	Polipropileno	Polipropileno	Poliéster
Resistência a tração MD (Direção de fabricação) (kN/m)	109	92	18	142	38	43	103
Módulo de rigidez a 5% de deformação MD (Direção de fabricação) (kN/m)	893	811	417	1165	474	627	1022

Tabela 3.4 Aberturas equivalentes calculadas para as geogrelhas comerciais e fabricadas no laboratório

Geogrelha	Abertura (mm)		Abert. Eq.(mm)
	Dir. Fabricação	Dir. Transversal	
G1	18,4	21,0	19,66
G2	23,0	35,0	28,37
G3	11,6	15,0	13,19
G4	14,1	18,5	16,15
G5	40,0	40,0	40,00
G6	15,0	15,0	15,00
GF1	30,0	30,0	30,00
GFC1	30,0	30,0	30,00
GF2	60,0	60,0	60,00
GFC2	60,0	60,0	60,00
GFV1	30,0	30,0	30,00
GFV2	60,0	60,0	60,00

- **Geogrelhas fabricadas**

Como foi mencionado anteriormente, a fim de manter algumas propriedades constantes, foram fabricadas algumas geogrelhas no laboratório. Para a fabricação destas geogrelhas foram usados dois tipos de fitas de polipropileno. A primeira tem 20 mm de largura e 1mm de espessura,

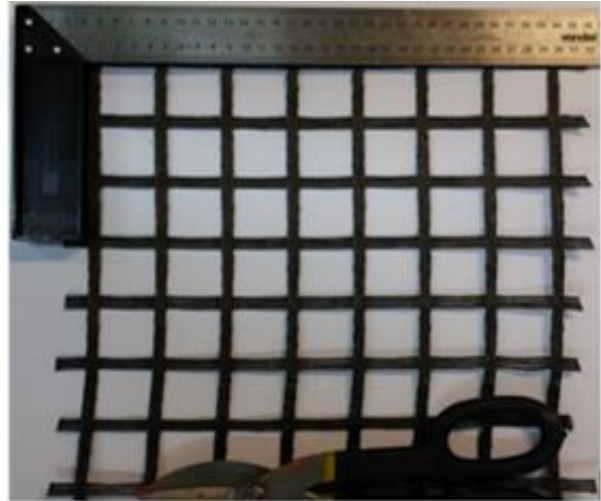
usada para confeccionar as geogrelhas denominadas GF1, GFC1, GF2 e GFC2. Já a outra fita possui 16 mm de largura e 1,5 mm de espessura, e foi utilizada para fabricar as geogrelhas GFV1 e GFV2. Em alguns casos (geogrelhas GF1, GF2, GFV1 e GFV2) no processo de fabricação, para fixar os nós das geogrelhas, usaram-se percevejos de cabeça plana, isso para garantir que o valor de ASM fosse menor, em função da maior liberdade de movimentação relativa entre membros longitudinais e transversais da geogrelha nos seus nós. Além disso, também foram confeccionadas algumas geogrelhas (GFC1 e GFC2) com os nós colados com ajuda de cola epóxi, tendo como objetivo obter uma geogrelha com um valor diferente de ASM que o da mesma geogrelha com os nós livres. Na Figura 3.7 são mostradas as geogrelhas fabricadas e na Tabela 3.5 apresentam-se as suas principais características. Para cada uma das geogrelhas fabricadas foi realizado o ensaio de resistência à tração em faixa larga, de acordo com a norma de ensaio ASTM D4595-11, para conhecer melhor as características de resistência do produto elaborado. A importância da elaboração destas geogrelhas baseia-se no interesse de isolar propriedades tais como dimensões da abertura, rigidez à tração e ASM, para assim poder determinar em que proporção cada um desses parâmetros poderia influenciar no comportamento mecânico de uma estrada não pavimentada.

Tabela 3.5 Propriedades das geogrelhas fabricadas em laboratório.

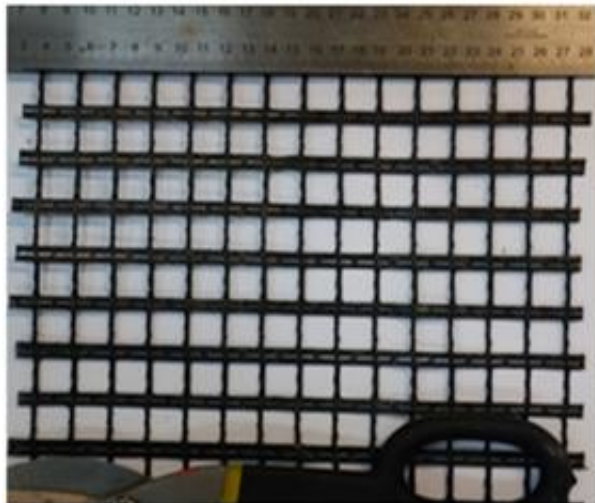
REFORÇO PROPRIEDADES	Geogrelha Fabricada 1 (GF1)	Geogrelha Fabricada Colada 1 (GFC1)	Geogrelha Fabricada 2 (GF2)	Geogrelha Fabricada Colada 2 (GFC2)	Geogrelha Fabricada Verde 1 (GFV1)	Geogrelha Fabricada Verde 2 (GFV2)
Abertura da malha(mm x mm)	30 x 30	30 x 30	60 x 60	60 x 60	30 x 30	60 x 60
Material de fabricação	Polipropileno	Polipropileno	Polipropileno	Polipropileno	Polipropileno	Polipropileno
Resistência a tração MD (Direção de fabricação) (kN/m)	12,9	21,0	15,0	44,7	20,9	20,8
Módulo de rigidez a 5% de deformação MD (Direção de fabricação) (kN/m)	72,0	117,0	164,0	300,0	416,0	261,0



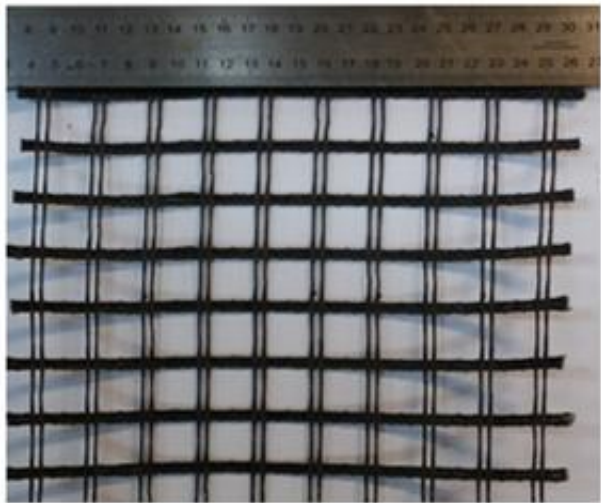
(a)



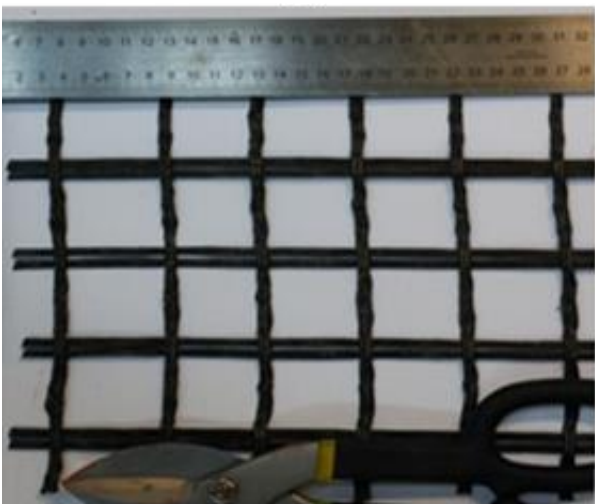
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.6 Geogrelhas comerciais utilizadas na pesquisa: a) Geogrelha 1 (G1), b) Geogrelha 2 (G2), c) Geogrelha 3 (G3), d) Geogrelha 4 (G4), e) Geogrelha 5 (G5), f) Geogrelha 6 (G6).

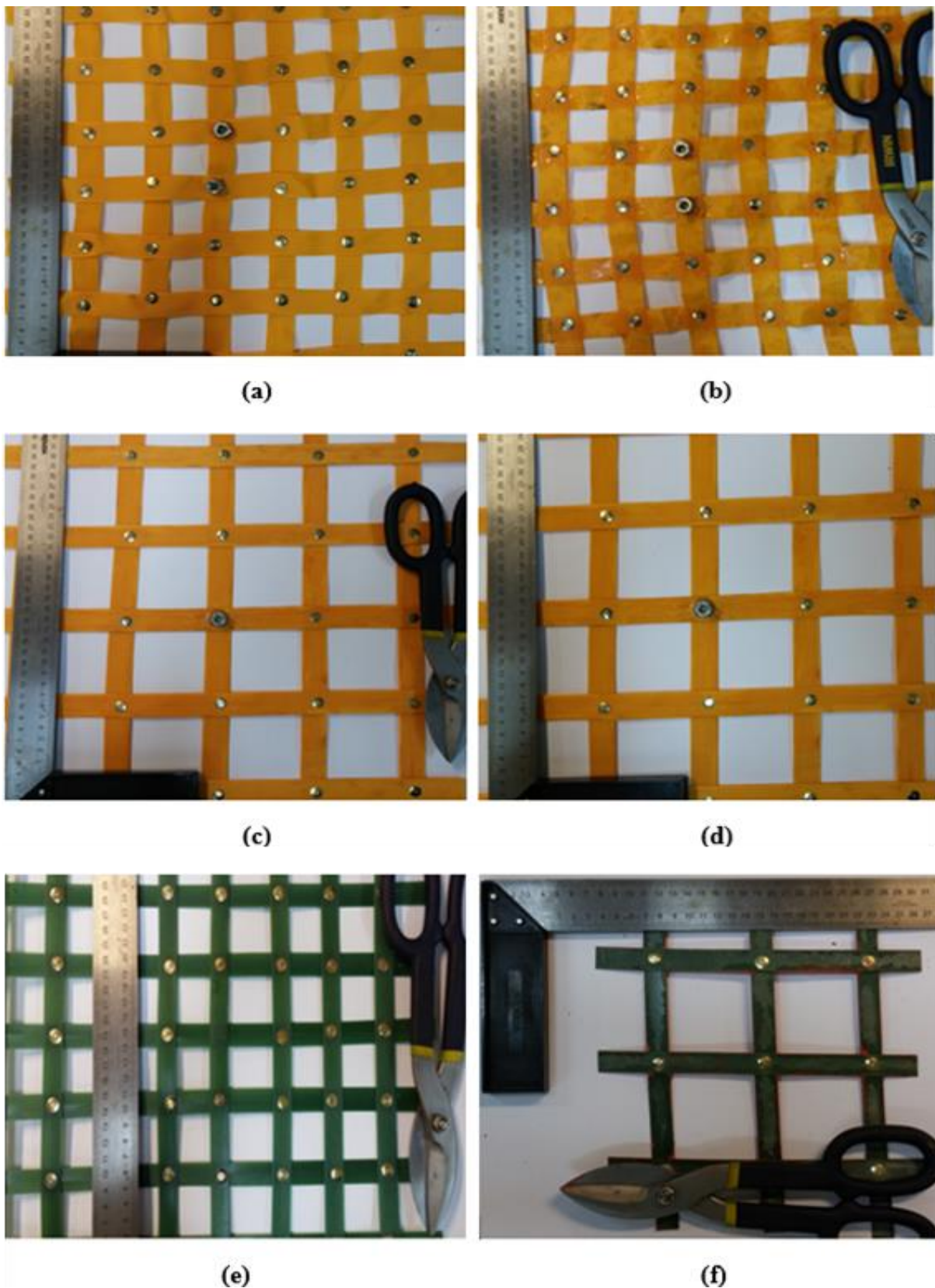


Figura 3.7 Geogrelhas fabricadas em laboratório: a) Geogrelha fabricada 1 (GF1), b) Geogrelha fabricada colada 1 (GFC1), c) Geogrelha fabricada 2 (GF2), d) Geogrelha fabricada colada 2 (GFC2), e) Geogrelha fabricada verde 1 (GFV1), f) Geogrelha fabricada verde 2 (GFV2).

3.1.4 Determinação do módulo de estabilidade à abertura (ASM) das geogrelhas usadas

Um dos objetivos desta pesquisa foi determinar e, se possível, quantificar a relevância das propriedades dos geossintéticos no comportamento mecânico de uma estrada. Diante disso foi necessário realizar ensaios para a determinação do módulo de estabilidade à abertura (ASM) nas diferentes geogrelhas utilizadas nesta pesquisa. Este módulo foi introduzido por Giroud e Han (2004), em seu método de projeto de estradas não pavimentadas reforçadas com geossintéticos, e devido ao seu uso recente ele não é comumente fornecido pelos fabricantes.

Para a obtenção do valor de ASM das geogrelhas foi necessária realizar a adaptação do equipamento para ensaio. A montagem do equipamento de ensaio foi realizada de acordo com a versão preliminar da norma ASTM WK246350, que está sendo desenvolvido pelo comitê da ASTM desde 2009. Neste ensaio mediu-se a rigidez no plano das geogrelhas, em função do momento necessário para provocar torção na interseção entre membros transversais e longitudinais da geogrelha. Para todas as geogrelhas o módulo foi calculado para um momento de 2.0 N-m, em função da rotação da geogrelha para este momento.

Na Figura 3.8 é mostrada a montagem utilizada para a determinação do ASM em laboratório. Já nas Tabelas 3.6 e 3.7 apresentam-se os valores de módulo de estabilidade à abertura obtidos tanto para as geogrelhas comerciais quanto para as geogrelhas que foram fabricadas.

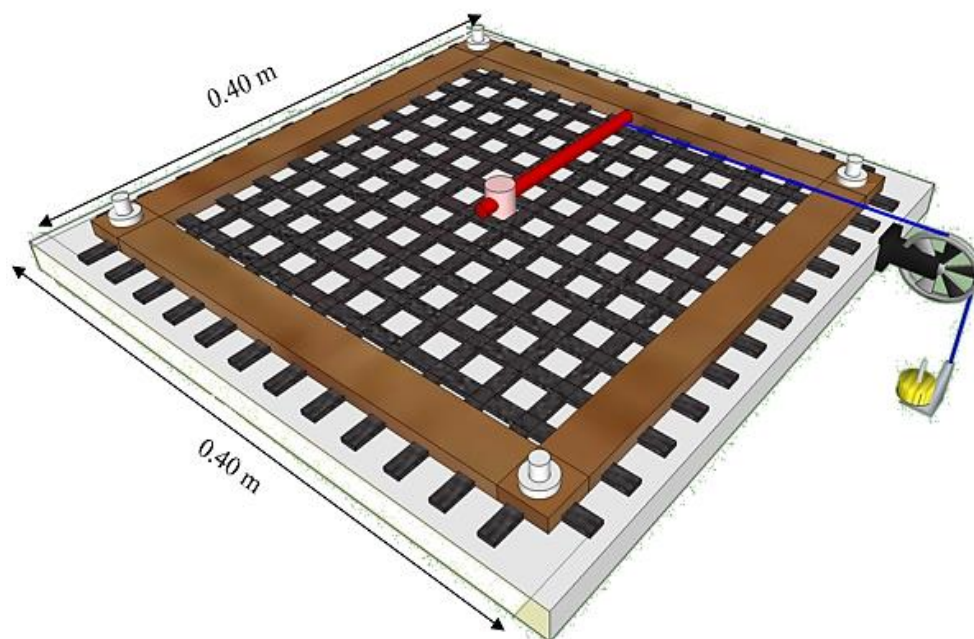


Figura 3.8 Montagem usada para a determinação do módulo de estabilidade à abertura.

Tabela 3.6 Módulos de estabilidade à abertura obtidos para as geogrelhas comerciais usadas na pesquisa.

Geogrelha	Momento (N-m)	Rotação do nó (°)	Módulo (N-m/°)
Geogrelha 1 (G1)	2,0	60,2	0,033
Geogrelha 2 (G2)	2,0	27,0	0,074
Geogrelha 3 (G3)	2,0	50,6	0,040
Geogrelha 4 (G4)	2,0	55,3	0,036
Geogrelha 5 (G5)	2,0	18,7	0,107
Geogrelha 6 (G6)	2,0	68,0	0,029

Tabela 3.7 Módulos de estabilidade à abertura obtidos para as geogrelhas fabricadas empregadas na pesquisa.

Geogrelha	Momento (N-m)	Rotação do nó (°)	Módulo (N-m/°)
Geogrelha Fabricada 1 (GF1)	2,0	46,1	0,043
Geogrelha Fabricada Colada (GFC1)	2,0	29,9	0,067
Geogrelha Fabricada 2 (GF2)	2,0	21,0	0,095
Geogrelha Fabricada Colada 2 (GFC2)	2,0	19,4	0,103
Geogrelha Fabricada Verde 1 (GFV1)	2,0	15,0	0,133
Geogrelha Fabricada Verde 2 (GFV2)	2,0	36,8	0,054

Ao se tentar estabelecer algum vínculo entre os módulos de estabilidade à abertura e a rigidez à tração das geogrelhas usadas no trabalho, encontra-se que não existe nenhuma relação lógica entre estas duas propriedades. Ou seja não é possível dizer, por exemplo, que maior módulo de estabilidade à abertura implica em maior rigidez à tração das geogrelhas utilizadas neste trabalho.

3.2 EQUIPAMENTOS

Nesta parte do trabalho serão descritos os equipamentos e procedimentos adotados para simular o comportamento de estradas não pavimentadas reforçadas com geossintéticos. Um equipamento de grandes dimensões foi construído para representar a estrutura de uma estrada não pavimentada reforçada ou sem reforço, submetida à aplicação de cargas cíclicas, como parte da simulação da ação do tráfego de veículos. O reforço foi colocado na interface entre a camada de aterro e o subleito.

É importante destacar que todos os ensaios foram devidamente monitorados por meio de instrumentação em locais estratégicos na estrutura. Com isso pretendeu-se simular uma estrutura em escala próxima à real.

3.2.1 Equipamento de ensaio

Para a realização do programa experimental de ensaios foi necessário a construção de um equipamento de grandes dimensões para representar de maneira mais próxima o comportamento de uma estrada não pavimentada reforçada com geossintéticos.

Foi empregado um tanque cilíndrico de concreto (conhecida comumente como “manilha”, que é utilizada para a construção de sistemas de drenagem). O referido tanque possui as seguintes dimensões: diâmetro interno de 1,00 m e altura de 0,52 m. Estas dimensões foram suficientes para representar uma camada de aterro de 30 cm de espessura, dimensão compatível com as dos aterros encontrados em campo. A camada de subleito foi de 20 cm de espessura, o que representa apenas uma porção do subleito encontrado em estradas não pavimentadas.

Também foi utilizado um sistema de reação, que permitiu a aplicação de carga sobre uma placa rígida (diâmetro igual a 0,20 m), para simular o carregamento proveniente da roda de um veículo com carga por eixo de 80 kN. Este sistema de reação foi projetado em aço 250 MR, por meio do programa computacional SAP2000, que é um pacote de software da Computer and Structures Inc., destinado à análise estrutural e projeto de estruturas.

A carga vertical sobre a placa, como já foi dito, foi aplicada por meio de um sistema hidráulico, no qual era definida a intensidade e a frequência necessárias para a execução dos ensaios. Esse sistema hidráulico é composto das seguintes partes:

- **Conjunto motor-bomba**, que é responsável pela circulação do fluido e manutenção da pressão no cilindro hidráulico.
- **Válvula de alívio**, que é o sistema de segurança do circuito contra pressões excessivas.
- **Válvula solenoide e direcional**, peça-chave do circuito, que controla a circulação de fluido por meio de aberturas consecutivas e fechamentos de suas vias, direcionando assim o fluido

para o cilindro hidráulico (sistema carregado) e finalmente conduzido para o reservatório (sistema descarregado).

- **Mangueiras hidráulicas de alta pressão** (69 MPa).
- **Manômetro**, para ajustar a carga desejada em função da pressão aplicada no circuito.
- **Cilindro hidráulico**, que é a peça que efetivamente efetuará o carregamento.
- **Temporizador**, peça que tem por função o controle elétrico da válvula solenoide.

Nos ensaios realizados neste trabalho foi aplicado carregamento cíclico através do sistema hidráulico, aplicando-se uma carga de aproximadamente 17,6 kN para produzir uma pressão máxima de 560 kPa sobre a superfície da estrada. A frequência de aplicação da carga foi de um 1 Hz, com o intuito de simular a passagem dos veículos.

Na Figura 3.9 é mostrado o equipamento utilizado para a execução dos ensaios.



Figura 3.9 Equipamento para execução dos ensaios.

3.2.2 Instrumentação

Para cada um dos ensaios foi realizado um monitoramento do comportamento da estrada não pavimentada simulada submetida a aplicação de carregamentos cíclicos. Este foi realizado com a ajuda de alguns instrumentos geotécnicos, os quais serão descritos a seguir:

- **Célula de Carga**

Em todos os ensaios foi usada uma célula de carga com capacidade máxima de 100 kN. A través desta, era medida a carga aplicada pelo cilindro hidráulico sobre a placa metálica usada nos ensaios. Na figura 3.10 é mostrada a célula de carga utilizada. Antes da realização dos ensaios executados nesta pesquisa, a célula de carga foi devidamente calibrada dentro do intervalo de carga máximo do ensaio junto ao sistema de aquisição de dados. Para isso, foram aplicados sucessivos incrementos de força por meio de uma prensa da marca Pavitest, existente no Laboratório de Geotecnia da UnB.



Figura 3.10 Célula de carga usada nos ensaios.

- **Células de tensões totais**

Foram empregadas 5 (cinco) células para medir tensões verticais no subleito, a várias profundidades. Estas células são do tipo diafragma, com diâmetro de 75 mm, espessura de 6 mm, capacidade máxima de 600 kPa e com uma acurácia de 1%. Na Figura 3.11 é apresentada uma das células de tensão empregadas. Antes de realizar os ensaios, todas as células a serem

usadas no trabalho foram devidamente calibradas. Para tanto, utilizou-se uma caixa rígida de aço preenchida com o mesmo material de subleito usado nos ensaios. A areia usada como material de subleito foi depositada na caixa com uma altura de queda de aproximadamente 10 cm, da mesma forma que nos ensaios em grande escala, isso para obter uma areia fofa com baixa capacidade de suporte, além de calibrar a célula nas mesmas condições em que ia ser utilizada nos ensaios. A célula era instalada a meia altura da caixa, sendo recoberta por aproximadamente 15 cm do material. Após esse processo, uma placa de aço foi instalada sobre a camada final de solo onde foram aplicados incrementos de carga, com o auxílio de uma bomba e cilindros hidráulico. As cargas aplicadas foram registradas pela célula de carga e pela leitora digital. Ao mesmo tempo, o sistema de aquisição de dados (ADS 2000) registrava as voltagens correspondentes fornecidas pelos extensômetros elétricos existentes no diafragma da célula de tensão.



Figura 3.11 Célula de tensão total usada na pesquisa.

- **Medidores de deslocamento linear**

Em cada um dos ensaios foram determinados o afundamento da placa de carregamento e da superfície da estrada. Para isso foram usados medidores de deslocamento linear. Os medidores empregados permitem uma medição de deslocamentos de até 100 mm, suficiente para o objetivo do trabalho. Na Figura 3.12 é exibido um dos medidores de deslocamento usados. Cada um dos medidores empregados foram devidamente calibrados antes da realização dos ensaios.



Figura 3.12 Medidor de deslocamento linear empregado nos ensaios.

3.2.3 Sistema de Aquisição de Dados

Como foram usados alguns tipos de sensores para o monitoramento dos ensaios, foi necessário a utilização de um sistema de aquisição de dados para poder converter as leituras analógicas dos instrumentos em digitais. O aquisitor usado foi fabricado pela empresa LYNX, modelo ADS 2000 (Figura 3.13). É importante mencionar que o equipamento de aquisição de dados funciona com software específico. O software empregado para visualizar os sinais emitidos pela instrumentação é o AqDados 7, que permite a aquisição simultânea de dados de todos os canais, além de possibilitar a programação da frequência com que os dados são adquiridos. O equipamento usado possui 16 canais para a conexão da instrumentação.

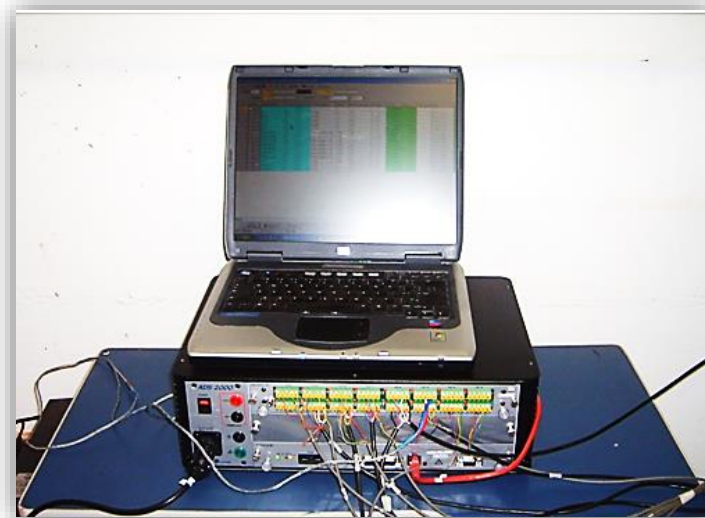


Figura 3.13 Sistema de aquisição de dados usado nos ensaios.

3.3 PROCEDIMENTO ADOTADO PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO CICLICO

Para a realização dos testes realizados na presente pesquisa foi preciso adotar um roteiro para a montagem e execução dos ensaios. A montagem do ensaio compreendeu a colocação do solo de subleito junto com a instrumentação, a camada de reforço, se for o caso, e a disposição da camada de aterro. Nesta pesquisa foram usados cerca de 13 tipos de reforço para a execução dos testes.

3.3.1 Preparação do equipamento de ensaio

Antes da execução dos testes foi necessário preparar o equipamento para a colocação dos materiais que comporiam a estrada não pavimentada simulada. Antes da colocação dos materiais no equipamento para ensaios, foi instalada uma camada de plástico lubrificada com ajuda de vaselina sólida e líquida (Figura 3.14). Este procedimento teve como objetivo de minimizar o atrito lateral produzido pelo contato entre o solo e a superfície interna do tanque.



Figura 3.14 Colocação de camada de plástico para evitar atrito lateral

3.3.2 Disposição da camada de subleito

Para a representação da estrada não pavimentada simulada nos ensaios, foi feita a preparação da camada de subleito. Esta camada foi composta por areia em estado solto, a fim de representar um estado fofo e garantir um subleito com baixa capacidade de suporte (Figura 3.15). A areia foi disposta em duas camadas de 12 cm e 10 cm respectivamente cada, até se atingir a espessura final de 22 cm para esta camada. Cada camada foi depositada no tanque de ensaios a uma altura

de queda de aproximadamente 10 cm, garantindo uma areia fofa com um CBR de aproximadamente 1,6 %.



Figura 3.15 Disposição da camada de subleito

3.3.3 Colocação da instrumentação no solo de subleito

Na camada de subleito foram colocadas células de tensões totais no eixo de aplicação de carga e nas laterais, com o objetivo de determinar as tensões que eram transferidas ao subleito (Figura 3.16). Na Figura 3.17 é mostrada a localização das células de tensões totais na estrutura de estrada não pavimentada simulada.



Figura 3.16 Colocação das células de tensão total.

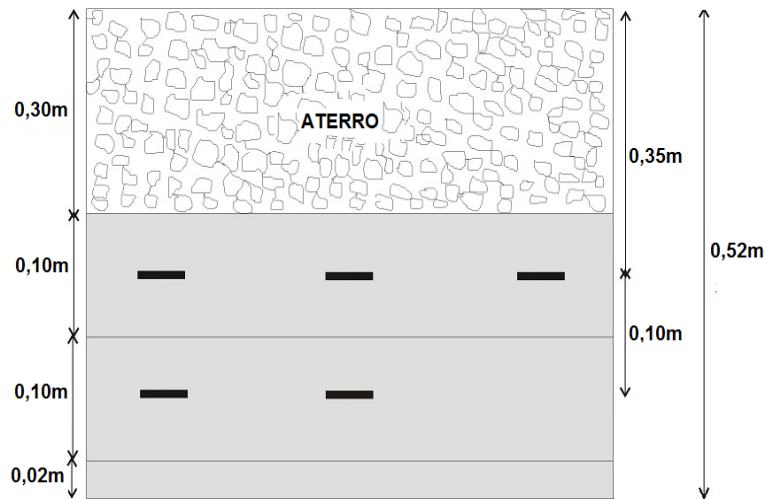


Figura 3.17 Localização das células de tensão nos ensaios

3.3.4 Instalação da camada de reforço

Nos ensaios foi colocada uma camada de reforço geossintético, para representar uma estrada não pavimentada reforçada. Para cada um dos ensaios foi usado um tipo diferente de reforço. Destaca-se que apenas um dos ensaios foi realizado sem a presença do reforço, isso para ter um padrão de comparação acerca do efeito que confere o reforço na estrada. O elemento de reforço nos ensaios foi instalado logo após a colocação da camada de subleito. Este reforço possuía um diâmetro de 1,50 m, um pouco maior que o diâmetro do equipamento de ensaio, para permitir a ancoragem das extremidades do geossintético. A ancoragem foi feita dobrando-se 10 cm nas laterais da geogrelha e embutindo no aterro (Figura 3.18). Na figura 3.19 é mostrado a preparação do reforço antes da instalação e na Figura 3.20 a instalação do mesmo.

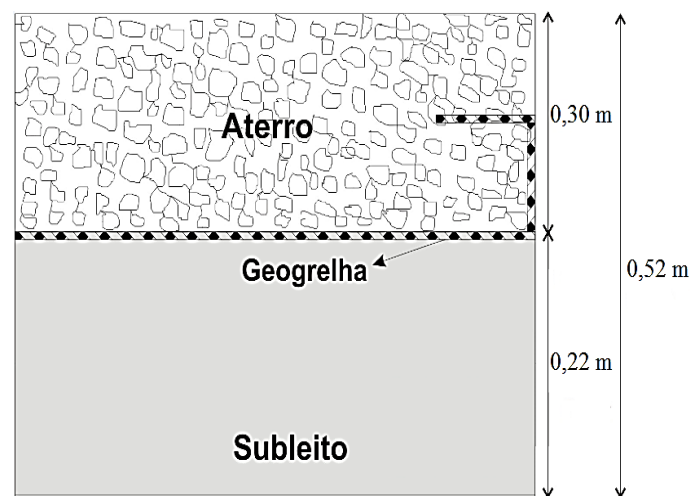


Figura 3.18 Ancoragem do reforço.



Figura 3.19 Preparação do reforço.



Figura 3.20 Instalação do reforço.

3.3.5 Colocação da camada de aterro

Após a instalação do reforço foi disposta a camada de aterro. A compactação foi realizada em três camadas, as quais foram compactadas estaticamente com ajuda do equipamento de aplicação de carga sobre placa de aço com diâmetro ligeiramente menor que o diâmetro interno do tanque. A altura final da camada de aterro foi de 0,30 m. Tem-se que o material de aterro pode sofrer o fenômeno de dilatância durante a aplicação do carregamento cíclico. A figura 3.21 mostra a colocação da camada de aterro.



Figura 3.21 Colocação da camada de aterro.

3.3.6 Instalação da instrumentação

Logo após a preparação da estrada não pavimentada, foi instalada colocar a instrumentação na superfície da camada de aterro. Para cada um dos ensaios realizados foram colocados um total de cinco medidores de deslocamento linear, com o propósito de medir deslocamentos superficiais provocados pelo carregamento. Para isso, foi necessário o uso de uma estrutura metálica para fixação dos medidores. Com respeito à distribuição destes instrumentos, três deles foram instalados nas bordas da placa de carregamento. Os outros dois se situaram na lateral esquerda e direita da placa metálica com uma distância de 0,10 m com relação à placa. Na Figura 3.22 é mostrada a disposição dos medidores de deslocamento no ensaio.

3.3.7 Execução do ensaio (Primeiro estágio de carga)

Após a preparação do ensaio, foi ligado o sistema de aplicação de carga, iniciando-se o ensaio. Para todos os ensaios foi aplicado carregamento cíclico com uma frequência de 1 Hz e uma pressão de 560 kPa. Como alguns dos testes tendem a suportar grande número de ciclos de carga, foi preciso adotar um critério de interrupção do ensaio. Adotou-se como critério a ocorrência de um afundamento da placa de carregamento igual a 75 mm. Esta etapa do ensaio denominou-se primeiro estágio de carga.



Figura 3.22 Localização dos medidores de deslocamento linear.

3.3.8 Restauração do aterro (segundo estágio de carga)

Após se atingir o afundamento de 75 mm, foi realizada a restauração da camada de aterro (Figura 3.23). A restauração consistiu em colocar mais material de aterro na região afundada, tendo precaução de manter as mesmas condições de compactação utilizadas na preparação do ensaio. A execução do ensaio foi, então, retomada até novo afundamento de 75 mm. Esta nova aplicação de carga foi denominada segundo estágio de carga. O propósito de fazer o reparo da superfície do aterro foi o de simular o procedimento seguido em manutenções de estradas não pavimentadas.

3.4 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUEBRA DOS GRÃOS DO MATERIAL DE ATERRO

Após da finalização de cada um dos ensaios considerou-se importante avaliar se o material de aterro ensaiado tenha sofrido algum processo de quebra dos grãos. Para isto foi determinado o índice de quebra dos grãos contidos no aterro. Para conhecer este índice, foi coletada brita na região onde ocorreu a aplicação do carregamento cíclico ao finalizar o ensaio. Este material foi coletado em duas posições diferentes. Na primeira situação, o material foi colhido na superfície da estrada onde se encontrava o afundamento de 75 mm da placa de carregamento (posição 1) e na segunda situação junto ao reforço, próximo à interface aterro-subleito (posição 2). Logo depois, foram realizados ensaios de granulometria para o material recolhido em cada uma destas profundidades e, em seguida, foram feitos os cálculos também com base na curva granulométrica original da brita graduada, realizada antes dos ensaios de carregamento cíclico.

O cálculo do índice de quebra dos grãos (B_g), foi realizado adotando a metodologia de Marsal (1967). Este índice representa a porcentagem do peso de sólidos que sofreu quebra. Seu cálculo consiste em se obter as diferenças de porcentagens de pesos (ΔW) retidos entre peneiras antes (ΔW_{ki}) e após (ΔW_{kf}) os ensaios.

O índice de quebra dos grãos B_g é dado pela seguinte equação:

$$B_g = \sum_1^n (\Delta W_{ki} - \Delta W_{kf}) \text{ Para os valores de } \Delta W_{ki} - \Delta W_{kf} > 0 \quad (3.1)$$

Onde o B_g é o índice de quebra dos grãos, ΔW as diferenças de porcentagens de pesos retidos entre peneiras, ΔW_{ki} peso retido nas peneiras antes do ensaio, e, ΔW_{kf} peso retido nas peneiras após os ensaios.



Figura 3.23 Restauração do aterro.

3.5 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE ESPRAIAMENTO DE TENSÕES (β)

Para cada um dos ensaios foi determinado o ângulo de espraiamento de tensões (β). O procedimento adotado para a obtenção deste valor foi o seguinte: Logo após desmontado o sistema de aplicação de carregamento e a instrumentação utilizada, foi retirado o material de aterro. A seguir, foi medido o diâmetro da área deformada pela aplicação de cargas na base do aterro. Posteriormente, com a altura da camada de aterro e com o diâmetro da placa metálica, estimou-se o ângulo do tronco de cone onde se concentraram os mecanismos de deformação e ruptura (ângulo de espraiamento), para os caso dos ensaio sem reforço (β') e reforçados (β'').

A Figura 3.24 apresenta graficamente a forma geral de propagação das tensões no interior de uma estrada não pavimentada devido à aplicação de carregamento externo.

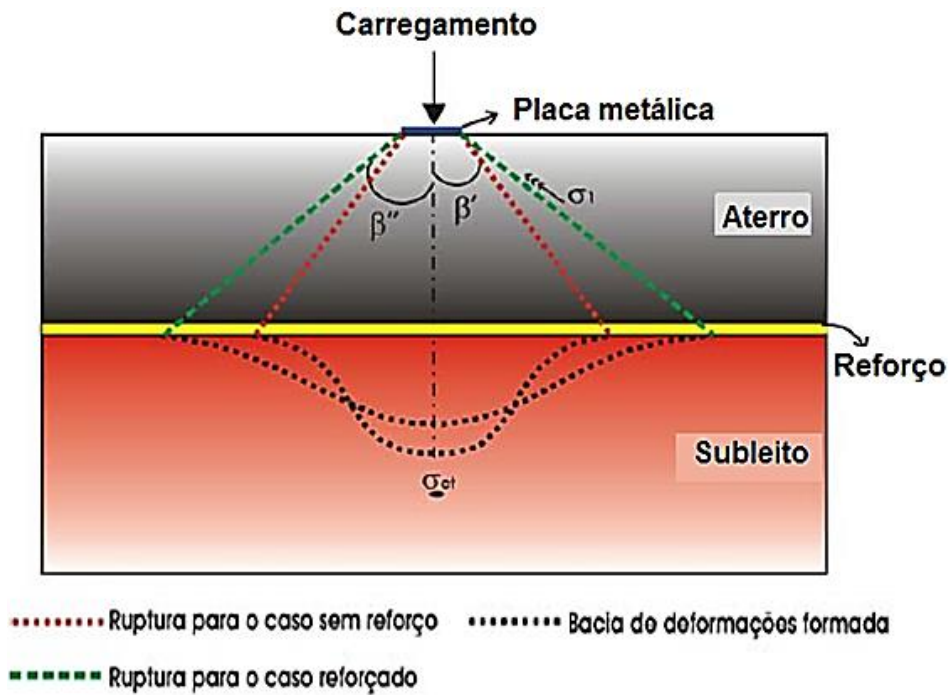


Figura 3.24 Espreadimento de tensões numa estrada não pavimentada reforçada e sem reforço (modificado – Antunes, 2008)

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão mostrados os resultados obtidos para as configurações de ensaios realizados nesta pesquisa e suas respectivas análises. Serão expostos os comportamentos das estradas não pavimentadas simuladas no trabalho, com os diferentes tipos de reforço utilizados. Cada uma das geogrelhas empregadas nos testes apresentaram variação em características tais como abertura, módulo de estabilidade à abertura (ASM), rigidez e resistência à tração. Tem-se que para cada configuração de ensaio simulado foram avaliados os deslocamentos da superfície do aterro e as tensões transferidas para o solo de subleito em função do número de repetições de carga suportadas. Serão apresentados gráficos comparativos entre os desempenhos dos diferentes reforços e a estrada de referência (sem uso de reforço). Além disso, são mostrados gráficos incluindo as mudanças dos deslocamentos da superfície de aterro e as tensões no solo de subleito. Cada uma das análises foi realizada para o primeiro estágio de carga e para uma restauração efetuada na superfície da estrada (segundo estágio de carga). Outro parâmetro avaliado foi a quebra de grãos para cada uma das configurações de ensaios realizadas, assim como também o cálculo do fator de eficiência para cada tipo de reforço. Também será exibido o comportamento das estradas não pavimentadas reforçadas no que se refere à variação do ângulo de espraiamento das tensões no interior do subleito, comparando-se os resultados com e sem reforço. Para uma melhor compreensão dos resultados, eles serão divididos em duas partes, para o primeiro e segundo estágio de carga (restauração). Da mesma forma, será feita uma diferenciação entre o comportamento das geogrelhas encontradas no mercado e as fabricadas no laboratório para esta pesquisa.

4.1 PRIMEIRO ESTÁGIO DE CARGA

4.1.1 Análises dos deslocamentos no primeiro estágio de carga

A Figura 4.1 apresenta os deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de repetições de carga para alguns reforços encontrados no mercado. É possível observar que a estrada com melhor desempenho foi a reforçada com a Geogrelha G1, uma vez que suportou 340.068 ciclos de carga no primeiro estágio. Destaca-se que os ensaios reforçados com os distintos tipos de geogrelhas disponíveis no mercado atingiram o afundamento de placa de 75 mm com números de ciclos bem maiores que o ensaio não reforçado. Além disso, foi possível constatar que os melhores comportamentos, quanto ao número de ciclos de carga suportados, foram mostrados pelas geogrelhas G1, G2 e G4. Isso pode ser devido ao fato de serem as

geogrelhas que apresentam maior rigidez à tração, em comparação com os outros geossintéticos empregados. Outro aspecto a ser levado em consideração é a abertura da malha, que são diferentes nas geogrelha G1, G2 e G4, fato que certamente influenciou uma melhor interação com o aterro. Finalmente, o maior número de ciclos de carga apresentado pela estrada reforçada com a geogrelha G1 pode também ser em parte devido ao fato que esta foi a situação em que se teve menor quantidade de partículas quebradas durante o ensaio. Estes fatos poderão ser comprovados por meio de resultados de índice de quebra mostrados mais adiante.

Nos testes realizados foi também ensaiado um geotêxtil tecido. A estrada reforçada com este material suportou um número de repetições de carga superior a estrada sem reforço. Na Figura 4.1 pode se inferir que no caso de geogrelhas com mesmo módulo de rigidez, diferente abertura e diferente ASM, o comportamento em termos de repetições de carga varia bastante. Outra coisa que pode ser vista para a estrada reforçada com a geogrelha G5 é que, apesar dela apresentar um módulo de estabilidade à abertura (ASM) alto (0,107), ela resistiu a um número menor de ciclos de carga (8.156). O contrário aconteceu com a estrada reforçada com a geogrelha G2. Ela exibe um ASM relativamente baixo (0,074), mas conseguiu suportar um número de repetições de carga elevado (221.102).

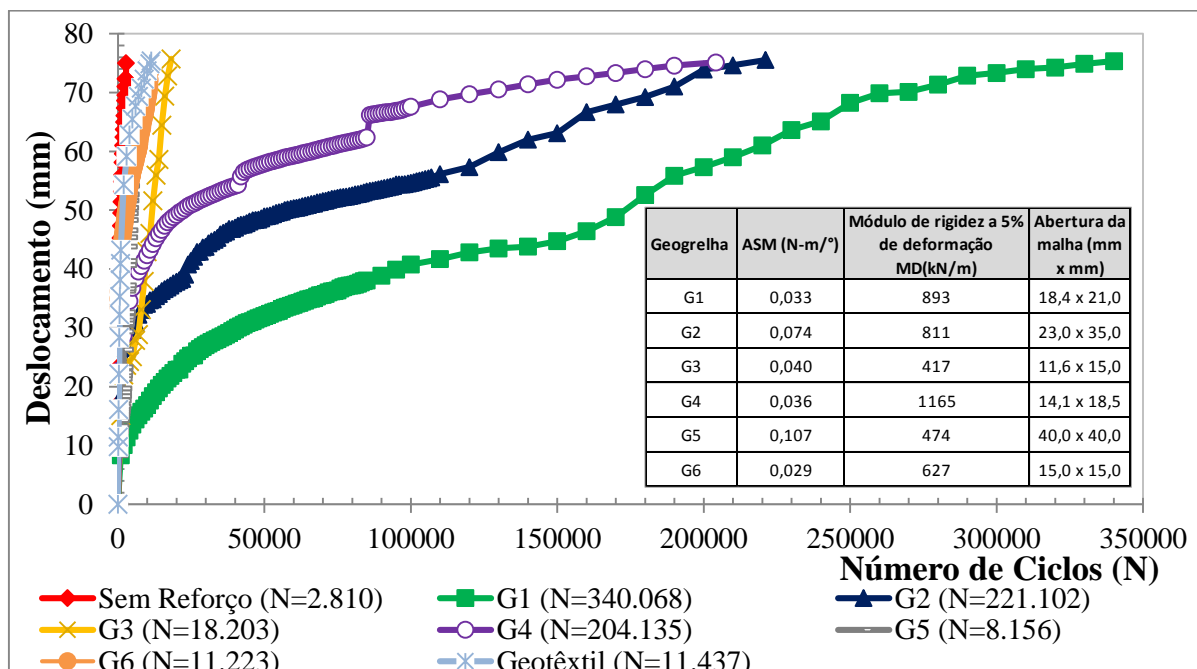


Figura 4.1 Deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Primeiro estágio de carga.

Na Figura 4.2 são exibidos os deslocamentos da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga para as geogrelhas que foram fabricadas durante a execução desta pesquisa. Nota-se que as geogrelhas GF1 e GFC1, com a mesma abertura, mas diferentes módulos de estabilidade à abertura (ASM), mostraram um comportamento similar, suportando aproximadamente o mesmo número de repetições de carga. O mesmo fato aconteceu com as geogrelhas GF2 e GFC2. Já as geogrelhas GFV1 e GFV2 se comportaram de forma diferente. As observações mostram que não necessariamente uma geogrelha com maior módulo de estabilidade à abertura resulta em um melhor desempenho da estrada reforçada em termos de número de repetições de carga. Muito pelo contrário, os resultados sugerem que propriedades como rigidez e dimensões da abertura são mais importantes. Estes fatos serão confirmados posteriormente com outros resultados a serem mostrados.

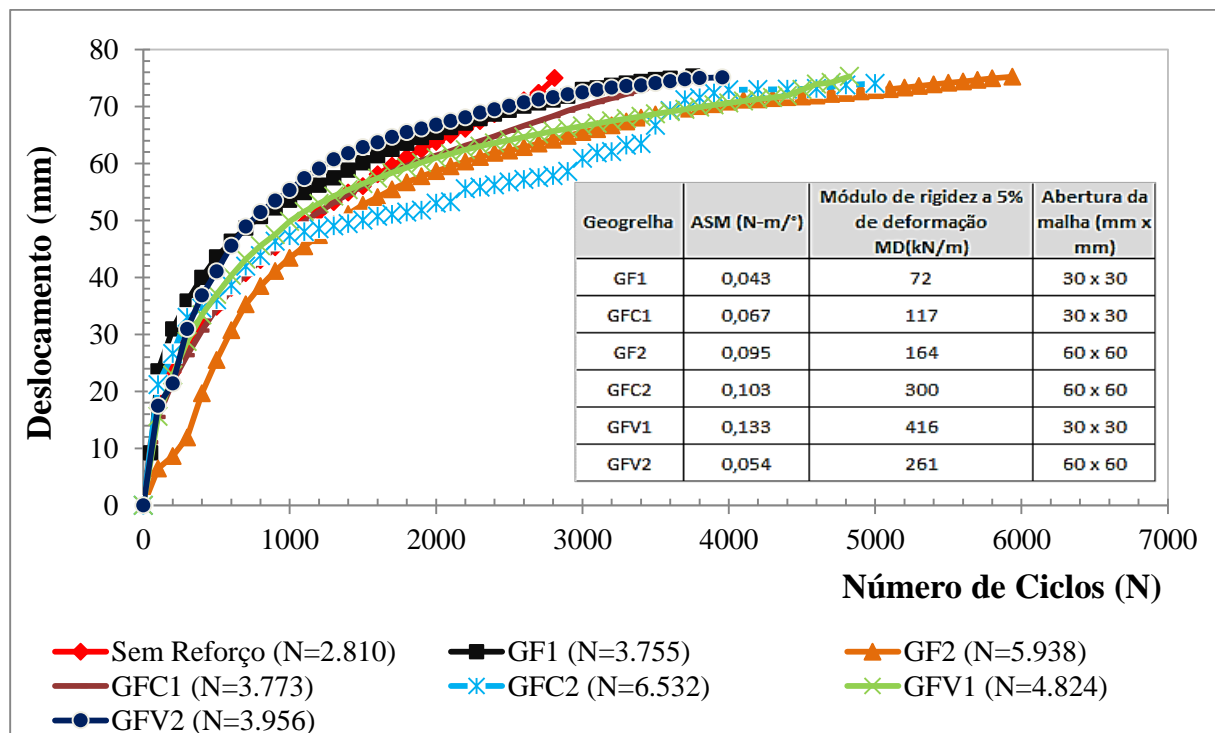


Figura 4.2 Deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de Carga para geogrelhas fabricadas – Primeiro estágio de carga.

A Figura 4.3 mostra os deslocamentos da placa de carregamento *versus* número de ciclos de carga, considerando-se o limite $N = 2.810$, que foi o valor atingido ao final do ensaio sem reforço. Até este valor de N , a estrada que melhor se comportou foi a reforçada com a geogrelha G1, atingindo um deslocamento de apenas aproximadamente 11 mm.

Na Figura 4.4 exibem-se os deslocamentos da placa de carregamento *versus* número de ciclos de carga para ensaios com geogrelhas fabricadas no laboratório, considerando-se o limite $N = 2.810$, que foi o valor atingido ao final do ensaio sem reforço. Neste caso, tem-se que a estrada que melhor se comportou foi a reforçada com a geogrelha GFC2, atingindo um deslocamento de aproximadamente 58 mm. Não se observou muita variação entre resultados para as demais geogrelhas fabricadas para $N = 2.810$.

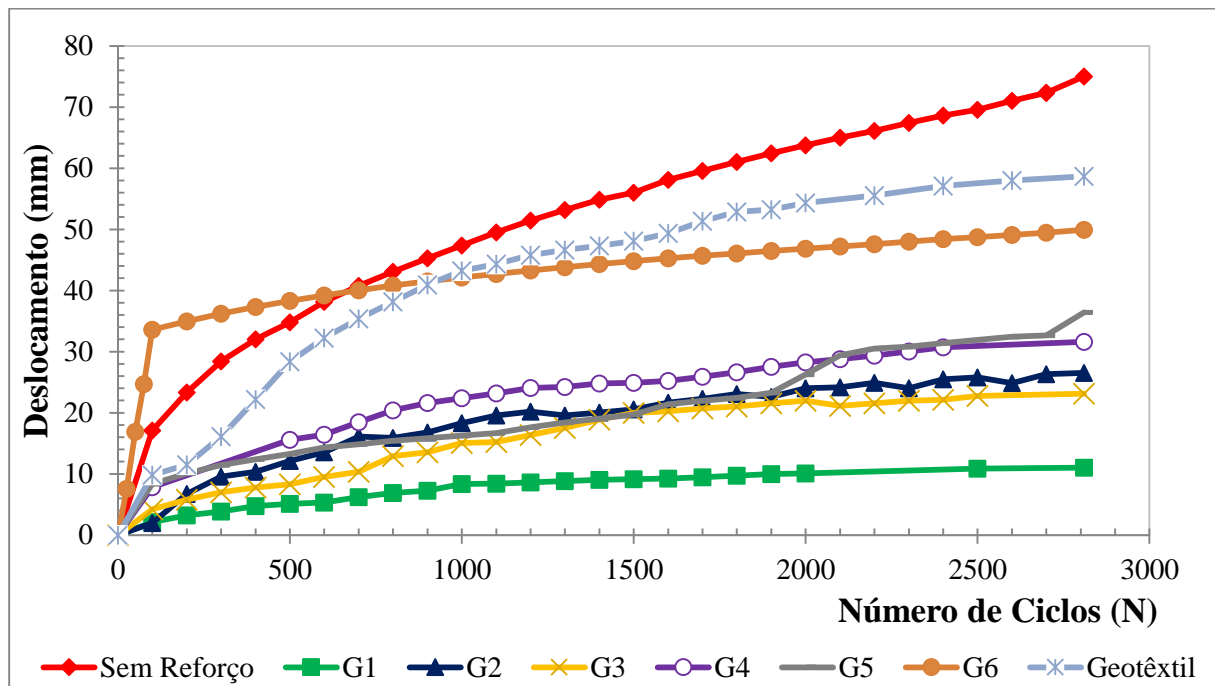


Figura 4.3 Deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Primeiro estágio de carga. Para $N = 2.810$ (final do ensaio sem reforço).

Nas Figuras 4.5 e 4.6 são mostrados os perfis de deslocamentos da superfície do aterro para todas as geogrelhas ensaiadas incluindo o resultado para o geotêxtil tecido ensaiado. As geogrelhas comerciais mostram uma variação pequena entre os deslocamentos, especialmente a partir de uma distância de 0,3 m do centro da placa. Isso sugere pouca influência das fronteiras laterais nos resultados dos ensaios. Na Figura 4.5 pode-se observar que as superfícies dos aterros das estradas reforçadas com as geogrelhas G1, G4, G5 e G6 levantaram-se ligeiramente. Isso é decorrência de uma melhor interação destas geogrelhas com a brita e devido à dilatação da brita compactada (Fig. 4.5). Já os perfis de deslocamentos para as estradas reforçadas com as geogrelhas fabricadas (Fig. 4.6) mostraram resultados de deslocamentos semelhantes para

cada uma das distâncias de medição. Percebe-se que para distâncias ao centro da placa de 0,2 e 0,3 m as superfícies dos aterros simulados também levantam-se levemente

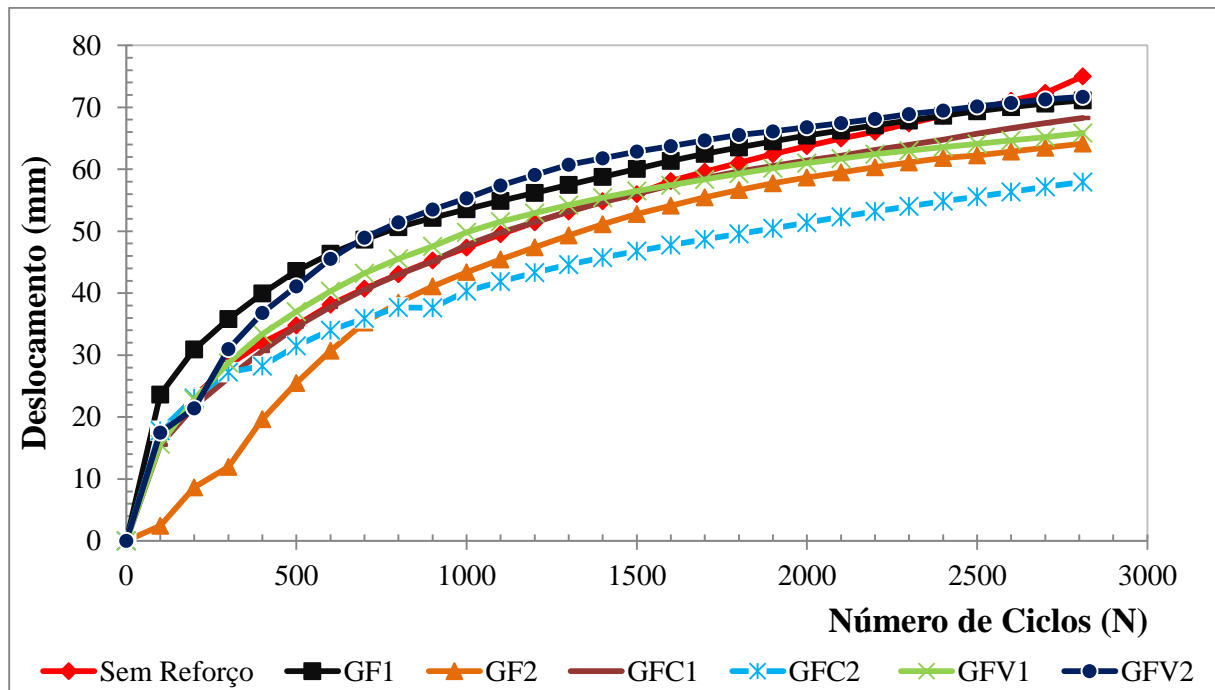


Figura 4.4 Deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga para geogrelhas fabricadas– Primeiro estágio de carga. Para N = 2.810 (final do ensaio sem reforço).

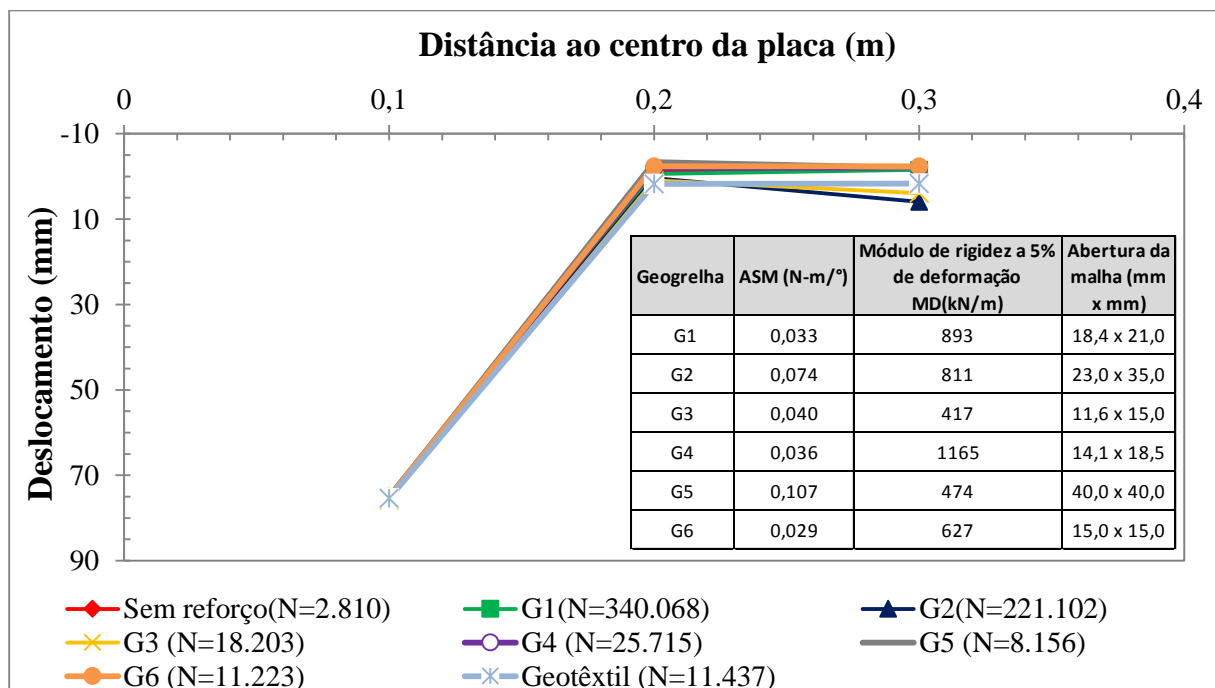


Figura 4.5 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para reforços comerciais - Primeiro estágio de carga.

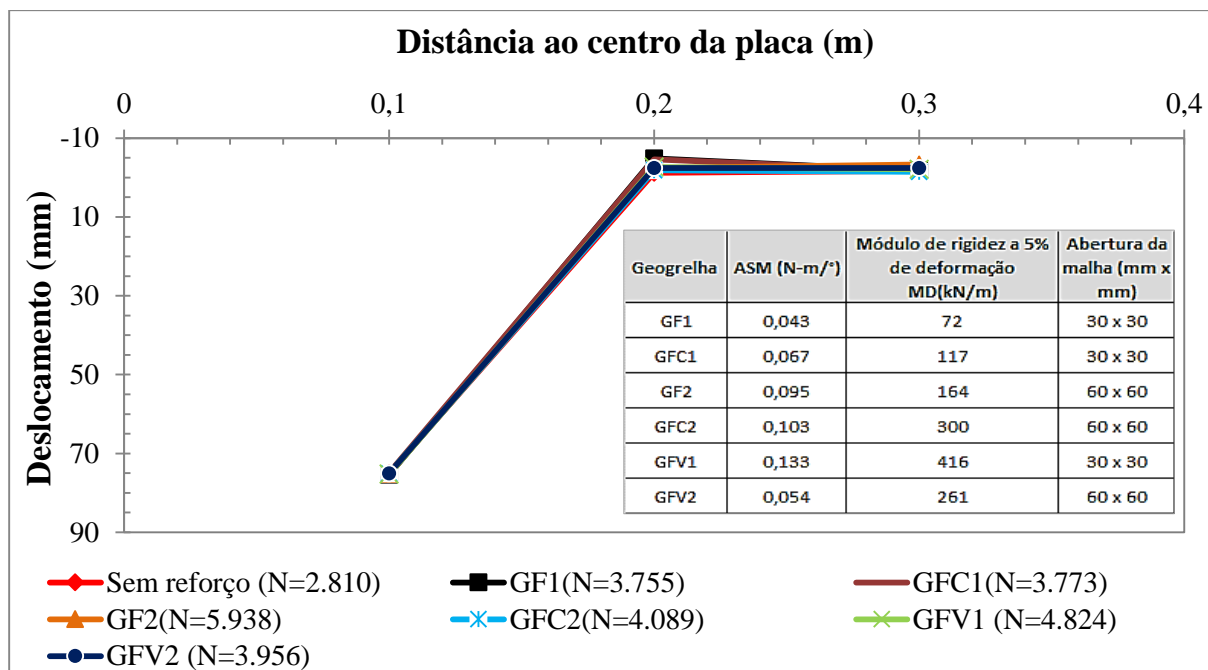


Figura 4.6 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para geogrelhas fabricadas - Primeiro estágio de carga.

Mostram-se na Figura 4.7 os perfis de deslocamentos para reforços existentes no mercado para o valor de N no final do ensaio não reforçado. Pode-se observar que a uma distância de 0,1 m do centro da placa de aplicação de carga, a estrada que apresentou menor deslocamento para um mesmo número de ciclos foi a reforçada com a geogrelha G1, seguida pelas estradas reforçadas com as geogrelhas G3 e G2. Para distâncias maiores ao centro da placa, os deslocamentos exibidos pelas estradas foram similares.

Na Figura 4.8 apresentam-se os perfis de deslocamentos das estradas reforçadas com as geogrelhas fabricadas no final do ensaio sem reforço. Nota-se que as geogrelhas analisadas mostram deslocamentos similares para distâncias ao centro da placa de 0,2 e 0,3 m. Além disso, verificou-se que a estrada que apresentou menor afundamento para uma distância ao centro da placa de 0,1 m foi a reforçada com a geogrelha GF1. Esse comportamento pode ser devido a uma melhor interação entre esse reforço e o material de aterro, pelo menos nos ciclos de carga iniciais.

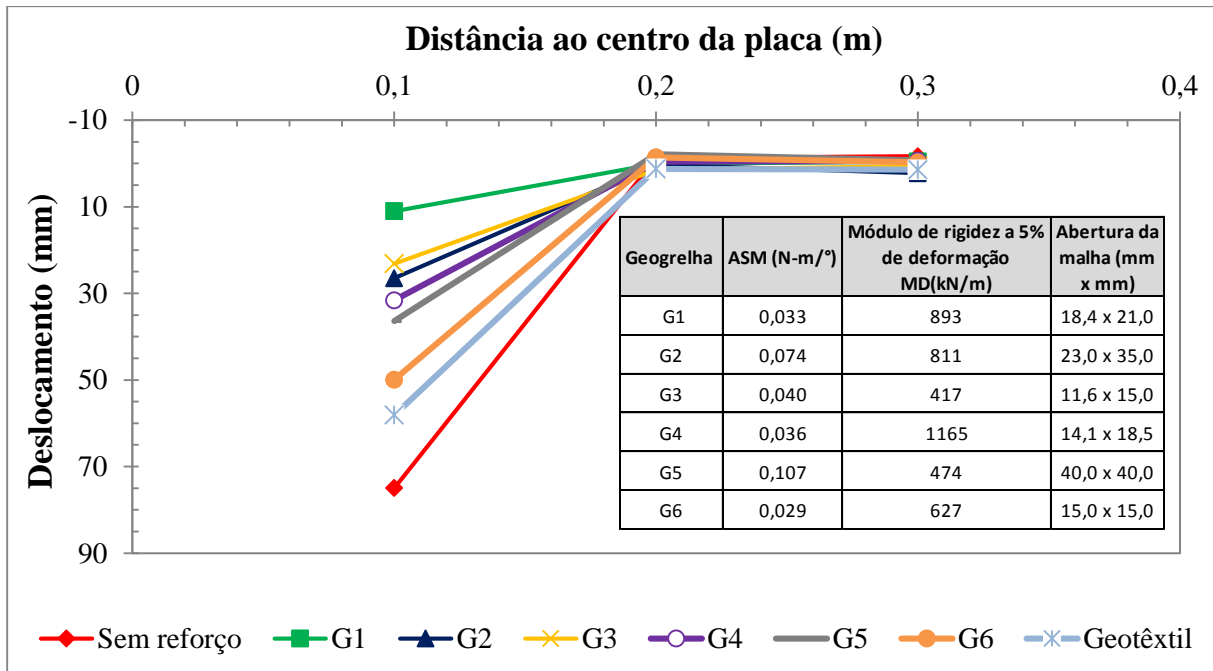


Figura 4.7 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para reforços comerciais - Primeiro estágio de carga. Para N = 2.810 (ao final do ensaio não reforçado).

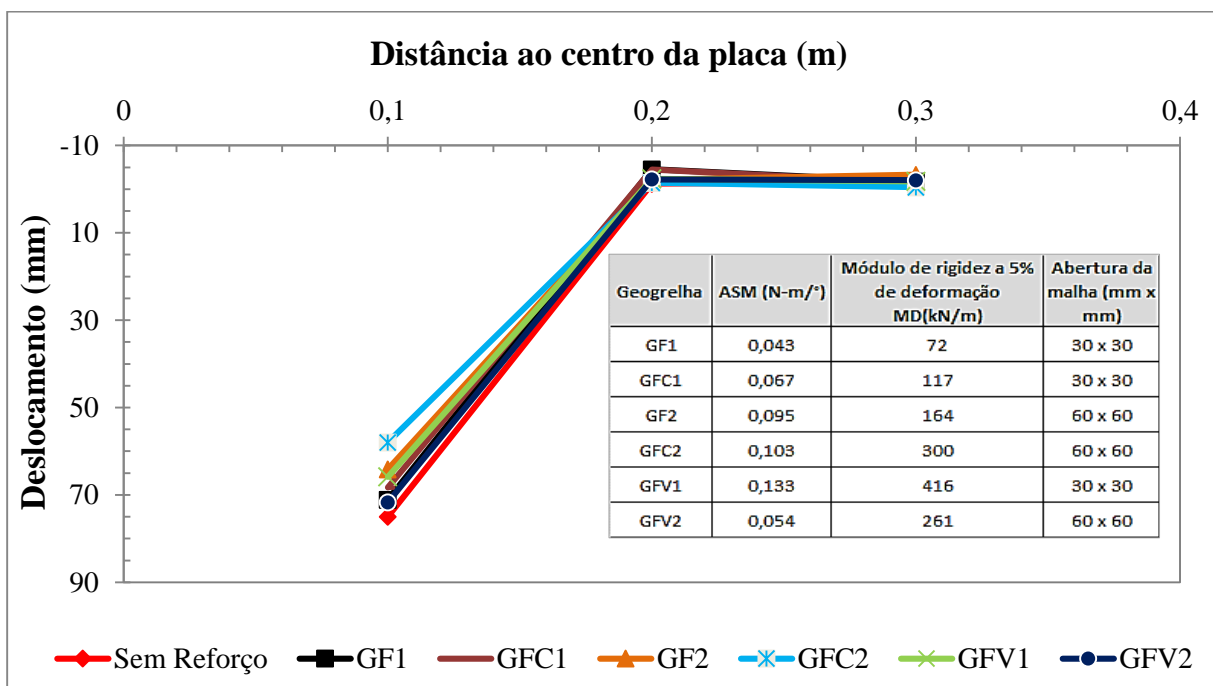


Figura 4.8 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para geogrelhas fabricadas - Primeiro estágio de carga. Para N = 2.810 (ao final do ensaio não reforçado).

4.1.2 Fator de eficiência para cada um dos reforços usados - Primeiro estágio de carga

Visando avaliar a eficiência do reforço, foram calculados os fatores de eficiência (E) para cada um dos reforços empregados na pesquisa. Este fator é definido como a razão entre o número de repetições (N_r) de carga necessárias para que a estrada reforçada alcance um afundamento de 75 mm e o número de repetições (N_u) de carga para que a estrada não reforçada também atinja o mesmo afundamento. Os fatores de eficiência para as estradas reforçadas com as geogrelhas disponíveis do mercado, incluindo o geotêxtil ensaiado e as geogrelhas fabricadas em laboratório, correspondentes ao primeiro estágio de carga, são apresentados na Tabela 4.1

Tabela 4.1 Fatores de eficiência obtidos para os reforços usados na pesquisa – Primeiro estágio de carga.

Reforço	Nr	Nu	E
G1	340.068	2.810	121,02
G2	221.102	2.810	78,68
G3	18.203	2.810	6,48
G4	204.135	2.810	72,65
G5	8.156	2.810	2,90
G6	11.223	2.810	3,99
Geotêxtil	11.437	2.810	4,07
GF1	3.755	2.810	1,34
GFC1	3.773	2.810	1,34
GF2	5.938	2.810	2,11
GFC2	6.532	2.810	2,32
GFV1	4.824	2.810	1,72
GFV2	3.956	2.810	1,41

Da tabela anterior, percebe-se que as estradas que apresentaram um maior fator de eficiência foram as reforçadas com os reforços encontrados no mercado. Observa-se também que a geogrelha que apresentou melhor comportamento em termos de suporte a repetições de carga, foi a geogrelha G1, suportando 121 vezes mais ciclos de carga que a estrada sem reforço. As estradas reforçadas com geogrelhas fabricadas em laboratório resistiram bem menos. Isso pode ser devido ao fato delas terem menor rigidez à tração, quando comparadas às geogrelhas existentes no mercado, além dos seus membros terem menor espessura (menor resistência passiva). De acordo com os resultados obtidos, a geogrelha G1 foi aquela para a qual a abertura da malha proporcionou uma melhor interação com os grãos do material de aterro. Resultados parecidos foram obtidos com as geogrelhas G2 e G4, mostrando fatores de eficiência altos, sendo estas estradas 78 e 72 vezes respectivamente mais resistentes que a estrada sem presença

de reforço. Os resultados obtidos evidenciam a boa interação entre o reforço G1 e o material de aterro. Valores similares de fatores de eficiência foram encontrados nos trabalhos desenvolvidos por pesquisadores como (Perkins 2001, Cancelli *et al* 1996, Cancelli *et al.* 1999), onde foram simuladas estradas reforçadas com geogrelhas. Nos ensaios executados por Cancelli *et al.* (1996), foi usado um subleito arenoso, chegando a encontrar valores de eficiência superiores a 200, dependendo da profundidade de rodeira considerada.

4.1.3 Análises das tensões totais no primeiro estágio de carga

Na Figura 4.9 são mostradas as tensões transferidas para o subleito a uma profundidade de 0,35 m a partir da superfície do aterro (5 cm abaixo da interface aterro-subleito). Percebe-se que as maiores tensões foram medidas no ensaio reforçado com o geotêxtil, seguidas das apresentadas pelo ensaio reforçado com a geogrelha G5. Nota-se também que para os ensaios reforçados com a geogrelhas G1 e G2 as tensões transferidas foram relativamente mais baixas, se comparadas com as do ensaio sem reforço. Tal fato pode ter acontecido devido ao bom desempenho do reforço, permitindo melhor distribuição das tensões. Note-se também que os valores de tensões da Figura 4.9 correspondem a diferentes valores finais de N.

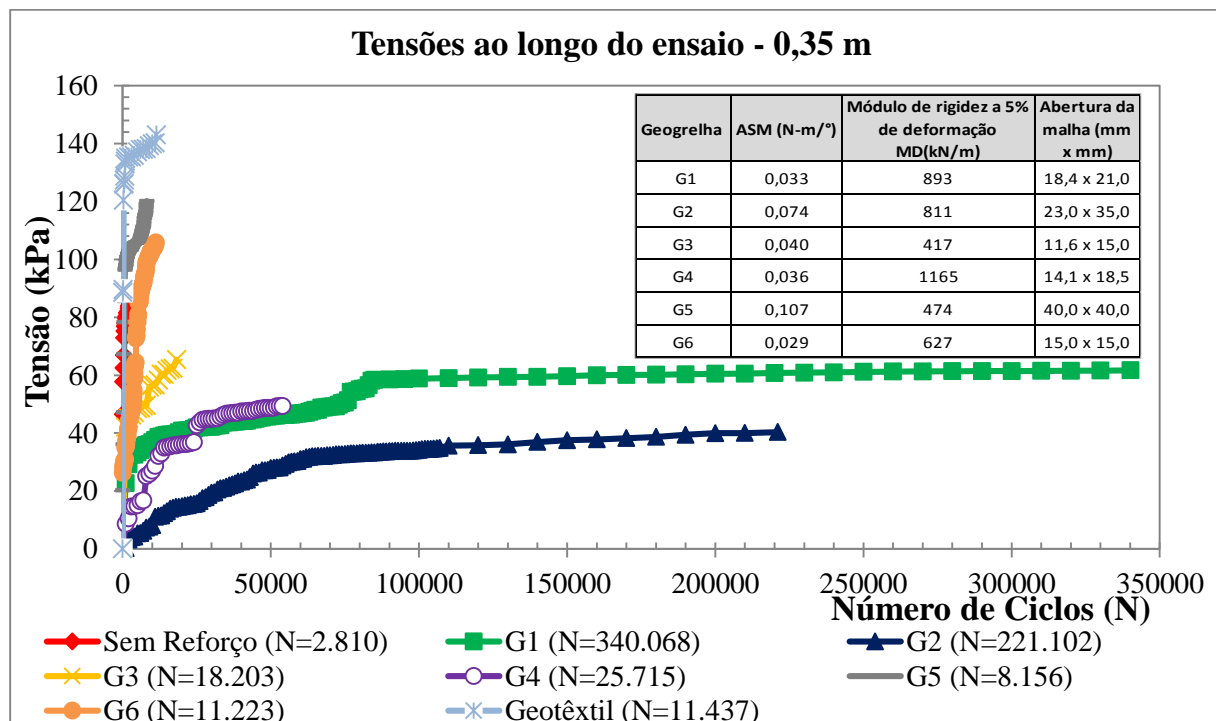


Figura 4.9 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,35 m *versus* o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Primeiro estágio de carga.

Na Figura 4.10 exibem-se as tensões transferidas para o subleito *versus* o número de de ciclos de carga para uma profundidade de 0,45 m a partir da superfície do aterro. Foi encontrado que as maiores tensões transferidas para o solo de subleito nesta profundidade foram as obtidas para as estradas reforçadas com as geogrelhas G5 e G6 e para a reforçada com o geotêxtil. Já as menores tensões transferidas continuaram sendo as das estradas reforçadas com as geogrelhas G1 e G2, de forma similar ao mostrado na Figura 4.8 para uma profundidade de 0,35m.

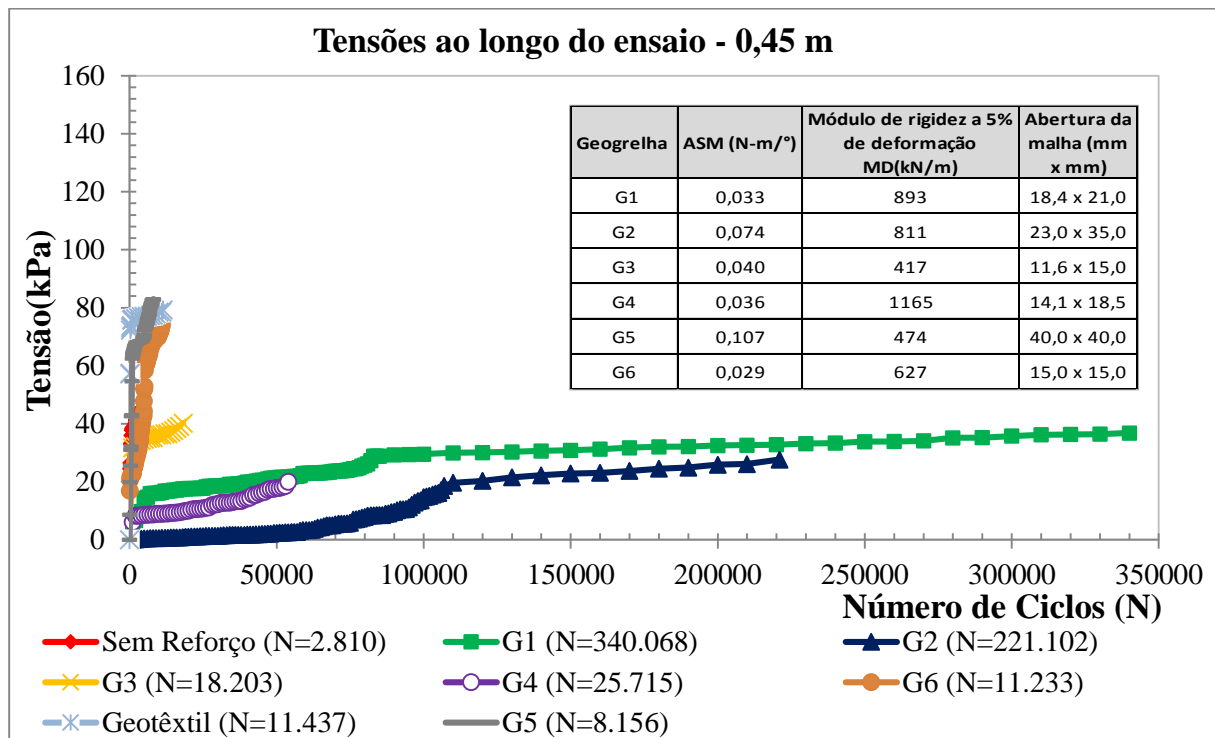


Figura 4.10 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,45 m *versus* o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Primeiro estágio de carga.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostraram as tensões transferidas para o subleito para as estradas reforçadas com as geogrelhas fabricadas no laboratório para profundidades de 0,35 m e 0,45 m a partir da superfície do aterro. A uma profundidade de 0,35 m (Figura 4.11) as estradas reforçadas com as geogrelhas GFC1 e GFV2 apresentaram as maiores tensões. Note-se que a estrada reforçada com a geogrelha GFC1 atingiu rapidamente altas tensões, provavelmente devido à alta quebra de grãos e a uma menor interação entre o material de aterro e o reforço. Já na profundidade de 0,45 m (Figura 4.12) as tensões mostradas pelos diferentes reforços aumentaram gradativamente e foram bastante próximas, excetuando as desenvolvidas nos ensaios com as geogrelhas GFC1 e GFV2 que foram bem maiores quando comparadas com as dos outros reforços.

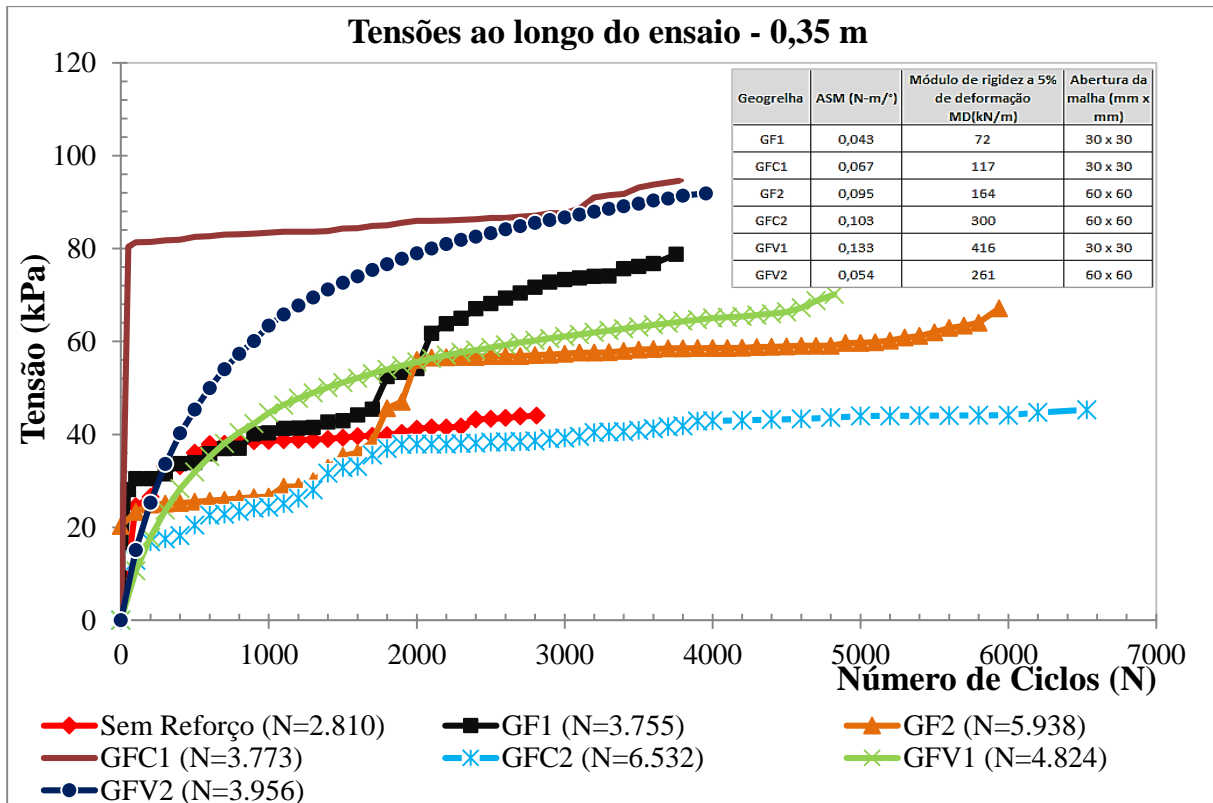


Figura 4.11 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,35 m versus o número de ciclos de carga para geogrelhas fabricadas– Primeiro estágio de carga.

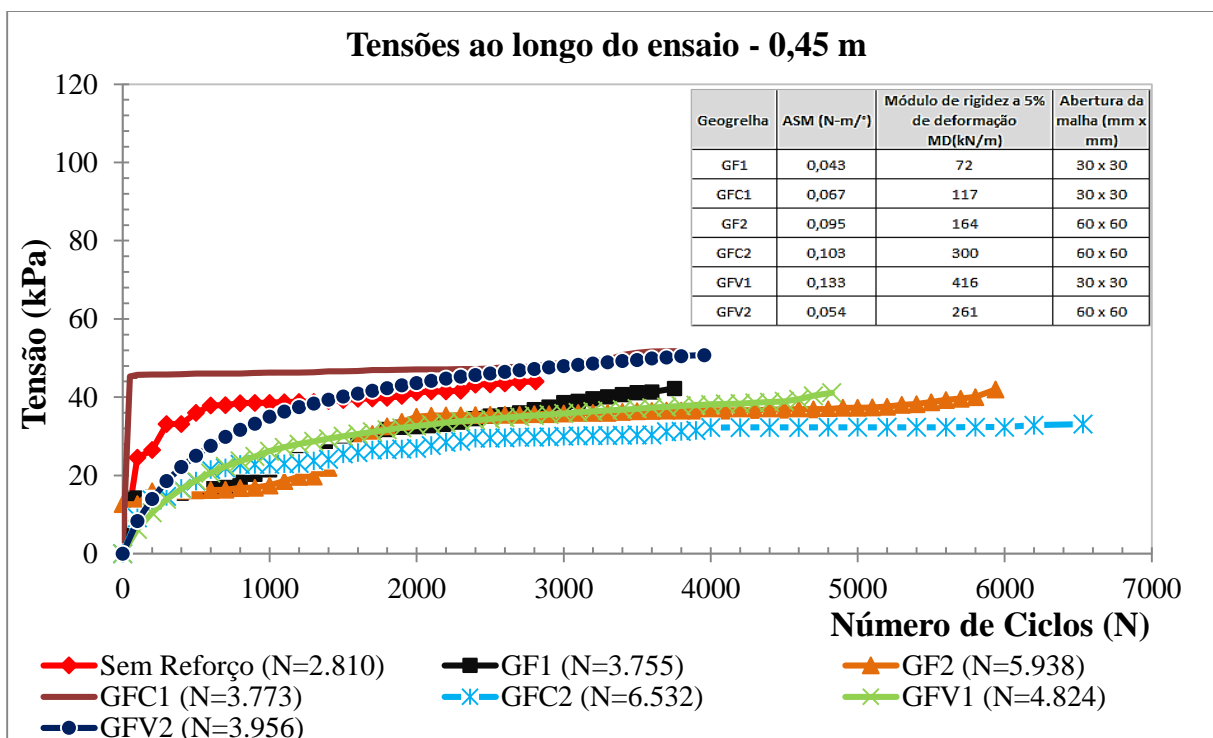


Figura 4.12 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,45 m versus o número de ciclos de carga para geogrelhas fabricadas– Primeiro estágio de carga.

Na Figura 4.13 mostram-se as variações das tensões totais com a profundidade no subleito em ensaios com reforços comerciais. Nota-se que as tensões para a estrada construída com as geogrelhas G1 e G3 foram similares ao final do ensaio para as duas profundidades analisadas. As tensões para a estrada reforçada com a geogrelha G5 e G6 e o geotêxtil foram as maiores medidas nos ensaios. Esse comportamento pode ser devido à quebra das partículas do aterro durante o ensaio e/ou menor interação reforço-aterro. Novamente, deve-se atentar para os diferentes valores de N em cada caso.

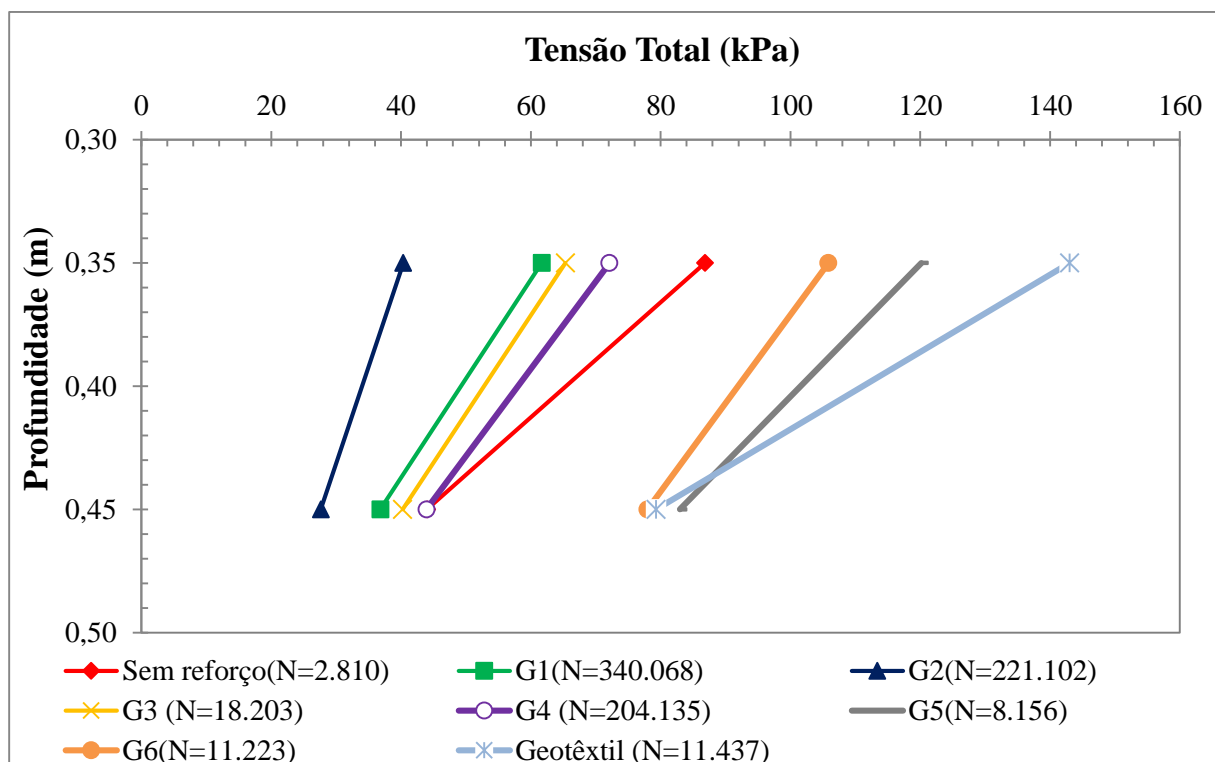


Figura 4.13 Tensões totais máximas *versus* profundidade para as estradas construídas com reforços comerciais - Primeiro estágio de carga.

A Figura 4.14 mostra as tensões totais *versus* a profundidade para as estradas reforçadas com as geogrelhas fabricadas. Observa-se que as tensões nos ensaios realizados com as geogrelhas GF1, GF2 e GFV1 são similares. A estrada que apresentou menores tensões foi a reforçada com a geogrelha GFC2.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 mostram-se as tensões totais *versus* a profundidade para N igual ao valor ao final do ensaio não reforçado. Observa-se grande variação entre as tensões medidas para as diferentes estradas. Percebe-se que as tensões para as estradas reforçadas com as geogrelhas G1, G2, G3, G4 e G6 foram significativamente menores comparada com as

apresentadas pela estrada sem reforço (Fig. 4.15). Na Figura 4.16 as tensões medidas são bem próximas para todas as geogrelhas fabricadas ensaiadas, excetuando as exibidas pela estrada reforçada com a geogrelha GFC2, que são bem menores.

Deve-se notar que os resultados obtidos pelas células de tensões podem ter sido afetados pelos seus deslocamentos durante o ensaio. O desalinhamento da célula em relação à sua posição inicial por compressão do subleito pode certamente influenciar os valores medidos. Estes podem ser os casos de ensaios reforçados cujas células de tensões apresentam valores medidos maiores que os da estrada sem reforço.

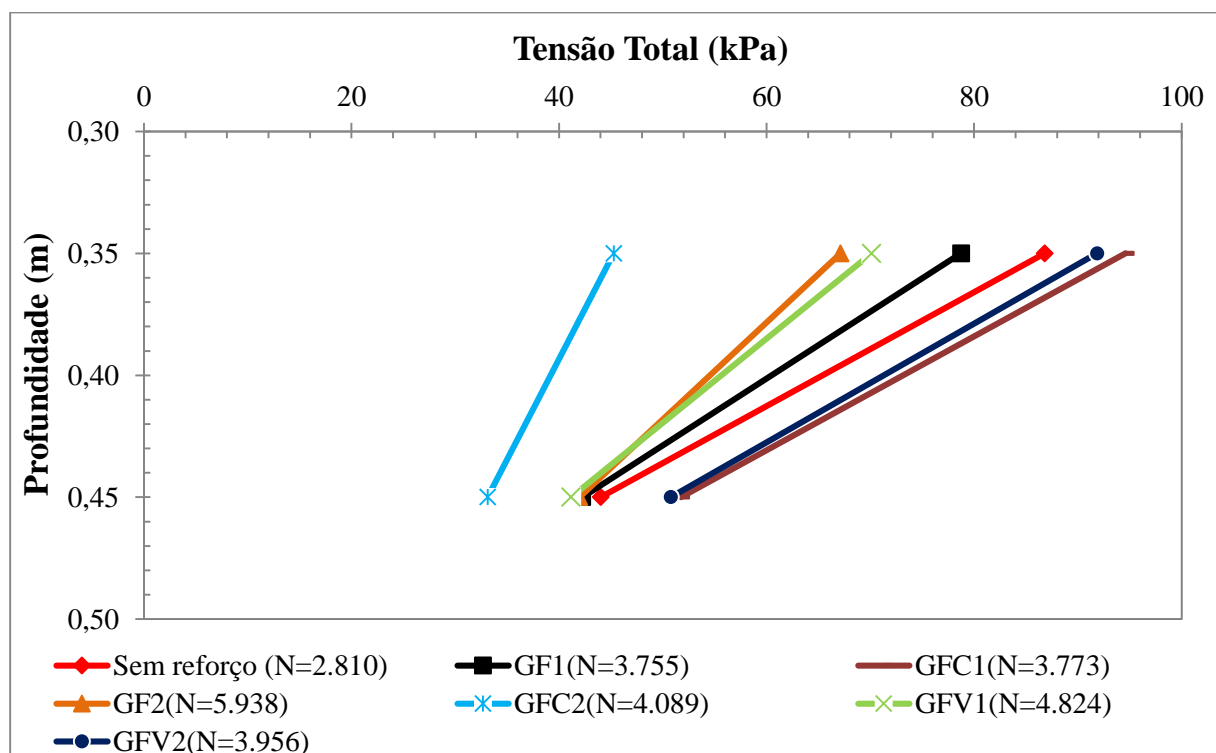


Figura 4.14 Tensões totais máximas *versus* profundidade para as estradas construídas com geogrelhas fabricadas - Primeiro estágio de carga.

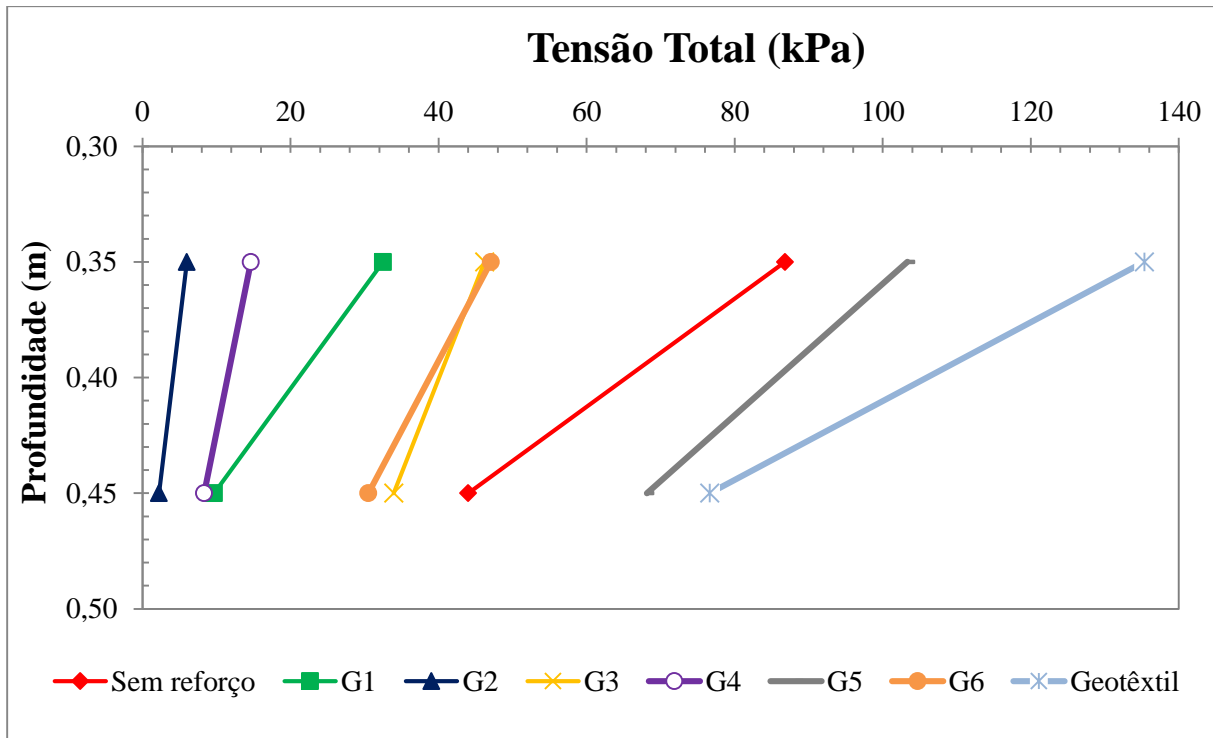


Figura 4.15 Tensões totais máximas para as estradas construídas com reforços comerciais *versus* profundidade - Primeiro estágio de carga. Para $N = 2.810$ (ao final do ensaio não reforçado).

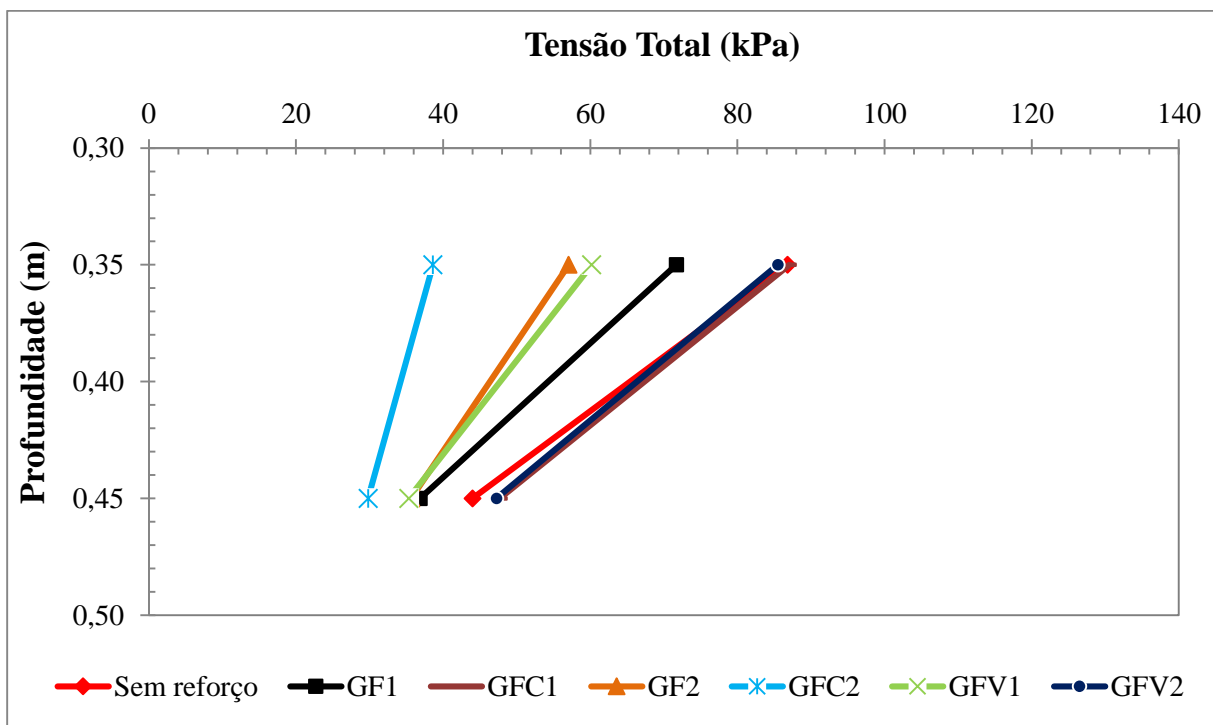


Figura 4.16 Tensões totais máximas para as estradas construídas com geogrelhas fabricadas *versus* profundidade - Primeiro estágio de carga. Para $N = 2.810$ (Ao final do ensaio não reforçado).

4.2 SEGUNDO ESTÁGIO DE CARGA

4.2.1 Análises dos deslocamentos no segundo estágio de carga

Na Figura 4.17 são mostrados os deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de repetições para o segundo estágio de carga e para os reforços existentes no mercado. Observa-se que as geogrelhas G1 e G2 foram as que apresentaram os menores deslocamentos até $N = 270.000$, quando foram finalizados os ensaios onde não se atingiu o afundamento de 75 mm. Também nota-se que neste estágio de carga a geogrelha que continuou mostrando o melhor comportamento foi a G1, como no 1º estágio de carga. As estradas reforçadas com as geogrelhas G5, G6, nesta fase do carregamento, suportaram maiores repetições de carga quando comparadas com seus desempenhos no primeiro estágio de carga.

A Figura 4.18 exibe os deslocamentos da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga para os ensaios realizados com os reforços fabricados no laboratório, após a restauração da superfície da estrada. Pode-se ver que as estradas que suportaram maiores números de ciclos de carga foram as reforçadas com as geogrelhas GF1, GFC2, GFV1 e GFV2. A estrada reforçada com a geogrelha GFC2 foi a que menor afundamento apresentou para $N = 270.000$ (aproximadamente 38 mm). Tal fato pode ser devido a uma adequada interação entre o reforço e o material de aterro (maior espessura dos membros). Das geogrelhas usadas, a que apresentou pior desempenho no 2º estágio de carga foi a geogrelha GF2, contrastando com o comportamento mostrado no estágio de carregamento anterior. Tal fato pode ser, em parte devido à quebra dos grãos das partículas de brita no estágio de carga anterior. As quebras de grãos serão melhor tratadas adiante nessa tese.

Na Figura 4.19 são apresentados os deslocamentos da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga suportados pelas estradas reforçadas com as geogrelhas comerciais para $N = 84.042$ (final do ensaio sem reforço no 2º estágio de carga). Nota-se que as geogrelhas G1 e G2 mostraram um comportamento similar em termos de deslocamento até $N = 84.042$. Já a estrada sem reforço mostra uma mudança de comportamento brusca para $N = 45.932$, devido a uma maior intensidade de quebra dos grãos nessa fase do ensaio. As estradas reforçadas com G3 e com o geotêxtil atingiram um deslocamento de aproximadamente 57 mm para o mesmo valor de N da estrada sem reforço. Já as estradas reforçadas com as geogrelhas G4, G5 e G6 apresentaram deslocamentos entre 35 e 41 mm para o $N = 84.042$.

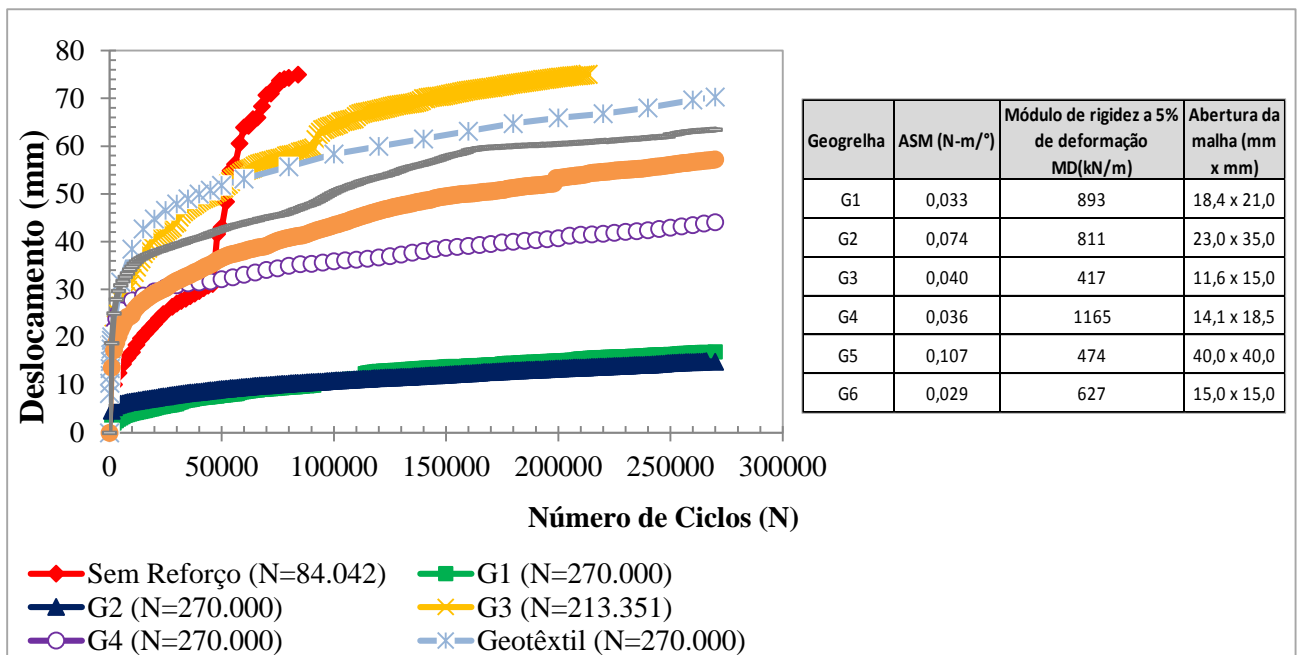


Figura 4.17 Deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Segundo estágio de carga.

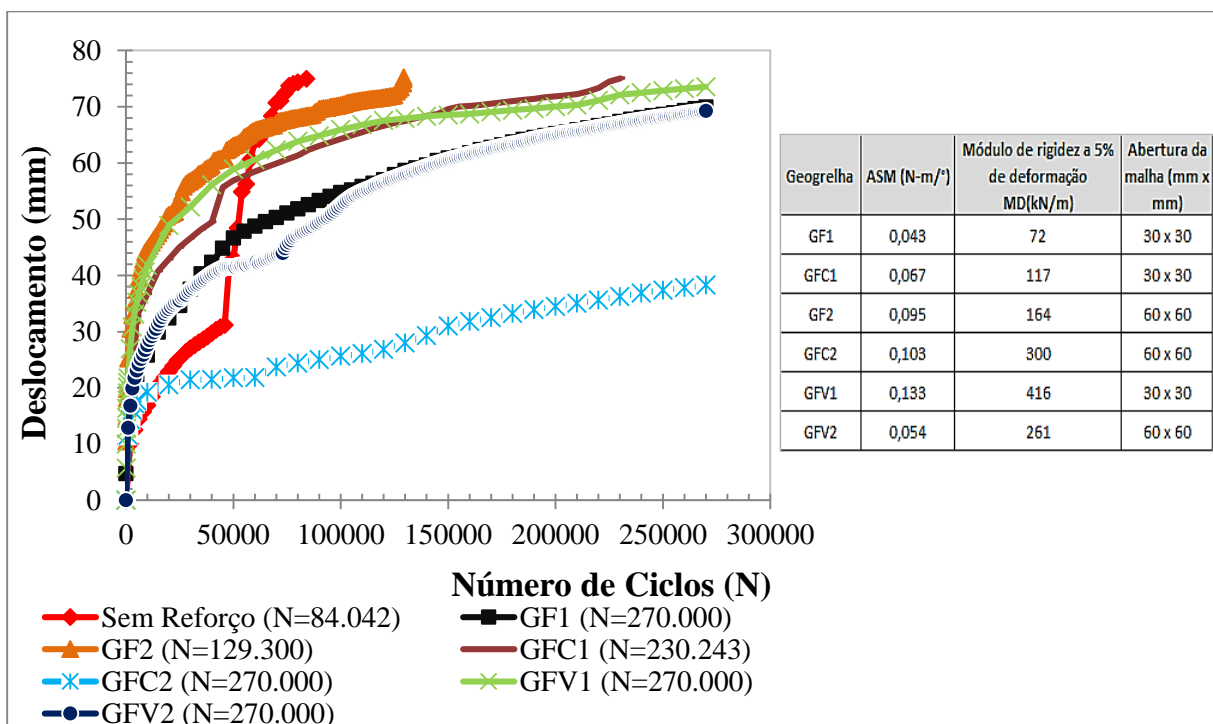


Figura 4.18 Deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga para geogrelhas fabricadas– Segundo estágio de carga.

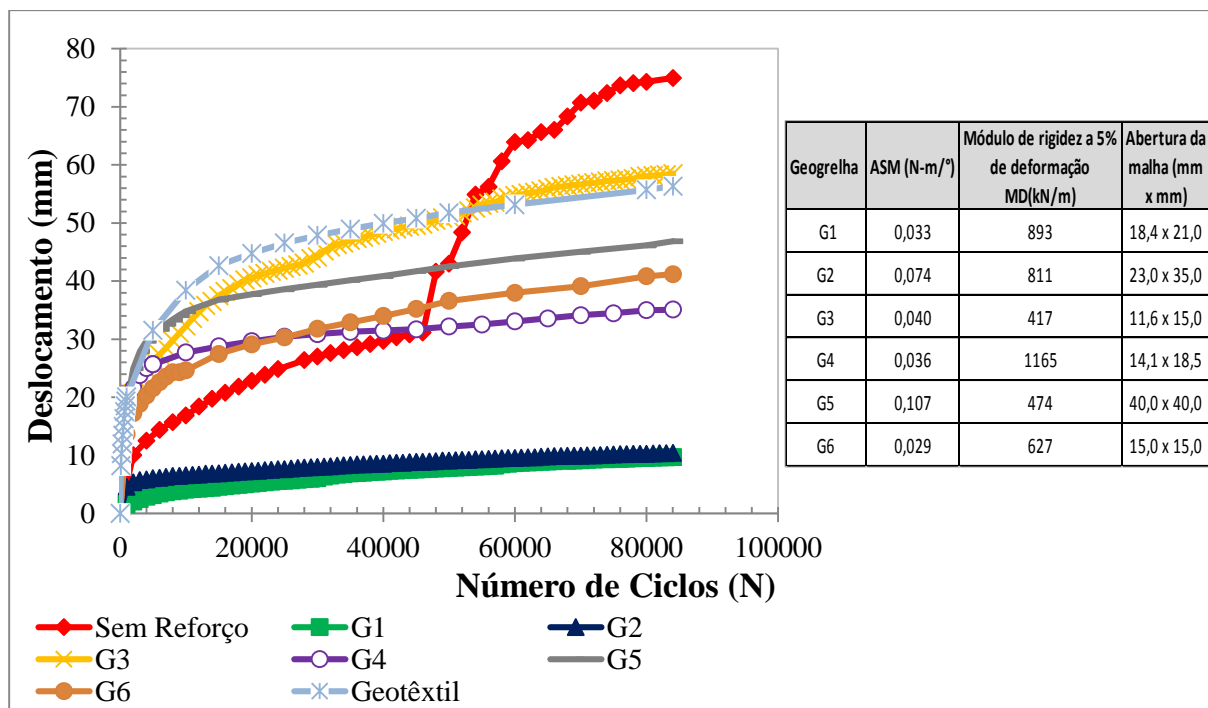


Figura 4.19 Deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga para geogrelhas comerciais – Segundo estágio de carga. Para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço).

A Figura 4.20 mostra deslocamentos da placa *versus* o número de ciclos de carga suportados pelas estradas com os reforços fabricados para N = 84.042. As estradas reforçadas com as geogrelhas GFC1, GF2 e GV1, apresentaram deslocamentos entre 62 e 68 mm para N= 84.042. A estrada reforçada com a geogrelha GFC2 foi a que apresentou menor afundamento (24,5 mm), pelo menos até o final do ensaio sem reforço. Esse bom desempenho foi também observado no 1º estágio de carga.

Nas Figuras 4.21 e 4.22 são mostrados os perfis de deslocamentos para as geogrelhas existentes comercialmente e para as fabricadas. Note-se que para distâncias ao centro da placa de 0,2 e 0,3 m os deslocamentos para todas as estradas foram bem próximos (Figura 4.21). As superfícies dos aterros reforçados com as geogrelhas G4, G5 e G6 elevaram-se ligeiramente, como aconteceu no primeiro estágio de carga, em consequência da dilatação da brita. A uma distância ao centro da placa de 0,1 m as estradas reforçadas com as geogrelhas G1 e G2 não atingiram o deslocamento de 75 mm, quando comparadas com os outros reforços usados. Os deslocamentos obtidos a diferentes distâncias da placa para os reforços fabricados foram similares, a exceção da estrada reforçada com a geogrelha GFC2, como mostra a Figura 4.22.

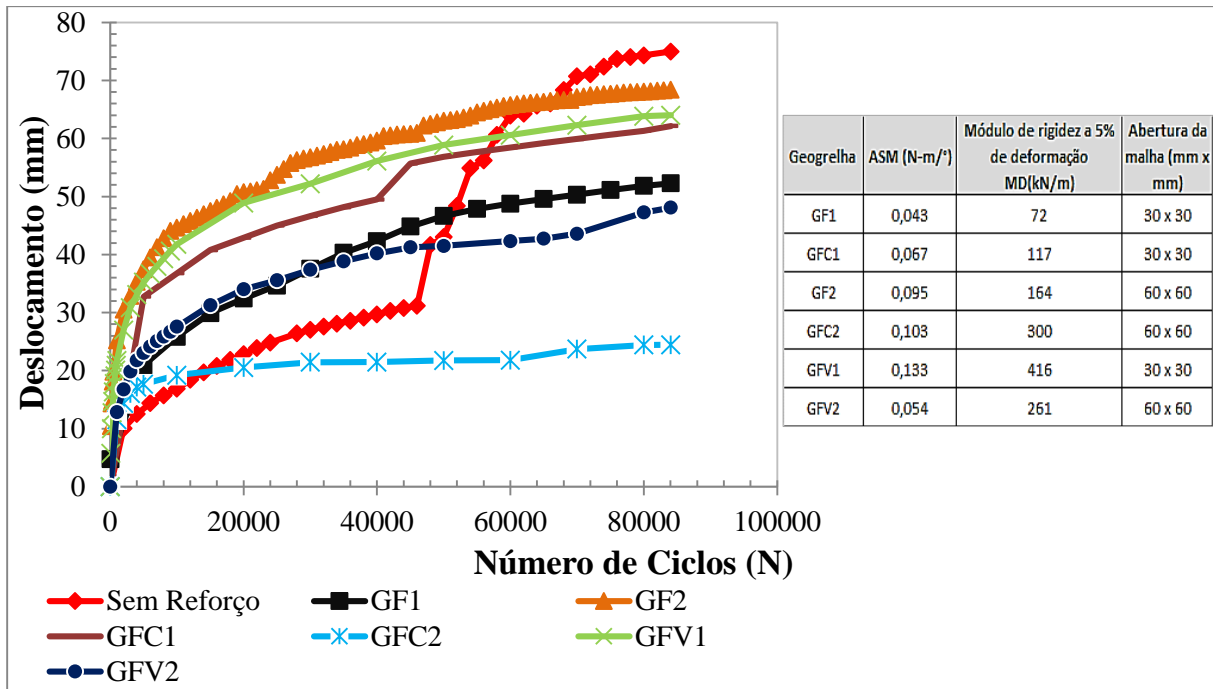


Figura 4.20 Deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga para geogrelhas fabricadas – Segundo estágio de carga. Para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço).

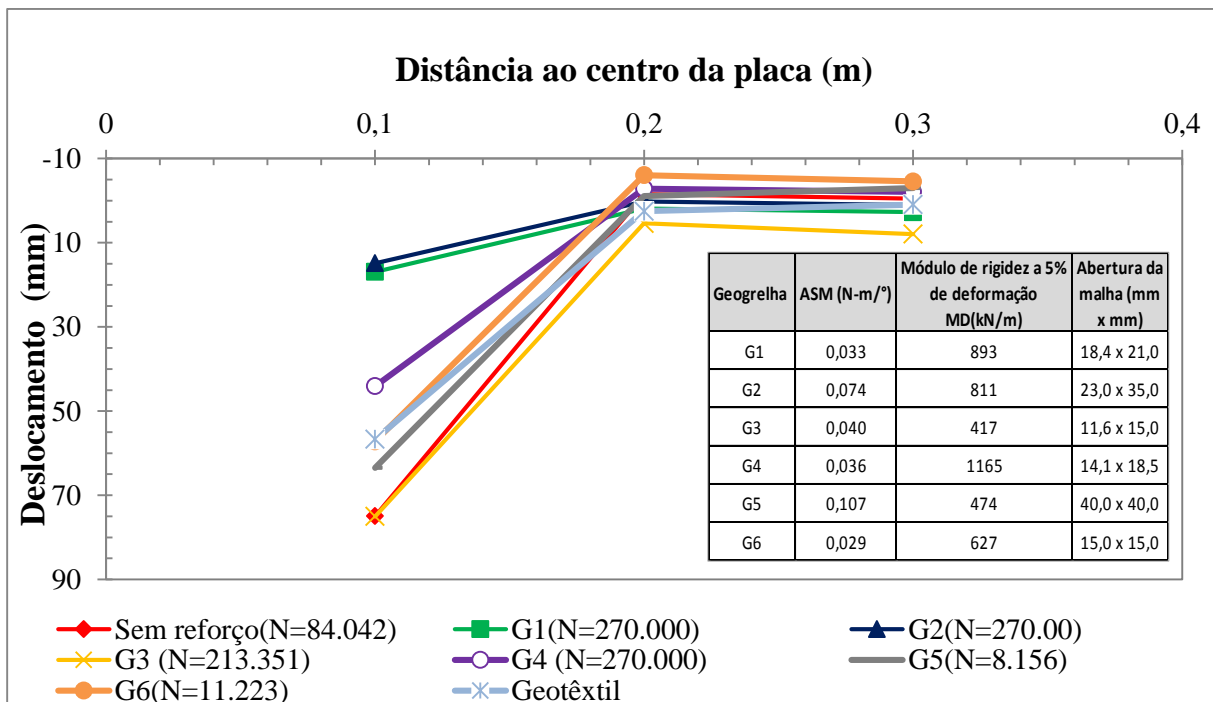


Figura 4.21 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para reforços comerciais - Segundo estágio de carga.

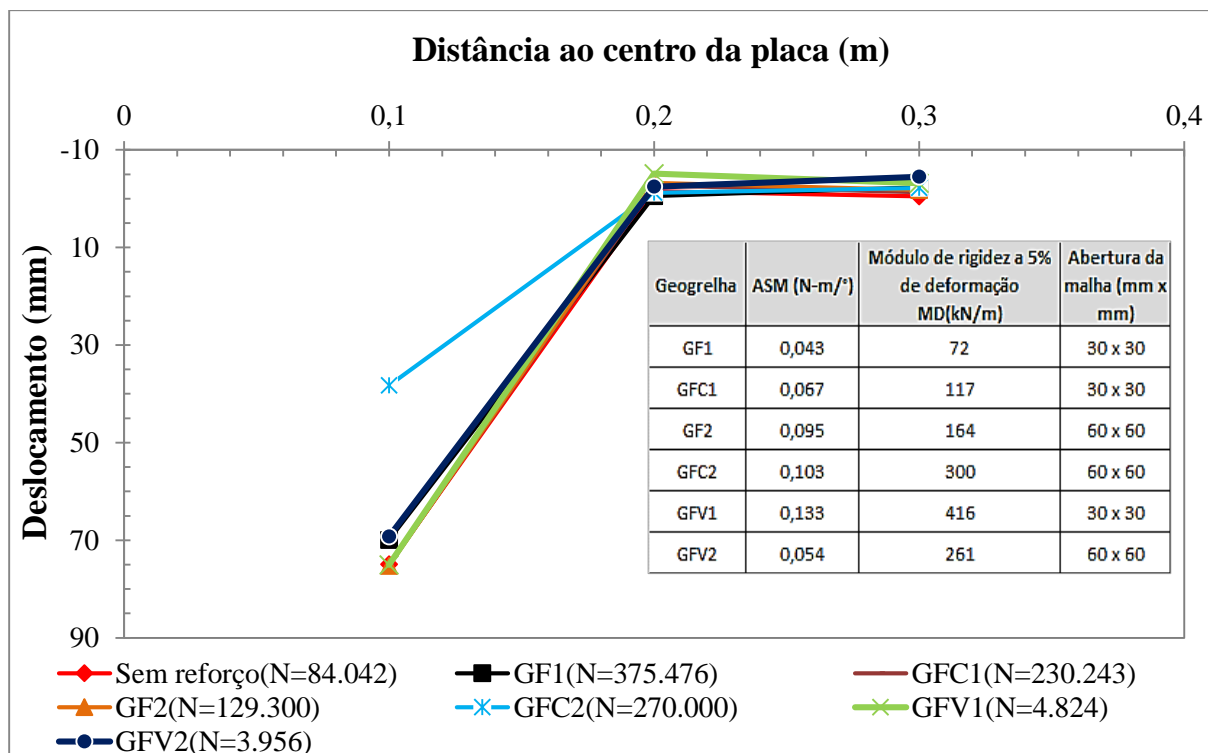


Figura 4.22 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para geogrelhas fabricadas - Segundo estágio de carga.

A Figura 4.23 apresenta os perfis de deslocamento *versus* o número de repetições de carga para as geogrelhas comerciais para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço). Neste gráfico é possível ver que os perfis de deslocamentos das estradas reforçadas com as geogrelhas G1 e G2 foram menores que os de estradas com outros reforços, como observado no 1º estágio de carga.

Na Figura 4.24 são mostrados os perfis de deslocamentos para as geogrelhas fabricadas em laboratório *versus* as repetições de carga aplicadas para N = 84.042, podendo-se notar que os deslocamentos foram similares nos pontos a 0,2 m e a 0,3m do centro da placa para todas as geogrelhas. A estrada que continuou apresentando menores deslocamentos até o final do ensaio sem reforço foi a reforçada com a geogrelha GFC2.

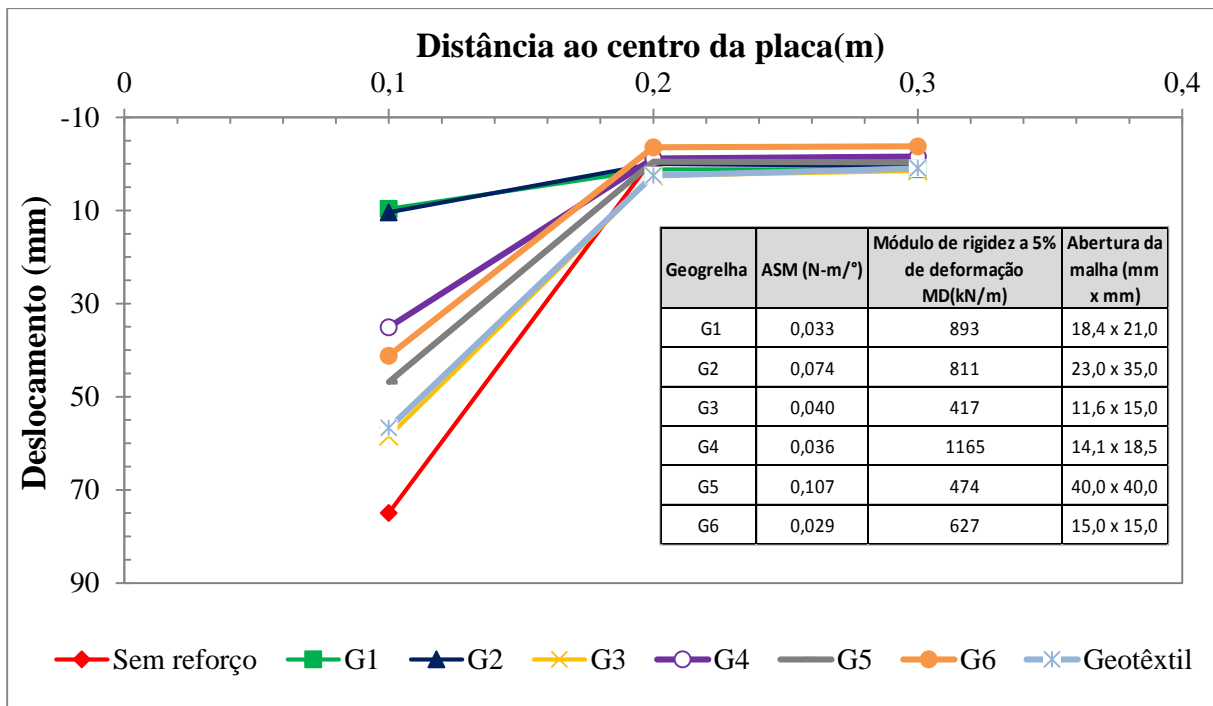


Figura 4.23 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para reforços comerciais - Segundo estágio de carga. Para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço).

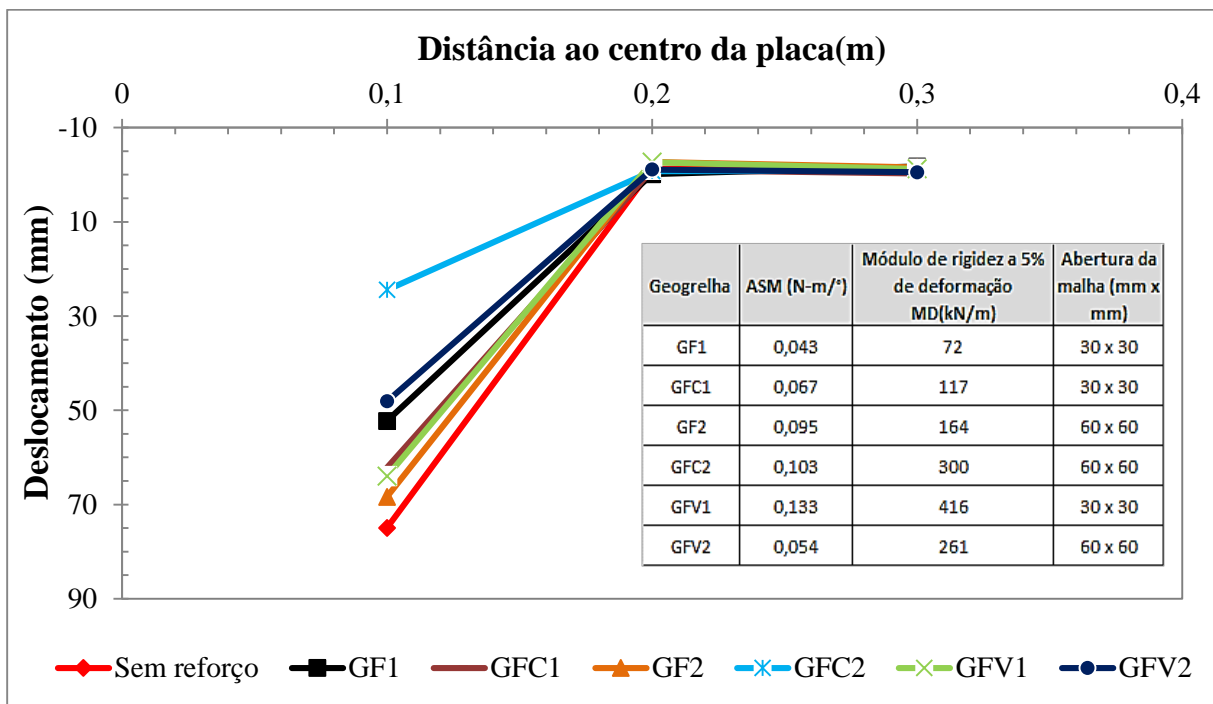


Figura 4.24 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para geogrelhas fabricadas - Segundo estágio de carga. Para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço).

4.2.2 Fator de eficiência calculado para cada um dos reforços – segundo estágio de carga

Em alguns ensaios reforçados não se atingiu o afundamento da placa máximo de 75 mm no segundo estágio de carga. Tal fato compromete o cálculo de E para estes ensaios. Assim, como forma de contornar o problema, propõe-se um cálculo de fator de eficiência modificado (E^*), que leva em conta o afundamento da placa e o número de repetições de carga quando da interrupção do ensaio sem reforço. Assim, tem-se:

$$E^* = \frac{N_r \rho_u}{N_u \rho_r} \quad (4.1)$$

Onde E^* é o fator de eficiência modificado, N_r é o número de repetições de carga no ensaio reforçado quando da sua interrupção, N_u é o número de repetições de carga ao final do ensaio sem reforço, ρ_u afundamento da placa ao final do ensaio sem reforço ($\rho_u = 75$ mm) e ρ_r é o afundamento da placa no ensaio reforçado quando da sua interrupção.

A Tabela 4.2 apresenta os valores de E e de E^* obtidos no segundo estágio de carga para os ensaios realizados.

Tabela 4.2 Fatores de eficiência obtidos para as geogrelhas empregadas – Primeiro estágio de carga.

Reforço	Nr	Nu	E	E*
G1	270.000	84.042	—	14,23
G2	270.000	84.042	—	16,20
G3	213.351	84.042	2,54	—
G4	270.000	84.042	—	5,47
G5	270.000	84.042		3,80
G6	270.000	84.042		4,21
Geotêxtil	270.000	84.042	—	4,11
GF1	270.000	84.042	—	3,44
GFC1	230.243	84.042	2,74	—
GF2	129.300	84.042	1,54	—
GFC2	270.000	84.042	—	6,29
GFV1	270.000	84.042	—	3,28
GFV2	270.000	84.042	—	3,48

Com os resultados encontrados, foi possível constatar que a geogrelha que melhor desempenhou seu papel de reforço no segundo estágio de carga foi a geogrelha G2, com resultado ligeiramente superior ao apresentado pela geogrelha G1. Das geogrelhas fabricadas a que resultou em maior número de ciclos de carga foi a geogrelha GFC2, que suportou aproximadamente 6 vezes mais que a estrada não reforçada, seguida pela estrada reforçada com a geogrelha GF1.

4.2.3 Tensões totais no segundo estágio de carga

Na Figura 4.25 são mostradas as tensões totais a 5 cm de profundidade no subleito durante o segundo estágio de carga, para as geogrelhas comerciais. De acordo com o gráfico, tem-se que as maiores tensões foram encontradas no ensaio reforçado com a geogrelha G1. A estrada que mostrou menores valores de tensão nesta profundidade foi a reforçada com a geogrelha G2. Tensões similares foram obtidas para as estradas reforçadas com as geogrelhas G3, G5 e para o geotêxtil.

A Figura 4.26 mostra as tensões transferidas para o subleito no segundo estágio de carregamento para uma profundidade de 0,45 m a partir da superfície do aterro (0,15 m a partir da superfície do subleito). As maiores tensões foram medidas nas estradas reforçadas com o geotêxtil e com a geogrelha G5. Já tensões menores foram exibidas pela estrada reforçada com a geogrelha G2, comportamento similar ao apresentado no primeiro estágio de carga.

Nas Figura 4.27 e 4.28 exibem-se as tensões no subleito para as estradas reforçadas com as geogrelhas fabricadas no laboratório, para profundidades de 0,35 m e 0,45 m a partir da superfície do aterro. Destaca-se que a estrada que apresentou menores valores de tensão no subleito foi a reforçada com a geogrelha GFC2. A estrada reforçada com a geogrelha GF2 apresentou aumentos bruscos de tensões para $N = 15.000$, talvez resultante de movimentação das células ou problemas com as mesmas (Figuras 4.27 e 4.28). As estradas reforçadas com as geogrelhas GFV1 e GFV2 mostraram tensões similares para $N = 270.000$ (Figura 4.28).

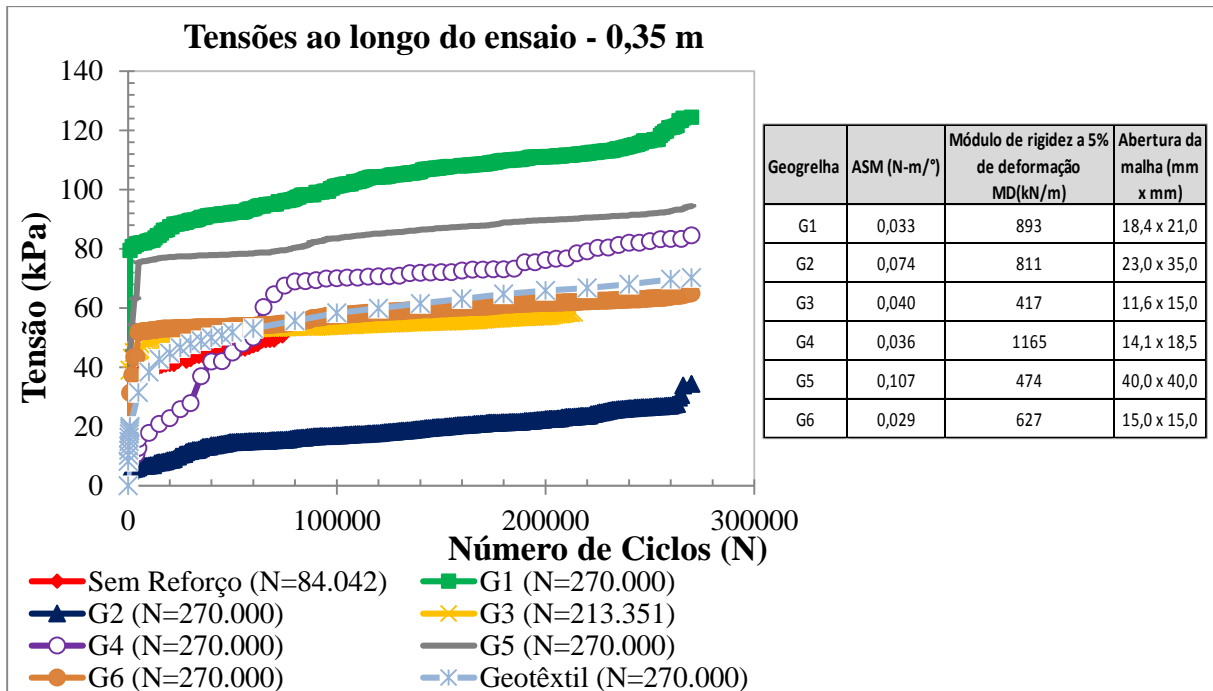


Figura 4.25 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,35 m *versus* o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Segundo estágio de carga.

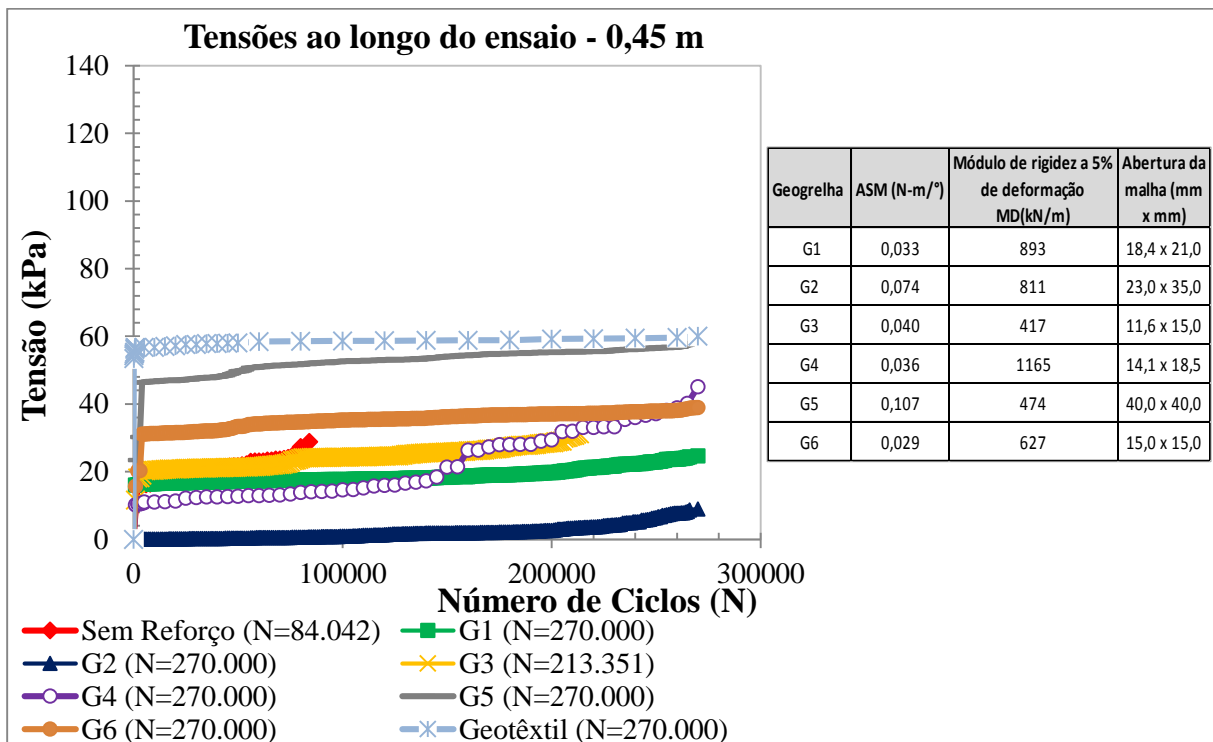


Figura 4.26 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,45 m *versus* o número de ciclos de carga para reforços comerciais– Segundo estágio de carga.

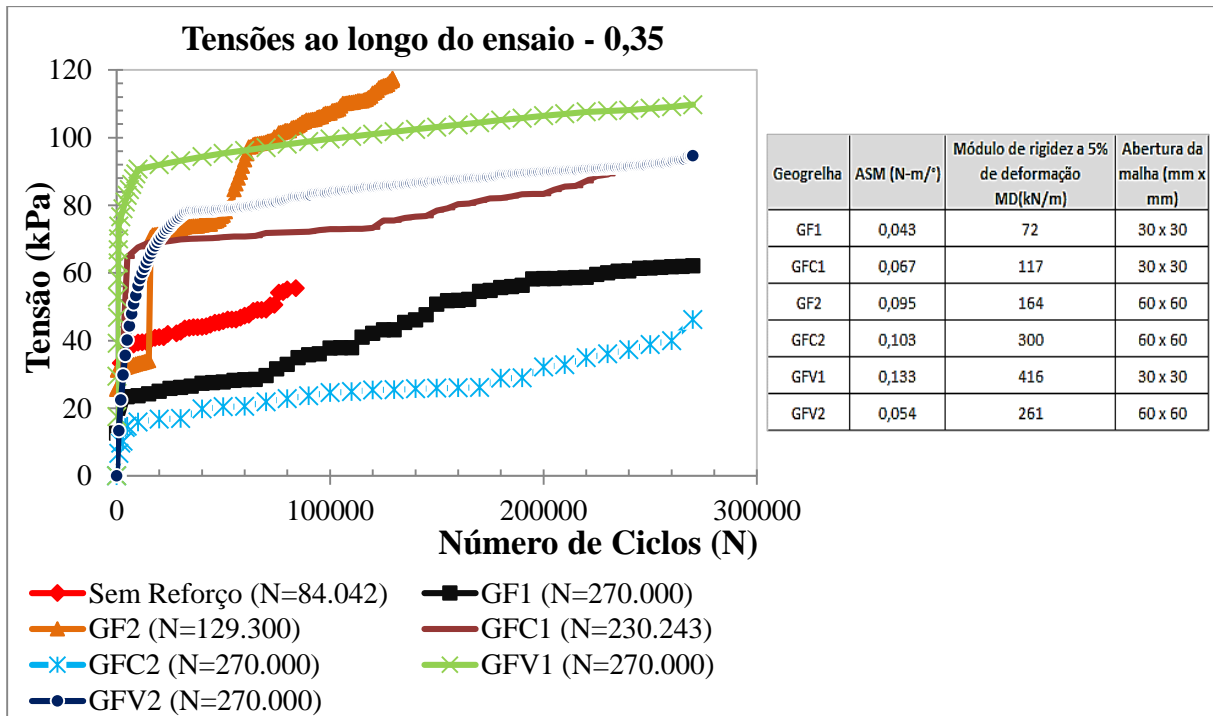


Figura 4.27 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,35 m *versus* o número de ciclos de carga para reforços fabricados– Segundo estágio de carga.

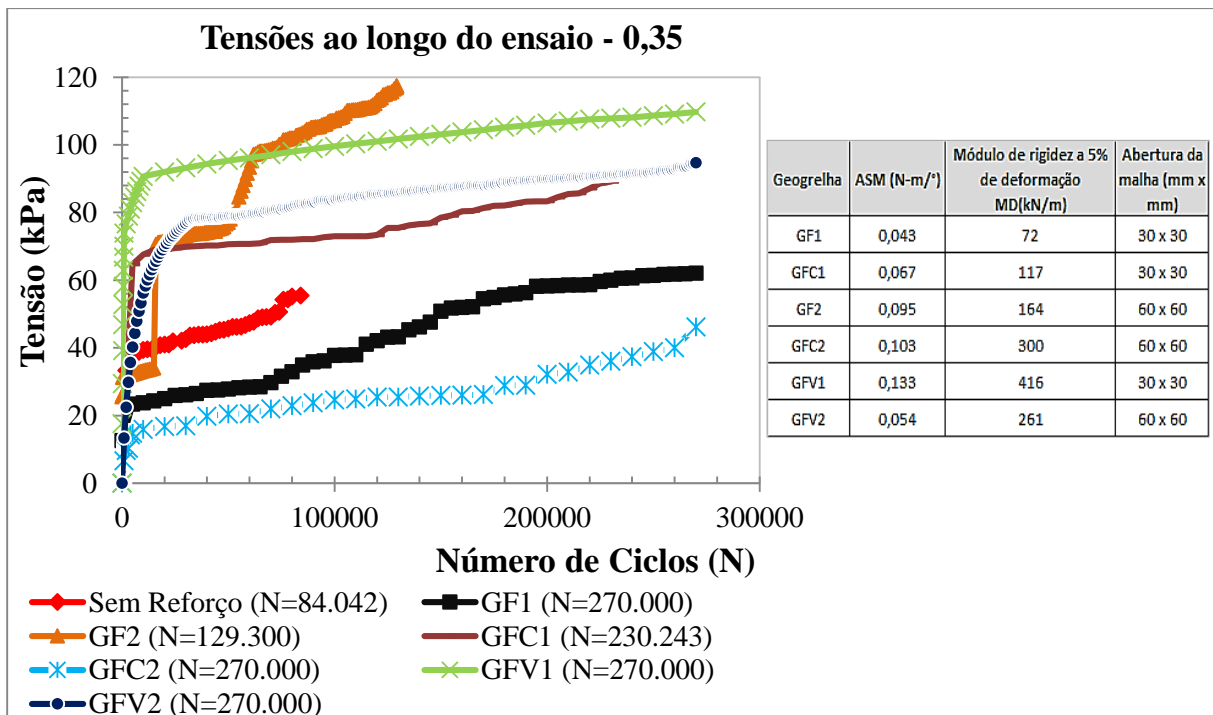


Figura 4.28 Tensões totais transferidas para o subleito para uma profundidade de 0,45 m *versus* o número de ciclos de carga para reforços fabricados– Segundo estágio de carga.

Na Figura 4.29 mostram-se as variações das tensões totais com a profundidade para os ensaios onde foram empregados reforços comerciais. O ensaio onde foi usada a geogrelha G3 como reforço mostrou tensões similares as do ensaio sem presença de reforço. As tensões obtidas na estrada reforçada com a geogrelha G1 mudam drasticamente da profundidade de 0,05m para a de 0,15 m, decorrente talvez de algum problema nas células de tensões utilizadas nesse ensaio.

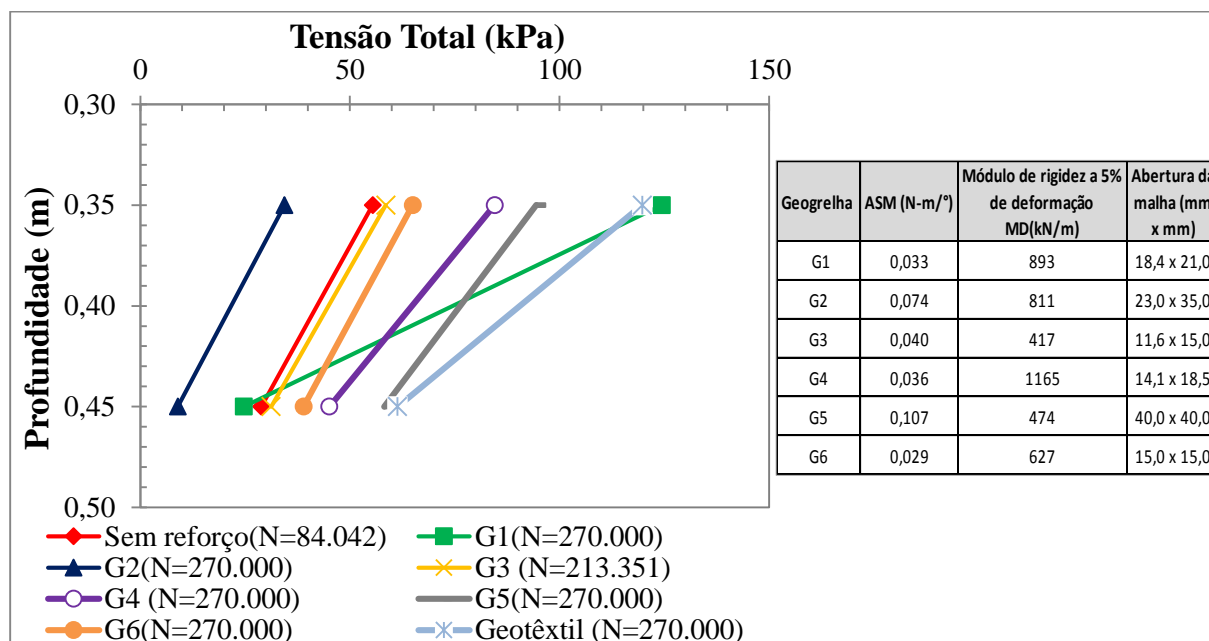


Figura 4.29 Tensões totais máximas *versus* profundidade para as estradas construídas com reforços comerciais - Segundo estágio de carga.

A Figura 4.30 mostra as variações de tensões totais com a profundidade para as estradas reforçadas com as geogrelhas fabricadas. Observa-se que as tensões nos ensaios realizados com as geogrelhas GFV1 e GF2 foram similares, apesar que estes apresentaram comportamentos distintos em termos de número de repetições de carga. A estrada reforçada com a geogrelha GFC2 continuou apresentando tensões menores, como observado no primeiro estágio de carga.

Na Figura 4.31 são mostradas as tensões para as geogrelhas comerciais usadas para um N = 84.042, correspondente ao final do ensaio não reforçado no segundo estágio de carga. Percebe-se que as maiores tensões foram observadas nos ensaios com os reforços G1, G4 e G5, para uma profundidade de 0,15 m. Deve-se levar em conta que tais ensaios suportaram um número bem maior de repetições de carga. Pode-se ver que as menores tensões ocorreram na estrada reforçada com as geogrelhas G2 e G3 e na estrada sem uso de reforço.

Na Figura 4.32 são apresentadas as tensões totais máximas para as geogrelhas fabricadas *versus* a profundidade encontradas até $N = 84.042$. Nota-se que as maiores tensões foram as apresentadas pela estrada reforçada com GF2.

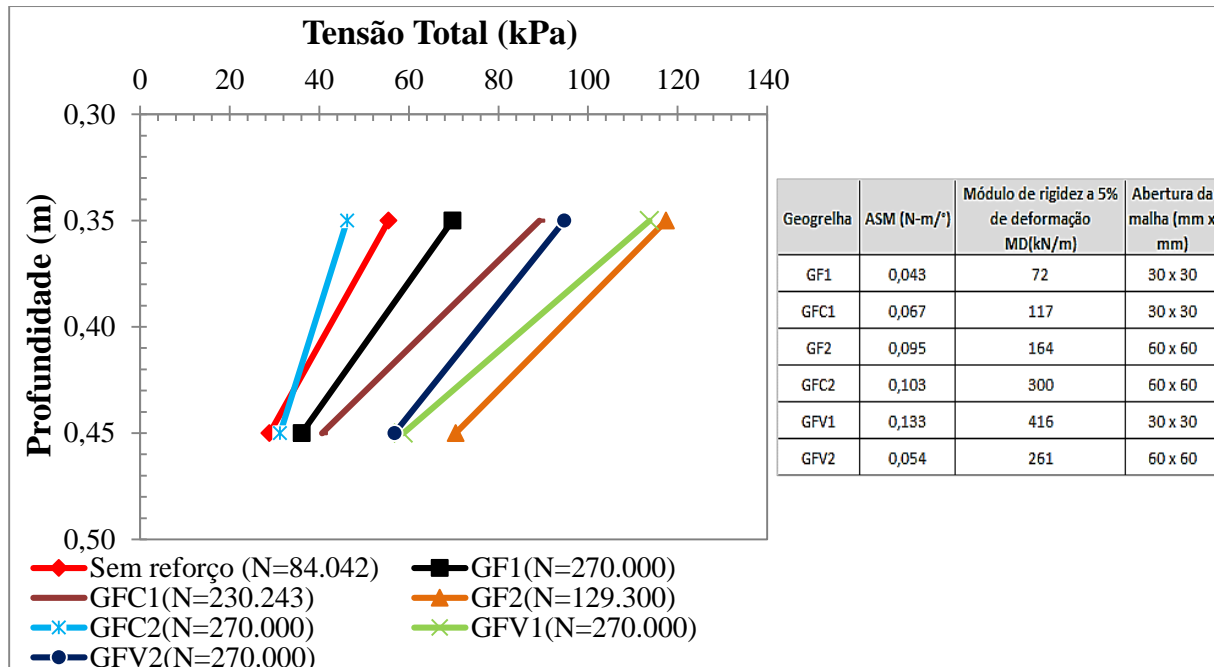


Figura 4.30 Tensões totais máximas *versus* profundidade para as estradas construídas com reforços fabricados - Segundo estágio de carga.

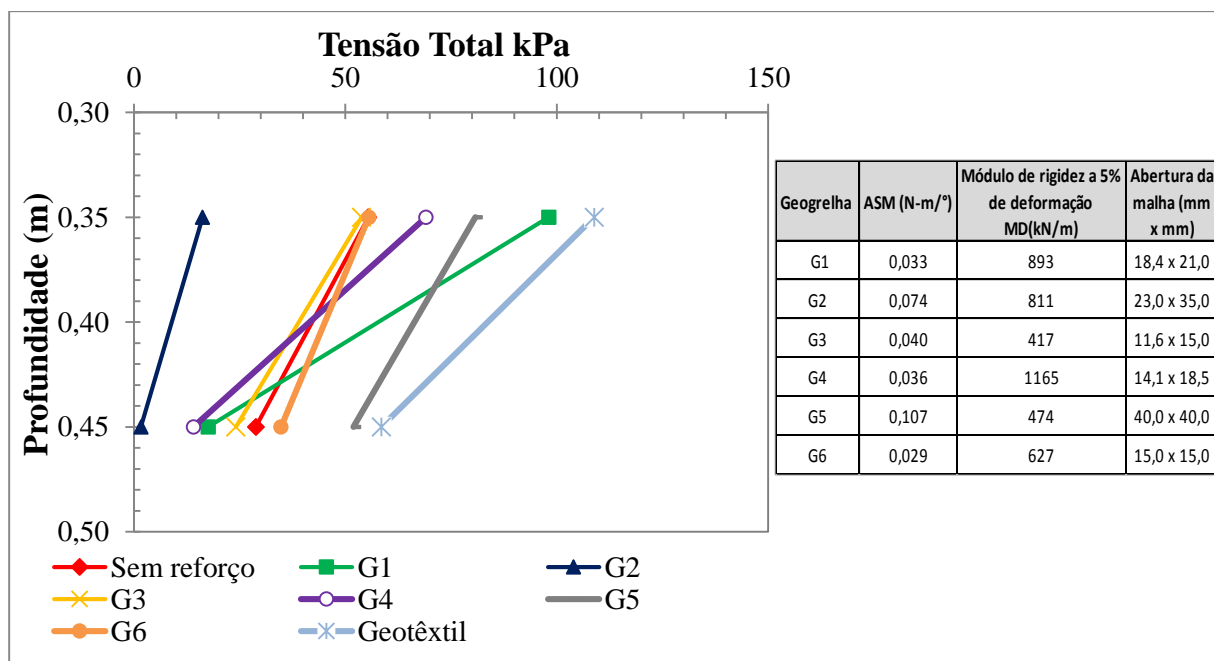


Figura 4.31 Tensões totais máximas *versus* profundidade para as estradas construídas com reforços comerciais - Segundo estágio de carga. Para $N = 84.042$ (final do ensaio sem reforço).

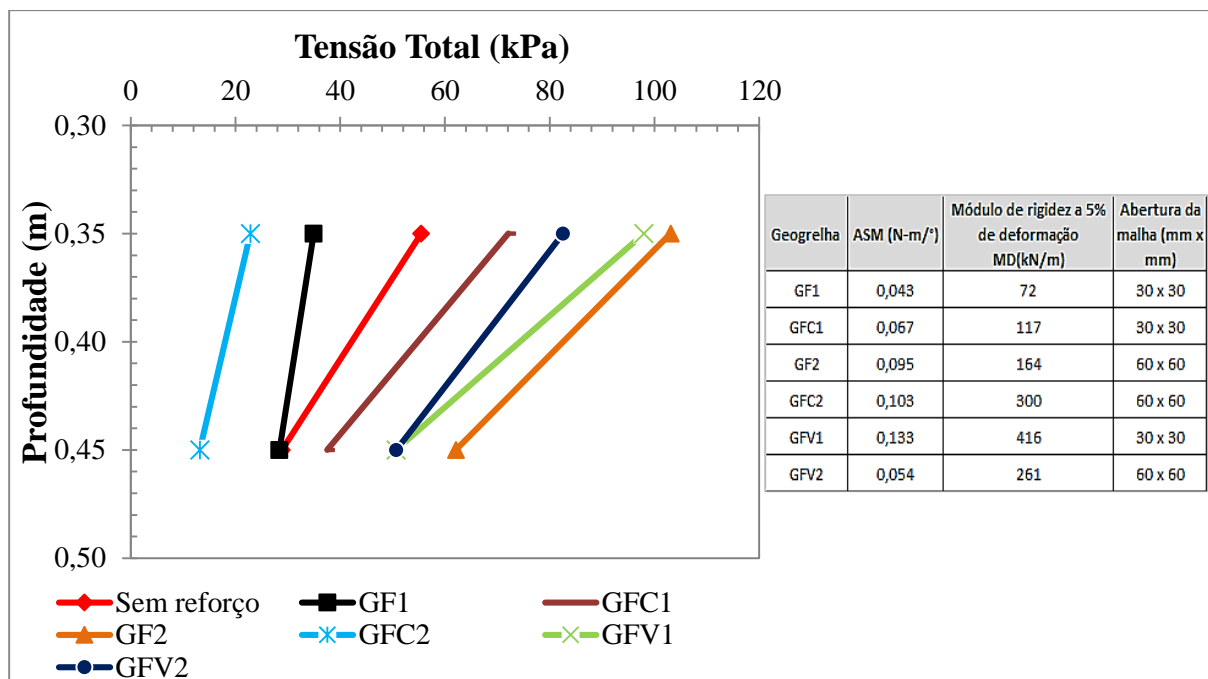


Figura 4.32 Tensões totais máximas *versus* profundidade para as estradas construídas com geogrelhas fabricadas - Segundo estágio de carga. Para N = 84.042 (final do ensaio sem reforço).

4.3 ANÁLISES DA QUEBRA DE GRÃOS DO MATERIAL DE ATERRO

Para cada um dos ensaios executados nesta pesquisa, foi avaliada a quebra de grãos após da finalização dos mesmos. Para o cálculo da quebra de partículas foi seguida a metodologia descrita no item 3.4 da presente tese. Na Tabela 4.3 são apresentados os índices de quebra obtidos ao final dos ensaios. Os resultados corroboram os comentários anteriores sobre a influência da quebra de grãos nos afundamentos da placa de carregamento. Com relação aos resultados obtidos de quebra dos grãos nos ensaios, nota-se que as maiores intensidades de quebra ocorreram no ensaio sem reforço, com um índice de quebra de aproximadamente 27%. Na maioria dos ensaios não se observou diferença significativa entre os valores de B_g na superfície do aterro e na interface com o reforço. Dos ensaios realizados com reforços existentes no mercado, a camada de aterro com maior valor de B_g foi a reforçada com a geogrelha G5, com um índice de 18,2%. Outra que apresentou um índice de quebra alto foi a estrada reforçada com a geogrelha G6, com um índice de 15,1%. Isso explica o fato dessa estrada ter suportado um menor número de repetições de carga no primeiro estágio de carga. No que se refere aos índices de quebra correspondentes às estradas reforçadas com as geogrelhas feitas em laboratório, pode-se dizer que as estradas onde foram empregadas as geogrelhas GF2 e GFV2,

exibiram índices de quebra médios de 15,9% e 12,3%, respectivamente. Com isso, percebe-se que as estradas sofreram quebra nos grãos do aterro e isso influenciou também o número de ciclos de carga para se atingir o afundamento máximo na superfície do aterro.

Tabela 4.3 Índice de quebra dos grãos ao final dos ensaios

ENSAIO	POSIÇÃO	ÍNDICE DE QUEBRA (Bg) %	MÉDIA (%)
Sem Reforço (SR)	1	25,3%	26,6%
	2	27,8%	
Geogrelha 1 (G1)	1	4,8%	4,5%
	2	4,2%	
Geogrelha 2 (G2)	1	5,1%	5,0%
	2	4,9%	
Geogrelha 3 (G3)	1	10,7%	10,8%
	2	11,0%	
Geogrelha 4 (G4)	1	8,1%	7,8%
	2	7,5%	
Geogrelha 5 (G5)	1	17,8%	18,2%
	2	18,5%	
Geogrelha 6 (G6)	1	14,7%	15,1%
	2	15,4%	
Geotêxtil	1	10,9%	12,4%
	2	13,9%	
Geogrelha Fabricada 1 (GF1)	1	7,4%	7,6%
	2	7,8%	
Geogrelha Fabricada Colada 1 (GFC1)	1	9,2%	11,2%
	2	13,1%	
Geogrelha Fabricada 2 (GF2)	1	15,3%	15,9%
	2	16,4%	
Geogrelha Fabricada Colada 2 (GFC2)	1	7,7%	7,9%
	2	8,1%	
Geogrelha Fabricada Verde 1 (GFV1)	1	8,9%	9,2%
	2	9,4%	
Geogrelha Fabricada Verde 2 (GFV2)	1	12,7%	12,3%
	2	11,9%	

4.4 ÂNGULO DE ESPRAIAMENTO DE TENSÕES PARA OS ENSAIOS REALIZADOS

Depois de finalizados os ensaios realizados foi medido o ângulo de espraio de tensões (β). O procedimento para a medição destes ângulos foi conforme descrito no item 3.5 dessa tese. A Tabela 4.4 apresenta os valores dos ângulos de espraio obtidos para os ensaios executados na pesquisa. Observa-se que os maiores ângulos foram medidos nos ensaios com presença de reforço.

Tabela 4.4 Valores de ângulos de espraio nos ensaios realizados

ENSAIO	ÂNGULO DE ESPRAIAMENTO
Sem Reforço	10,12
G1	19,23
G2	12,79
G3	20,14
G4	21,79
G5	11,07
G6	13,89
Geotêxtil	14,22
GF1	13,13
GFC1	14,04
GF2	12,46
GFC2	16,83
GFV1	14,95
GFV2	13,69

4.5 INFLUÊNCIA DE PROPRIEDADES RELEVANTES DOS REFORÇOS NOS RESULTADOS OBTIDOS

Para definir e interpretar melhor os resultados obtidos na pesquisa, foram elaborados gráficos comparativos em função de propriedades mecânicas relevantes dos reforços. As propriedades que tiveram influência sobre o desempenho das estradas investigadas foram: rigidez a tração dos reforços, módulo de estabilidade à abertura (ASM), relação entre a abertura equivalente e o diâmetro médio (D_{50}) dos grãos da brita e a fração de área sólida em planta da geogrelha.

Na Figura 4.33 é mostrada a variação do número de repetições de carga suportados pelas estradas *versus* a razão entre a abertura das geogrelhas e o diâmetro médio dos grãos do material de aterro ($\text{abertura}/D_{50}$). No caso de geogrelhas com aberturas retangulares a dimensão característica da abertura (abertura equivalente) foi determinada como sendo igual à média

geométrica dos lados da abertura, como sugerido por Khaja (2010). É possível observar na Figura 4.33 que para o material de aterro empregado nesta pesquisa existe uma relação ótima entre a abertura das malhas usadas e o diâmetro dos grãos do aterro de aproximadamente 2,0. Isso indica que para esta relação o aterro conseguiu interagir melhor com o reforço, conferindo maior capacidade de suporte à estrada. Na Tabela 4.5 são mostrados os dados empregados para a confecção do gráfico da Figura 4.33.

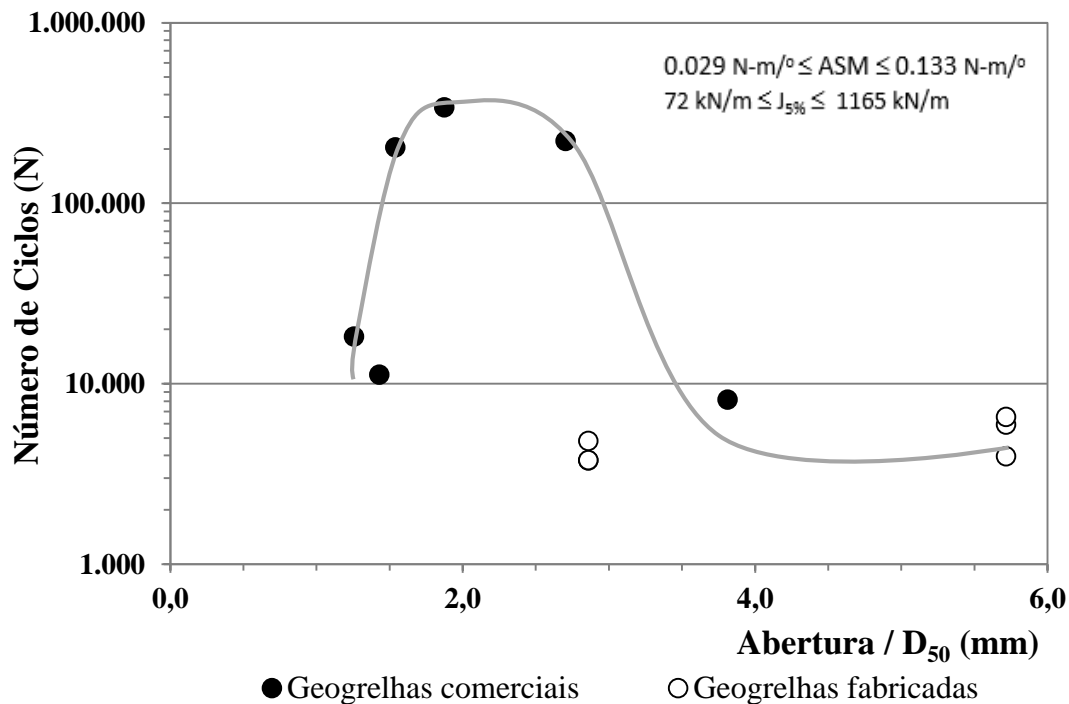


Figura 4.33 Relação de abertura / D₅₀ para as geogrelhas usadas na pesquisa *versus* número de repetições de carga – Primeiro estágio de carga

Na Figura 4.34 foram plotados os valores de número de repetições de carga para cada estrada *versus* os módulos de estabilidade à abertura (ASM) das geogrelhas usadas na pesquisa. A Tabela 4.6 mostra os dados usados para a confecção desta figura. No gráfico percebe-se que não existe uma tendência clara entre o ASM e o número de repetições de carga. Giroud e Han (2004), no seu método de projeto de estradas não pavimentadas, utilizaram esse parâmetro na calibração do método. Estes autores mencionam que reforços com valores de ASM maiores seriam mais eficientes. Os resultados encontrados neste trabalho permitem inferir de forma inicial que o ASM não tem relação com o comportamento mecânico da estrada. Desta forma, destaca-se que parâmetros como dimensão das aberturas e rigidez à tração da geogrelha têm mais relevância no que se refere ao desempenho da estrada como encontrado por Cuelho *et al* (2014).

Tabela 4.5 Relação de abertura equivalente/ D_{50} para os reforços usados na pesquisa.

Geogrelha	Abertura Eq./D_{50}	Número de ciclos (Primeiro estágio)
G1	1,872	340.068
G2	2,702	221.102
G3	1,256	18.203
G4	1,538	204.135
G5	3,810	8.156
G6	1,429	11.223
GF1	2,857	3.755
GFC1	2,857	3.773
GF2	5,714	5.938
GFC2	5,714	6.532
GFV1	2,857	4.824
GFV2	5,714	3.956

Tabela 4.6 Módulo de estabilidade à abertura (ASM) e número de repetições de carga para os reforços usados na pesquisa.

Geogrelha	Módulo (N-m^o)	Número de ciclos (Primeiro estágio)
G1	0,033	340.068
G2	0,074	221.102
G3	0,040	18.203
G4	0,036	204.135
G5	0,107	8.156
G6	0,029	11.223
GF1	0,043	3.755
GFC1	0,067	3.773
GF2	0,095	5.938
GFC2	0,103	6.532
GFV1	0,133	4.824
GFV2	0,054	3.956

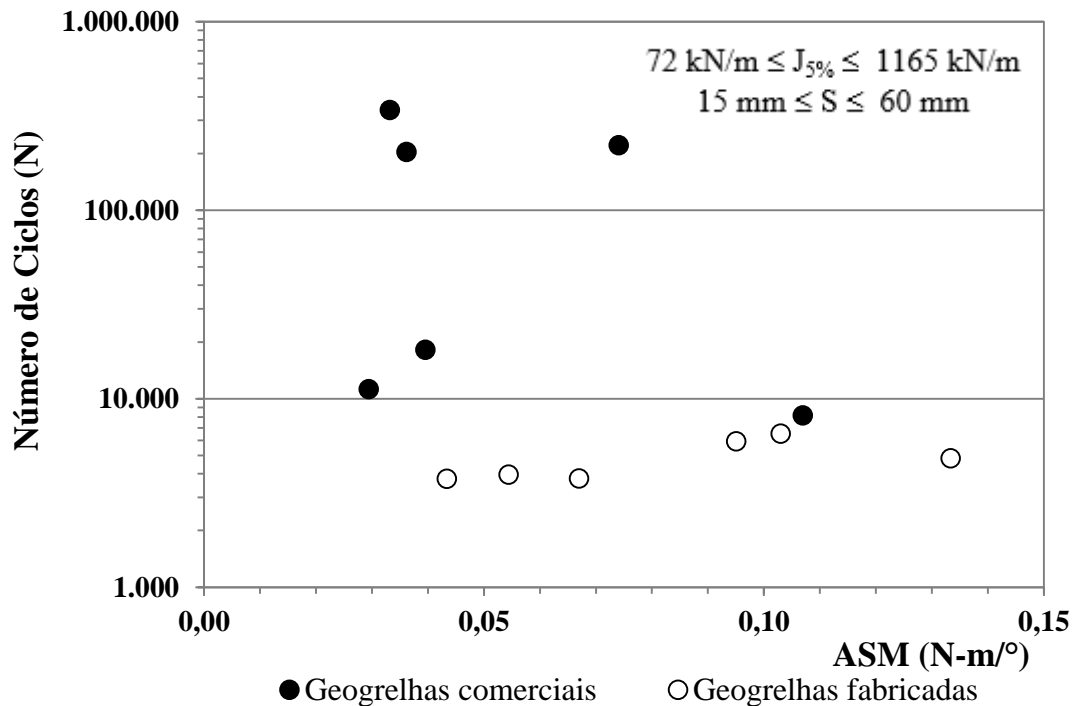


Figura 4.34 Módulo de estabilidade à abertura (ASM) *versus* número de ciclos – Primeiro estágio de carga.

A Figura 4.35 apresenta o número de ciclos de carga suportado pela estrada para cada um dos reforços empregados *versus* a rigidez à tração do reforço a 5% de deformação. Na Tabela 4.6 são apresentados os valores de rigidez à tração de cada um dos reforços usados e o número de ciclos de carga suportados pelas estradas simuladas. Na Figura 4.35 é possível observar que existe uma relação clara entre a rigidez à tração e número de repetições de carga suportado pela estrada. Em que pese a dispersão dos resultados, a relação é válida para todos os reforços empregados na pesquisa, sejam eles comerciais ou fabricados. A Figura 4.35 mostra também que a eficiência do reforço aumenta para valores de rigidez à tração superiores a 400 kN/m.

Para cada geogrelha utilizada como reforço foi também calculada a fração da área sólida em planta (α_s) disponível para atrito com o solo de aterro. Na Tabela 4.8 são mostrados os valores de α_s para os reforços.

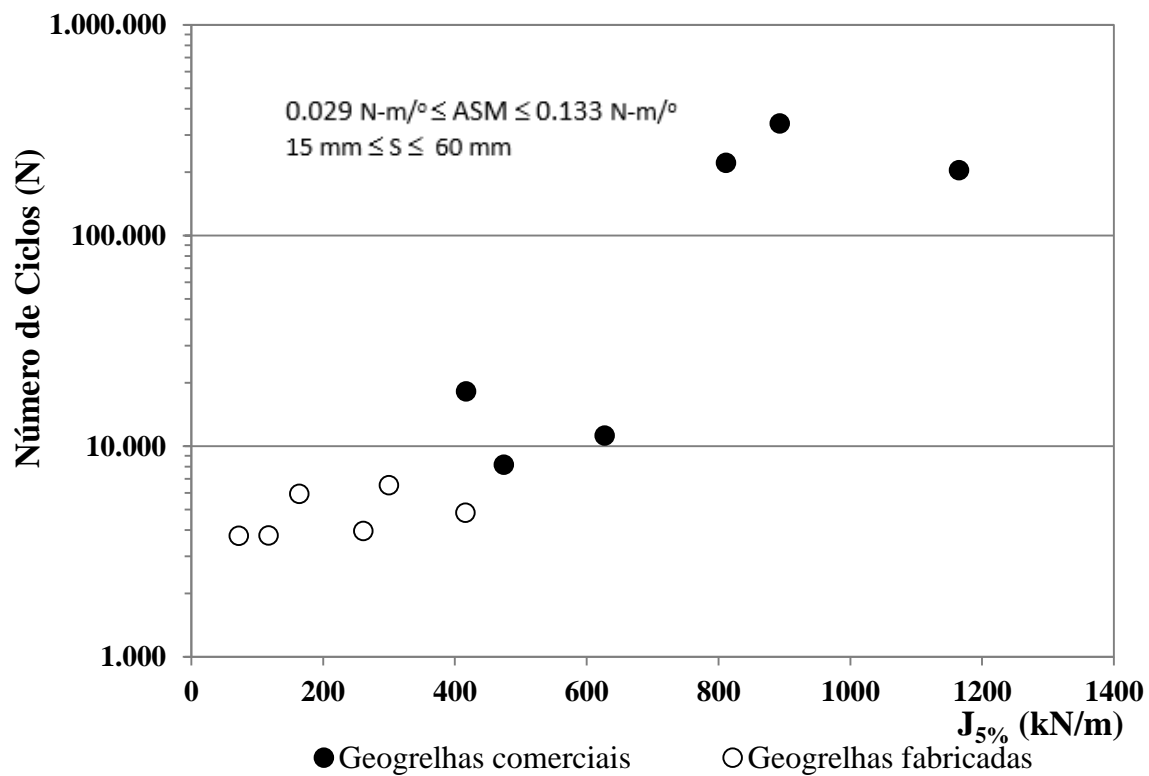


Figura 4.35 Rigidez à tração a 5% de deformação ($J_{5\%}$) versus número de ciclos de carga – Primeiro estágio de carga.

Tabela 4.7 Rigidez à tração a 5% deformação e número de repetições de carga para os reforços utilizados na pesquisa.

Geogrelha	Módulo de Rigidez a 5% de deformação (kN/m)	Número de ciclos (Primeiro estágio)
G1	893	340.068
G2	811	221.102
G3	417	18.203
G4	1165	204.135
G5	474	8.156
G6	627	11.223
GF1	72	3.755
GFC1	117	3.773
GF2	164	5.938
GFC2	300	6.532
GFV1	416	4.824
GFV2	261	3.956

Tabela 4.8 Fração de área sólida em planta (α_s) dos reforços empregados.

Geogrelha	Número de ciclos (Primeiro estágio)	Fração de área sólida em planta (α_s)
G1	340.068	0,37
G2	221.102	0,32
G3	18.203	0,37
G4	204.135	0,36
G5	8.156	0,26
G6	11.223	0,33
GF1	3.755	0,65
GFC1	3.773	0,65
GF2	5.938	0,45
GFC2	6.532	0,45
GFV1	4.824	0,56
GFV2	3.956	0,36

A Figura 4.36 mostra que a fração de área sólida das geogrelhas empregadas não apresenta correlação clara com o número de repetições de carga suportado pela estrada. Foi observado que não necessariamente uma fração de área sólida alta da geogrelha implica em melhor desempenho da estrada. O que garante um bom desenvolvimento da estrada é uma combinação de mecanismos, como interação por atrito e resistência passiva dos membros transversais das geogrelhas. As estradas que suportaram maiores ciclos de carga apresentaram uma fração de área sólida entre 0,32 e 0,37, como é o caso das geogrelhas G1, G2 e G4. As geogrelhas fabricadas para a pesquisa apresentaram frações de área sólida mais altas em relação às geogrelhas comerciais utilizadas nos testes, mas espessuras menores. Neste caso, o aumento da área sólida sem aumento substancial de atrito de “pele” e a menor espessura levaram a um pior desempenho destas geogrelhas como reforço.

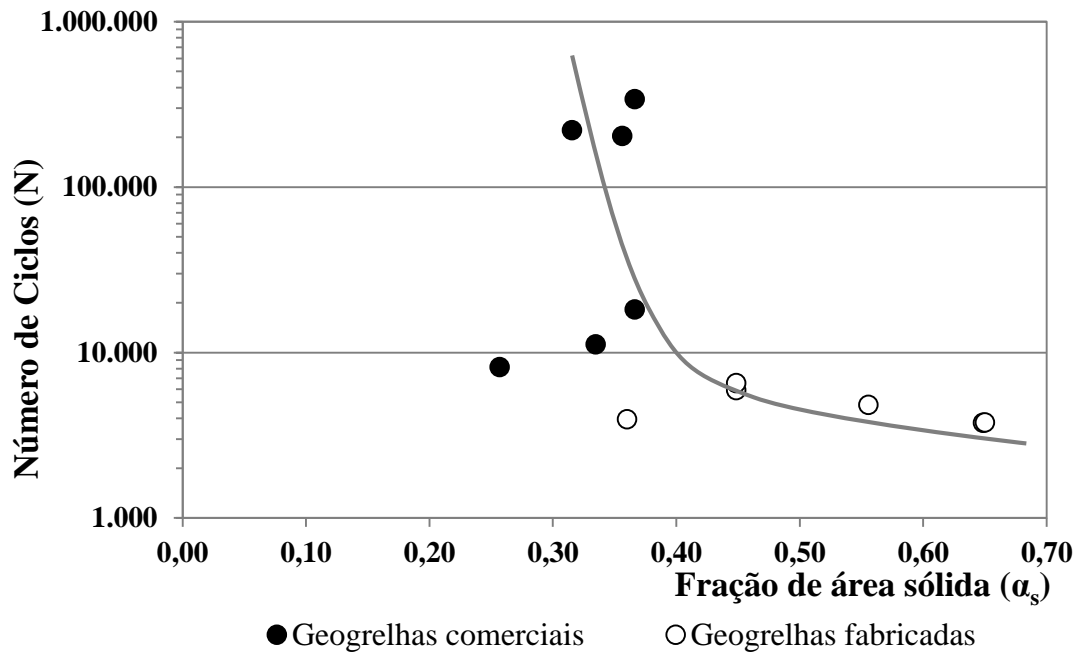


Figura 4.36 Fração de área sólida *versus* número de ciclos – Primeiro estágio de carga.

4.5.1 Verificação visual da influência do módulo de estabilidade à abertura (ASM) no comportamento mecânico de uma estrada não pavimentada

Para se ter uma ideia mais próxima da influência ou importância do módulo de estabilidade à abertura (ASM) no comportamento mecânico das estradas não pavimentadas, foi realizado um teste que permitiu avaliar se os nós da geogrelha experimentam torsão durante os ensaios. Essa é a premissa básica que justificaria a importância do ASM para o desempenho da estrada. O teste em questão foi realizado no mesmo equipamento usado para os ensaios da pesquisa. O ensaio consistiu no seguinte: primeiramente foi cortado o reforço (geogrelha) a ser utilizado, cuja face inferior foi pintada com tinta a óleo de forma a deixar sua marca num papel A0 colocado subjacente à geogrelha. No ensaio não se utilizou solo de subleito, que foi substituído por placa de concreto. Assim, o material de aterro foi instalado sobre a geogrelha, e esta sobre a folha de papel A0 repousando sobre a base de concreto. A seguir, foi colocada a placa de carregamento sobre o aterro e uma pressão de 560 kPa foi aplicada pela placa ao aterro. O carregamento foi mantido por um tempo aproximado de 5 min. Quando finalizado o ensaio, foi retirado o material de aterro para se poder analisar o formato de deformação do reforço, em função da impressão deixada por este na folha de papel. Na Figura 4.37 é mostrada a montagem e execução do ensaio descrito acima.

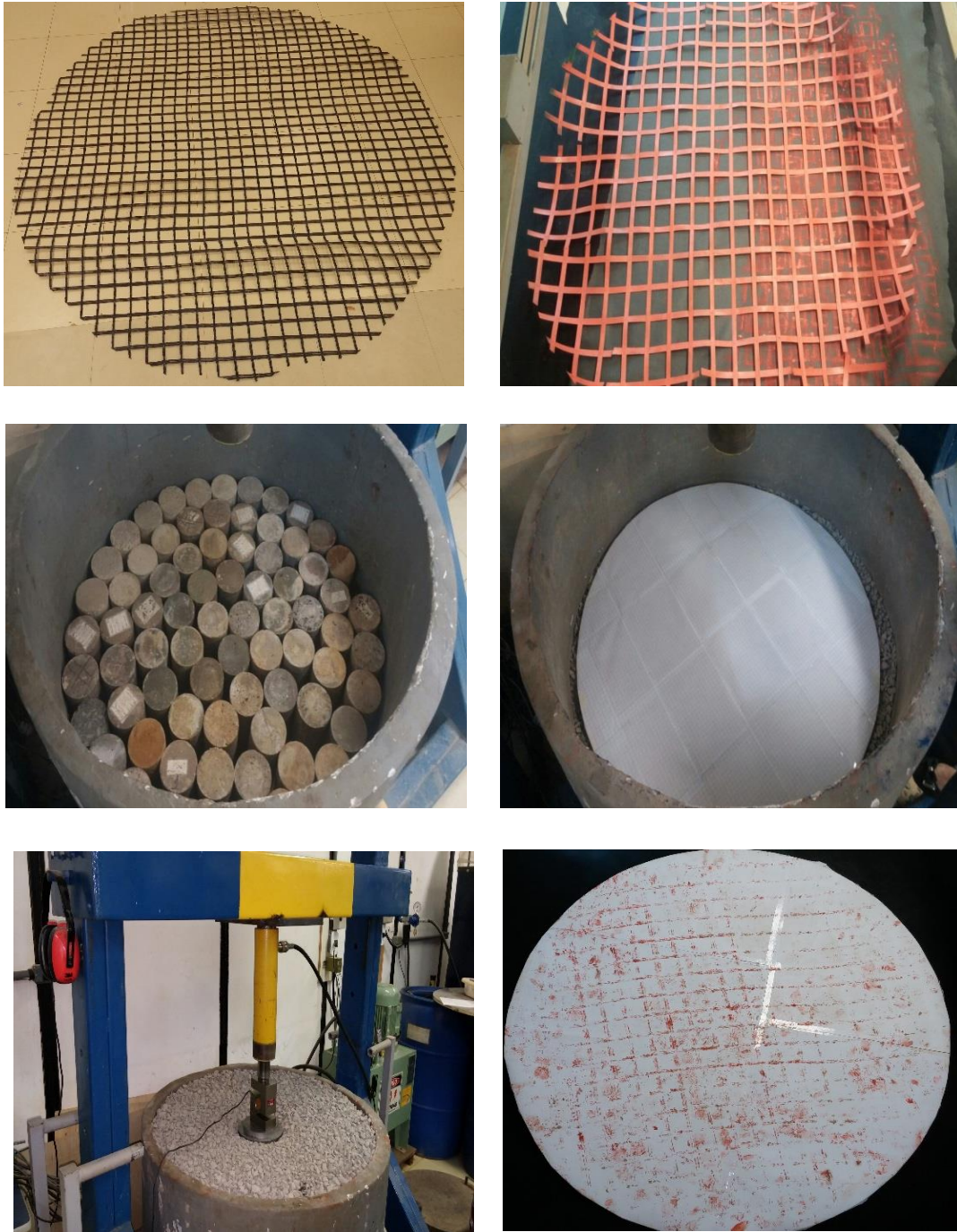


Figura 4.37 Montagem do ensaio para verificar a forma deformada da geogrelha após carregamento.

Foram executados dois ensaios (realizados com as geogrelhas G5 e GFV2), cujos resultados, em termos de impressão da geogrelha no papel, são mostrados nas Figuras 4. 38 e 4.39. Em que pese se tratar de uma avaliação rudimentar, as impressões deixadas pelas geogrelhas nas folhas de papel A0 não sugerem que possam haver rotações importantes dos nós das geogrelhas. Assim sendo, não se justificaria considerar o ASM como um parâmetro relevante de projeto de

estradas não pavimentadas reforçadas com geogrelha. É importante também frisar que Simac *et al.* (2006) consideram que o ASM como um parâmetro relevante de uma geogrelha no que se refere à sua utilização como reforço de estradas não pavimentadas.

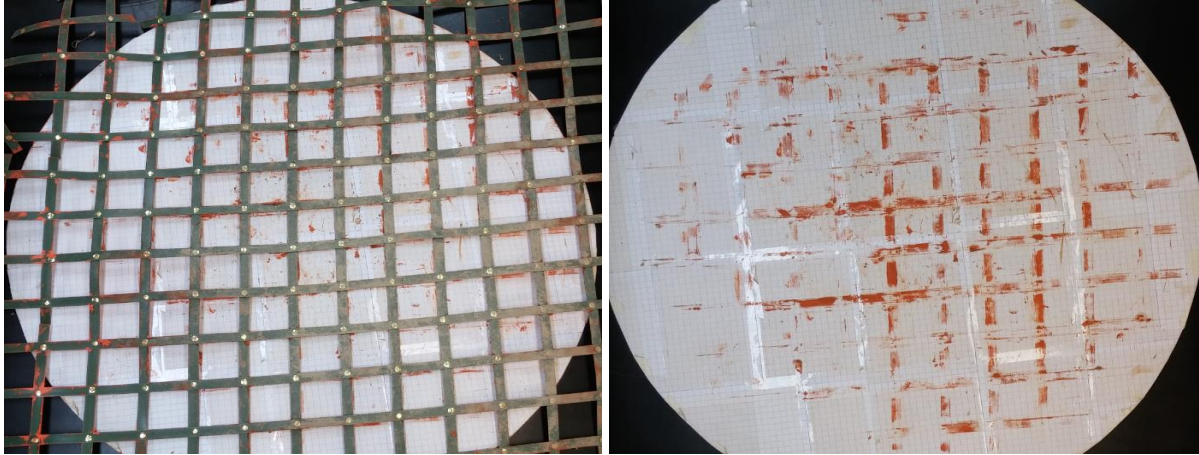


Figura 4.38 Ensaio 1 para determinação da influência do ASM.

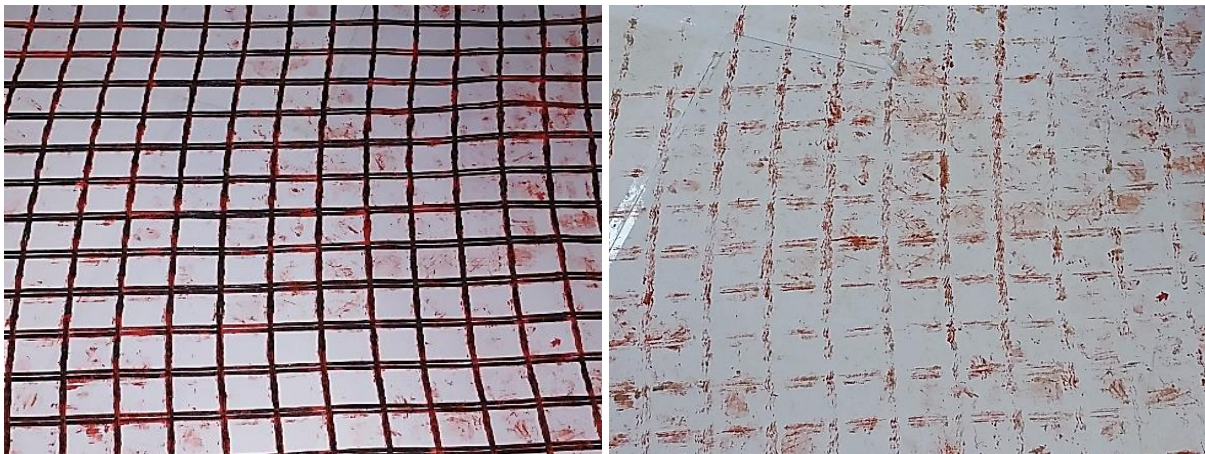


Figura 4.39 Ensaio 2 para determinação da influência do ASM.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

Nesta tese foi estudado o comportamento de estradas não pavimentadas reforçadas com geossintéticos. Visando avaliar a importância das características do reforço tais como abertura de malha, rigidez a tração, módulo de estabilidade à abertura (ASM), entre outros. Para atingir o objetivo foi empregado um equipamento especialmente construído para a pesquisa, o qual simulou a passagem de veículos através da aplicação de carregamento cíclico. Em função dos resultados obtidos nos ensaios realizados, a seguir são apresentadas a seguir as principais conclusões obtidas nesse trabalho.

O reforço geossintético empregado nas estradas não pavimentadas simuladas, contribuiu para aumentar o número de repetições de carga suportados pela estrada. Isso em condições reais, resultará em um aumento da vida útil da estrada.

Considerando os ensaios realizados, no primeiro estágio de carga observou-se um melhor desempenho da estrada reforçada com a geogrelha G1, uma vez que ela suportou maior número de repetições de carga (340.068 ciclos). Para o mesmo estágio de carga as estradas reforçadas com as geogrelhas G2 e G4, suportaram 221.102 e 204.135 ciclos de carga respectivamente. Isto foi devido ao fato de estes reforços apresentam maior rigidez à tração, em comparação com os outros geossintéticos empregados, além da abertura da malha que certamente influenciou na interação do reforço com o material de aterro.

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, pode se dizer que não se justifica considerar o módulo de estabilidade à abertura (ASM) como um parâmetro relevante de projeto de estradas não pavimentadas reforçadas com geogrelha. Sendo que as estradas que conseguiram suportar o maior número de ciclos de carga não apresentaram valores altos de ASM, como é o caso da estrada reforçada com a geogrelha G2 (0,074) que suportou 221.102 ciclos de carga. Já a estrada reforçada com a geogrelha G5 suportou 8.156 sendo que tenha um valor de ASM relativamente alto (0,107).

Pode-se considerar que a execução de geogrelhas fabricadas para a pesquisa mostrou-se satisfatória. Isso porque conseguiu-se garantir isolar propriedades como abertura, rigidez e

ASM. O anterior permitiu ter uma ideia mais clara do papel de cada uma destas propriedades no desempenho do reforço em estradas não pavimentadas.

Observou-se, que não necessariamente uma fração de área sólida alta da geogrelha implica em melhor desempenho da estrada. Sendo assim, as estradas que suportaram maiores ciclos de carga apresentaram uma fração de área sólida entre 0,32 e 0,37 como é o caso das geogrelhas G1, G2 e G4. Vale destacar que este valor de área sólida exibido por estas geogrelhas não é um dos valores mais altos, quando comparado com outros reforços.

A partir das relações de fração de área sólida em função do número de ciclos de carga suportados pela estrada, pode-se estabelecer que o aumento da área sólida sem aumento substancial de atrito de “pele” e a menor espessura dos membros levam a um pior desempenho destas geogrelhas como reforço de estradas não pavimentadas.

De acordo com os resultados obtidos no trabalho, é possível determinar que existe uma relação clara entre a rigidez à tração e o número de repetições de carga suportado pelas estradas simuladas. Apesar da dispersão encontrada em alguns dos resultados, a relação é válida para todos os reforços utilizados nesta pesquisa, sejam eles comerciais ou fabricados.

O material de aterro empregado nesta pesquisa apresenta uma relação ótima entre a abertura das malhas usadas e o diâmetro dos grãos do aterro de aproximadamente 2,0 mm. O anterior sugere que para esta relação o aterro conseguiu interagir de melhor forma com o reforço, conferindo maior capacidade de suporte à estrada.

Após a realização dos ensaios foram medidos ângulos de espraiamento de tensões no subleito. Foi observado que os maiores ângulos foram aqueles medidos nos ensaios com presença de reforço.

Para o segundo estágio de carga (após a primeira restauração da estrada) as estradas conseguiram resistir a números maiores de ciclos de carga, comparado com o primeiro estágio de carga. Acredita-se que isso tenha sido decorrência de uma maior compactação do material de aterro após o primeiro estágio de carga. No segundo estágio de carga, as estradas que apresentaram melhores fatores de eficiência foram as reforçadas com as geogrelhas G2, G1 e GFC2. Exibindo fatores de 16.2, 14.23 e 6.29 respectivamente. Mostrando que conseguiram

resistir mais vezes quando comparadas com a estrada sem presença de reforço. Ou seja estas estradas na pratica apresentariam uma vida útil maior e requeria um menor número de manutenções.

Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se determinar que não existe uma tendência clara entre o módulo de estabilidade à abertura (ASM) e o número de repetições de carga. Tem-se que de acordo ao método de projeto de estradas não pavimentadas desenvolvido por Giroud e Han (2004), o ASM é um parâmetro de grande importância no desempenho da estrada, usado inclusive como critério de calibração. De acordo com estes autores reforços com valores de ASM maiores seriam mais eficientes. De acordo aos resultados encontrados neste trabalho, pode-se inferir de forma inicial que o ASM não tem relação nenhuma com o comportamento mecânico da estrada não pavimentada.

No que diz respeito as tensões obtidas nos ensaios, tem-se que as maiores tensões foram medidas nas estradas reforçadas com o geotêxtil e com as geogrelhas G5 e GF2. Já tensões menores foram exibidas pelas estradas reforçadas com as geogrelhas G2 e GFC2, tanto para o primeiro como o segundo estágio de carga. Destacando-se que a estradas reforçadas com estas duas geogrelhas foram as que suportaram maiores repetições de carga. O anterior mostra a eficiência dos reforços ao distribuir de forma adequadas nas tensões.

Os resultados permitiram concluir que o que garante um bom desenvolvimento da estrada é a combinação de mecanismos, como interação por atrito e resistência passiva dos membros transversais das geogrelhas, rigidez a tração e abertura dos reforços.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

De acordo aos resultados obtidos nesta tese podem ser realizadas algumas sugestões para pesquisas futuras acerca do estudo de geossintéticos como reforço de estradas não pavimentadas, quais sejam:

- Realizar simulações numéricas que permitem avaliar em detalhe o papel do módulo de estabilidade à abertura ASM no comportamento mecânico de uma estrada não pavimentada.
- Construir trechos experimentais e avaliar a importância de propriedades relevantes do reforço, como rigidez a tração, módulo de estabilidade à abertura, entre outros.

- Avaliar o dano mecânico provocado nos reforços após a execução dos ensaios
- Propor um método de projeto de estradas não pavimentadas, levando em consideração as propriedades do reforço que realmente influenciam o comportamento da estrada.
- Executar simulações numéricas do problema, para comparar os resultados obtidos no laboratório com os obtidos numericamente.
- Fazer ensaios com solos de subleito de diferente capacidade de suporte e mudar o material e sua espessura.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Farsakh Murad Y, Qiming Chen. (2010). Evaluation of geogrid base reinforcement in flexible pavement using cyclic plate load testing. *International Journal of Pavement Engineering* . Vol. 12, No. 3, June 2011, 275–288.
- Al-qadi, I. L., Brandon, T. L., And Bhutta, A. (1997). Geosynthetic Stabilized Flexible Pavements. *Proceedings of Geosynthetics '97*, IFAI, Long Beach, California. Vol. 2: 647-662.
- Al-qadi, I. L.; Dessouky, S. H.; Kwon, J. & Tutumluer, E. (2007). Accelerated Full- Scale Testing of Geogrid-Reinforced Flexible Pavements. *Transportation Research Board. 86th Annual Meeting*. Washington, D.C, USA.
- Antunes, L. G. S. (2008). Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos. *Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília*. Brasília, DF, 158 p.
- Baesso, D.P, Gonçalves, F.L. (2003). *Estradas Rurais: Técnicas Adequadas de manutenção. Manual Técnico*, Florianópolis, Der. 236 p.
- Bhandari, A., Han, J. (2010). Investigation of geotextile–soil interaction under a cyclic vertical load using the discrete element method. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 28: 33-43.
- Cancelli, A., Montanelli, F., Rimoldi, P., Zhao, A. (1996). Full scale laboratory testing on geosynthetics reinforced paved roads. *Proc. International Symposium on Earth Reinforcement – IS Kyushu'96*, Fukuoka, Kyushu, Japan, vol. 1, pp. 573-578.
- Cancelli, A., Montanelli, F. (1999). In-ground tests for geosynthetic reinforced flexible paved roads. *Proc. of Geosynthetics'99*, Boston, Massachusetts, USA, vol. 2, pp. 863-878
- Carvalho, L.D.V. (1992). Avaliação da viabilidade da melhoria do projeto geométrico e da conservação das estradas de terra. 1992. *Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, USP – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP*, 85p.
- Cuelho, E., Perkins, S., Morris, Z. (2014). *Relative Operational Performance of Geosynthetics Used as Subgrade Stabilization. Final Project Report - FHWA/MT-14-002/7712-251*. Western Transportation Institute, Montana State University – Bozeman. 313 p.
- Geosynthetic Research Institute - GRI (2004). “GRI GG-9 torsional behavior of bi-directional geogrids when subjected to in-plane rotation.” *GRI Test Methods and Standards*; Folsom, Pa.
- Giroud J., Han J. (2004). Design method for Geogrid-Reinforced unpaved roads. I. Development of Design Method. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 8: 775-786.
- Giroud, J. P. ,Noiray, L. (1981). Geotextile-Reinforced Unpaved Road Design. *Proceedings ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(GT9): 1233– 1254.

- Giroud, J.P. and Han, J. (2006). "Closure to design method for geogrid-reinforced unpaved roads. I. Development of design method." ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(4), 549-551.
- Giroud, J.P., Ah-Line, C., Bonaparte, R. (1984). Design of Unpaved Roads and Trafficked Areas With Geogrids. Proceedings of the Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering, London, U.K. 116-127.
- 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, Publicação G.DM-190/11, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76 p.
- IRF (2006). World road Statistics 2006: Data 1999 to 2004. International Road Federation.
- Jewell, R. A. (1996). Soil reinforcement with geotextiles. London: Thomas Telford. 332p.
- Khaja, K.H.S (2010). An Experimental Study on the Deformation Behaviour of Geosynthetically Reinforced Ballast. Doctoral Thesis. University of Wollongong, Australia.
- Kinney, T.C. (2000). Standard test method for determining the "Aperture Stability Modulus" of a geogrid, Shannon & Wilson, Inc., Seattle.
- Koerner, R.M. (1999). Designing with geosynthetics. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice- Hall, 761p.
- Lage, R.G. Vidal, D. (2003). Métodos Convencionais no Dimensionamento de Pavimentos com Base Reforçada Utilizando Geossintéticos. IX Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA, São José dos Campos, 7-9 Outubro.
- Latha, G.M. Nair, A.M. Hemalatha, M.S. (2010). Performance of Geosynthetics in Unpaved roads. International Journal of Geotechnical Engineering Vol 4: 337 – 349.
- Leng, J. (2002). Characteristics and Behavior of Geogrid Reinforced Aggregate Under Cyclic Load. Doctoral thesis. Department of Civil Engineering North Carolina State University.
- Marsal R. J. (1967). Large scale testing of rock fill materials. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, nº SM2, paper 5128: 27-43.
- McGown, A. Y.K.C, Yogarajah, I. (1990). Identification of dynamic interlock mechanism proceedings of the international reinforced soil conference. University of Strathclyde, Glasgow. In performance of reinforced soil structures (British geotechnical society), Thomas Telford, London. PP. 377-379.
- Miura, N., Sakai, A., Taesiri, Y., Yamanouchi, T., Yasuhara, K. (1990). Polymer grid reinforced pavement on soft clay ground. Geotextiles and Geomembranes vol 9: 99- 123.
- Nair, A.M, Latha G.M. (2013).Cyclic loading behaviour of reinforced soil–aggregate bases Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Ground Improvement Vol. 167, No. 2: 88-98.

- Nunes, T. V.L. (2003). Método de Previsão de Defeitos em Estradas Vicinais de Terra com Base no Uso das Redes Neurais Artificiais: Trecho de Aquiraz - CE. Fortaleza, 2003. XV. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 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. 176p.
- Oda, S., Fernandes JR., J.L., Sória, M.H.A. (2001). Caracterização de Estradas Não Pavimentadas Visando a Implementação de um Sistema de Gerência de Vias. Engenharia Arquitetura. São Carlos, SP, v.01, n.02, p.135-145.
- Palmeira, E.M. (1981). Utilização de Geotêxteis como Reforço de Aterros sobre Solos Moles. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ.
- Perkins, S.W., Ismeik, M. and fogelson, M.L. (1998), "Mechanical Response of a Geosynthetic-Reinforced Pavement System to Cyclic loading", Fifth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway, Vol. 3: 1503-1512.
- Perkins, S.W., Ismeik, M., (1997). A Synthesis and Evaluation of Geosynthetic-Reinforced Base Layers in Flexible Pavements: Part 1. Geosynthetics International vol 4, No 6: 549–604.
- Perkins, S.W., Ismeik, M., Fogelson, M.L. (1999). Influence of geosynthetic placement position on the performance of reinforced flexible pavement systems. Geosynthetics Conference, Boston. Vol 1: 253–264.
- Perkins, S.W. (2001). Mechanistic-empirical modeling and design model development of geosynthetic reinforced flexible pavements: Final Report. Report No. FHWA/MT-01-002/991601A, State of Montana Dept. of Transportation/Federal Highway Administration, USA
- Pimentel, K.C.A. (2007). Estradas Não-pavimentadas e Ferrovias Reforçadas com Geossintéticos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-042/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 293 p.
- Santos, A.R., Pastore E.L., Augusto, F., Cunha, M.A. (1988). Estradas vicinais de terra: Manual técnico para manutenção e conservação. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 125p.
- Shukla, S.K. (2005). Handbook of Geosynthetic Engineering. Institution of Civil Engineers – ICE Publishing. Chapter 7, 163-177.
- Simac, M. R., Elton D. J., Gale, S. M. (2006). Discussion of "Design Method for Geogrid-Reinforced Unpaved Roads. I: Development of Design Method" by J. P. Giroud and Jie Han. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, April 2006.

Watts, G.R.A., Blackman, D.I., and Jenner, C.G. (2004). "The performance of reinforced unpaved sub-bases subjected to trafficking", EuroGeo3 Third European Geosynthetics Conference, Munich, Germany, 1-3 March, 261-266.

Webster, S. L. _1992_. Geogrid reinforced base courses for flexible pavements for light aircraft: Test section construction, behavior under traffic, laboratory tests, and design criteria. Final Rep. DOT/FAA/ RD-92/25, U.S. Department of Transportation and Federal Aviation Administrations, 91 p.

Webster, S.L. (1993). Geogrid Reinforcement Base Courses for Flexible Pavements for Light Aircraft: Test Section Construction, Behavior Under Traffic, Laboratory Test, and Design Criteria. Technical Report GL-93-6, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station, Vicksburg, Mississippi, USA. 86 p.