

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

**UTILIZAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS COMO REFORÇO DE  
ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS: INFLUÊNCIA DO TIPO  
DE REFORÇO E DO MATERIAL DE ATERRO.**

**IVONNE ALEJANDRA GUTIÉRREZ GÓNGORA**

**ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA**

**DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-190/11**

**BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2011**

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

**UTILIZAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS COMO REFORÇO DE  
ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS: INFLUÊNCIA DO TIPO  
DE REFORÇO E DO MATERIAL DE ATERRO.**

**IVONNE ALEJANDRA GUTIÉRREZ GÓNGORA**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

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

---

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

**DATA: BRASÍLIA/DF, 2 DE MARÇO DE 2011.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

GÓNGORA, IVONNE ALEJANDRA GUTIÉRREZ

Utilização de Geossintéticos como Reforço de Estradas não Pavimentadas: Influência do Tipo de Reforço e do Material de Aterro. [Distrito Federal] 2010

xix, 86 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2011)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Geogrelha

2. Estrada não Pavimentada

3. Solo Mole

4. Carregamento Cíclico

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ivonne Alejandra Gutiérrez Góngora

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Utilização de Geossintéticos como Reforço de Estradas não Pavimentadas: Influência do Tipo de Reforço e do Material de Aterro.

GRAU / ANO: Mestre / 2011

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

---

Ivonne Alejandra Gutiérrez Góngora  
ScIn 407 Bloco C apto 205, Bairro Asa Norte  
CEP.: 70855-530 – Brasília/DF - Brasil

*À Deus por permitir cumprir este sonho e por todas as bênçãos recebidas.*

*Aos meus pais, Libardo e Rubby, pelo amor, apoio e confiança ao longo de minha vida, muito obrigada por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos. Vocês são meu orgulho e exemplo. Aos meus irmãos Juan David e Catalina pelo amor e amizade, sei que posso contar sempre com vocês. Ao meu namorado Jaime, por me fazer acreditar que poderia chegar até aqui, pelo amor e respeito neste tempo juntos. E finalmente a toda minha família pela confiança depositada em mim.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Professor Ennio Marques Palmeira, por ser um exemplo de vida. Sou uma grande admiradora de todas suas conquistas e avanços ao longo de sua vida profissional. Fico muito agradecida pela valiosa ajuda em minha pesquisa, foram muitas sugestões e dúvidas esclarecidas. Nunca tinha visto um orientador tão comprometido como o senhor. Agradeço pelos conselhos dados, pela amizade oferecida e por ter acreditado que eu conseguiria desenvolver uma dissertação que precisava de muita “força física”.

À 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.

Aos Senhores Arthur e Xavier do Laboratório de Engenharia Mecânica, pela ajuda na elaboração de algumas peças para a dissertação, sem essa ajuda não teria terminado o trabalho a tempo.

Aos técnicos do laboratório de Geotecnia Thiago e Vanilson pela colaboração constante durante os ensaios, especialmente quando precisava de maior força física. Agradeço pela alegria contagiante do Vanilson em meus dias de trabalho no laboratório, tornou mais fácil e agradável o trabalho.

Às minhas amigas Kaliana e Nina, pela amizade nestes anos, obrigada pelos momentos agradáveis junto a vocês, por me ensinarem a falar português, agradeço pelas intermináveis conversas no telefone, confesso que consegui treinar meu ouvido para entender o idioma. Espero que mesmo terminando o mestrado nossas amizades continuem e claro, que vocês apareçam de forma mais constante.

À minha amiga Andreia pelo apoio, amizade e por todos os bons momentos quando morávamos juntas, acredito que sem você não teria conseguido ficar muito tempo naquela república.

Ao meu amigo Bruno (Bruninho), pela amizade oferecida, pelos bons momentos juntos, pelos churrascos tão gostosos que você faz, em fim... Fico sem palavras para descrever uma pessoa tão maravilhosa e especial.

À minha amiga Thelma, por sua companhia, apoio e amizade ao longo destes meses.

Aos meus colegas de turma por todos aqueles momentos inesquecíveis juntos.

Ao Robinson pelas sessões de psicologia nos finais de semana (rsrsrsrs), obrigada pela ajuda com a seleção dos dados de meus ensaios.

À Cida, pela colaboração nas coisas que precisei por parte da Secretaria. Obrigada pelo empenho e rapidez colocada em alguns processos. Agradeço por sua amizade.

A Caroline pela ajuda com a revisão do português em alguns capítulos.

Aos colegas, Alejandra, Ivan, Claudia, Paola, Andrelissa, pela preocupação que tiveram sempre comigo e por estarem sempre a postos para qualquer ajuda que eu precisasse.

Agradeço ao CNPQ pelo apoio financeiro.

As estradas não pavimentadas, por seu baixo custo e rápida execução, constituem-se em importantes vias de transporte em áreas rurais e cidades. Com elas é possível suprir necessidades básicas de determinadas populações e acesso a serviços de educação, saúde e lazer disponíveis nos grandes centros urbanos. Dentro deste contexto, deve-se ter especial cuidado com o dimensionamento, a construção e as manutenções periódicas das mesmas, que devem ser realizados de maneira a permitir seu adequado funcionamento durante elevado período de tempo. Muitas estradas não pavimentadas atravessam locais onde o solo apresenta baixa capacidade de suporte, o que pode ocasionar deformações superficiais excessivas na camada de aterro e subleito e redução dos períodos entre manutenções. Esta dissertação procura avaliar o uso de geossintéticos para reforçar estradas não pavimentadas sobre subleitos fracos. Investigou-se o uso de diferentes tipos de materiais de aterro (incluindo-se resíduos de construção e demolição reciclados RCD-R) e geogrelhas com diferentes aberturas de malha. Foi usado um equipamento de grande porte para realizar ensaios com carregamentos cíclicos onde simularam-se estradas com e sem reforço. No estudo realizou-se também a simulação da restauração da superfície da estrada, tendo como critério para realizar essa restauração a ocorrência de trilha de roda com 25 mm de profundidade. Foram medidos deslocamentos ao longo da superfície do aterro e as tensões totais no solo de subleito durante os ensaios. 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 mostram a significativa contribuição da presença da camada de reforço no aumento do número de ciclos de carga suportados pela estrada.

## **ABSTRACT**

---

Due to their low cost and quick construction, unpaved roads are important means for transportation in rural areas and even cities. They allow the population to have access to services of education, health and leisure. In this context, special care must be taken in the design, construction and periodical maintenance services of these roads, in order to allow their proper operation during long periods of time. Many unpaved roads are built on soft soils, which can yield to excessive deformation of the fill and subgrade soils as well as to increase the need for periodical maintenance services. This dissertation aimed at evaluating the use of geosynthetic as reinforcement in unpaved roads on weak subgrades. Different types of fill materials (including recycled rubble) and geogrids with varying aperture sizes were investigated. A large scale equipment was used in the testing programme to perform tests on reinforced and unreinforced unpaved roads subjected to cyclic loading. The influence of surface maintenance was also investigated, where the criterion for road surface maintenance was a rut depth of 25 mm. Vertical displacements along the fill surface and total stresses in the subgrade were measured. In addition, the use of reinforced recycled rubble fill material showed very good performance. The results obtained showed the significant contribution due to the presence of the reinforcement in increasing the number of load repetitions until the maximum rut depth be reached.

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
2.1 ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	4
2.1.1 Histórico.....	4
2.1.2 Generalidades.....	4
2.1.3 Características técnicas de uma estrada não pavimentada.....	5
2.1.3.1 Capacidade de suporte.....	5
2.1.3.2 Condições de rolamento e aderência.....	5
2.1.4 Problemas mais comuns das estradas não pavimentadas.....	6
2.2 GEOSSINTÉTICOS EMPREGADOS COMO REFORÇO DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	8
2.2.1 Geotêxtil.....	9
2.2.2 Geogrelha.....	10
2.3 FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS.....	11
2.4 MECANISMOS DE AÇÃO DO REFORÇO.....	11
2.4.1 Efeito membrana.....	12
2.4.2 Restrição à movimentação lateral do solo.....	13
2.4.3 Capacidade de carga.....	13
2.5 ENSAIOS REALIZADOS EMPREGANDO GEOSSINTÉTICOS SUBMETIDOS A CARGA CÍCLICA.....	14
2.6 REPRODUÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS EM ENSAIOS EM ESCALA REAL.....	15
2.6.1 Estudos de campo em estradas não pavimentadas.....	15
2.6.2 Ensaio em escala real executados no laboratório.....	16

<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS.....	22
3.1.1 Tanque rígido para ensaios.....	22
3.1.2 Sistema Hidráulico.....	23
3.1.3 Sistema de aquisição de dados.....	24
3.1.4 Instrumentação utilizada.....	24
3.1.4.1 Célula de carga.....	25
3.1.4.2 Células de tensões totais.....	25
3.1.4.3 Medidores de deslocamento linear.....	26
3.2 MATERIAIS EMPREGADOS.....	27
3.2.1 Solo de subleito.....	27
3.2.2 Materiais de aterro.....	29
3.2.2.1 Resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R).....	29
3.2.2.2 Brita.....	31
3.2.3 Geossintéticos usados como reforço.....	33
3.2.3.1 Geogrelha 1.....	33
3.2.3.2 Geogrelha 2.....	34
3.2.3.3 Geogrelha 3.....	34
3.3 GENERALIDADES SOBRE OS ENSAIOS.....	35
3.4 MONTAGEM DO ENSAIO.....	36
3.4.1 Preparação do equipamento para ensaios .....	36
3.4.2 Preparação do solo de subleito.....	36
3.4.3 Instalação da instrumentação no subleito .....	37
3.4.4 Preparação das diferentes configurações de ensaios.....	38
3.4.4.1 Ensaio 1.....	38
3.4.4.2 Ensaio 2.....	39
3.4.4.3 Ensaio 3.....	40
3.4.4.4 Ensaio 4.....	41
3.4.4.5 Ensaio 5.....	41
3.4.4.6 Ensaio 6.....	41
3.4.5 Instalação da instrumentação na superfície do aterro.....	41
3.5 APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO CÍCLICO.....	42
3.6 RESTAURAÇÃO DO ATERRO.....	42

<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	44
4.1 INTRODUÇÃO.....	44
4.2 RESULTADOS DO USO DE DISTINTOS MATERIAIS DE ATERRO.....	44
4.2.1 Primeiro estágio de carga.....	44
4.2.1.1 Análises dos deslocamentos no primeiro estágio de carga.....	44
4.2.1.2 Análise de tensões totais máximas no primeiro estágio de carga.....	49
4.2.2 Segundo estágio de carga.....	51
4.2.2.1 Análises de tensões totais no segundo estágio de carga.....	54
4.3 RESULTADOS DO USO DE DISTINTOS TIPOS DE REFORÇO.....	55
4.3.1 Primeiro estágio de carga.....	56
4.3.1.1 Análises dos deslocamentos no primeiro estágio de carga.....	56
4.3.1.2 Análises de tensões totais no primeiro estágio de carga.....	60
4.3.2 Segundo estágio de carga.....	61
4.3.2.1 Análises dos deslocamentos no segundo estágio de carga.....	61
4.3.2.2 Análises de tensões totais no segundo estágio de carga.....	64
4.3.3 Terceiro estágio de carga.....	65
4.3.3.1 Análises dos deslocamentos no terceiro estágio de carga.....	65
4.3.3.2 Análises de tensões totais no terceiro estágio de carga.....	68
4.4 ANÁLISES DA QUEBRA DE GRÃOS DOS MATERIAIS DE ATERRO.....	69
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b> .....	71
5.1 CONCLUSÕES .....	71
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	73
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	75
<b>ANEXOS</b> .....	78

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 2.1 – Trilhas de rodas no pavimento (SANTOS et al., 1985).....	6
Figura 2.2 – Excesso de pó na pista (SANTOS et al., 1985).....	7
Figura 2.3 – Segregação de agregados (SANTOS et al., 1985).....	7
Figura 2.4 – Costelas de vaca (SANTOS et al., 1985).....	8
Figura 2.5 – Formação de buracos na estrada (SANTOS et al., 1985).....	8
Figura 2.6 – Alguns tipos de geogrelhas.....	10
Figura 2.7 – Efeito Membrana no geossintético (modificado - Perkins e Ismeik, 1997).....	12
Figura 2.8 – Restrição da movimentação lateral do solo de aterro (modificado –Perkins e Ismeik, 1997).....	13
Figura 2.9 – Aumento da capacidade de carga produzido pelo geossintético (modificado Perkins e Ismeik, 1997).....	14
Figura 2.10 - Equipamento em grande escala para simulação de uma estrutura de pavimento (modificado – Perkins e Ismeik, 1997).....	17
Figura 2.11 - Seções de pavimento ensaiadas por Perkins et al. (1999).....	18
Figura 2.12 - Deslocamentos verticais no pavimento <i>versus</i> número de ciclos de carga (modificado Perkins et al., 1999).....	19
Figura 2.13 - Caixa metálica usada por Cancelli para simulação de uma estrada não pavimentada (modificado - Cancelli et al, 1996).....	20
Figura 2.14 – Comparação entre seções não reforçadas e reforçadas com geogrelha sobre solos de subleito com diferentes valores de CBR. (Cancelli et al., 1996).....	21
Figura 3.1 - Equipamento para ensaios de carregamento cíclico.....	23
Figura 3.2 - Sistema de aquisição de dados.....	24
Figura 3.3 - Célula de carga empregada nos ensaios.....	25
Figura 3.4 – Célula de tensões utilizada nos ensaios.....	26
Figura 3.5 – Medidor de deslocamento linear.....	26
Figura 3.6 – Disposição da instrumentação no ensaio.....	27

Figura 3.7 - Curvas granulométricas com e sem defloculante (Guimarães, 2002).....	28
Figura 3.8 – Resíduo de construção e demolição reciclado utilizado na pesquisa.....	30
Figura 3.9 – Curva granulométrica do RCD utilizado.....	31
Figura 3.10 – Brita utilizada na pesquisa.....	32
Figura 3.11 – Curva granulométrica da Brita empregada nos ensaios.....	32
Figura 3.12 – Geogrelha 1 usada nos ensaios.....	33
Figura 3.13 – Geogrelha 2 usada nos ensaios.....	34
Figura 3.14 – Geogrelha 3 usada nos ensaios.....	35
Figura 3.15 – Colocação da lona para evitar atrito lateral.....	36
Figura 3.16 – Instalação das células de tensões no subleito.....	37
Figura 3.17 – Localização das células de tensões totais.....	38
Figura 3.18 – Vista da superfície do aterro no Ensaio 1.....	38
Figura 3.19 – Simulação do umedecimento no aterro.....	39
Figura 3.20 – Ancoragem lateral do reforço.....	40
Figura 3.21 – Colocação do reforço no ensaio 2.....	40
Figura 3.22 – Montagem ensaio três (3).....	41
Figura 3.23 – Disposição dos medidores de deslocamento linear no ensaio.....	42
Figura 3.24 – Restauração da superfície do aterro.....	43
Figura 4.1 – Deslocamentos superficiais nos ensaios sem reforço <i>versus</i> o número de ciclos de carga - primeiro estágio de carga.....	45
Figura 4.2 – Deslocamentos superficiais nos ensaios com reforço <i>versus</i> o número de ciclos de carga - primeiro estágio de carga.....	46
Figura 4.3 – Deslocamentos verticais da placa de carregamento <i>versus</i> o número de ciclo de carga para N = 1.630 (ao final do ensaio não reforçado com brita) - primeiro estágio de carga.....	48
Figura 4.4 – Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro - primeiro estágio de carga.....	48

Figura 4.5 – Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro - primeiro estágio de carga. Para N = 1.630 (ao final do ensaio não reforçado com brita).....	49
Figura 4.6 – Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade - primeiro estágio de carga.....	50
Figura 4.7 – Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade - primeiro estágio de carga. Para N = 1.630 (Ao final do ensaio não reforçado).....	50
Figura 4.8– Deslocamentos superficiais nos ensaios sem reforço <i>versus</i> o número de ciclos de carga – segundo estágio de carga.....	51
Figura 4.9– Deslocamentos superficiais nos ensaios com reforço <i>versus</i> o número de ciclos de carga – segundo estágio de carga.....	52
Figura 4.10 – Deslocamentos superficiais <i>versus</i> o número de ciclos de carga - segundo estágio de carga. Para N = 12.355 (ao final do ensaio não reforçado).....	53
Figura 4.11 – Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro - segundo estágio de carga.....	54
Figura 4.12 – Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro - segundo estágio de carga. Para N = 12.355 (ao final do ensaio não reforçado).....	54
Figura 4.13 – Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade - segundo estágio de carga....	55
Figura 4.14 – Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade - segundo estágio de carga. Para N = 12.355 (ao final do ensaio não reforçado).....	55
Figura 4.15 – Deslocamentos verticais da placa de carregamento <i>versus</i> o número de ciclos de carga – Primeiro estágio de carga.....	56
Figura 4.16 – Deslocamentos verticais da placa de carregamento <i>versus</i> o número de ciclos de carga - primeiro estágio de carga. Para N = 1.630 (ao final do ensaio não reforçado).....	57
Figura 4.17 – Fator de Eficiência <i>versus</i> relação entre a abertura da grelha e o $d_{50}$ . Primeiro estágio de carga).....	58
Figura 4.18 – Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro - primeiro estágio de carga.....	59
Figura 4.19 – Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro - primeiro estágio de carga. Para N = 1.630 (ao final do ensaio não reforçado).....	59
Figura 4.20 – Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade - primeiro estágio de carga....	60
Figura 4.21 – Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade - primeiro estágio de carga. Para N = 1.630 (ao final do ensaio não reforçado).....	61

Figura 4.22 – Deslocamentos superficiais <i>versus</i> o número de ciclos de carga – segundo estágio de carga.....	61
Figura 4.23 – Fator de Eficiência <i>versus</i> relação entre a abertura da grelha e o $d_{50}$ . (Segundo estágio de carga).....	62
Figura 4.24 – Deslocamentos superficiais <i>versus</i> o número de ciclos de carga - segundo estágio de carga. Para N = 12.000 (ao final do ensaio não reforçado).....	63
Figura 4.25 – Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro - segundo estágio de carga.....	63
Figura 4.26 – Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro - segundo estágio de carga. Para N = 12.355 (ao final do ensaio não reforçado).....	64
Figura 4.27 – Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade - segundo estágio de carga.....	64
Figura 4.28 – Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade - segundo estágio de carga. Para N = 12.355 (ao final do ensaio não reforçado).....	65
Figura 4.29– Deslocamentos superficiais <i>versus</i> o número de ciclos de carga – terceiro estágio de carga.....	66
Figura 4.30 – Estado da Geogrelha 2 após o terceiro estágio de carga.....	66
Figura 4.31 – Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro - terceiro estágio de carga.....	67
Figura 4.32 – Perfís de deslocamentos verticais na superfície do aterro - terceiro estágio de carga. Para N = 105.100 (ao final do ensaio não reforçado).....	67
Figura 4.33 – Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade - terceiro estágio de carga.....	68
Figura 4.34 – Tensões totais máximas <i>versus</i> profundidade - terceiro estágio de carga. Para N = 105.100 (ao final do ensaio não reforçado).....	68

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 2.1 – Propriedades do concreto asfáltico empregado.....	17
Tabela 2.2 – Propriedades da camada de base.....	17
Tabela 2.3 – Propriedades da camada de subleito.....	18
Tabela 2.4 – Localização do reforço.....	18
Tabela 3.1 – Propriedades do solo de subleito.....	29
Tabela 3.2 – Propriedades geotécnicas do RCD-R (Modificado de Santos, 2010).....	31
Tabela 3.3 – Propriedades da brita utilizada nos ensaios.....	32
Tabela 3.4 – Propriedades da Geogrelha 1.....	33
Tabela 3.5 – Propriedades da Geogrelha 2.....	34
Tabela 3.6 – Ensaios realizados na pesquisa.....	35
Tabela 3.7 – Localização das células de tensão usadas na pesquisa.....	38
Tabela 4.1 – Índice de quebra após dos ensaios.....	70

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

<b>Equação</b>	<b>Página</b>
Equação 4.1 – Equação para o cálculo do fator de eficiência do reforço para distintos materiais de aterro (RCD-R) – Primeiro estágio de carga.....	46
Equação 4.2 – Equação para o cálculo do fator de eficiência do reforço para distintos materiais de aterro (Brita) – Primeiro estágio de carga.....	47
Equação 4.3 – Equação para cálculo do fator de eficiência para distintos tipos de reforço (Geogrelhas 1 e 3) – Primeiro estágio de carga.....	57
Equação 4.4 – Equação para cálculo do fator de eficiência para distintos tipos de reforço (Geogrelha 2) – Primeiro estágio de carga.....	57
Equação 4.5 – Equação para cálculo do fator de eficiência para distintos tipos de reforço (Geogrelha 1) – Segundo estágio de carga.....	62
Equação 4.6 – Equação para cálculo do fator de eficiência para distintos tipos de reforço (Geogrelha 2) – Segundo estágio de carga.....	62
Equação 4.7 – Equação para cálculo do fator de eficiência para distintos tipos de reforço (Geogrelha 3) – Segundo estágio de carga.....	62
Equação 4.8 – Equação para o cálculo do Índice de quebra dos grãos.....	69

## **LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES**

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Brita+R:	Brita reforçada
Ca:	Calcio
CBR:	Califórnia Bearing Ratio
CV:	Cavalos de força
cm:	Centímetro
cm <sup>3</sup> :	Centímetro cúbico
cm <sup>2</sup> :	Centímetro quadrado
Cc:	Coefficiente de Curvatura
Cu:	Coefficiente de Uniformidade
δv:	Deslocamento vertical
D <sub>50</sub> :	Diâmetro das partículas correspondente a 50 % passante em peso
ΔW:	Diferença entre porcentagens retidas entre peneiras
E:	Fator de eficiência
GTN:	Geotêxtil não-tecido
GTNa:	Geotêxtil não-tecido agulhado
GTNr:	Geotêxtil não-tecido resinado
GTW:	Geotêxtil tecido
g:	Gramas
g/cm <sup>3</sup> :	Gramas por Centímetro Cúbico
°:	Grau
Hz:	Hertz
h:	Hora
Bg:	Índice de quebra
e:	Índice de vazios
kg:	Kilogramas
lb:	Libra
γ <sub>dmax</sub> :	Peso específico seco máximo
Mg:	Magnésio
m:	Massa
ρ <sub>s</sub> :	Massa específica dos grãos

M: Mega  
MPa: MegaPascal  
m: Metro  
m<sup>3</sup>: Metro cúbico  
m<sup>2</sup>: Metro quadrado  
mm: Milímetro  
min: Minuto  
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.  
N: Número de ciclos de carga  
SiO<sub>2</sub>: Óxido de Silício  
ppm: Partes por milhão  
PVC: Policloreto de vinila  
%: Porcentagem  
K: Potássio  
kN/m: QuiloNewton por metro  
kN/m<sup>3</sup>: QuiloNewton por metro cúbico  
kPa: Quilopascal  
RCD: Resíduo de construção e demolição  
RCD-R: Resíduos de construção e demolição reciclado  
RCD-R +R: Resíduos de construção e demolição reciclado reforçado  
s: Segundo  
Na: Sódio  
t/m<sup>3</sup>: Tonelada por metro cúbico

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

As estradas não-pavimentadas constituem um importante meio de ligação entre as áreas rurais e as cidades. Estas vêm sendo bastante empregadas em todo o mundo, atingindo funções provisórias como acesso a obras, ou em muitos casos, permanecendo em serviço por longos períodos, servindo para transporte de minerais provenientes de exploração mineira, além de produtos agrícolas, da indústria florestal e de indústrias. Assim, contribuem de forma importante para o desenvolvimento e a melhoria da qualidade de vida das comunidades beneficiadas pela sua existência. É importante destacar que seu uso deve-se principalmente ao fato de apresentar baixo custo de construção, tolerância de grandes deformações e a outros aspectos técnico-econômicos.

Dada a importância das estradas não-pavimentadas para a economia da maioria dos países do mundo, seu dimensionamento, construção e serviços de manutenções periódicas devem ser realizados de maneira a permitir o adequado funcionamento dessas estradas durante a sua vida útil. Muitas estradas não-pavimentadas atravessam locais onde o solo apresenta baixa capacidade de suporte, o que pode ocasionar deformações superficiais excessivas na camada de aterro e subleito e redução entre períodos de manutenção. Devido a isso surge a necessidade de empregar novos materiais que contribuam para melhorar as condições estruturais da estrada.

As condições de conservação da superfície de uma estrada não-pavimentada dependem do material que a constitui, das solicitações do tráfego, das condições climáticas e das técnicas de manutenção. Uma estrada não-pavimentada em boas condições deve ter largura da faixa de rolamento suficiente para acomodar com segurança o tráfego esperado. Também deve apresentar resistência suficiente para suportar as cargas das rodas sem que ocorram deformações excessivas antes do final da sua vida útil. É fundamental destacar que a capacidade de suporte depende das características dos materiais, da superfície e da resistência do solo, sob diferentes condições de teor de umidade (Oda, 1995).

Por causa de limitações na utilização e/ou custos de materiais de qualidade tem se tornado significativo o aumento do emprego de novos materiais ou materiais alternativos nesse tipo de obra. Nesse contexto, os geossintéticos podem ser utilizados como reforço, uma vez que contribuem para o aumento da capacidade de suporte da estrada, distribuem melhor as tensões para o subleito, reduzem a altura de aterro necessária e aumentam a vida útil da estrada. Finalmente, o emprego de geossintéticos como material de reforço, reduz as manutenções periódicas e diminuem-se os custos de operação da estrada.

## **1.2 OBJETIVO**

**Objetivo Geral:** Avaliar o comportamento de estradas não pavimentadas construídas sobre solos moles reforçadas com geossintéticos e diferentes materiais de aterro.

### **Objetivos específicos:**

- Avaliar a influência das características geométricas do reforço (particularmente geogrelhas) no comportamento mecânico de estradas não pavimentadas.
- Verificar a influência do material de aterro no comportamento mecânico da estrada quando solicitada a carregamentos cíclicos;
- Analisar o comportamento do aterro e do subleito sob carregamento cíclico mediante medições de deslocamentos e tensões.

## **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação está dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo introduz o tema da pesquisa, apresentando como motivação para sua realização a relevância da conservação das estradas não pavimentadas ao longo do tempo dada sua importância para a economia do país e do mundo. O segundo capítulo mostra uma revisão da literatura sobre o tema, descrevendo alguns aspectos de interesse sobre as estradas não pavimentadas, os materiais usados como reforço, além de destacar estudos realizados por outros autores. No capítulo três são expostos os materiais e a metodologia seguida nos ensaios que permitiram avaliar o uso de

geossintéticos como reforço em estradas não pavimentadas. O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados e as análises dos mesmos, visando avaliar a influência do tipo de material de aterro e o comportamento do geossintético como elemento de reforço. No quinto capítulo apresentam-se as conclusões obtidas no estudo e sugestões para pesquisas futuras.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS**

#### **2.1.1 Histórico**

De maneira geral, a grande maioria das estradas situadas nas zonas rurais foi aberta pelos colonizadores de uma forma inadequada, por ter sido orientada basicamente pela estrutura fundiária e pelas facilidades do terreno. Favorecia em períodos de chuvas intensas o desenvolvimento de processos erosivos extremamente prejudiciais à pista de rolamento, áreas marginais e a sua plataforma como um todo. Muitas delas, ao terem evoluído originalmente de pequenas trilhas e caminhos utilizados pelos primeiros grupos de pessoas que se estabeleceram nas diversas regiões, apresentam traçados atravessando locais cujos solos denotam grande fragilidade em termos de suporte. À medida que o tráfego cresceu, tais caminhos tornaram-se estradas recebendo, entre outros serviços, melhoramentos graduais na base, com agregados graúdos e inclusive sendo colocada alguma forma de revestimento na superfície de rolamento. Em geral, tais revestimentos têm sido executados sem obediência a quaisquer princípios básicos da engenharia (Baesso e Gonçalves, 2003).

#### **2.1.2 Generalidades**

As estradas rurais, especialmente as não pavimentadas, por seu baixo custo, são uma necessidade básica para prover uma determinada localidade de um fluxo regular de mercadorias e serviços. Permitem o desenvolvimento das comunidades por elas atingidas e, por consequência, garantem a melhoria de sua qualidade de vida. Embora possa-se dizer que as estradas rurais por si só não são capazes de evitar fatores que levam ao empobrecimento das comunidades, elas podem, por outro lado, ser importantes agentes indutores de crescimento e proporcionar significantes benefícios sociais e econômicos.

Segundo evidências constatadas em vários países, é notório o vital papel desempenhado pelas estradas rurais no desenvolvimento da agricultura e atividades extrativas, dentre outras. Estudos do Banco Mundial (1993) concluíram que a implantação de melhoras na rede viária

rural tem um efeito imediato, não somente na redução do custo operacional de veículos, como também na expansão dos serviços públicos nessas regiões (Baesso e Gonçalves, 2003).

### **2.1.3 Características técnicas de uma estrada não pavimentada**

É importante mencionar algumas das características fundamentais que devem apresentar as estradas não pavimentadas para prestar um bom serviço à comunidade diretamente beneficiada, em termos de funcionamento e conceituação. Estas características são descritas a seguir.

#### **2.1.3.1 Capacidade de suporte**

Uma característica fundamental que uma estrada não pavimentada deve apresentar primordialmente é uma boa capacidade de suporte e boas condições de rolamento e aderência, para poder garantir condições satisfatórias de conforto e segurança aos veículos que por ela trafegam.

É de destacar que, em geral, 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.

Santos et al. (1988) relatam que os defeitos comumente encontrados em estradas não pavimentadas devido à falta de capacidade de suporte são as ondulações transversais e as trilhas de rodas. Em períodos chuvosos, a baixa capacidade de suporte favorece, também, a formação de atoleiros.

#### **2.1.3.2 Condições de rolamento e aderência**

As condições de rolamento e aderência estão intimamente 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 é possível mencionar os seguintes: buracos, ondulações transversais, materiais soltos etc.

#### 2.1.4 Problemas mais comuns das estradas não pavimentadas

Os problemas encontrados nas estradas não pavimentadas surgem devido a uma combinação de fatores, sendo alguns deles externos à via, como tráfego, chuva e atividades de manutenção inadequada e outros intrínsecos, como geometria imprópria (projeto em planta, em perfil longitudinal e seção transversal), drenagem ineficiente e tipos de solos (Oda, 1995).

São os seguintes os principais tipos de problemas que comprometem as condições de serventia das estradas não pavimentadas (Santos et al., 1988):

- **Trilhas de Rodas:** as trilhas de rodas são as depressões na superfície da estrada ao longo das trajetórias dos pneus dos veículos. O afundamento é causado por uma deformação permanente em qualquer camada da estrada ou do subleito, devido à compressibilidade dos solos e às cargas repetidas de tráfego, especialmente quando a capacidade de suporte é baixa e em períodos de chuva (Figura 2.1).

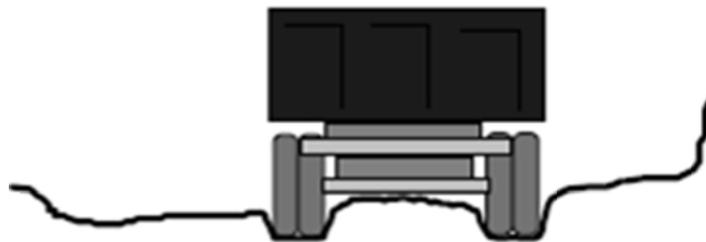


Figura 2.1 Trilhas de rodas no pavimento (SANTOS et al., 1985).

- **Excesso de pó na pista:** A ação abrasiva do tráfego em estradas não-pavimentadas eventualmente faz com que as partículas de solos se soltem na superfície de rolamento. Com a passagem do tráfego, formam-se nuvens de poeira que são um perigo para os veículos seguintes, além de causar problemas ambientais (Figura 2.2).
- **Segregação de Agregados:** ação abrasiva do tráfego em estradas não-pavimentadas eventualmente faz com que as maiores partículas de solos granulares se soltem da superfície de rolamento. O tráfego move as partículas de agregados soltos para fora das trilhas de rodas e forma bermas no centro, ao longo do acostamento da estrada ou na área menos trafegável, paralela à linha central da estrada (Figura 2.3).



Figura 2.2 Excesso de pó na pista (SANTOS et al., 1985).



Figura 2.3 Segregação de agregados (SANTOS et al., 1985).

- **Costelas de Vaca:** Nas “costelas de vaca”, o material granular de diâmetro entre 5 e 10 mm se acumula, formando pequenos “morros” sucessivos, causando instabilidade e desconforto ao usuário. Aguiar (1963) define este tipo de problema como ondas, no sentido transversal, distantes entre si de 0,60 a 1,10 m, como resultado de um movimento vibratório transmitido pelos veículos à estrada. Tal movimento se deve à vibração dos motores, ao choque do veículo sobre o solo e à ação do molejo dos mesmos, cuja contribuição é expressiva na formação das ondulações, além das forças de tração, frenagem etc. (Figura 2.4).
- **Buracos:** os buracos surgem pela contínua expulsão de partículas sólidas do leito quando da passagem de veículos em locais onde há empoçamento de água, ou seja, o aparecimento de buracos é uma consequência de uma plataforma mal drenada (sem abaulamento transversal, por exemplo). (Figura 2.5).



Figura 2.4 Costelas de vaca (SANTOS et al., 1985).



Figura 2.5 Formação de buracos na estrada (SANTOS et al., 1985).

## **2.2 GEOSINTÉTICOS EMPREGADOS COMO REFORÇO DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS**

Na atualidade, os geossintéticos comumente empregados como materiais de reforço em estradas não pavimentadas são os geotêxteis tecidos, os não-tecidos e as geogrelhas. As geocélulas podem também ser utilizadas, mas seu custo, em geral, é elevado para esse tipo de aplicação. Entretanto, em situações onde o material de aterro é caro ou escasso, podem resultar em soluções econômica 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.

O comportamento global de um maciço de solo reforçado com geossintéticos está condicionado às propriedades do solo, do reforço e da interface solo-geossintético. Dentre estas propriedades, são particularmente importantes a resistência e a rigidez à tração do geossintético e os parâmetros de interação mecânica entre o solo e o reforço (Palmeira, 1993). A seguir são descritos sumariamente os principais geossintéticos utilizados como reforço de estradas não pavimentadas.

### 2.2.1 Geotêxtil

Os geotêxteis consistem em fibras sintéticas ou naturais, distribuídas de forma aleatória ou não, unidas por diferentes processos físicos ou químicos de ligação (calor, costuras, resinas ou por amarração). Devido à distribuição destas fibras, possuem poros que permitem a passagem de fluidos e gases, sendo geralmente excelentes materiais para obras de drenagem.

Dentre as muitas aplicações dos geotêxteis, as mais conhecidas são: drenagem, filtração, reforço de solo, separação entre camadas, proteção e barreira (quando impregnado com algum material impermeabilizante, como betume ou bentonita). Este tipo de geossintético é classificado tecido ou não-tecido, o qual depende do processo utilizado para combinar os filamentos ou fibras dentro de uma estrutura planar. Os geotêxteis tecidos são os que apresentam uma distribuição ordenada de fibras, filamentos ou laminetes e os não tecidos são os que apresentam distribuição aleatória dos fios ou filamentos. Na função reforço o geotêxtil provê resistência à tração ao conjunto, tendo-se em mente que os solos possuem baixa resistência mecânica aos esforços de tração.

É importante destacar que em virtude da técnica de fabricação adotada, existem variações no tipo de estrutura do geotêxtil, sendo eles classificados segundo a NBR 12553 (Geossintéticos – Terminologia, 2003), em:

**Geotêxtil não-tecido (GTN):** produto composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos, sendo:

- **Geotêxtil não-tecido agulhado (GTNa):** fibras interligadas mecanicamente, por processo de agulhagem.
- **Geotêxtil não-tecido termo-ligado (GTNt):** fibras interligadas por fusão parcial obtida por aquecimento.
- **Geotêxtil não-tecido resinado (GTNr):** fibras interligadas por meio de produtos químicos.

- **Geotêxtil tecido (GTW):** Produto oriundo do entrelaçamento de fios, mono filamentos ou laminetes (fitas), segundo direções preferenciais de fabricação denominadas trama (sentido transversal) e urdume (sentido longitudinal).

### 2.2.2 Geogrelha

As Geogrelhas são estruturas feitas a base de polímeros, constituídas por uma rede regular de elementos, obtidos normalmente por meio da extrusão em uma ou em duas direções perpendiculares, com aberturas de tamanho adequado para interagir com o material de enchimento circundante. Sua principal função é a de reforço. As geogrelhas geram um incremento da resistência do maciço, com conseqüente redução da sua deformabilidade.

As geogrelhas podem ser classificadas em duas categorias no que diz respeito à sua estrutura. Na primeira categoria, a grelha tem reforços longitudinais e transversais individuais que são unidos para formar uma só estrutura (Figura 2.6(a)). A segunda categoria é essencialmente produzida a partir de uma folha de polímero (geralmente polietileno ou polipropileno) com um padrão uniforme e controlado de orifícios pré-perfurados (Figura 2.6(b)) e que, após tracionada, assume a sua configuração final. Do ponto de vista da direção de maior resistência e rigidez à tração, a geogrelha pode ser classificada com: uniaxial; biaxial ou triaxial. (B.V.S. Viswanadhama e D. König, 2004).

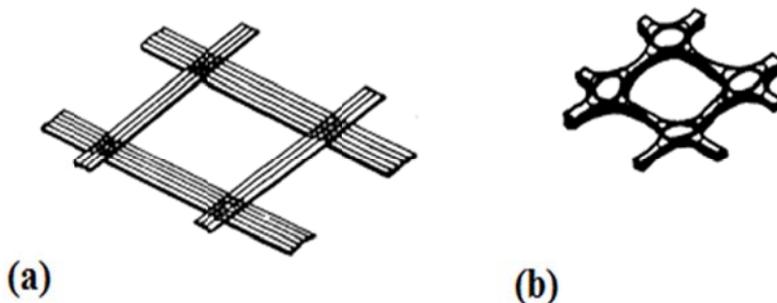


Figura 2.6 Alguns tipos de geogrelhas (B.V.S. Viswanadhama e D. König, 2004).

A utilização de geogrelhas em diferentes campos de aplicação é determinada principalmente por sua função de reforço. Esta função é desenvolvida quando a geogrelha provê resistência à tração em função da interação com o solo circundante. Dentro das principais aplicações das geogrelhas em sistemas de pavimentos, encontra-se: viabilizar construções de pavimentos

sobre solos moles, melhorar ou aumentar a vida útil do pavimento e reduzir as deformações permanentes (Antunes, 2008).

Muitos estudos em pequena e em grande escala têm sido realizados para se obter um melhor entendimento da interação entre geossintéticos e solos. Tais estudos permitiram comparar o desempenho do aterro em condições não reforçadas e em condições reforçadas. No caso das geogrelhas, estas têm sido utilizadas com sucesso para permitir a construção sobre subleitos fracos (Cancelli et al. (1996), Hass et al. (1988), entre outros).

Em várias pesquisas feitas por diferentes autores (Al-Qadi et al. 1997, Cancelli et al. 1996, Hass et al. 1988, Miura 1990, Webster 1993, etc.) foi obtido 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 pode permitir a utilização de bases com menor espessura com o mesmo desempenho de pavimentos não reforçados com maior espessura.

### **2.3 FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS**

Desde 1970 os geossintéticos têm sido utilizados para a estabilização dos subleitos e reforço de aterros para a construção de estradas não-pavimentadas. Tipicamente, este material é colocado entre a camada de aterro e o subleito. Nestas condições, consegue-se suportar maiores cargas e maior intensidade de tráfego com a presença do geossintético. Além disso, a capacidade de reforço do geossintético pode viabilizar a utilização de um material de aterro de menor qualidade, o que implica em redução de custos e benefícios ambientais.

### **2.4 MECANISMOS DE AÇÃO DO REFORÇO**

Ao serem empregados como reforço, os geossintéticos apresentam normalmente três mecanismos potenciais de reforço, os quais podem ser identificados como: efeito membrana; restrição à movimentação lateral do solo; e aumento de capacidade de carga (Perkins e Ismeik, 1997).

### 2.4.1 Efeito membrana

Para que se apresente o efeito membrana, o geossintético deve estar significativamente deformado pela passagem do tráfego (logo ter sido submetido a grandes deformações). A ação combinada dos esforços de tração no reforço e a sua curvatura reduzem a tensão vertical transferida ao subleito. Fora da área carregada, a deformação e a curvatura do reforço proporcionam tensões verticais adicionais na superfície do subleito, aumentando o confinamento desse solo nessa região. A consequência desses mecanismos é o aumento da capacidade de carga do subleito (Burd, 1995).

A intensidade do efeito membrana é função da rigidez e da deformação do geossintético e da profundidade das trilhas de rodas (rodeira). Este tipo de solicitação é mais relevante apenas para altos valores de profundidade da trilha de rodas. Jewell (1996) afirma que o benefício do efeito membrana é significativo somente para razões entre deslocamentos verticais e largura da roda do veículo maior que 0,20. Segundo Giroud et al. (1984), o efeito membrana é desprezível para trilhas de roda com profundidades menores que 75 mm e contribui com apenas 10 % na melhoria do sistema para um deslocamento vertical ( $\delta_v$ ) de 150 mm.

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. Outro benefício da presença do reforço é a prevenção do surgimento ou redução de fissuras na porção inferior da camada de aterro, minimizando a contaminação desta pelos finos do solo de subleito (no caso de geotêxteis) e redução da perda de agregado para dentro do subleito, à medida que a camada granular deforma com o carregamento. A Figura 2.7 ilustra o efeito membrana provocado pelo reforço.

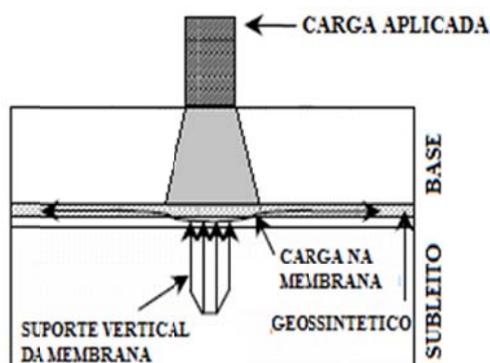


Figura 2.7 Efeito Membrana no geossintético (modificado - Perkins e Ismeik, 1997).

## 2.4.2 Restrição à movimentação lateral do solo

A restrição lateral é causada 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. A Figura 2.8 ilustra a restrição da movimentação lateral do solo de aterro causada pelo geossintético.

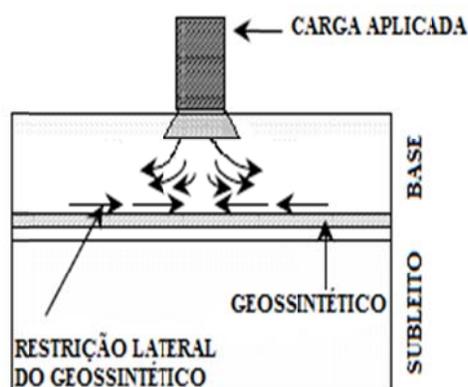


Figura 2.8 Restrição da movimentação lateral do solo de aterro (modificado - Perkins e Ismeik, 1997).

## 2.4.3 Capacidade de carga

A carga máxima que um solo pode suportar é denominada capacidade de carga, que é dependente não só das propriedades mecânicas do solo, mas também do tamanho, forma e localização da área carregada.

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, nem protuberâncias visíveis na superfície.

A maior capacidade de carga do solo provocada pela presença do geossintético deve-se a que o aterro reforçado pode absorver maiores cargas aplicadas, devido à redução das tensões cisalhantes instabilizadoras transmitidas ao subleito. Isso é particularmente relevante para subleitos com baixa capacidade de suporte. A Figura 2.9 ilustra o aumento da capacidade de carga de uma estrada não pavimentada devido à presença de reforço.

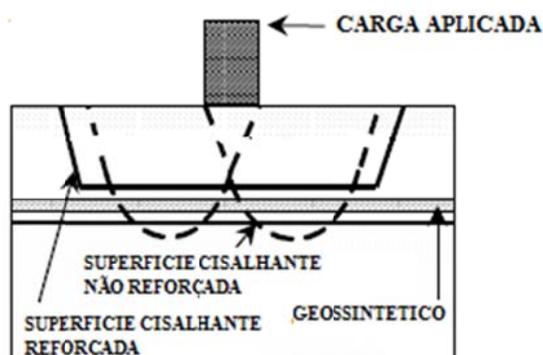


Figura 2.9 Aumento da capacidade de carga produzido pelo geossintético (modificado - Perkins e Ismeik, 1997).

## 2.5 ENSAIOS REALIZADOS EMPREGANDO GEOSSINTÉTICOS SUBMETIDOS A CARGA CÍCLICA

Raymond e Ismail (2003) realizaram pesquisa que teve como objetivo investigar o uso de geogrelha como reforço em bases de pavimento, utilizando diversos tipos de agregado, submetidas a carregamentos cíclicos. Os agregados utilizados neste estudo foram do tipo arredondado e britado, com a mesma mineralogia. Na pesquisa foi usada apenas uma única camada de reforço de geogrelha, a qual consistiu numa geogrelha biaxial. A resistência à tração desta grelha foi de aproximadamente 40 kN/m. Como resultado destes ensaios foi encontrado que na fase de carga repetida a estrutura conseguiu suportar até 10000 ciclos de carga usando uma pressão média de 45 kPa, ainda com deformações aceitáveis, isso devido à presença da geogrelha como reforço. Comparado com os resultados obtidos com o uso de reforço encontrou-se que para os ensaios realizados sem uso de reforço, muito antes de 10000 ciclos de carga a estrutura de pavimento apresentava grandes deformações na camada de base.

Bhandari e Han (2010) estudou a interação solo-geotêxtil sob a ação de uma carga de roda cíclica usando o Método dos Elementos Discretos (DEM). Neste estudo, o solo foi modelado

como partículas sem coesão por meio de um modelo linear. Os parâmetros do solo e do geotêxtil foram determinados por meio de testes biaxiais e de ensaios de tração, respectivamente. Também foi pesquisada a influência da profundidade de colocação e da rigidez à tração do geotêxtil sobre o desempenho da base reforçada. Os resultados do estudo mostraram que a profundidade do geotêxtil afetou significativamente o grau de interação entre o geotêxtil e o solo. O efeito da rigidez do geotêxtil sobre a deformação foi mais significativa quando o geotêxtil foi colocado em um local mais perto da superfície do que quando colocado em um local mais profundo.

Miura et al. (1990) realizaram ensaios em pavimentos, construídos numa caixa quadrada de concreto de 1,50 m x 1,50 m por 1,0 m de profundidade. Como solo de subleito, foi utilizada uma argila proveniente da cidade de Saga (Japão). Foram realizados ensaios em três seções, cada uma com um tipo diferente de geogrelha. Além disso, foram realizados ensaios em seções sem reforço. Em cada um destes ensaios foi aplicado um carregamento de 200 kPa com uma frequência de 0,18 Hz. Como resultado, obteve-se que a geogrelha funcionou de forma eficaz, diminuindo as deformações da camada de base devido ao carregamento cíclico. Observou-se também a influência do efeito membrana desenvolvido pelo geossintético.

## **2.6 REPRODUÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS EM ENSAIOS EM ESCALA REAL**

### **2.6.1 Estudos de campo em estradas não pavimentadas**

Alguns ensaios de campo bem controlados têm sido realizados por vários autores para examinar a influência de geossintéticos em estradas não pavimentadas.

Potter e Curren (1981) observaram em alguns de seus ensaios que a presença do geotêxtil na interface entre o aterro e o subleito, além de reduzir a deformação da superfície, também reduziu de forma considerável as tensões verticais transmitidas ao subleito. Em contraste, foi observado por Ruddock et al. (1982) que a presença de geotêxtil tecido como reforço não influenciou as tensões verticais que chegaram ao subleito, o que contraria o observado na quase totalidade de estudos sobre o assunto.

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.

Delmas et al. (1986) realizaram ensaios em grande escala empregando quatro tipos de geotêxteis, dois não tecidos e dois geotêxteis tecidos de diferentes valores de rigidez à tração. Os resultados mostraram uma considerável diferença na deformação da camada de aterro, com melhor comportamento dos aterros reforçados com geotêxtil tecido.

Dos resultados de ensaios em obras reais, pode-se concluir que é evidente que a inclusão de um geossintético melhora o desempenho de uma estrada não pavimentada construída sobre solo mole.

### **2.6.2 Ensaios em escala real executados no laboratório**

Para representar de maneira fidedigna a relevância do emprego de geossintético (geogrelhas, geotêxteis) numa estrutura de pavimento ou estrada não pavimentada, podem ser realizados ensaios em escala real os quais podem ser executados em laboratório. Nesses tipos de ensaios são medidas as deformações e efeitos decorrentes da aplicação do carregamento dos veículos.

Perkins (1998) avaliou o efeito do reforço em pavimentos reforçados com materiais geossintéticos por meio de um ensaio em grande escala. Ele empregou uma caixa de ensaio construída em concreto armado, com dimensões de 2,0m x 2,0m e 1,5m de altura, como apresentado na Figura 2.10 o carregamento máximo aplicado foi de 40 kN, resultando em uma pressão máxima de 550 kPa sobre a superfície do pavimento. Nos ensaios foram utilizados três tipos de reforços (um geotêxtil e duas geogrelhas) em oito testes, diferentes entre si pela espessura da camada de base e pelo posicionamento do reforço. Nesses testes as seções com reforço resistiram aproximadamente 600.000 ciclos de carga, comparado com as seções sem reforço que apenas suportaram 100.000 repetições de carga, para a mesma deformação permanente final.

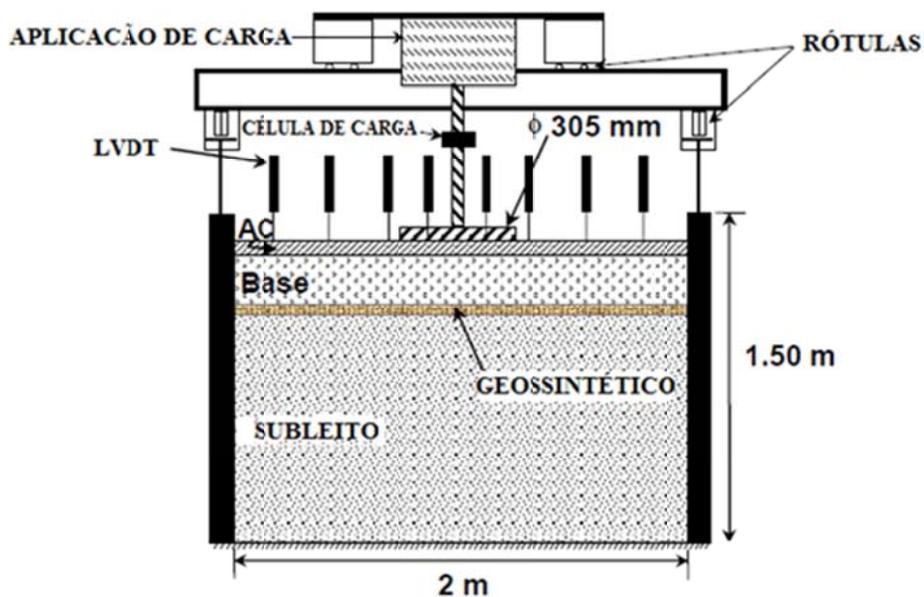


Figura 2.10 Equipamento em grande escala para simulação de uma estrutura de pavimento (modificado - Perkins e Ismeik, 1997).

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, as quais são apresentadas nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3.

Tabela 2.1 Propriedades do concreto asfáltico empregado.

Seção	Espessura (mm)	Massa específica Aparente ( $\text{kN/m}^3$ )	Volume de Vazios (%)	Teor de ligante (%)	Estabilidade (lb)	Fluência
1	78	23.1	3.3	6.8	2013	26
2	77	23.4	1.9	6.0	2480	20
3	75	22.9	4.3	6.6	1979	16

Tabela 2.2 Propriedades da camada de base.

Seção	Espessura (mm)	Peso específico ( $\text{kN/m}^3$ )	Umidade (%)	Grau de saturação (%)
1	300	20.6	6.4	65.7
2	300	20.5	6.3	63.2
3	300	20.6	5.5	56.5

Tabela 2.3 Propriedades da camada de subleito.

Seção	Densidade (kN/m <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Grau de saturação (%)	CBR
1	11.4	44.8	91.4	1.5
2	11.4	45.1	92.0	1.5
3	11.5	44.2	91.6	1.5

Nota: CBR = Índice Suporte Califórnia.

Além disso, nestes testes foi empregado um tipo de geogrelha como reforço, localizada a diferentes profundidades na estrutura do pavimento, como mostrado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 Localização do reforço.

Seção	Tipo de reforço	Localização do reforço	Carregamento aplicado (kPa)
1	Nenhum	Nenhum	549
2	Geogrelha	Interfase Base-Subleito	549
3	Geogrelha	100 mm acima da Interfase Base-Subleito	549

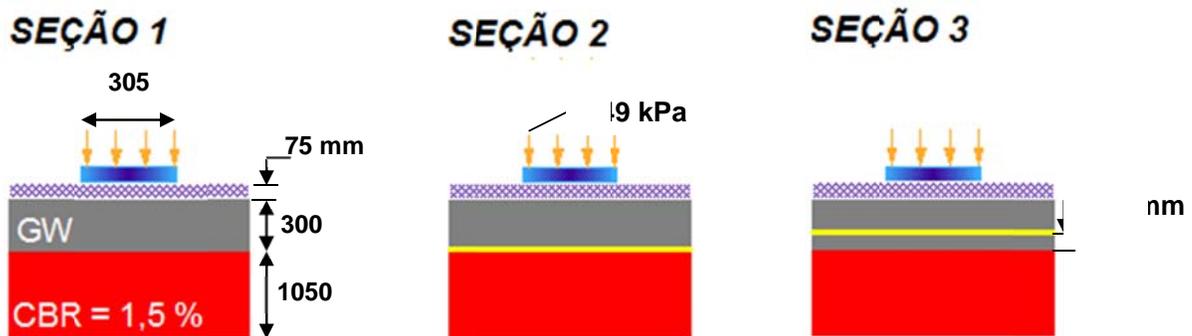


Figura 2.11 Seções de pavimento ensaiadas por Perkins et al. (1999).

Nos ensaios realizados foi utilizada uma ampla instrumentação para quantificar a resposta mecânica das seções de pavimentos. Cada estrutura possuía além da célula de carga e medidores de deslocamento linear na superfície, células de tensão e extensômetros para medir as tensões totais e deformações nos materiais de base e subleito.

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

melhora 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 a configuração que apresentou melhor desempenho.

Cancelli et al. (1996) empregaram uma caixa metálica para simular uma estrada pavimentada. 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, como apresentado na Figura 2.13.

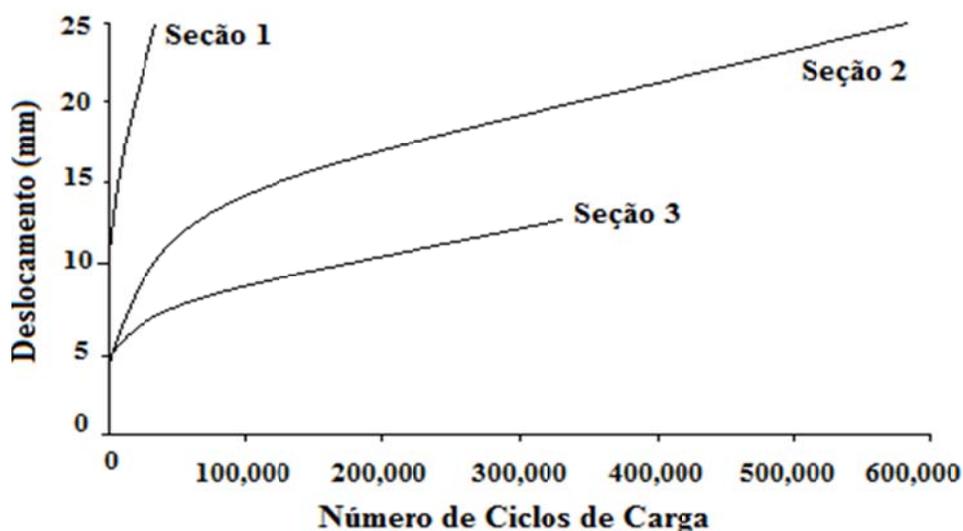


Figura 2.12 Deslocamentos verticais no pavimento *versus* número de ciclos de carga (modificado Perkins et al., 1999).

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. Alguns resultados obtidos são apresentados na

Figura 2.14. Esses resultados 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.

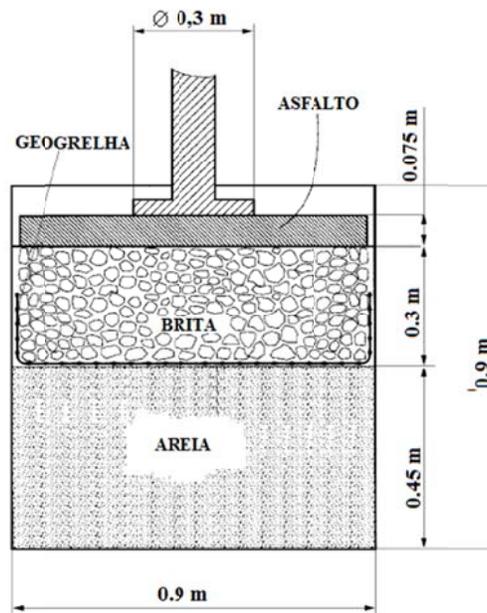


Figura 2.13 Caixa metálica usada por Cancelli para simulação de uma estrada não pavimentada (modificado - Cancelli et al, 1996).

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. Alguns resultados obtidos são apresentados na Figura 2.14. Esses resultados revelam de forma geral que quando o reforço é localizado na interface subleito-base, efetivamente aumenta a vida útil de uma estrada pavimentada, além de mostrar que o reforço consegue melhorar o comportamento da estrada em termos de resistência ao número de ciclos de carga quando usado um solo de subleito de baixa

capacidade de suporte. Finalmente foi observado que o reforço gera uma distribuição de carga mais uniforme e uma redução no afundamento acelerado da superfície do pavimento.

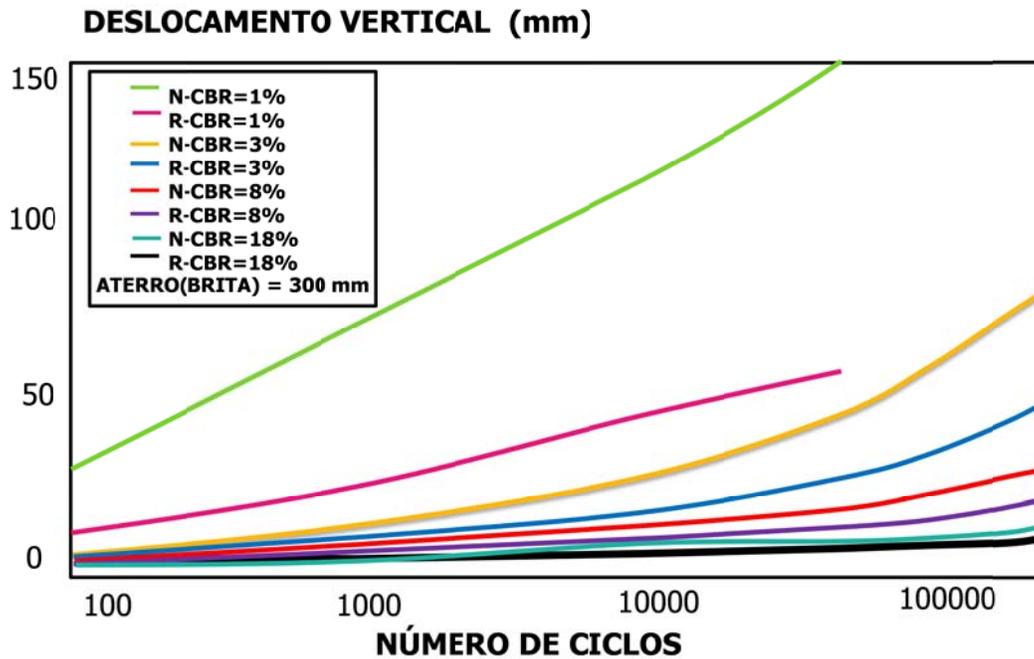


Figura 2.14 Comparação entre seções não reforçadas e reforçadas com geogrelha sobre solos de subleito com diferentes valores de CBR. (Cancelli et al., 1996).

Em ensaios em trechos experimentais, Al-Qadi et al. (2007) observou também que a utilização de reforço geossintético reduziu os movimentos laterais da camada de base. O aumento do movimento lateral na camada de base nos ensaios sem reforço foi evidenciado pela ocorrência de trincas superficiais mais profundas, o que aumentou a transferência de tensões para o subleito.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentadas as características e propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados na pesquisa visando a simulação do comportamento de uma estrada não pavimentada sujeita à ação do tráfego de veículos. Além disso, serão descritos os tipos de configurações de ensaios executados e o procedimento seguido para a elaboração de cada um dos ensaios.

#### 3.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS

Na pesquisa descrita nessa dissertação foram executados ensaios visando simular estradas não pavimentadas construídas com dois tipos de material de aterro, no caso foram utilizados, Resíduo de Construção e Demolição Reciclado (RCD-R) e brita. Além disso, foram simuladas estradas com reforço (geogrelha) 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, utilizando-se metodologia e equipamento de ensaio descritos a seguir.

##### 3.1.1 Tanque rígido para ensaios

Os ensaios de carregamento cíclico foram realizados em um tanque cilíndrico metálico rígido (Figura 3.1), O qual possuía as seguintes dimensões: diâmetro interno de 0,75 m e altura de 0,53 m, formando um conjunto com um cilindro hidráulico para aplicação de carga. Como parte da montagem, encontrasse um sistema de reação que permite a aplicação de carga sobre uma placa rígida (diâmetro igual a 20 cm), para simular o carregamento proveniente da roda de um veículo com carga por eixo de 80 kN.



Figura 3.1 Equipamento para ensaios de carregamento cíclico.

### 3.1.2 Sistema Hidráulico

Para poder executar os ensaios de carregamento cíclico, foi necessária a montagem de um sistema hidráulico que permitisse a aplicação de uma carga repetitiva estabelecida para simular as passagens dos veículos numa estrada não pavimentada. Esse sistema é composto basicamente pelos seguintes componentes:

- **Conjunto Motor-Bomba:** é responsável pela circulação do fluido (óleo) e manutenção da pressão no cilindro hidráulico. É composto por um reservatório de 80 litros, sendo capaz de produzir um pressão máxima de 30 MPa. A conexão elétrica para o funcionamento do motor é do tipo trifásico 4 CV.
- **Válvula de alívio:** é encarregada de proteger o sistema contra pressões excessivas.
- **Válvula solenóide:** é o componente que controla a circulação do fluido por meio de aberturas e fechamentos sucessivos durante seu funcionamento. Permite a transmissão do fluido para o cilindro hidráulico para carregamento e o seu retorno para o reservatório.

- **Mangueiras hidráulicas de alta pressão:** tem como função transportar o fluido desde o reservatório até o cilindro hidráulico, sendo capaz de suportar uma pressão máxima de 70 MPa.
- **Cilindro hidráulico:** é o componente responsável pela aplicação da carga desejada no ensaio. A capacidade do cilindro utilizado é de 100 kN.
- **Temporizador:** é encarregado de controlar a frequência com que é aplicado o carregamento, estabelecendo o ritmo de abertura e fechamento da válvula solenóide.

### 3.1.3 Sistema de aquisição de dados

Para fazer leitura da instrumentação empregada nos ensaios, foi necessário usar um sistema de aquisição de dados da empresa LYNX, modelo ADS 2000 (Figura 3.2). 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, ele permite a aquisição simultânea de todos os canais, além de permitir a programação da frequência com que os dados são adquiridos. O ADS2000 pode ser ligado a qualquer computador através de interfaces de comunicação Ethernet para captar sinais digitais e analógicos. O equipamento é composto por 16 canais para ligar a instrumentação desejada.

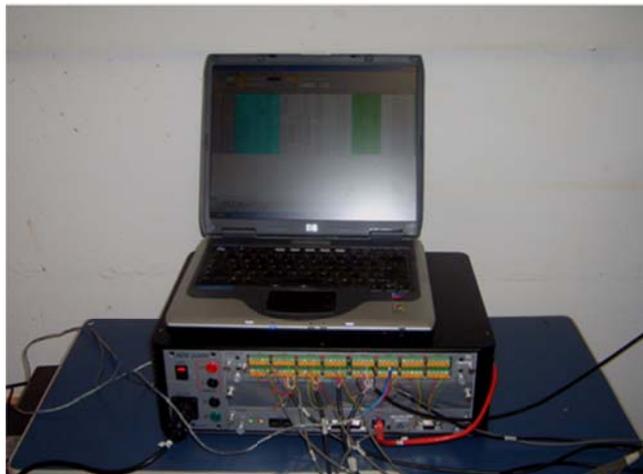


Figura 3.2 Sistema de aquisição de dados.

### 3.1.4 Instrumentação utilizada

Todos os ensaios foram monitorados por meio da instrumentação apropriada. Em cada ensaio utilizou-se uma célula de carga, cinco células de tensões totais e cinco medidores de deslocamento linear na superfície do aterro.

#### **3.1.4.1 Célula de carga**

Em todos os ensaios foi usada uma célula de carga de 100 kN (Figura 3.3), a qual serviu para medir a carga aplicada pelo cilindro na placa metálica que simulou o pneu do veículo.



Figura 3.3 Célula de carga empregada nos ensaios.

#### **3.1.4.2 Células de tensões totais**

Foram usadas células de tensões totais no interior da camada de subleito, posicionadas em várias profundidades. As células utilizadas foram do tipo diafragma, fabricadas pela empresa Micro Sensores Industrial, com diâmetro de 75 mm, espessura de 6 mm e com uma acurácia de 1%. A Figura 3.4 apresenta o modelo utilizado. Este tipo de célula de tensão total consiste de duas placas de aço inoxidável soldadas hermeticamente em suas bordas. Mediante um espaçador cria-se uma cavidade a qual é preenchida com óleo mineral previamente degaseificado a um nível inferior a 2 ppm, garantindo desta forma uma variação volumétrica mínima, com resposta linear e boa sensibilidade. A pressão gerada no interior da célula é medida através de um sensor de pressão elétrico, a base de extensômetros elétricos cujo circuito é ligado ao sistema de alimentação e de aquisição de dados.



Figura 3.4 Célula de tensões utilizada nos ensaios.

Antes de realizar os ensaios, as células foram devidamente calibradas. Para tanto, utilizou-se uma caixa rígida de aço preenchida com o mesmo solo utilizado nos ensaios. O processo de compactação do solo se deu, de forma similar ao utilizado nos ensaios, pelo método de compactação estática. A célula era instalada a meia altura da caixa, sendo recoberta por aproximadamente 15 cm de solo. Após esse processo, uma placa de aço era instalada sobre a camada final de solo onde eram aplicados incrementos de carga, com o auxílio de uma bomba e cilindros hidráulicos. As cargas aplicadas foram registradas pela célula de carga e pela leitora digital. Concomitantemente, o sistema de aquisição de dados (ADS 2000) registrava as voltagens correspondentes fornecidas pelos extensômetros elétricos existentes no diafragma da célula de tensão.

### 3.1.4.3 Medidores de deslocamento linear

Na pesquisa utilizaram-se medidores de deslocamento linear para obter o afundamento da placa de carregamento (Figura 3.5). Os medidores usados permitem uma medição de deslocamentos até 100 mm.



Figura 3.5 Medidor de deslocamento linear.

Na figura 3.6 é apresentado um esquema da disposição da instrumentação no ensaio.

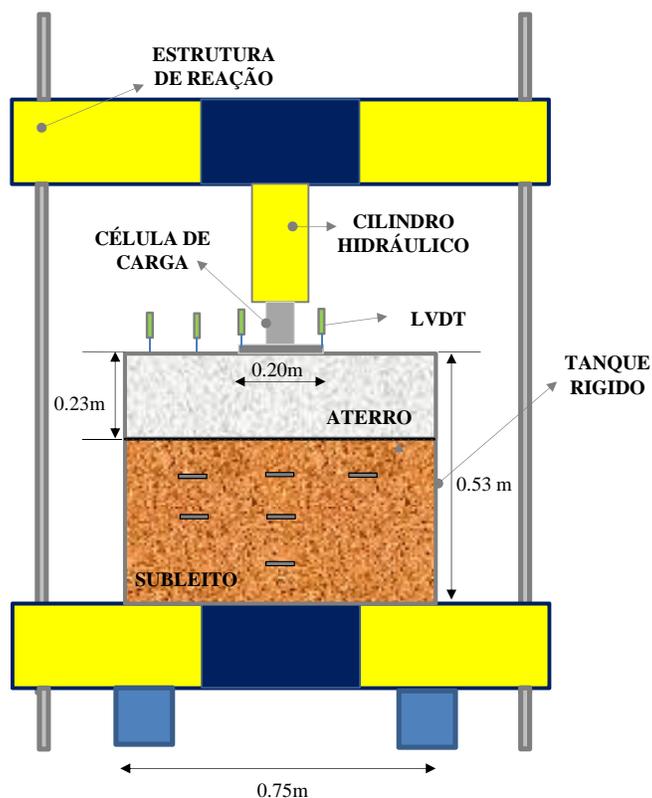


Figura 3.6 Disposição da instrumentação no ensaio.

## 3.2 MATERIAIS EMPREGADOS

Os solos utilizados foram um solo fino para execução do subleito e brita e resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) para a execução do aterro. Geogrelhas foram utilizadas como elementos de reforço instalados na interface aterro-subleito. Estes materiais são descritos a seguir.

### 3.2.1 Solo de subleito

Na realização desta pesquisa foi utilizado um solo fino como material de subleito, o qual foi coletado no Campo Experimental de Fundações e Ensaio de Campo da Universidade de Brasília. O referido campo experimental está localizado em frente ao prédio SG 12, onde funciona o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. A Figura

3.7 apresenta as curvas granulométricas do solo de subleito com e sem a utilização de defloculante.

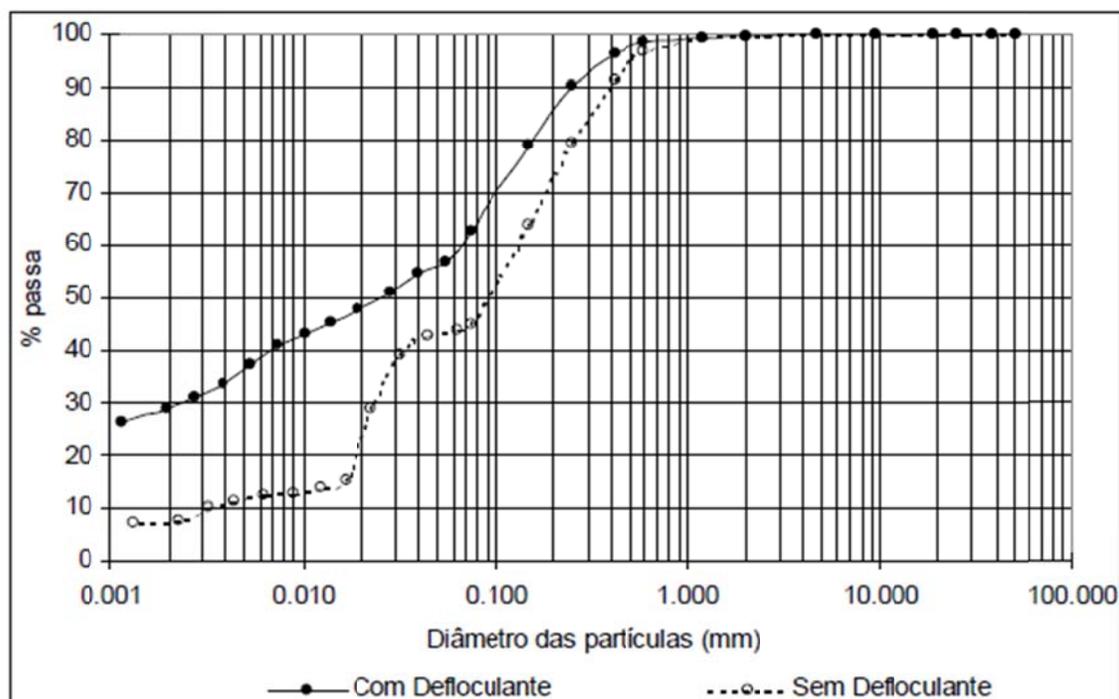


Figura 3.7 Curvas granulométricas com e sem defloculante (Guimarães, 2002).

O solo coletado no Campo experimental é originário de um manto de solo detritolaterítico da era Terciária-Quaternária, constituído principalmente de latossolos vermelhos e amarelos. Um alto grau de intemperismo e lixiviação foram responsáveis pela formação deste solo, o que resultou em uma estrutura bastante porosa, metaestável, com altos índices de vazios e consequentemente baixos pesos específicos, chamado pelos geotécnicos locais de “argila porosa de Brasília”. Devido ao processo de lixiviação, os horizontes destes solos são pouco diferenciados, com pequena variação no teor de argila e quase ausência das bases Ca, Mg, K, Na e SiO<sub>2</sub>, caracterizando-se pela predominância de argilominerais do tipo caolinita e presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Em seu estado natural este solo apresenta uma estrutura porosa, com grãos geralmente ligados por pontes de argila (Mendonça et al., 1994 apud Guimarães, 2002). Como o solo foi coletado a uma profundidade de 1,5 m, trata-se de um material que provém de um horizonte de solo residual laterítico, classificado como areno-argilo siltoso, com peso específico dos sólidos igual a 26,5 kN/m<sup>3</sup> e índice de plasticidade igual a 10 (Guimarães, 2002).

Na medida em que um dos objetivos dessa pesquisa foi o de analisar o comportamento de uma estrada construída sobre um solo mole submetida a condições de carregamento cíclico, foi utilizado o solo em condições que fornecesse uma capacidade de suporte muito baixa, para isto foram adotados os parâmetros citados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 Propriedades do solo de subleito.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Densidade relativa (dos sólidos)	2,68
Umidade (%)	27,10
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,40
Índice de Suporte California (CBR) (%)	4,23
Limite de Liquidez (%)	39
Limite de Plasticidade (%)	29

### **3.2.2 Materiais de aterro**

Na construção de estradas não pavimentadas, torna-se necessário prestar bastante atenção à camada de aterro, posto que ela é parte essencial na estrutura da estrada, sendo uma das camadas encarregadas de responder aos efeitos gerados pelo tráfego. Esta camada é responsável por distribuir as tensões verticais causadas pelas cargas do tráfego. Para melhor desempenho da estrada, recomenda-se que o material de aterro seja granular, com poucos finos, bem graduado, composto por partículas resistentes à abrasão. Os materiais de aterro utilizados nos ensaios são descritos a seguir.

#### **3.2.2.1 Resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)**

Resíduo de construção e demolição reciclados foram utilizados como material de aterro em alguns ensaios. Tais ensaios visaram verificar, em caráter preliminar, o desempenho de um material que frequentemente é disposto de maneira clandestina em terrenos baldios e em áreas públicas, tendo sua potencialidade desperdiçada.

Para estabelecer uma definição adequada do que é o RCD, adotou-se a publicada na Resolução 307 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), de 5 de julho de 2002,

que define como resíduos da construção civil os “*resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha*”

O RCD utilizado nesta pesquisa foi obtido no Campo Experimental de Fundações, Ensaios de Campo e Geossintéticos do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB, remanescente do utilizado por Santos (2010) em sua tese de doutorado. Segundo Santos (2010) este tipo de resíduo foi resultado do processo de britagem do RCD gerado em Brasília e nas cidades satélites. Esse processo foi realizado na Usina de Reciclagem de Entulho de Brasília (UREB), localizada no Aterro Controlado do Jôquei Clube. A Figura 3.8 apresenta uma foto do material utilizado na pesquisa. De acordo com ensaios realizados por Santos (2010), o RCD-R apresenta as propriedades listadas na Tabela 3.2. A Figura 3.9 apresenta a curva granulométrica deste material (Santos 2010).



Figura 3.8 Resíduo de construção e demolição reciclado utilizado na pesquisa.

Tabela 3.2 Propriedades geotécnicas do RCD-R (Modificado de Santos, 2010).

PARÂMETRO	VALOR
Densidade relativa (dos sólidos)	2,74
Limite de Liquidez (%)	35
Limite de Plasticidade (%)	28
Peso Especifico Seco Máximo ( $\text{kN/m}^3$ )	16,90
Umidade Ótima (%)	18
Ângulo de atrito	38
Coesão (kPa)	14

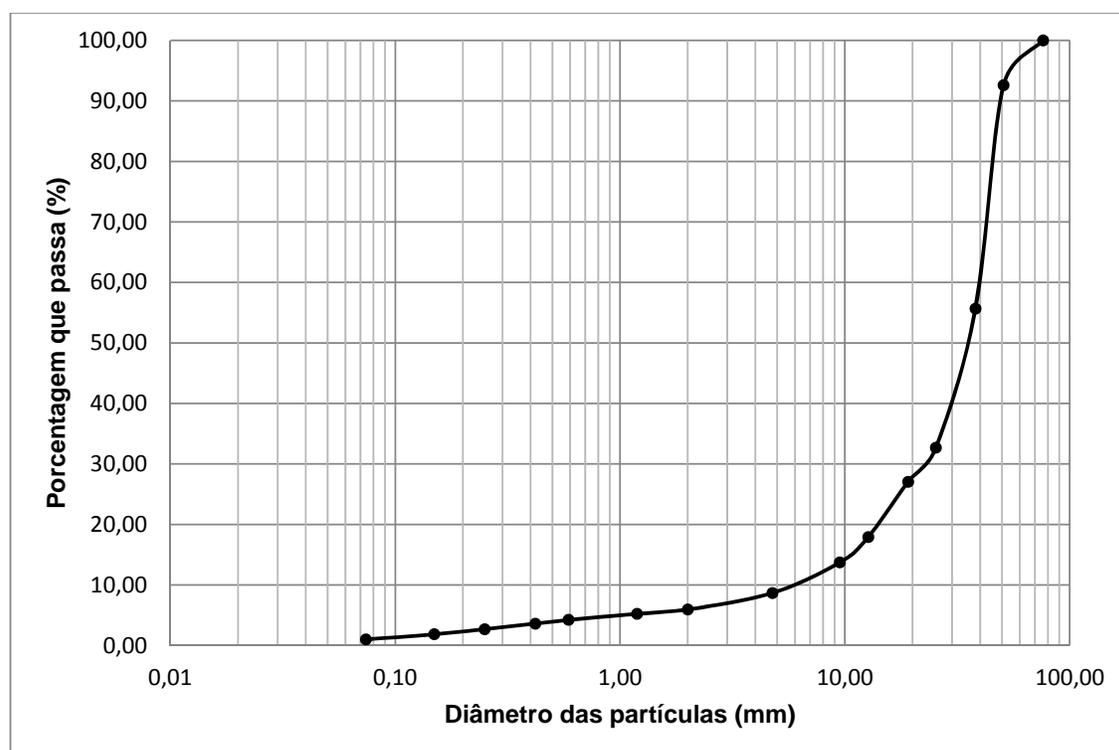


Figura 3.9 Curva granulométrica do RCD utilizado.

### 3.2.2.2 Brita

A brita usada nesta pesquisa tem origem calcária, procedente da pedra Guapó, localizada no estado de Goiás. A Figura 3.10 apresenta a brita utilizada nos ensaios e a Tabela 3.3 apresenta algumas de suas propriedades geotécnicas relevantes. A curva granulométrica desse material é apresentada na Figura 3.11.



Figura 3.10 Brita utilizada na pesquisa.

Tabela 3.3 Propriedades da brita utilizada nos ensaios.

PROPRIEDADE	VALOR
Densidade relativa (dos sólidos)	2,65
Massa específica seca ( $\text{g/cm}^3$ )	1,76
Absorção de Água (%)	0,50
Abrasão Los Angeles (%)	36,00
Umidade Ótima (%)	2,00

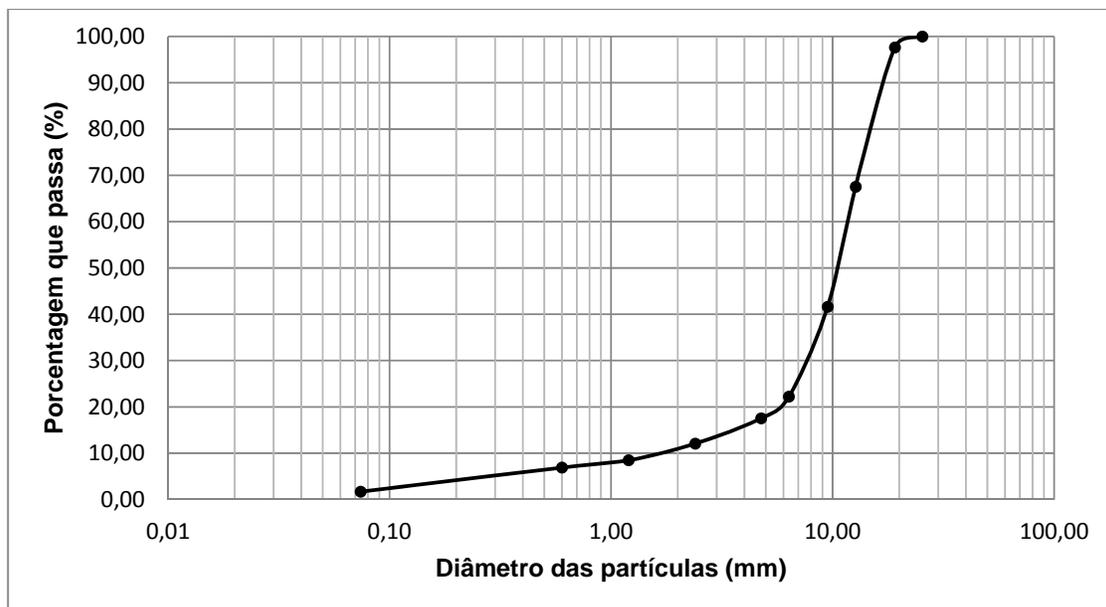


Figura 3.11 Curva granulométrica da Brita empregada nos ensaios.

### 3.2.3 Geossintéticos usados como reforço

Para os ensaios de carregamento cíclico foram utilizados como reforço três tipos de geogrelha, com diferentes dimensões de aberturas, rigidez e resistência à tração. Cada uma dessas geogrelhas é descrita abaixo.

#### 3.2.3.1 Geogrelha 1

Um dos tipos de geogrelha utilizada para os ensaios de carregamento cíclico foi uma geogrelha fabricada pela empresa Huesker, do tipo Fortrac 200/30-30 (Figura 3.12). Esta grelha tem aberturas de 30 mm x 30 mm, fabricada com fios de poliéster revestidos com camada de PVC. Na Tabela 3.4 são apresentadas as propriedades dessa geogrelha.

Tabela 3.4 Propriedades da Geogrelha 1.

PROPRIEDADES	VALOR
Aberturas (mm x mm)	30 x 30
Resistência à tração (kN/m)	200
Rigidez à tração a 5% de deformação (kN/m)	1500



Figura 3.12 Geogrelha 1 usada nos ensaios.

### 3.2.3.2 Geogrelha 2

A Geogrelha 2 empregada nesta pesquisa também é produzida pela empresa Huesker, sendo do tipo Fortrac 35/20-20 (Figura 3.13), tendo aberturas de 20 x 20 mm. É também confeccionada com filamentos de poliéster revestidos por camada de PVC para proteção. Na Tabela 3.5 são apresentadas as propriedades dessa grelha.

Tabela 3.5 Propriedades da Geogrelha 2.

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Abertura da malha (mm x mm)	20 x 20
Resistência à tração (kN/m)	35
Rigidez à tração a 5% de deformação (kN/m)	260



Figura 3.13 Geogrelha 2 usada nos ensaios.

### 3.2.3.3 Geogrelha 3

A Geogrelha 3 é uma modificação da Geogrelha 2, por meio de corte de alguns de seus membros, de forma a resultar em uma grelha com aberturas de 40 mm x 40 mm (Figura 3.14). Isso foi feito para analisar a influencia das aberturas da grelha no desempenho da estrada reforçada.



Figura 3.14 Geogrelha 3 usada nos ensaios.

### 3.3 GENERALIDADES SOBRE OS ENSAIOS

Na pesquisa foram realizados seis ensaios com aplicação de carregamento cíclico. Na Tabela 3.6 são apresentados detalhadamente os ensaios realizados na pesquisa. Para cada um destes testes, após se atingir um afundamento da placa de carregamento de 25 mm, foi realizada uma restauração da superfície do aterro. Esta zona foi preenchida com o mesmo material de aterro usado em cada ensaio. Após essa manutenção, um novo estágio de carregamento cíclico foi aplicado até se atingir novamente o afundamento de 25 mm. Nova restauração da superfície foi realizada, sendo seguida do estágio final de carregamento.

Tabela 3.6 Ensaios realizados na pesquisa.

ENSAIO	MATERIAL DE ATERRO	REFORÇO	ABERTURA DO REFORÇO (mm)
1	RCD-R	-----	-----
2	RCD-R	GEOGRELHA	30 X 30
3	BRITA	-----	-----
4	BRITA	GEOGRELHA	30 X 30
5	BRITA	GEOGRELHA	20 X 20
6	BRITA	GEOGRELHA	40 X 40

### 3.4 MONTAGEM DO ENSAIO

#### 3.4.1 Preparação do equipamento para ensaios

Antes da colocação dos solos no equipamento para ensaios foi instalada uma camada de plástico lubrificada (vaselina) com o objetivo de minimizar o atrito lateral produzido pelo contato entre o solo e a superfície interna do tanque metálico (Figura 3.15).



Figura 3.15 Colocação da lona para evitar atrito lateral.

#### 3.4.2 Preparação do solo de subleito

Dado que o objeto do trabalho foi representar estradas não pavimentadas sobre solos moles, foi necessário variar a umidade durante a preparação do solo escolhido como subleito, de modo a deixá-lo com características típicas às de solo com baixa capacidade de suporte. Para determinar esta umidade foram feitos ensaios de compactação e CBR, onde se determinou a umidade para a qual se teria um valor de CBR aproximadamente igual a 4.

Uma vez definida a umidade de compactação, procedeu-se à homogeneização do solo antes da compactação, utilizando-se uma betoneira. Para cada camada de solo compactada no tanque foram necessários 70 kg de solo na umidade de trabalho. O subleito foi executado em três camadas de 10 cm cada, até se atingir a espessura final de 30 cm para esta camada. O processo de compactação foi do tipo estático, utilizando-se para isso uma placa metálica

circular, sobre a qual se aplicava carga por meio de um cilindro hidráulico até que o solo lançado atingisse a espessura especificada. O grau de compactação foi controlado com base na massa compactada e na sua espessura final (10 cm).

### 3.4.3 Instalação da instrumentação no subleito

Células de tensões totais foram instaladas em diferentes profundidades no subleito. Na Figura 3.16 encontra-se ilustrado o processo de instalação das células em cada camada do subleito. É importante notar que as células de maior importância para o trabalho foram as instaladas sobre o eixo de aplicação do carregamento (células 1 a 3 na Tabela 3.7) . Foram também instaladas células de tensões em uma mesma profundidade, mas a diferentes distâncias horizontais em relação ao centro da placa de carregamento, como mostrado na Tabela 3.7 e na Figura 3.17.

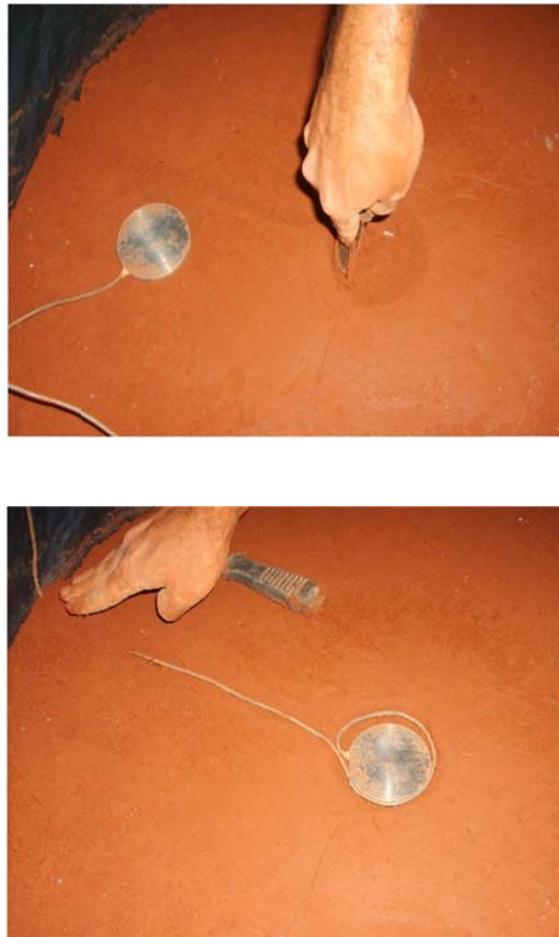


Figura 3.16 Instalação das células de tensões no subleito.

Tabela 3.7 Localização das células de tensão usadas na pesquisa.

CÉLULA DE TENSÃO N <sup>o</sup>	PROFUNDIDADE (m)	DISTANCIA AO CENTRO DE APLICAÇÃO DA CARGA (m)
1	0,28	0
2	0,38	0
3	0,48	0
4	0,28	- 0,275
5	0,28	0,275
6	0,38	- 0,275

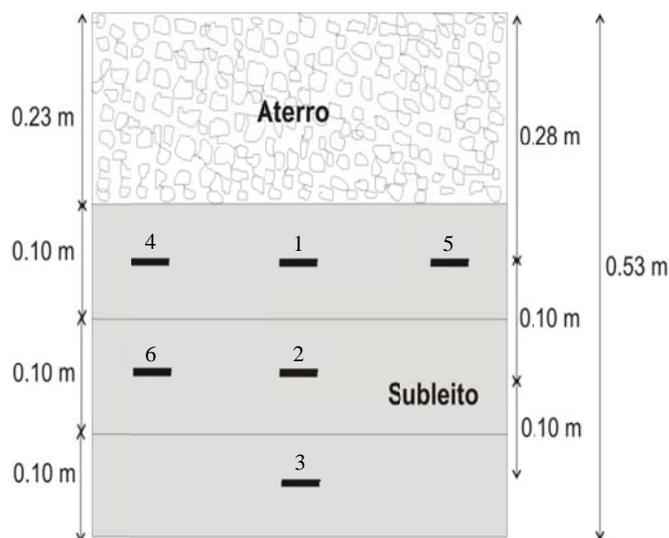


Figura 3.17 Localização das células de tensões totais.

### 3.4.4 Preparação das diferentes configurações de ensaios

#### 3.4.4.1 Ensaio 1

No primeiro ensaio foi utilizado como material de aterro o resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R). Nesse ensaio não foi utilizado reforço. A compactação do material de aterro foi realizada em três camadas, as quais foram compactadas com ajuda do equipamento de aplicação de carga mediante energia estática, tendo em conta para este processo o controle da altura da camada, tendo sempre obter o peso específico seco máximo do material utilizado. Na figura 3.18 é apresentada uma fotografia da disposição final do aterro de RCD-R.



Figura 3.18 Vista da superfície do aterro no Ensaio 1.

O critério de interrupção do ensaio era quando o afundamento da placa de carregamento atingisse 25 mm. Como no primeiro ensaio com esse material observou-se que isso levaria muito tempo para ocorrer, procedeu-se ao umedecimento do aterro para acelerar o processo após de 120.000 ciclos de carga. Isso simularia a ocorrência de uma chuva. Entretanto, mesmo assim, observou-se que seria necessário muito tempo para se atingir o afundamento estipulado, motivo pelo qual esse ensaio foi terminado com afundamento de 17 mm aproximadamente.



Figura 3.19 Simulação do umedecimento no aterro

#### **3.4.4.2 Ensaio 2**

No segundo ensaio empregou-se o mesmo tipo de material de aterro usado no Ensaio 1, só que neste caso foi instalado reforço na interface aterro-subleito. Como reforço foi empregada

a geogrelha 1. A amostra de geogrelha foi cortada com um diâmetro de 1,25 m, um pouco maior que o do equipamento de ensaio, para permitir a ancoragem do geossintético, a qual foi feita dobrando-se a geogrelha e embutindo 10 cm dela no aterro (Figura 3.20). Na figura 3.21 apresenta-se uma vista da instalação do reforço.

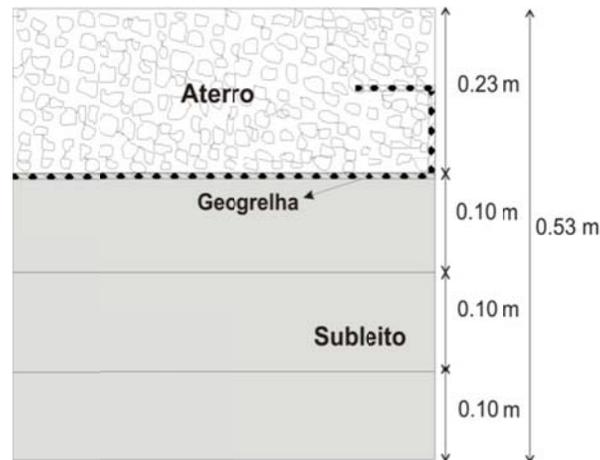


Figura 3.20 Ancoragem lateral do reforço.



Figura 3.21 Colocação do reforço no ensaio 2.

### 3.4.4.3 Ensaio 3

Para o ensaio três foi usado como material de aterro brita, sem presença de camada de reforço. Para a preparação das camadas de aterro e de subleito foram seguidos os mesmos

procedimentos descritos anteriormente. A Figura 3.22 apresenta uma vista parcial desse ensaio.



Figura 3.22 Montagem ensaio três (3).

#### **3.4.4.4 Ensaio 4**

Nesse ensaio foi utilizada a brita como material de aterro, com a presença de uma camada da Geogrelha 1. Os mesmos processos de preparação de solos e instalação da camada de reforço, descritos anteriormente, foram utilizados.

#### **3.4.4.5 Ensaio 5**

No Ensaio 5 foi utilizada brita como material de aterro e Geogrelha 2 como reforço. Nesse caso, visou-se variar o tipo de grelha com o objetivo de avaliar a sua influência no comportamento da estrada. Novamente, os mesmos processos para preparação de solos e instalação do reforço foram utilizados.

#### **3.4.4.6 Ensaio 6**

No sexto e último ensaio foi utilizada a Geogrelha 3 e brita como material de aterro. Os mesmos procedimentos descritos anteriormente foram utilizados.

### **3.4.5 Instalação da instrumentação na superfície do aterro**

Em 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. Com respeito à distribuição destes instrumentos, três deles foram instalados nas bordas da placa de carregamento. Os outros dois se situaram na lateral esquerda da placa metálica com uma distancia entre eles de 0,1 m, o Lvdt mais próximo ao bordo da placa encontrasse a 0,075 m. Na figura 3.23 é mostrada a disposição dos medidores de deslocamento no ensaio.



Figura 3.23 Disposição dos medidores de deslocamento linear no ensaio.

### **3.5 APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO CÍCLICO**

Para todos os ensaios realizados na pesquisa a aplicação do carregamento cíclico foi feito do mesmo modo. Após realizada a montagem do ensaio, com os estágios já mencionados, procedeu-se à aplicação do carregamento cíclico. Para aplicar carga no ensaio foi necessário o uso de uma placa metálica de 0,20 m de diâmetro sobre a qual foi aplicada uma carga de 17,3 kN, regulada previamente no sistema hidráulico. A frequência estipulada para a aplicação da carga foi de 1Hz.

### **3.6 RESTAURAÇÃO DO ATERRO**

Como já mencionado, após ser atingido um afundamento de 25 mm da placa de carregamento, o ensaio era interrompido para restauração da superfície do aterro. Esta restauração consistiu em se colocar o mesmo material de aterro na região afundada, tendo precaução de manter as

mesmas condições de compactação utilizadas na preparação do ensaio. A execução do ensaio depois de feita a restauração se realizava de igual forma ao descrito anteriormente. O propósito de fazer o reparo da superfície do aterro foi o de simular o procedimento seguido em manutenções de estradas não pavimentadas. Este tipo de restauração foi aplicado para todos os ensaios realizados na pesquisa, tendo sido realizadas duas restaurações da superfície por teste. A Figura 3.24 exibe a execução da restauração da superfície do aterro em um dos ensaios realizados.



Figura 3.24 Restauração da superfície do aterro.

Depois de finalizadas as duas restaurações superficiais e a aplicação dos respectivos estágios de carregamento, o ensaio era desmontado, tendo-se cuidado ao retirar a instrumentação. Durante essa fase foi recolhido material de aterro vizinho ao reforço e embaixo da placa de carregamento. A coleta deste material foi feita para a realização de ensaios de granulometria que permitissem estabelecer o índice de quebra dos grãos devido ao carregamento cíclico.

### **4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

#### **4.1 INTRODUÇÃO**

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos para as diferentes configurações dos ensaios realizados no trabalho e suas análises. Inicialmente, será exposto o comportamento da estrada não pavimentada simulado na pesquisa, em função do emprego de diferentes materiais de aterro (Resíduos de Construção e Demolição Reciclados – RCD-R e brita) para os casos sem reforço e reforçado. Para cada configuração de ensaio simulado foram avaliados os deslocamentos da superfície do aterro e as tensões transferidas para o solo de subleito. São apresentados gráficos comparativos entre os desempenhos dos diferentes materiais utilizados, em condições reforçadas e sem reforço. Entre os gráficos comparativos, estão os que relacionam os deslocamentos verticais com o número de ciclos de carga aplicado à estrada. Outra importante relação avaliada foi a de transmissão de tensões totais para o solo de subleito em função do número de repetições de cargas. Para as simulações de aterros reforçados, são mostrados os resultados obtidos com o uso de diferentes tipos de geogrelhas com propriedades de tração e geometrias distintas.

#### **4.2 INFLUÊNCIA DO TIPO DE MATERIAL DE ATERRO**

##### **4.2.1 Primeiro estágio de carga**

Os resultados do primeiro estágio de carga dividem-se em análise de deslocamentos e análises de tensões nos ensaios submetidos ao carregamento cíclico, como descrito abaixo.

##### **4.2.1.1 Análises dos deslocamentos no primeiro estágio de carga**

- **Ensaio sem reforço**

A Figura 4.1 mostra o progresso dos deslocamentos verticais para as superfícies de aterro sem presença de reforço. Foi observado que as estradas construídas com RCD e brita sem presença

de reforço, suportaram menor número de repetições de carga, em parte devido à quebra prematura dos grãos desses materiais. Comparando os resultados obtidos ao usar distintos materiais de aterro, verificou-se que na estrada não pavimentada feita de brita foi gerado um afundamento da placa de carregamento de 25 mm após a aplicação de 1.630 repetições de carga. Já a estrada construída com RCD atingiu o deslocamento estabelecido (25 mm) após de 1.710, muito similar ao comportamento da estrada construída com brita.

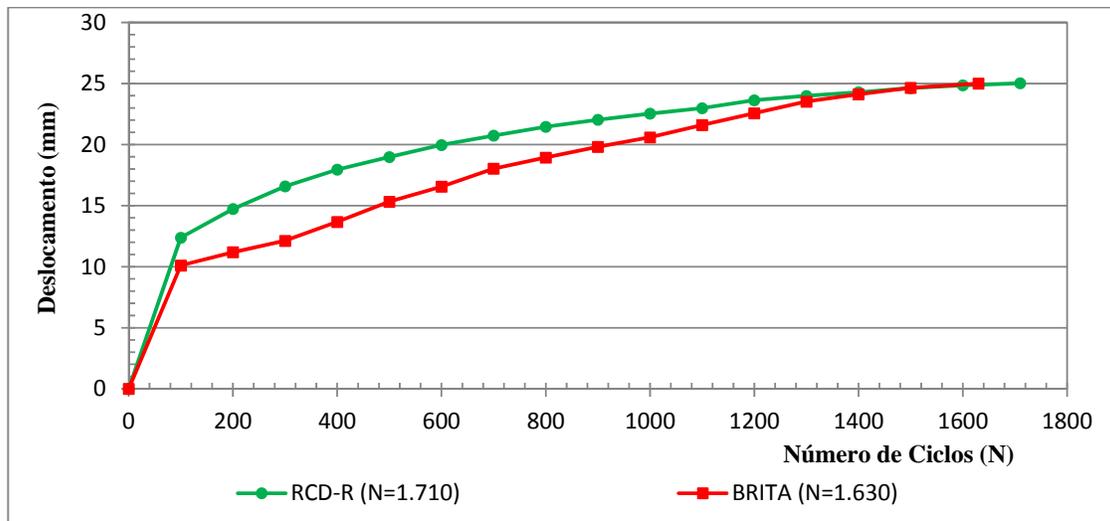


Figura 4.1 Deslocamentos superficiais nos ensaios sem reforço *versus* o número de ciclos de carga - primeiro estágio de carga.

- **Ensaio com reforço**

A Figura 4.2 mostra o progresso dos deslocamentos verticais da placa de carregamento devido à aplicação de repetições de carga ao longo do primeiro estágio de carga. Nessa figura a convenção “+R”, ao lado do tipo de aterro, indica a presença de reforço e pode-se observar que os ensaios reforçados com a Geogrelha 1, descrita no capítulo 3, tiveram uma maior duração até o afundamento limite ser atingido. Com isso, constata-se que a geogrelha conseguiu desempenhar de forma adequada a função de reforço esperada. Nesse caso, o geossintético contribuiu como reforço conferindo maior rigidez lateral à camada do solo de aterro, potencializando a durabilidade da estrada em termos gerais.

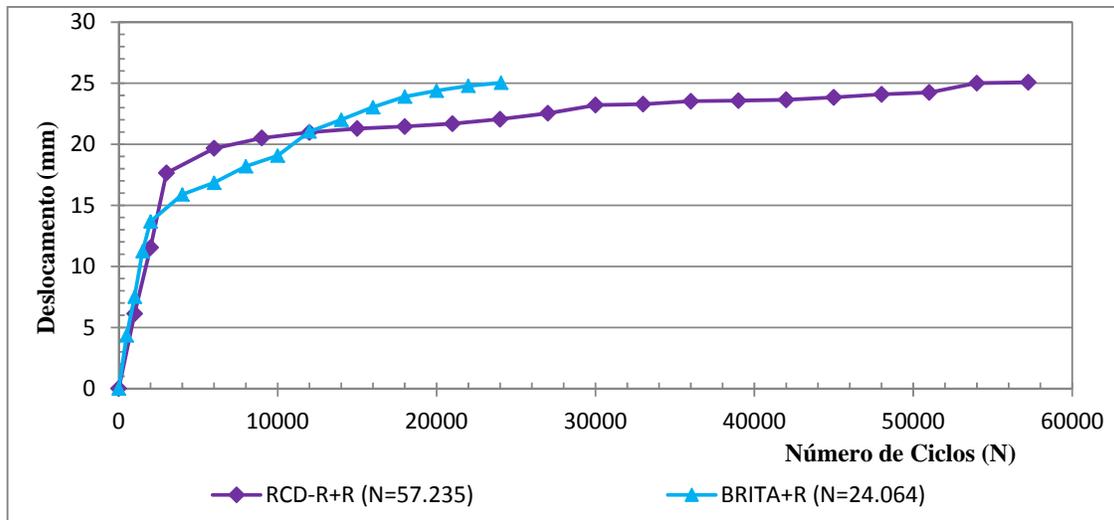


Figura 4.2 Deslocamentos superficiais nos ensaios com reforço *versus* o número de ciclos de carga - primeiro estágio de carga.

No ensaio utilizando brita reforçada, obtiveram-se 24.064 ciclos de carga até este afundamento. Porém, a estrada que apresentou melhor desempenho, do ponto de vista da maior resistência aos carregamentos cíclicos foi a construída RCD-R. Deve-se considerar que esse material apresenta granulometria mais graúda que a da brita.

Para quantificar a eficiência da geogrelha usada como reforço, pode-se calcular o fator de eficiência ( $E$ ), que é definido como a razão entre o número de repetições ( $N_r$ ) de carga necessárias para que a estrada reforçada alcance um afundamento de 25 mm e o número de repetições ( $N_u$ ) de carga para que a estrada não reforçada também atinja o mesmo afundamento. Na equação 4.1 é apresentado o fator de eficiência para o caso de utilização do RCD-R como aterro, tem-se:

$$E = \frac{N_r}{N_u} = \frac{57.000}{1.700} \approx 33.5 \quad (4.1)$$

Esse fator de eficiência evidencia um considerável aumento da vida útil da estrada não pavimentada com a utilização de geossintéticos como reforço. Entretanto, é possível que esse valor tão elevado, em parte, seja devido a um processo de quebra de grãos prematura no ensaio com RCD-R sem reforço.

Na equação 4.2 é calculado também o fator de eficiência para a estrada construída com brita como material de aterro e reforçada com geogrelha:

$$E = \frac{Nr}{Nu} = \frac{24.000}{1.600} \approx 15.0 \quad (4.2)$$

Os valores obtidos como fator de eficiência para os casos das estradas reforçadas usando brita como aterro, comparado com a construída com RCD-R, mostra que o melhor desempenho foi apresentado pelo RCD-R, mostrando também a eficiência do reforço empregado.

Outra análise relevante a ser feita é relativa ao desenvolvimento dos deslocamentos verticais da placa de carregamento para os distintos materiais de aterro utilizados, como mostrado na Figura 4.3. Nessa figura tomou-se como referência os resultados obtidos para o número de ciclos suportados pela estrada de brita não forçada (para afundamento de 25 mm), por este ter sido o material de aterro que suportou o menor número de ciclos. Na Fig. 4.3 constatam-se comportamentos parecidos entre os deslocamentos de aterros de brita e de RCD-R. Note-se que os deslocamentos no início da aplicação do carregamento são consideráveis, possivelmente devido à quebra ou acomodação dos grãos dos materiais devido ao carregamento. Além disso, observa-se que o RCD-R e a brita atingem o deslocamento de 25 mm quase que simultaneamente, para 1.400 ciclos, deslocamento esse estipulado como condição para a restauração da superfície da estrada.

Na Figura 4.4 são apresentados os deslocamentos verticais gerados na superfície do aterro *versus* a distância ao centro da placa de carregamento. Nesse gráfico é possível observar que as superfícies de aterro da estrada não pavimentada construída com brita reforçada (BRITA+R) e sem reforço levantam-se ligeiramente, o que pode ser explicado pela dilatação da brita durante o carregamento. Nos ensaios com RCD-R como material de aterro, o levantamento da superfície foi muito menor. Além disso, percebe-se que para uma distância igual a 1,5 vezes o diâmetro da placa, os deslocamentos verticais da superfície da estrada foram praticamente nulos.

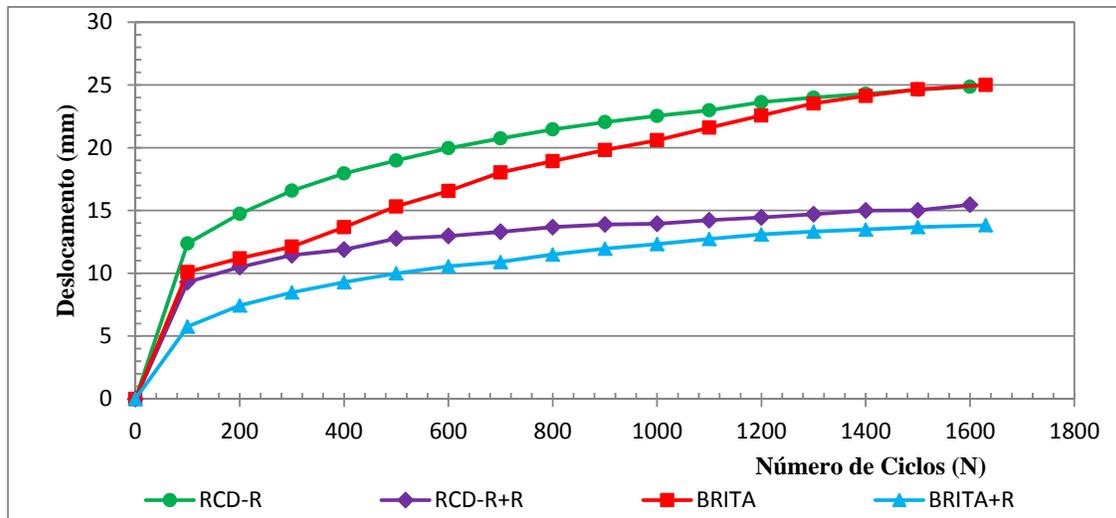


Figura 4.3 Deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga para N = 1.630 (ao final do ensaio não reforçado com brita) - primeiro estágio de carga.

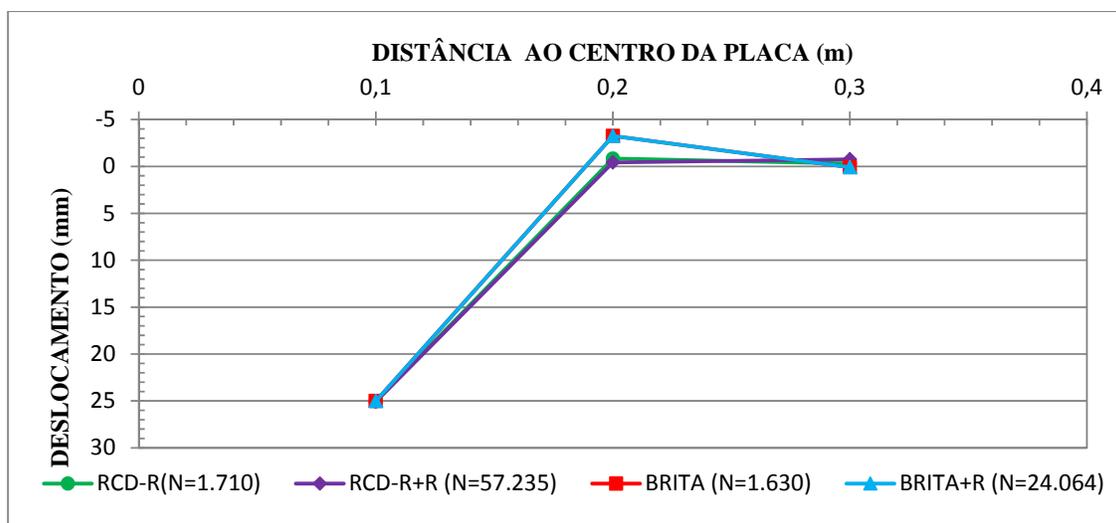


Figura 4.4 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro - primeiro estágio de carga.

Na Figura 4.5 são mostrados os perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro para todos os materiais de aterro usados nos ensaios, ressaltando-se se tratarem de deslocamentos para N igual a 1.630 (final do ensaio com a brita não reforçada). Segundo o gráfico, nota-se que para o esse número de ciclos de carga, os menores deslocamentos verticais ocorreram para as estradas construídas com brita e RCD-R reforçados com geogrelha, particularmente no ensaio com RCD-R.

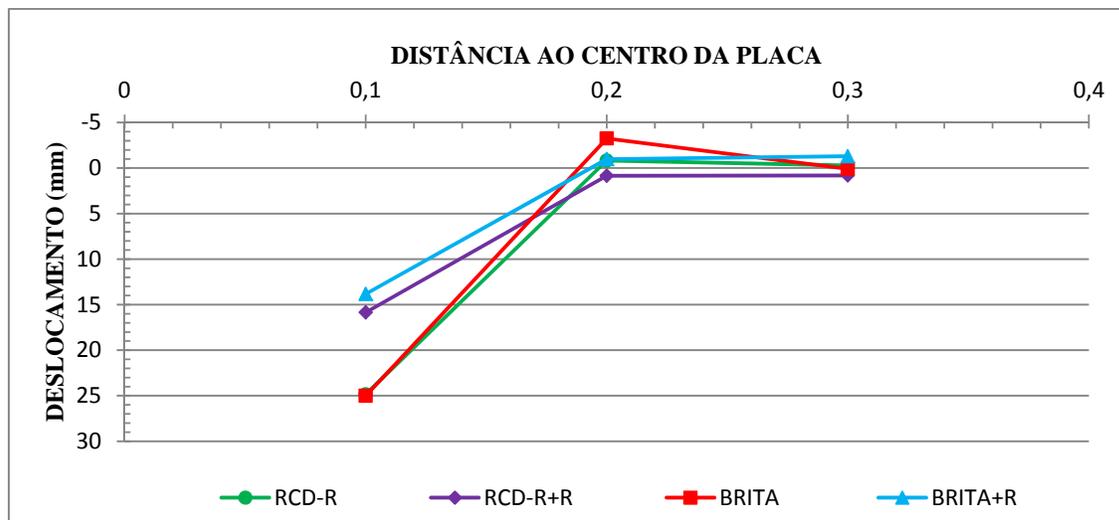


Figura 4.5 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro - primeiro estágio de carga. Para  $N = 1.630$  (ao final do ensaio não reforçado com brita)

#### 4.2.1.2 Análise de tensões totais máximas no primeiro estágio de carga

Na Figura 4.6 apresentam-se as variações de tensões totais máximas ao longo da profundidade do solo de subleito. Observa-se que as tensões geradas mais próximas à superfície do subleito nos ensaios com brita com e sem reforço foram significativamente menores que nos ensaios com RCD-R, o que pode, em parte, ter sido ocasionado pela distribuição granulométrica do RCD-R, composta de grãos de maior tamanho que os da brita. A penetração de elementos de RCD-R entre as aberturas da geogrelha pode ter influenciado a transferência de tensões na região superficial do subleito. A presença de reforço não alterou de forma significativa a variação de tensões totais ao longo da profundidade do subleito, embora deva-se considerar os maiores valores de  $N$  nos casos reforçados. Essa pouca diferença entre valores de tensões totais nas condições com e sem reforço pode estar associada à pouca espessura do material de subleito, embora tal aspecto tenha que ser melhor investigado.

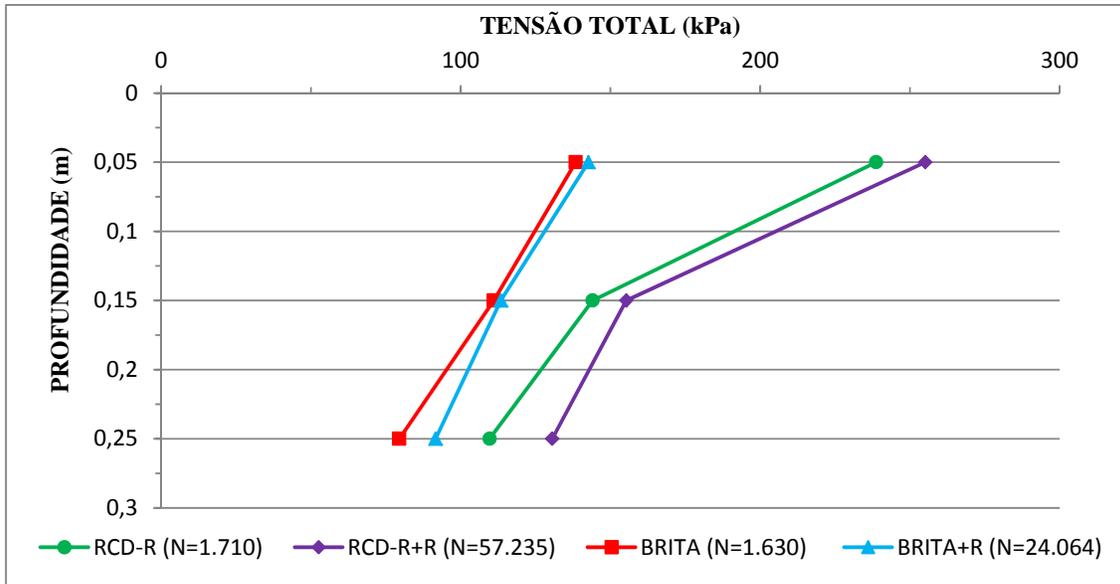


Figura 4.6 Tensões totais máximas *versus* profundidade - primeiro estágio de carga

As tensões totais no subleito para distintos materiais de aterro e  $N = 1.630$  são apresentadas na Figura 4.7. Como comentado anteriormente, observou-se também maiores valores de tensões nos ensaios com RCD-R.

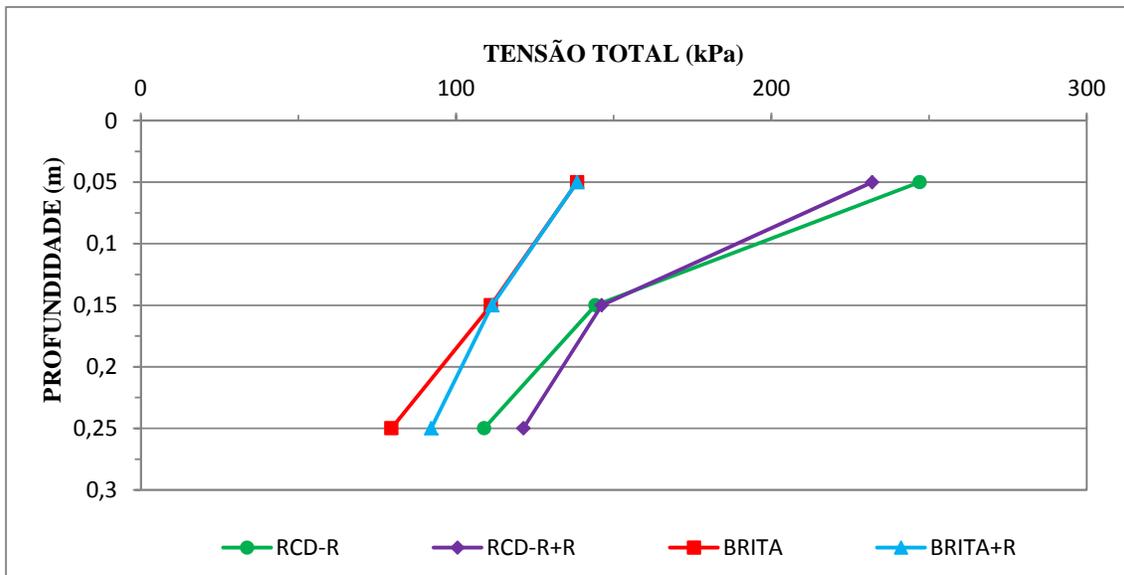


Figura 4.7 Tensões totais máximas *versus* profundidade - primeiro estágio de carga. Para  $N = 1.630$  (Ao final do ensaio não reforçado).

## 4.2.2 Segundo estágio de carga

- **Ensaio sem reforço**

Na Figura 4.8 são exibidos os deslocamentos da superfície da estrada *versus* o número de ciclos de carga para as configurações dos ensaios sem reforço, testadas no segundo estágio de carga, após a restauração da superfície da estrada. Percebe-se neste gráfico que a estrada que melhor respondeu a aplicação de carga foi a construída com RCD-R. Na tentativa de acelerar o afundamento da placa de carregamento, saturou-se o material de aterro em torno de  $N = 120.000$ . Embora o afundamento tenha aumentado após esse procedimento, ainda assim foi bem menor que o esperado (25 mm). Isso pode ter ocorrido devido ao fato deste material apresentar uma composição heterogênea, é possível que quando realizada a restauração da superfície, o material de aterro utilizado possa ter composição distinta da inicial, contendo provavelmente elementos (grãos) mais resistentes. Outra explicação é que um material de pior qualidade possa ter sido utilizado na restauração da estrada reforçada. Outra possibilidade é uma maior quebra de grãos do aterro da estrada reforçada no segundo estágio de carga, já que os mesmos foram submetidos a um número de repetições de carga maior no primeiro estágio. Note-se que não se atingiu o afundamento de 25 mm no ensaio com RCD-R sem reforço (Fig. 4.7) até  $N$  aproximadamente igual a 520.000.

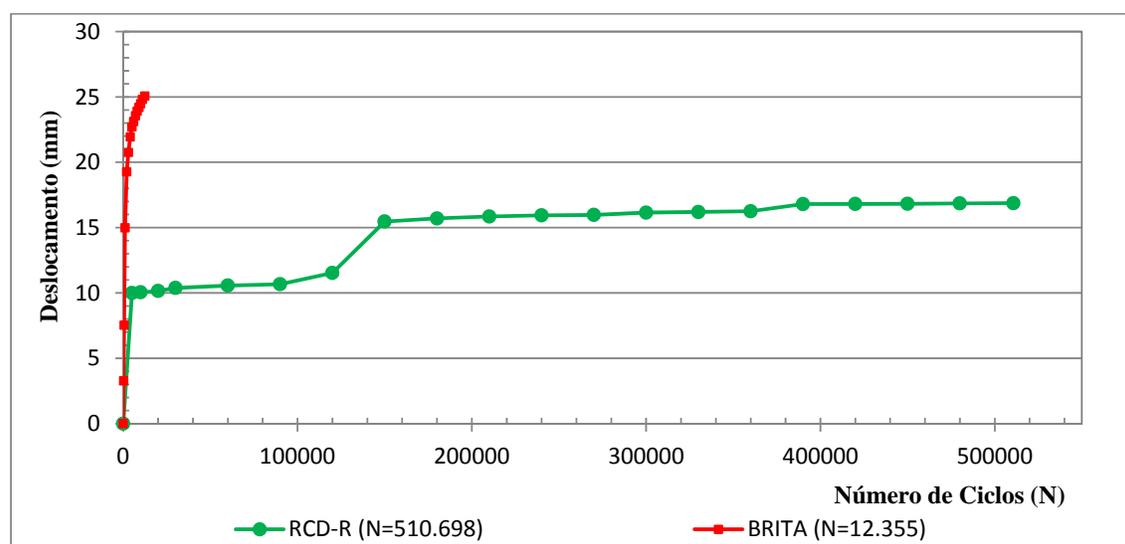


Figura 4.8 Deslocamentos superficiais nos ensaios sem reforço *versus* o número de ciclos de carga – segundo estágio de carga.

- **Ensaio com reforço**

Na Figura 4.9 são exibidos os deslocamentos da superfície da estrada *versus* o número de ciclos de carga para as configurações dos ensaios com reforço, testadas no segundo estágio de carga, após a restauração da superfície da estrada. Nestes testes foi observado que a presença do reforço contribui para o aumento no número de ciclos de carga suportado pelas estradas, com exceção da estrada construída com RCD-R+R que teve um bom comportamento, mas não melhor que o da estrada feita com o mesmo material de aterro sem presença de reforço. Como foi falado anteriormente, devido à heterogeneidade do RCD-R.

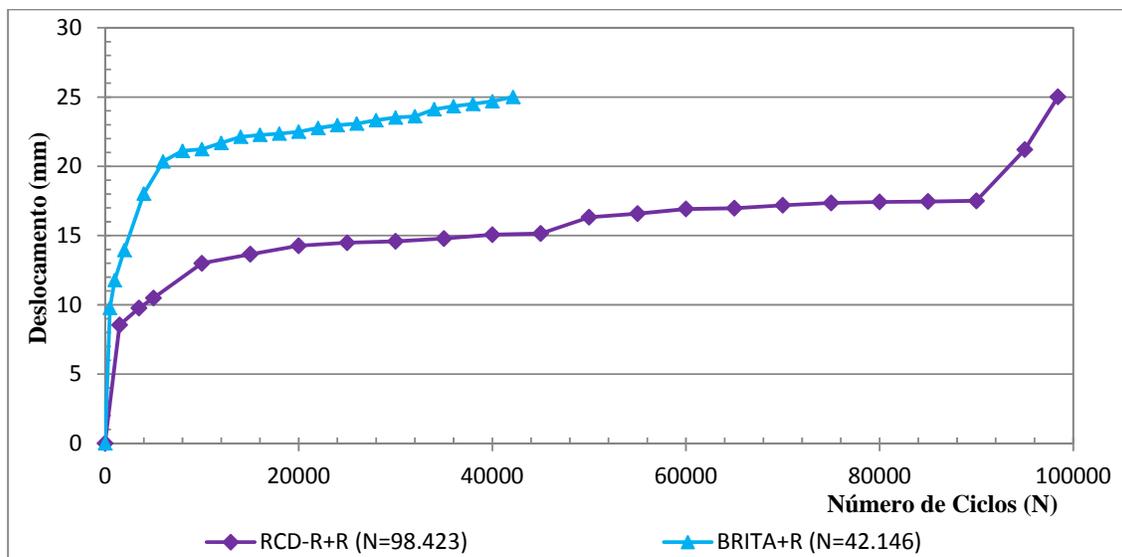


Figura 4.9 Deslocamentos superficiais nos ensaios com reforço *versus* o número de ciclos de carga – segundo estágio de carga.

Verificou-se que, de maneira geral, todas as estradas simuladas, conseguiram resistir um maior número de ciclos de carga maior, em comparação com o primeiro estágio de carga. Isso pode ter sido decorrência do material de aterro já ter sido carregado previamente, o que contribuiu para a sua melhor compactação, embora podendo também favorecer mais a quebra de grãos.

A Figura 4.10 mostra os deslocamentos da placa de carregamento *versus* número de ciclos de carga, considerando-se o limite  $N = 12.355$ , que foi estabelecido, como anteriormente, em função dos resultados obtidos no ensaio utilizando brita sem reforço. Até  $N = 12.355$ , a

diferença entre resultados de ensaios com RCD-R com e sem reforço ainda é pequena, como se pode observar na Figura 4.10.

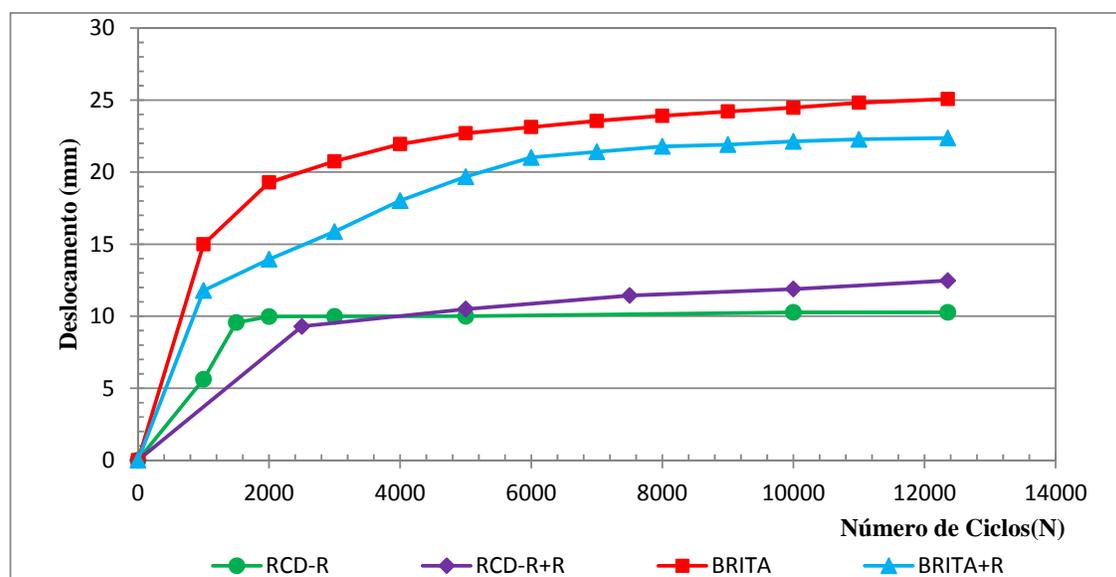


Figura 4.10 Deslocamentos superficiais *versus* o número de ciclos de carga - segundo estágio de carga. Para N = 12.355 (ao final do ensaio não reforçado).

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram os perfis de deslocamentos verticais na superfície das estradas no segundo estágio de carga. Segundo o observado nessa figura, para as faixas de 1 e de 1.5 vezes o diâmetro da placa, os deslocamentos são negativos, devido a uma maior dilatação dos materiais, sendo os valores encontrados muito próximos para todos os materiais empregados, com exceção do RCD-R sem reforço.

Na Figura 4.12 são apresentados perfis de deslocamentos da superfície do aterro para N = 12.355 ciclos de carga, correspondente ao final do ensaio com brita sem reforço. Observa-se que nos testes efetuados com Brita+R e Brita, a estrada mostrou deslocamentos verticais negativos nas distâncias de 1 e de 1.5 vezes o diâmetro da placa,. Apesar dos dois materiais de aterro poderem ser empregados com desempenhos aceitáveis, o que exibiu o melhor desempenho com relação a deslocamentos verticais na superfície foi o RCD-R.

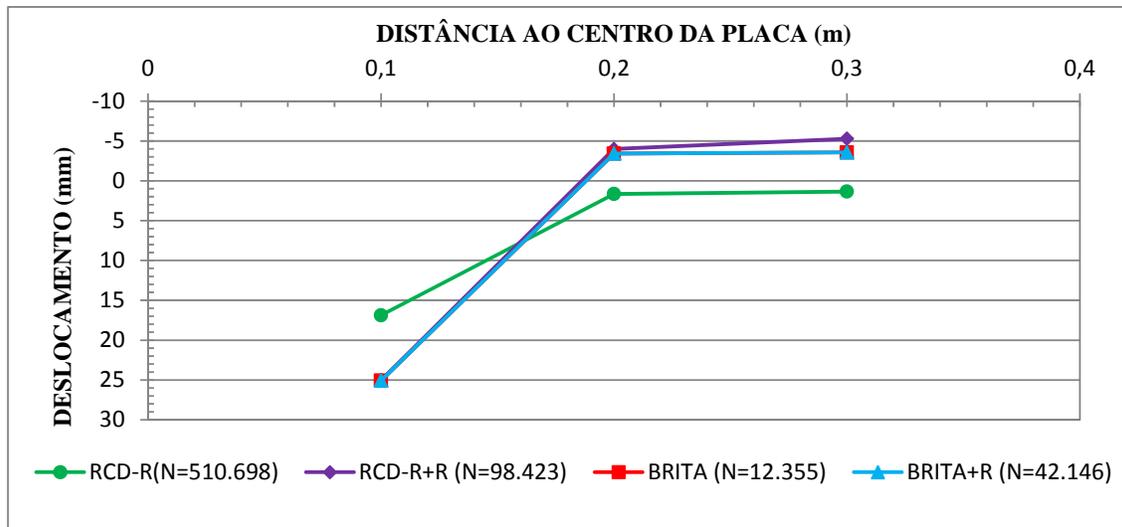


Figura 4.11 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro - segundo estágio de carga.

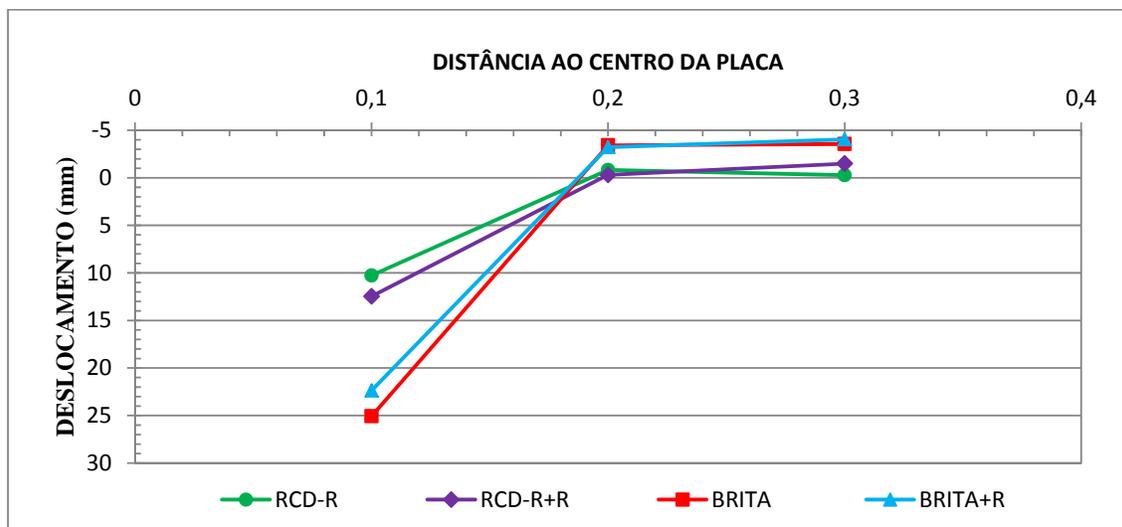


Figura 4.12 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro - segundo estágio de carga. Para N = 12.355 (ao final do ensaio não reforçado).

#### 4.2.2.1 Análises de tensões totais no segundo estágio de carga

Na Figura 4.13 são apresentadas as variações de tensões totais com a profundidade. Pode-se observar a pouca influência da presença do reforço nesse caso, bem como os maiores valores de tensões totais para os ensaios com RCD-R.

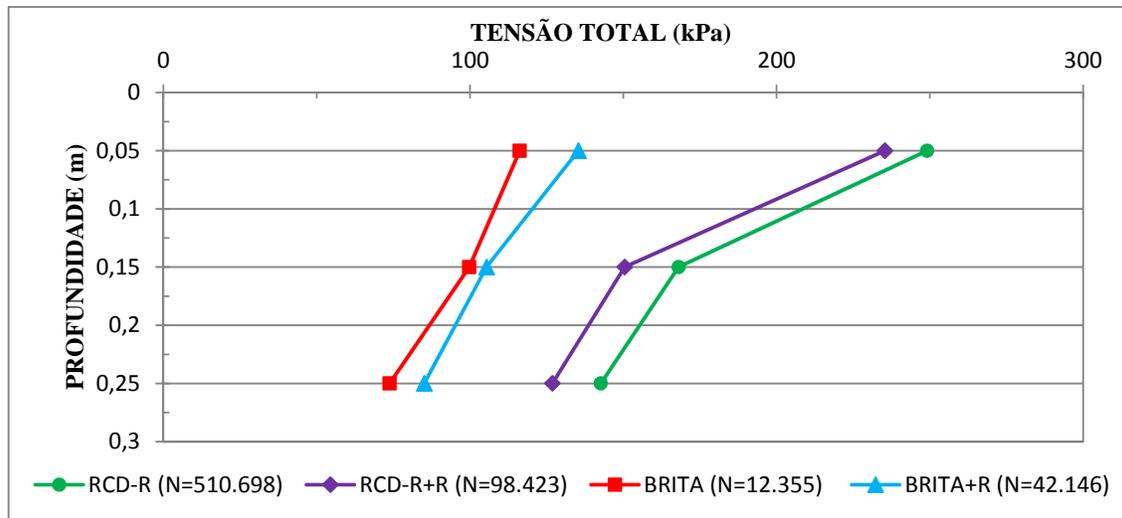


Figura 4.13 Tensões totais máximas *versus* profundidade - segundo estágio de carga.

A Figura 4.14 apresenta as tensões totais ao longo da profundidade para N = 12.355. Pode-se notar pouca diferença entre resultados, exceto no ensaio com RCD-R reforçado.

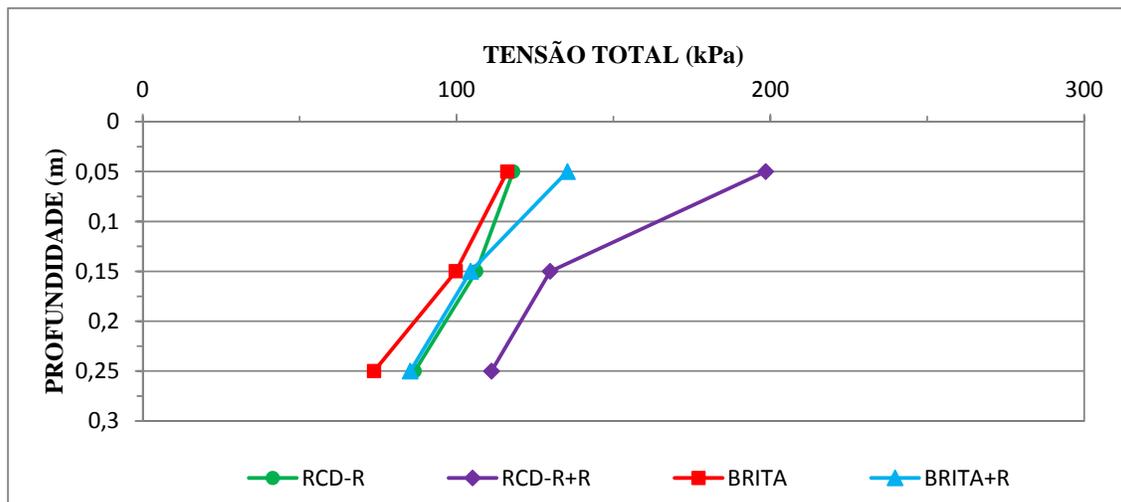


Figura 4.14 Tensões totais máximas *versus* profundidade - segundo estágio de carga. Para N = 12.355 (ao final do ensaio não reforçado).

### 4.3 RESULTADOS DO USO DE DISTINTOS TIPOS DE REFORÇO

Nesta parte do trabalho são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados usando diferentes tipos de geogrelhas e um mesmo tipo de material de aterro (brita). Como nas análises anteriores, são mostradas as variações de deslocamentos da superfície de aterro e as

tensões no solo de subleito, sendo cada análise realizada para o primeiro estágio de carga e para duas restaurações efetuadas na superfície da estrada (segundo e terceiro estágios de carga).

### 4.3.1 Primeiro estágio de carga

#### 4.3.1.1 Análises dos deslocamentos no primeiro estágio de carga

A Figura 4.15 apresenta os deslocamentos da placa de carregamento *versus* o número de repetições de carga. É possível observar que a estrada com melhor desempenho foi a reforçada com a Geogrelha 2, uma vez que suportou 33.068 ciclos de carga no primeiro estágio. Destaca-se que os ensaios reforçados com os distintos tipos de geogrelha atingiram o afundamento de placa de 25 mm com números de ciclos bem maiores que o ensaio não reforçado. Comparado com os ensaios realizados por Perkins (1998) encontrasse um comportamento parecido enquanto a resistência a um número de repetições de carga maior para os testes com presença de reforço. Os resultados obtidos para a Geogrelhas 2 e 3 foram semelhantes. Deve-se ressaltar ainda que a Geogrelha 2, com membros de dimensões geométricas menores, em comparação com as Geogrelhas 1 e 3, demonstrou melhor comportamento provavelmente devido à melhor interação gerada com o material de aterro, contribuindo para que o afundamento de 25 mm fosse atingido para um número maior de repetições de carga.

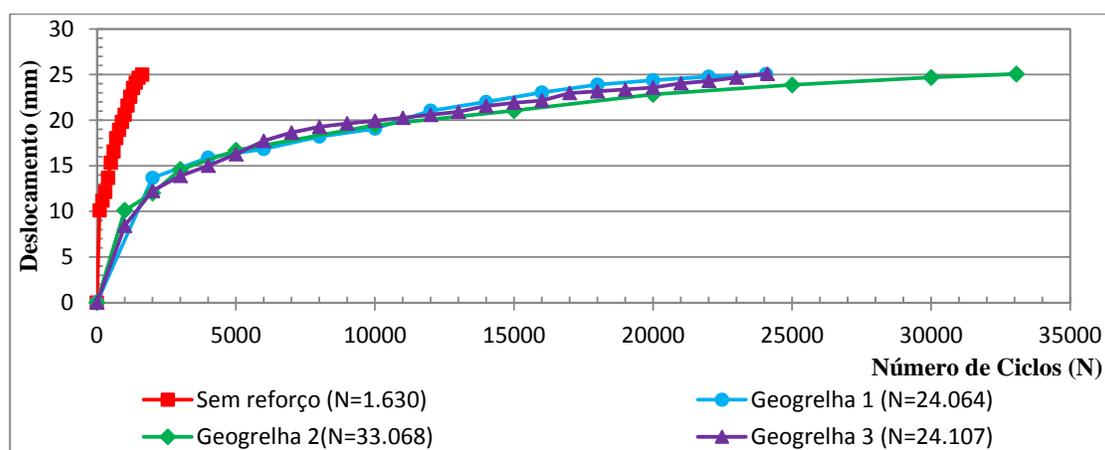


Figura 4.15 Deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga – Primeiro estágio de carga.

Os deslocamentos da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga até o valor  $N = 1630$ , que foi o valor atingido ao final do ensaio sem reforço, são apresentados na Figura 4.16. Até este valor de  $N$  a estrada reforçada com a Geogrelha 1 foi a que apresentou melhor desempenho, enquanto a atingir o deslocamento de 25 mm após de maiores repetições de carga, comparada com as outras estradas que possuíam distinto reforço.

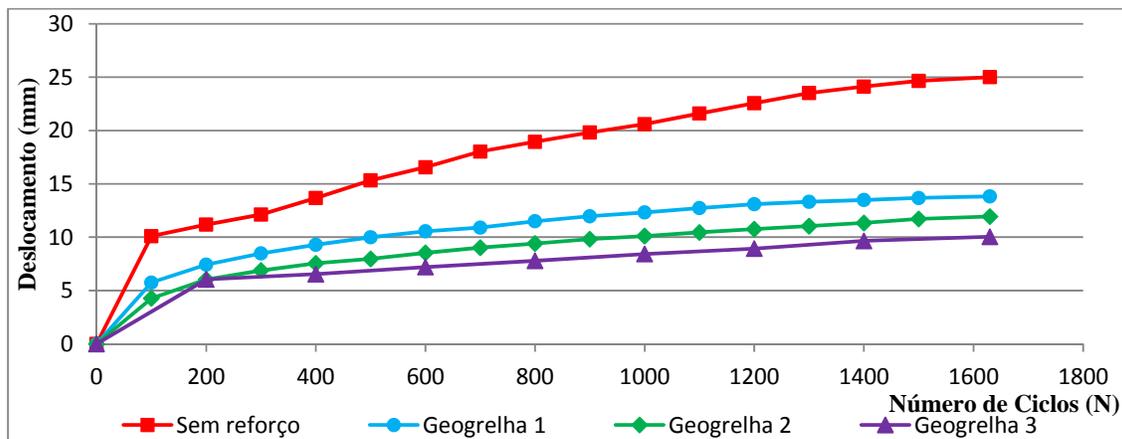


Figura 4.16 Deslocamentos verticais da placa de carregamento *versus* o número de ciclos de carga - primeiro estágio de carga. Para  $N = 1.630$  (ao final do ensaio não reforçado).

Visando avaliar a eficiência do reforço podem-se calcular fatores de eficiência para cada um dos reforços. Nesse caso, tem-se:

O fator de eficiência para as estradas reforçadas com a Geogrelha 1 e 3 é apresentado na equação 4.3:

$$E = \frac{Nr}{Nu} = \frac{24.064}{1.630} \approx 14.8 \quad (4.3)$$

Já para a geogrelha 2 na equação 4.4 é calculado o fator de eficiência:

$$E = \frac{Nr}{Nu} = \frac{33.068}{1.630} \approx 20.3 \quad (4.4)$$

A razão pela qual a estrada reforçada com a geogrelha 2 conseguiu resistir maiores repetições de carga foi devido a que a abertura da malha da geogrelha foi grande ou suficiente para permitir o entrosamento das partículas do material de aterro em contato com a mesma,

proporcionando uma boa interação do conjunto. Para que isto ocorra, tanto os fios, que formam os elementos transversais e longitudinais da geogrelha, como os nós (cruzamento destes dois elementos), deverão ter a rigidez e a resistência à tração adequada para haver o mecanismo de interação.

Na Figura 4.17 é apresentado o gráfico que mostra o fator de eficiência (E) *versus* a relação entre a abertura da grelha e o  $d_{50}$  (diâmetro correspondente a 50% passando) da brita. No gráfico é possível observar como a estrada reforçada com uma geogrelha de menor abertura, no caso a Geogrelha 2, apresenta um maior fator de eficiência o de desempenho do material reforçado em comparação com as reforçadas com os outros tipos de geogrelhas. Infere-se que dado o tamanho das partículas de brita, estas conseguem interagir melhor com a grelha de menor abertura ensaiada. As dimensões das partículas do solo, as dimensões das aberturas e a espessura dos membros transversais das geogrelhas são condicionantes para a mobilização da resistência passiva no geossintético.

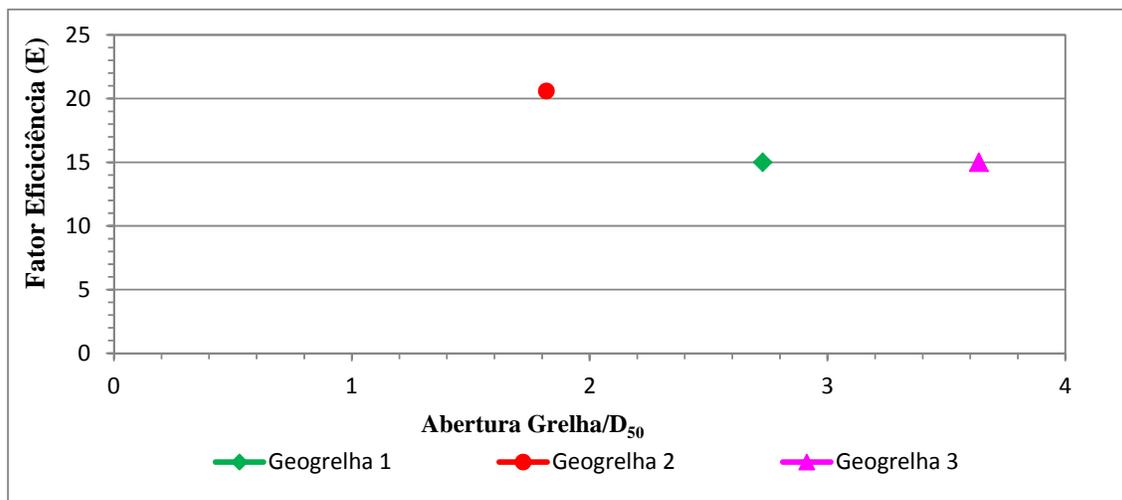


Figura 4.17 Fator de Eficiência *versus* relação entre a abertura da grelha e o  $d_{50}$ . (Primeiro estágio de carga).

Foi observado que o intertravamento entre os grãos do material de aterro e o geossintético consegue contribuir na melhora do comportamento da estrada simulada, mais do que a rigidez ou resistência própria do geossintético. Característica que é também muito importante, mas que para os ensaios realizados no primeiro estágio de carga, não teve muita transcendência.

Nas Figuras 4.18 e 4.19 são mostrados os perfis de deslocamentos da superfície do aterro. O ensaio com a Geogrelha 2 foi o que mostrou maior dilatância a uma distância de 0,3 m do centro da placa (Fig. 4.18). Para distâncias menores os resultados foram semelhantes. Para  $N = 1630$  os deslocamentos próximos à placa foram significativamente menores nos ensaios reforçados, com pouca influência do tipo de geogrelha até este valor de  $N$ .

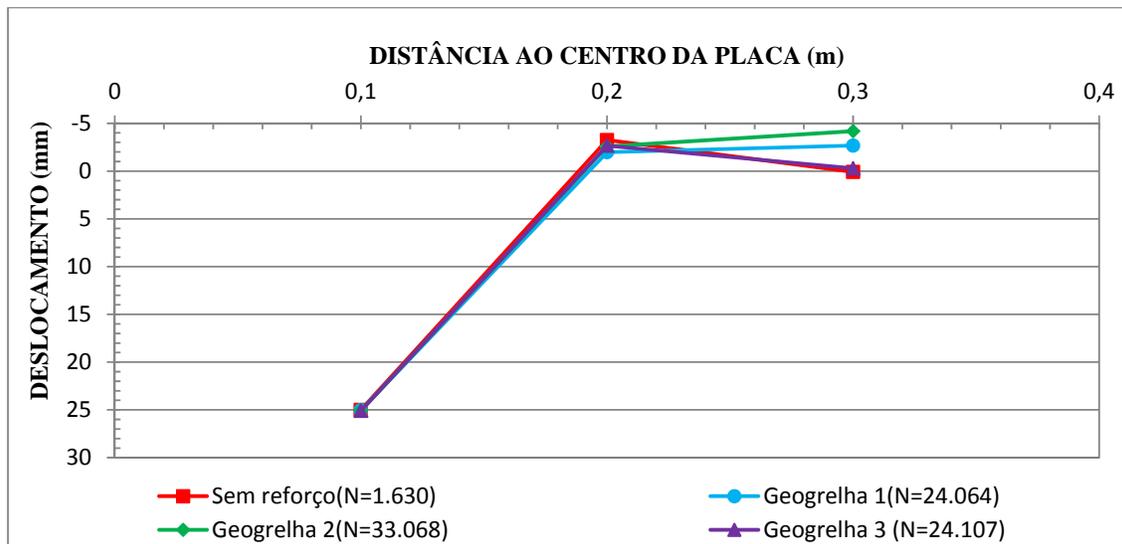


Figura 4.18 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro - primeiro estágio de carga

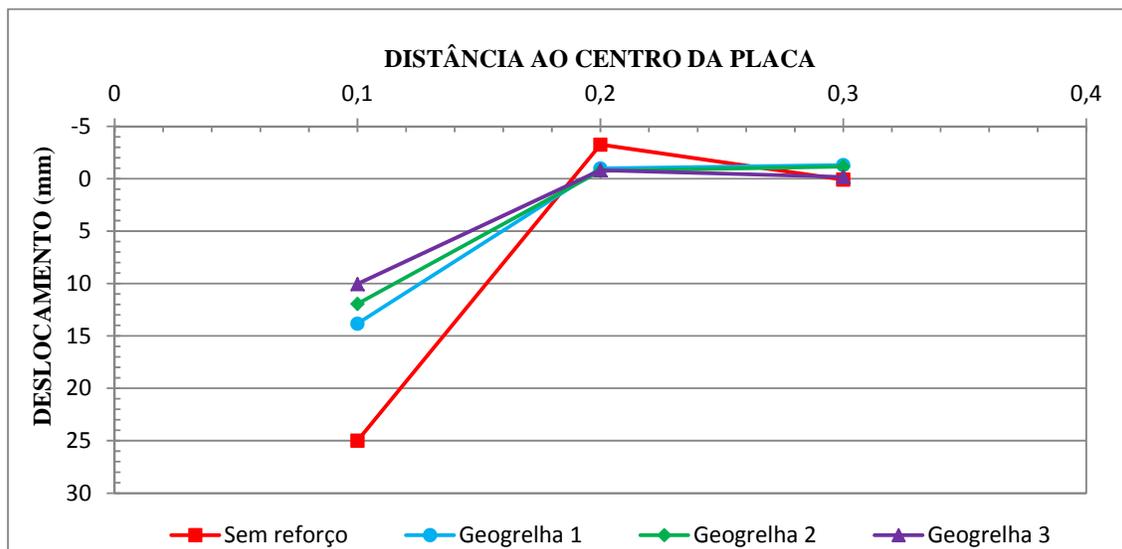


Figura 4.19 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro - primeiro estágio de carga. Para  $N = 1.630$  (ao final do ensaio não reforçado).

### 4.3.1.2 Análises de tensões totais no primeiro estágio de carga

Semelhantemente aos ensaios realizados com distintos materiais de aterro, foram medidas as tensões devidas à simulação da passagem de veículos na estrada, a várias profundidades (0,05, 0,15 e 0,25 m medidas a partir da superfície do subleito). Na Figura 4.20 e 4.21 mostram-se as variações de tensões totais com a profundidade. Observa-se pouca diferença em relação aos resultados da estrada sem reforço no caso dos ensaios com as Geogrelhas 1 e 2. Entretanto, as tensões medidas no ensaio com a Geogrelha 3 foram substancialmente menores, Tal fato é contraditório com o desempenho da estrada reforçada com essa geogrelha em termos de deslocamentos verticais *versus* número de ciclos de carga ou em termos do valor de E, em relação aos resultados obtidos para a estrada reforçada com a Geogrelha 2. Assim, crê-se que esses menores valores de tensões normais no ensaio com a Geogrelha 3 tenham se devido a algum problema com as células de tensões nesse ensaio. O mesmo tipo de tendência de resultados foi observado para um valor de N = 1630 (final do ensaio sem reforço), como pode ser verificado na Figura 4.21.

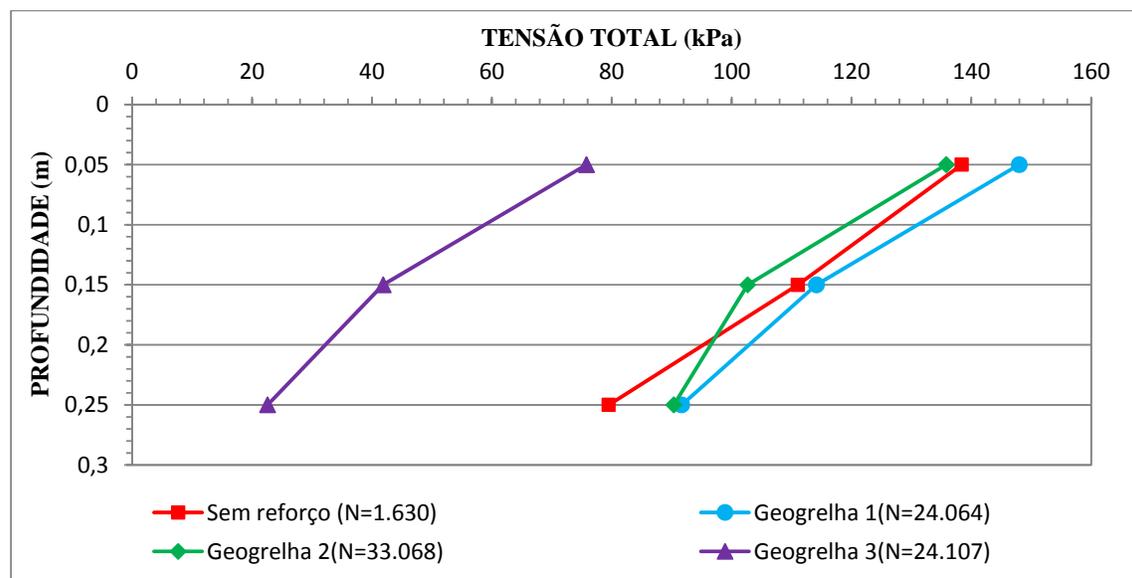


Figura 4.20 Tensões totais máximas *versus* profundidade - primeiro estágio de carga.

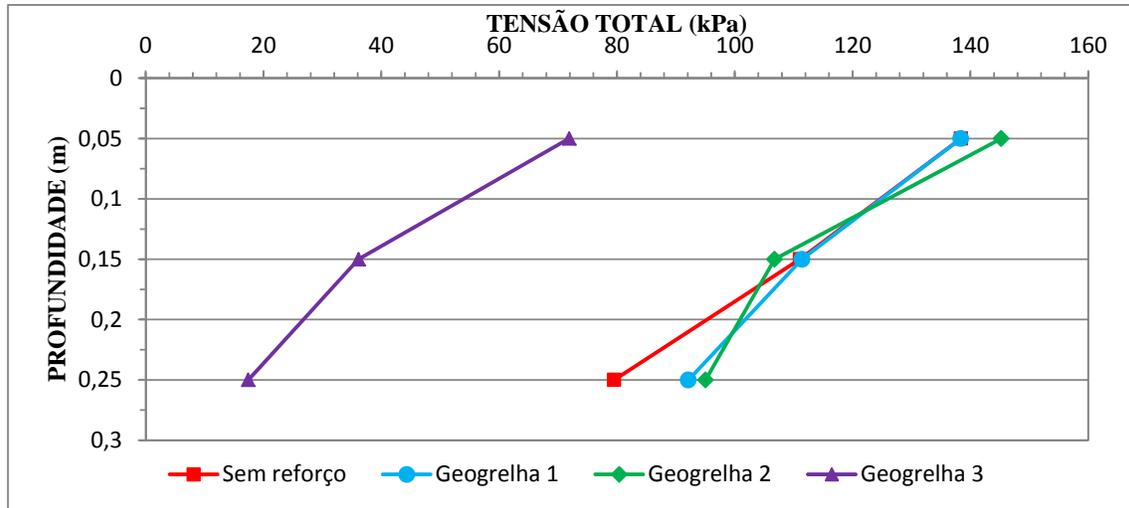


Figura 4.21 Tensões totais máximas *versus* profundidade - primeiro estágio de carga. Para N = 1.630 (ao final do ensaio não reforçado).

### 4.3.2 Segundo estágio de carga

#### 4.3.2.1 Análises dos deslocamentos verticais no segundo estágio de carga

Na Figura 4.22 são apresentados os deslocamentos da placa de carregamento *versus* o número de repetições de carga para os testes realizados para o segundo estágio de carga, após a primeira restauração da superfície da estrada. Nesse caso, o melhor desempenho continuou sendo o apresentado pela estrada reforçada com a Geogrelha 2.

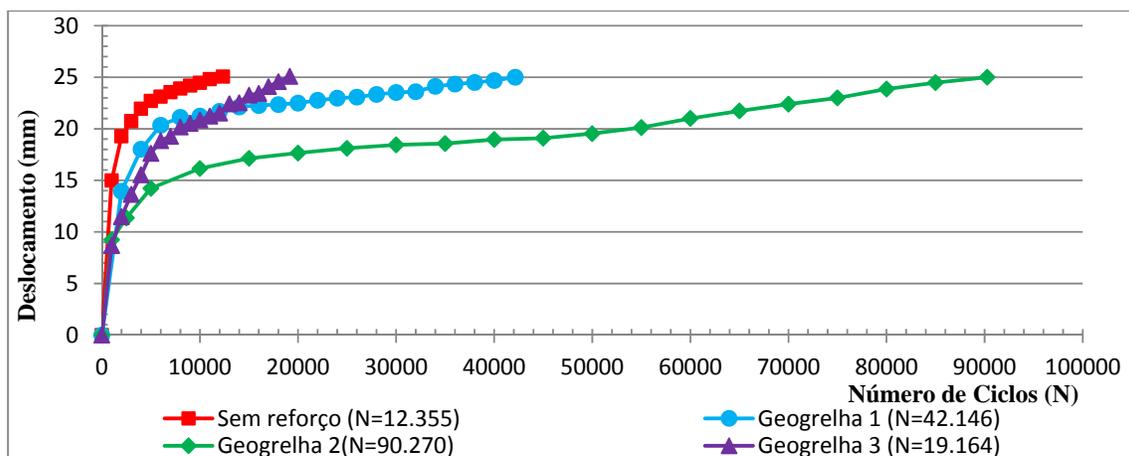


Figura 4.22 Deslocamentos superficiais *versus* o número de ciclos de carga – segundo estágio de carga.

Determinando-se os fatores de eficiência dos reforços no segundo estágio de carga, tem-se:

Na equação 4.5 é mostrado o fator de eficiência para a geogrelha 1:

$$E = \frac{Nr}{Nu} = \frac{42.146}{12.355} \approx 3.4 \quad (4.5)$$

Para a geogrelha 2 é exposto o fator calculado na equação 4.6:

$$E = \frac{Nr}{Nu} = \frac{90.270}{12.355} \approx 7.3 \quad (4.6)$$

No caso da geogrelha 3 o fator calculado é apresentado na equação 4.7:

$$E = \frac{Nr}{Nu} = \frac{19.000}{12.000} \approx 1.6 \quad (4.7)$$

Para estes valores de fator de eficiência, nota-se que a geogrelha 2 continuou apresentando o melhor desempenho como reforço da estrada não pavimentada simulada nos ensaios. Observou-se também uma significativa redução nos valores de E para as três grelhas, em relação aos valores obtidos no primeiro estágio de carga.

Na Figura 4.23 é apresentado o gráfico que mostra o fator de eficiência (E) *versus* a relação entre a abertura da grelha e o  $d_{50}$  (diâmetro correspondente a 50% passando) da brita. Observa-se, como no primeiro estágio de carga que a estrada com melhor desempenho foi a reforçada com a geogrelha 2. Isto devido a adequada interação entre o geossintético e o material de aterro.

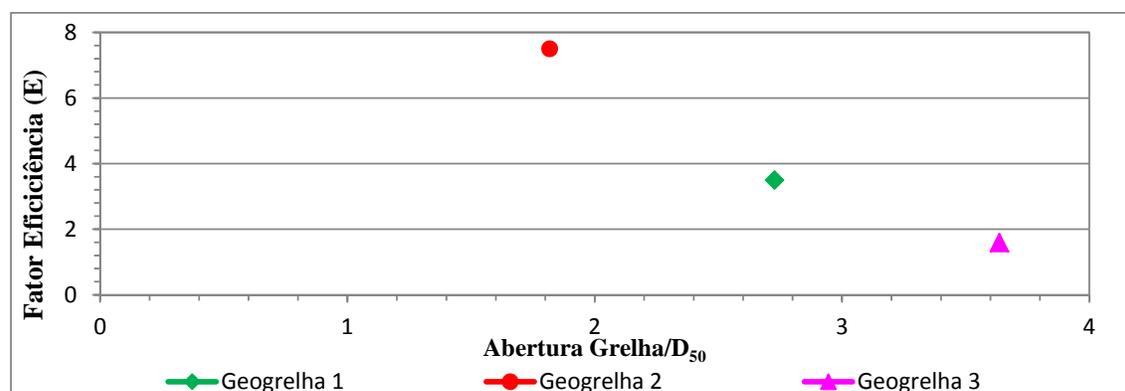


Figura 4.23 Fator de Eficiência *versus* relação entre a abertura da grelha e o D<sub>50</sub>. (Segundo estágio de carga).

Na Figura 4.24 apresentam-se as variações de deslocamentos verticais da placa de carregamento com o número de ciclos de carga para  $N = 12.355$ , correspondente ao final do ensaio sem reforço. Até esse valor de  $N$  também foi a estrada reforçada com a Geogrelha 2 a que apresentou o melhor desempenho. Pode-se observar a pouca diferença entre resultados obtidos para as estradas reforçadas com as Geogrelhas 1 e 3.

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam os perfis de deslocamentos verticais na superfície da estrada ao final de cada ensaio e para  $N = 12.355$ , respectivamente. Pode-se notar que os resultados foram semelhantes para as três geogrelhas utilizadas.

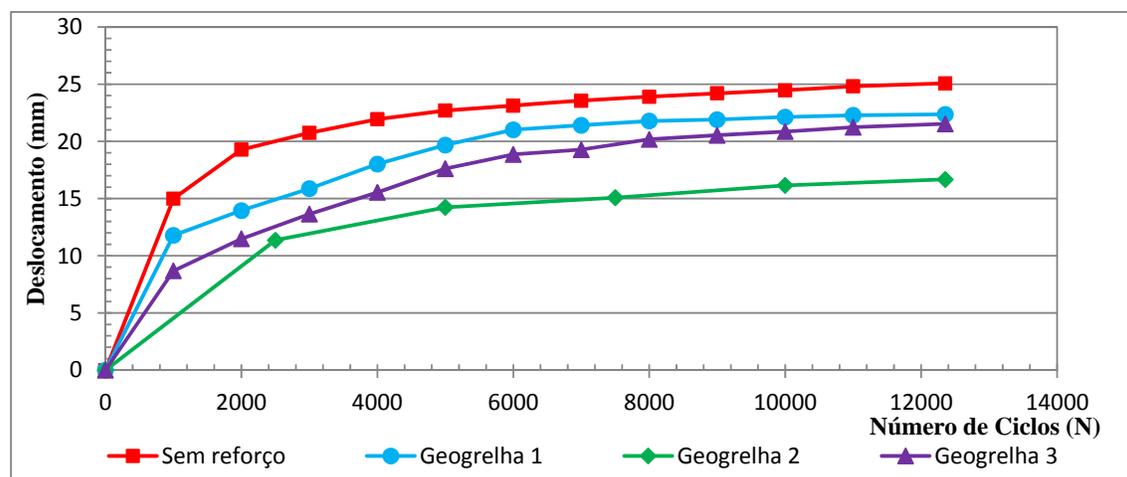


Figura 4.24 Deslocamentos superficiais *versus* o número de ciclos de carga - segundo estágio de carga. Para  $N = 12.355$  (ao final do ensaio não reforçado).

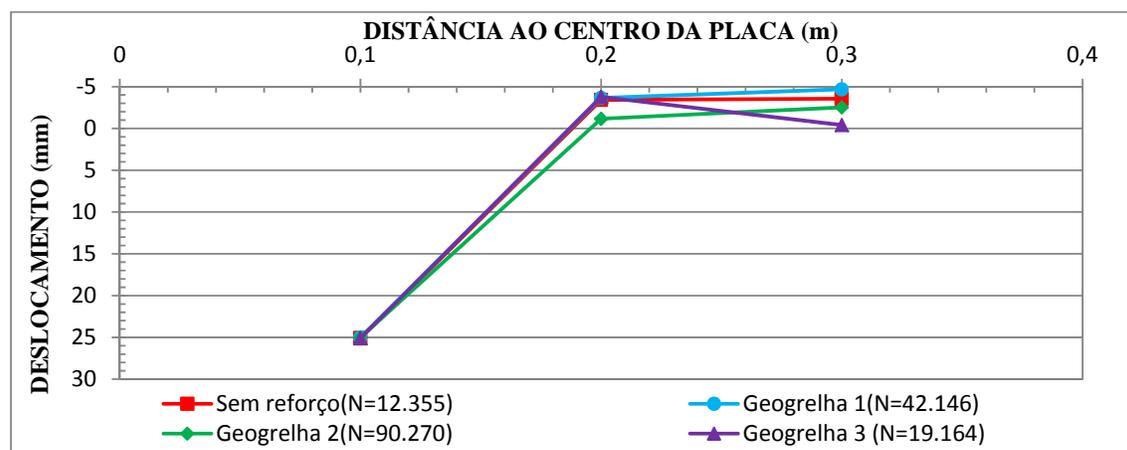


Figura 4.25 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro - segundo estágio de carga.

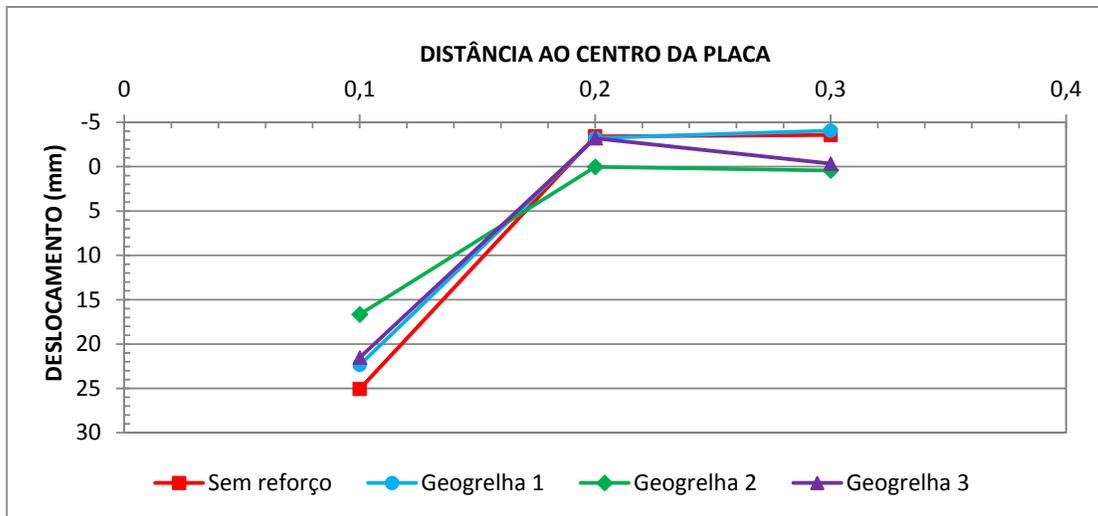


Figura 4.26 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro - segundo estágio de carga. Para  $N = 12.355$  (ao final do ensaio não reforçado).

#### 4.3.2.2 Análises de tensões totais no segundo estágio de carga

As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam as variações de tensões verticais máximas com a profundidade ao final de cada ensaio e para  $N = 12.355$ , respectivamente. Pode-se notar as mesmas tendências observadas no primeiro estágio de carga, também com os prováveis resultados espúrios de tensões totais medidas no ensaio reforçado com a Geogrelha 3.

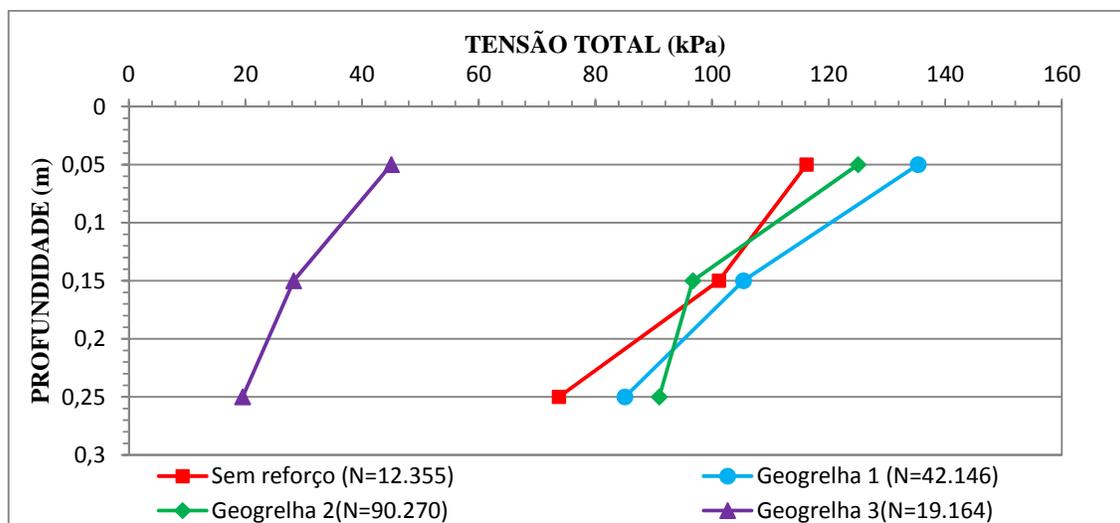


Figura 4.27 Tensões totais máximas *versus* profundidade - segundo estágio de carga.

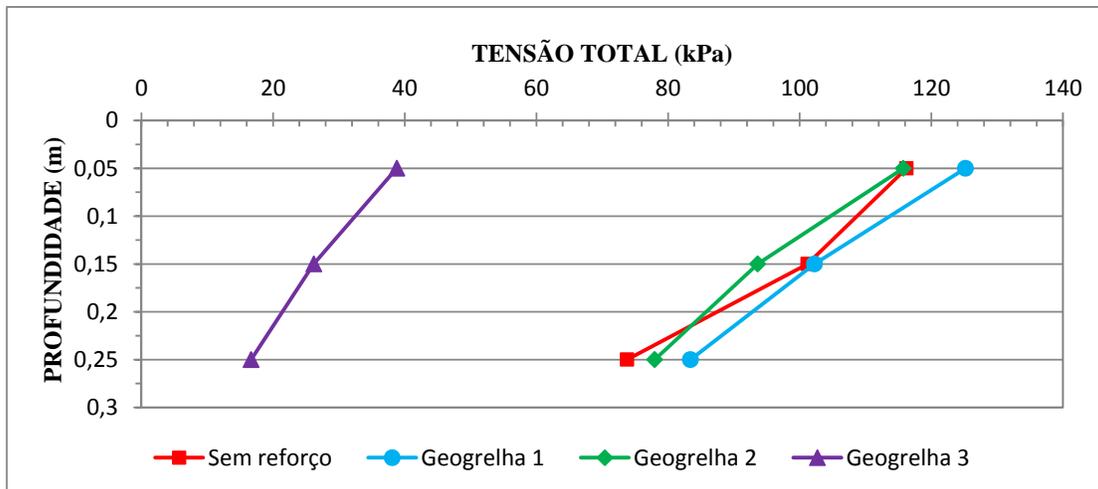


Figura 4.28 Tensões totais máximas *versus* profundidade - segundo estágio de carga. Para N = 12.355 (ao final do ensaio não reforçado).

### 4.3.3 Terceiro estágio de carga

Durante a realização dos ensaios foi feita uma segunda restauração da superfície da estrada não pavimentada, levando a um terceiro estágio de carga. Essa restauração, como as anteriores, foi realizada imediatamente após o afundamento de 25 mm da placa de carregamento ter sido atingido. Nessa parte do trabalho são mostradas as análises de deslocamentos na estrada e as tensões geradas no terceiro estágio de carga.

#### 4.3.3.1 Análises dos deslocamentos no terceiro de carga

Na Figura 4.29 são mostrados os deslocamentos verticais da placa de carregamento em função do número de ciclos de carga aplicados. Para este estágio de carga o afundamento de 25 mm foi alcançado no ensaio não reforçado após 105.100 repetições de carga, no ensaio reforçado com a Geogrelha 1 após 150.120 repetições, com a Geogrelha 2 após 80.540 repetições e com a Geogrelha 3 após 5.610 repetições de carga. Nesse estágio de carga observaram-se perdas significativas de desempenho das estradas reforçadas com as Geogrelhas 2 e 3, ficando o número de ciclos final para as estradas reforçadas com estas geogrelhas abaixo do observado para a estrada sem reforço. Esse pior desempenho foi devido a danos provocados nas geogrelhas ao longo dos estágios de carga anteriores. Acreditasse também que o fato da estrada reforçada com a geogrelha 1, conseguir resistir maiores repetições de carga foi por causa da rigidez da geogrelha, a qual comparada com a das outras grelhas apresentava um

valor de rigidez muito maior. A Figura 4.31 mostra o estado da geogrelha 2 após o termo do ultimo estágio de carga, esta geogrelha foi a que apresentou um dano mais notável comparado com o apresentado nas outras geogrelhas o qual não foi tão notório. Em contraste, a Geogrelha 1 ainda apresentou desempenho satisfatório.

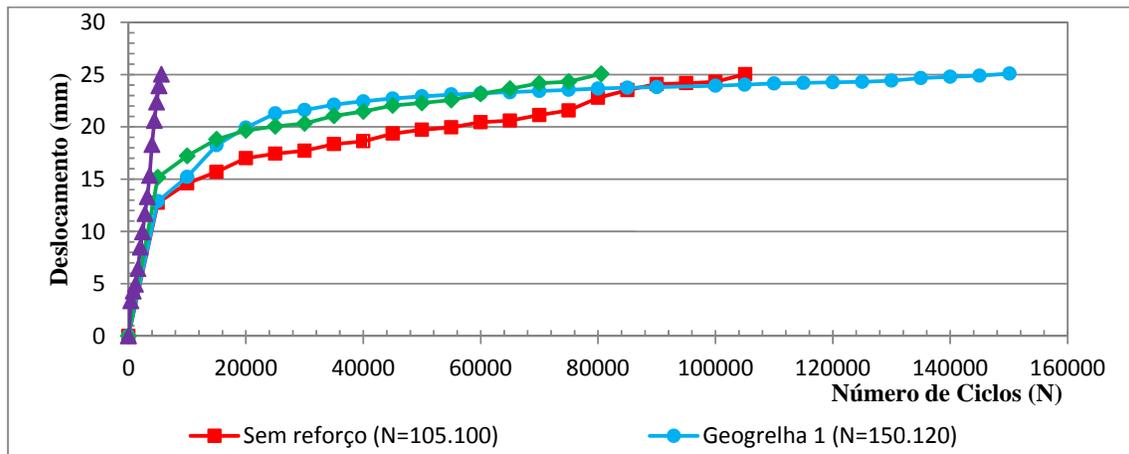


Figura 4.29 Deslocamentos superficiais *versus* o número de ciclos de carga – terceiro estágio de carga.



Figura 4.30 Estado da Geogrelha 2 após do terceiro estágio de carga.

Foi calculado o fator de eficiência para a estrada reforçada com Geogrelha 1, devido a sua resistência a número maior de ciclos de carga comparado com o número de ciclos de carga resistido pela estrada sem reforço, obtendo-se nesse caso  $E = 1,4$ . Contudo, os fatores de eficiência para as outras estradas reforçadas não foram calculados porque apresentaram valores de  $E$  menores que 1.

As Figuras 4.31 e 4.32 mostram os perfis dos deslocamentos verticais na superfície da estrada ao final dos ensaios executados e ao final do ensaio não reforçado (N = 105.100), respectivamente. Não se observaram diferenças significativas nos perfis obtidos nesse estágio de carga para as diferentes estradas, com exceção dos deslocamentos verticais do ensaio reforçado com a Geogrelha 3 a uma distância de 0.3m do centro da placa.

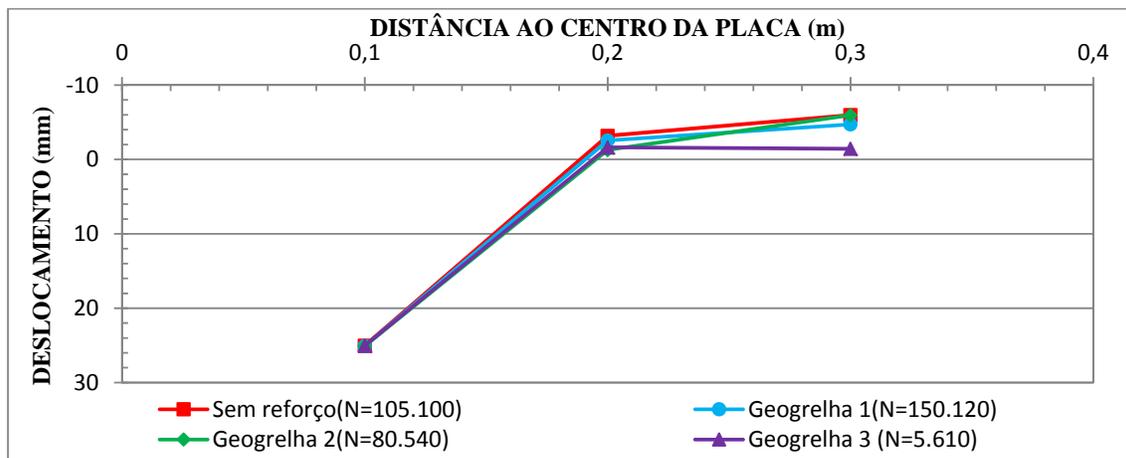


Figura 4.31 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro - terceiro estágio de carga.

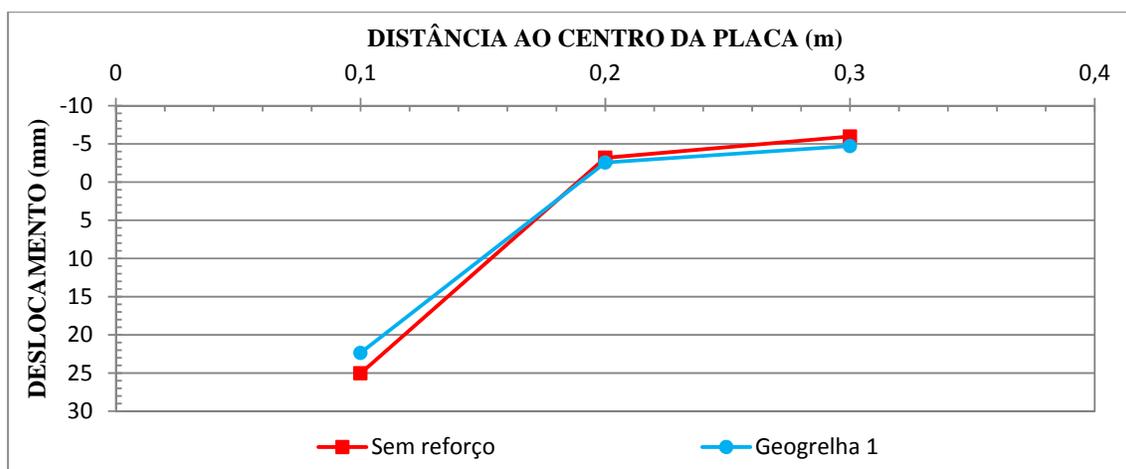


Figura 4.32 Perfis de deslocamentos verticais na superfície do aterro - terceiro estágio de carga. Para N = 105.100 (ao final do ensaio não reforçado).

### 4.3.3.2 Análises de tensões totais no terceiro estágio de carga

A Figura 4.33 mostra a variação das tensões com a profundidade ao final do terceiro estágio de carga para cada ensaio realizado. Os padrões de variação são semelhantes aos observados em estágios de carga anteriores, com os resultados obtidos para o ensaio com a Geogrelha 1 ligeiramente maiores que os demais.

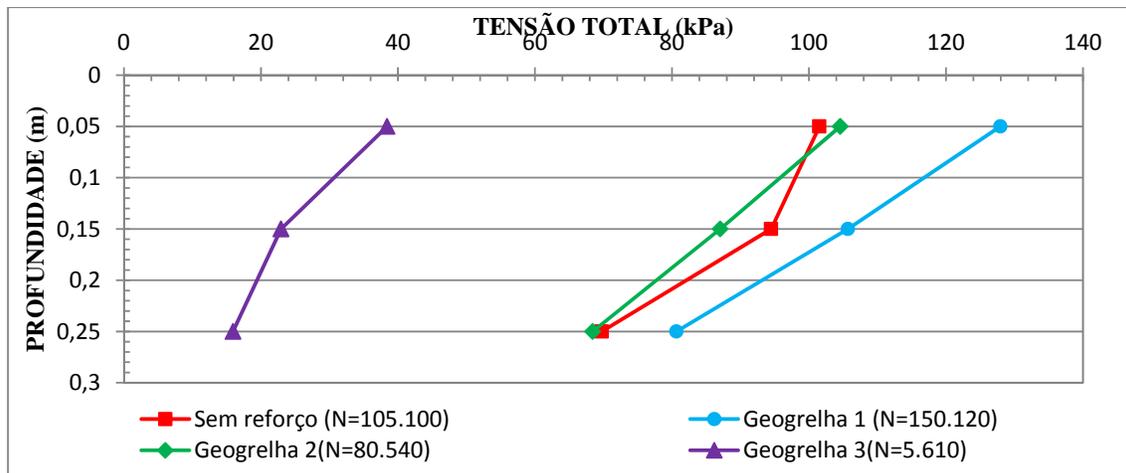


Figura 4.33 Tensões totais máximas *versus* profundidade - terceiro estágio de carga.

Na Figura 4.34 são mostradas as tensões totais *versus* a profundidade no terceiro estágio de carga para o final do ensaio sem reforço (N = 105.100). No caso da Geogrelha 1, só se observaram diferenças mais significativas de resultados em relação à estrada sem reforço na região mais próxima à superfície do subleito.

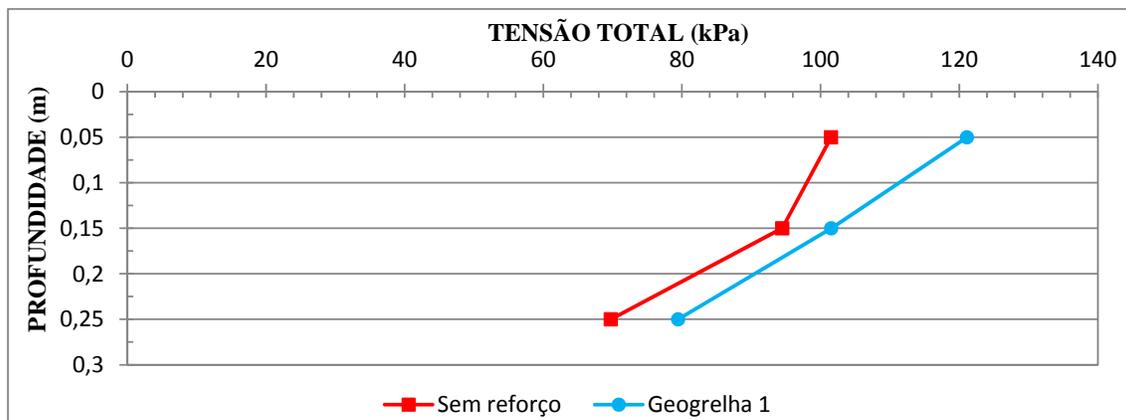


Figura 4.34 Tensões totais máximas *versus* profundidade - terceiro estágio de carga. Para N = 105.100 (ao final do ensaio não reforçado).

Na Figura 4.32 não foram apresentados os resultados correspondentes às geogrelhas 2 e 3, porque os ensaios com essas geogrelhas suportaram muito menos ciclos de carga que o ensaio sem reforço.

#### 4.4 ANÁLISES DA QUEBRA DE GRÃOS DOS MATERIAIS DE ATERRO

Como observou-se quebra de grãos dos materiais de aterro, a seguir são apresentados os resultados dos cálculos efetuados para determinar o índice de quebra dos grãos destes materiais durante os ensaios. O cálculo foi feito adotando-se a metodologia de Marsal (1967), que consiste em se obter as diferenças de porcentagens de pesos ( $\Delta W$ ) retidos entre peneiras antes ( $W_{ki}$ ) e após ( $W_{kf}$ ) os ensaios. O índice de quebra ( $B_g$ ) é expresso em porcentagem, sendo obtido pela seguinte equação:

$$B_g = \sum_{1}^n (\Delta W_{ki} - \Delta W_{kf}) \text{ Para os valores de } \Delta w_{ki} - \Delta w_{kf} > 0 \quad (4.8)$$

Onde  $B_g$  é porcentagem em peso dos grãos de brita que sofreram quebra,  $\Delta W_{ki}$  é a fração inicial do peso da amostra correspondente a um intervalo de dimensões de partículas de brita antes de sofrer quebra,  $\Delta W_{kf}$  é a fração final da amostra correspondente a um dado intervalo de dimensões de partículas após a quebra dos grãos e  $n$  é o número de intervalos de dimensões de partículas para as quais  $\Delta W_{ki} - \Delta W_{kf} > 0$ .

Para o cálculo dos índices de quebra do material de aterro, foi coletado material ao final do último estágio de carga de cada configuração de ensaio em duas situações. Na primeira situação, o material foi coletado na superfície da estrada onde se encontrava o afundamento de 25 mm da placa de carregamento (posição 1) e na segunda situação junto ao reforço, próximo à interface aterro-subleito (posição 2).

A Tabela 4.1 apresenta os valores de  $B_g$  obtidos para as diferentes configurações de ensaio. Como observado na Tabela 4.1, esses resultados corroboram os comentários anteriores sobre a influência da quebra de grãos nos recalques da placa de carregamento. Pode-se notar que os ensaios com RCD-R foram os que apresentaram maior intensidade de quebra de grãos.

Tabela 4.1 Índice de quebra após dos ensaios.

ENSAIO	POSIÇÃO	ÍNDICE DE QUEBRA (Bg) %	MÉDIA (%)
RCD-R	1	22.9	24.2
	2	25.5	
RCD-R +R	1	31.4	35.0
	2	38.6	
BRITA	1	15.2	16.3
	2	17.3	
BRITA + GEOGRELHA 1	1	17.8	18.0
	2	18.1	
BRITA + GEOGRELHA 2	1	11.2	12.5
	2	13.8	
BRITA + GEOGRELHA 3	1	18.5	19.4
	2	20.3	

Baseado nos resultados obtidos nos ensaios, onde foi avaliada a quebra dos grãos de material de aterro após da conclusão de cada teste, foi possível observar que o material de aterro que apresentou maior quebra foi o RCD-R. No ensaio com RCD-R com presença de reforço, a quebra de grãos foi maior comparada com a do ensaio com o mesmo material sem reforço. O anterior pode ser devido talvez à alta heterogeneidade do material (RCD). É assim que durante os ensaios foi difícil ter um material das mesmas características, dado que este material é composto de diferentes tipos de elementos, como concreto, tijolo, cerâmica, entre outros. Além disso, a partir dos comportamentos observados, analisou-se que deve ser empregada uma alta energia de compactação no caso das estradas construídas com RCD-R, para que as quebras dos grãos ocorram durante o processo construtivo da estrada e não ao longo da vida útil do pavimento, como foi constatado nos testes realizados.

Com respeito aos resultados de quebra dos grãos nos ensaios executados com brita como superfície de aterro, a estrada que mostrou maior quebra de grãos foi a reforçada com a geogrelha três. Em certa forma é coerente com os resultados de repetições de carga suportados pela mesma, já que foi a estrada que menos ciclos de carga conseguiu resistir ao longo dos três estágios de carga, mostrando um crescimento marcado nos deslocamentos superficiais.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 5.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou o comportamento de uma estrada não pavimentada simulada num tanque rígido circular onde avaliou-se o uso de diferentes tipos de materiais de aterro e de geogrelhas com distintas aberturas. Para cada configuração de ensaio realizado foi aplicada carga cíclica para simular a passagem dos veículos numa estrada. Nos ensaios foram medidas as tensões totais em diferentes pontos da camada de solo de subleito e os deslocamentos verticais provocados na superfície do aterro. Em função dos resultados obtidos, a seguir são apresentadas as principais conclusões obtidas nesse estudo.

- **Uso de distintos tipos de materiais de aterro**

As estradas construídas com RCD e brita sem presença de reforço, suportaram menor número de repetições de carga, em parte devido à quebra prematura dos grãos desses materiais.

O material de aterro que apresentou melhor comportamento em termos de resistência ao número de ciclos de carga foi de forma geral o RCD-R, isso pode ter ocorrido devido ao fato deste material apresentar uma composição heterogênea, é possível que quando realizada a restauração da superfície, o material de aterro utilizado possa ter composição distinta da inicial, contendo provavelmente elementos (grãos) mais resistentes.

De forma geral, o uso do reforço na estrada não pavimentada simulada contribuiu para aumentar o número de ciclos de carga suportados pela estrada, além de provocar uma maior rigidez lateral na camada de aterro o que, em condições reais, pode aumentar a vida útil deste tipo de obra. Em vista dos resultados obtidos, conclui-se que o material de aterro que apresentou o melhor desempenho em termos de maior resistência aos carregamentos cíclicos foi o RCD-R.

Nos ensaios realizados com dois tipos de material de aterro (brita e RCD) durante o primeiro estágio de carga, a estrada construída com RCD-R sem reforço, atingiu o limite estabelecido

para o deslocamento vertical após de 1.710 ciclos de carga, enquanto a construída com brita atingiu esse limite com 1630 ciclos, que são valores muito próximos. No caso dos ensaios com estes mesmos materiais, mas com reforço de geogrelha, o número de repetições de carga para o ensaio RCD-R+R foi de 57.235, enquanto no ensaio Brita+R obteve-se 24.064 repetições de carga. Em relação ao ensaio sem reforço, os ensaios reforçados apresentaram fatores de eficiência de 33,5 e 14,8 para as estradas construídas com RCD-R e brita respectivamente.

Nos ensaios variando-se o tipo de material de aterro foi observado que a presença do reforço não influenciou em grande medida as tensões totais transferidas para a camada do solo de subleito, apesar dos ensaios com reforço suportarem maiores números de repetições de carga. Esse fato pode ter a ver com a pequena espessura do subleito nos ensaios, embora este aspecto ainda mereça análises mais aprofundadas.

Para os ensaios realizados após a primeira restauração da estrada (segundo estágio de carga), ao contrário do esperado, a estrada não reforçada construída com RCD-R suportou 510.698 repetições de carga, enquanto a reforçada construída com o mesmo material (RCD-R+R) suportou 98.423 ciclos de carga. Isto pode ter ocorrido devido à heterogeneidade do RCD-R ou a uma quebra de grãos tardia do material de aterro utilizado na estrada reforçada. Uma maior homogeneidade, ou melhor seleção, do RCD-R contribuiria bastante para seu uso como material de aterro em estradas não pavimentadas, com repercussão na durabilidade destas obras.

O intertravamento entre os grãos do material de aterro e o geossintético consegue cooperar na melhora do comportamento da estrada simulada, mais do que a rigidez ou resistência própria do geossintético.

- **Uso de tipos distintos de reforço**

Durante a realização dos ensaios reforçados, nos quais foi usado um mesmo material de aterro (brita) e distintos tipos de reforço, observou-se um melhor desempenho por parte da estrada reforçada com a Geogrelha 2 no primeiro estágio de carga. Nesse caso, a estrada resistiu 33.068 ciclos. Para esse mesmo estágio de carga, as Geogrelhas 1 e 3 suportaram 24.064 e 24.107 repetições de carga, respectivamente. O maior suporte da estrada reforçada com a

Geogrelha 2 pode ser consequência de uma melhor interação com o material de aterro, em função da relação entre as dimensões dos grãos e dimensões das aberturas da grelha.

Nos ensaios em que foi variado o tipo de material de aterro, as tensões totais no subleito para os ensaios onde foram usados diferentes tipos de reforço, não foram muito diferentes das observadas nos ensaios sem reforço. O anterior foi provocado talvez pela pouca espessura do solo de subleito, a qual não ajudou na dissipação das tensões.

Para os testes, onde a abertura da geogrelha foi maior que o diâmetro dos grãos do material de aterro, as tensões foram maiores que as apresentadas nos ensaios sem reforço. Isso pode ser devido a que os grãos do aterro, atravessavam os membros da geogrelha, empurrando ou exercendo maior pressão no solo de fundação.

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. Crê-se que isso tenha sido resultado de uma maior compactação do material de aterro após o primeiro estágio de carga. No segundo estágio de carga a estrada reforçada com a Geogrelha 2 apresentou um fator de eficiência de 7.3, enquanto as estradas reforçadas com as Geogrelhas 1 e 3 apresentaram fatores de eficiência iguais a 3.4 e 1.6, respectivamente. Estes valores foram muito menores que os obtidos no primeiro estágio de carga. Com isso pode-se concluir que, em condições reais semelhantes às dos ensaios realizados, uma estrada reforçada com a Geogrelha 2 apresentaria uma vida útil maior e requeria um menor número de manutenções.

Observou-se também que o desempenho das estradas reforçadas com as Geogrelhas 1 e 2 no terceiro estágio de carga diminuiu consideravelmente. Esta situação foi causada pelos danos provocados nas geogrelhas ao longo dos estágios de carga anteriores.

## **5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Baseado nos resultados obtidos nesta dissertação podem ser feitas algumas sugestões para pesquisas futuras sobre o estudo de geossintéticos como reforço de estradas não pavimentadas, quais sejam:

- Realizar uma melhor classificação e caracterização do RCD-R em ensaios futuros para assim se obter um material mais homogêneo.
- Utilizar outros materiais de aterro nos ensaios.
- Realizar testes variando o tipo de geossintético usado como reforço, como por exemplo, empregando-se geogrelhas de diferente abertura, geocélulas, geocompostos e geotêxteis.
- Variar a posição de instalação do reforço dentro do aterro.
- Variar as espessuras das camadas de aterro e subleito.
- Simular condições de chuva na estrada para verificar o seu comportamento e a influência da presença de reforço.
- Avaliar o dano mecânico provocado nos reforços após ensaios.
- Executar simulações numéricas do problema e retro-análises.
- Avaliar a acurácia de métodos de dimensionamento de estradas não pavimentadas quando aplicados às situações e materiais empregados nos ensaios realizados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT 2003.– Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR12553: Geossintéticos – Terminologia. Rio de Janeiro. 3p.
- Aguiar, M.E. (1963). A Corrugação Ritmada e Outros Problemas das Estradas de Terra. Anais do Primeiro Simpósio de Conservação de Rodovia. ABPv, Sp.
- 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.
- Burd H. J. (1995). Analysis of Membrane Action in Reinforced Unpaved Roads. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32: 946- 956.
- Cancelli, A., Montanelli, F., Rimoldi, P., Zhao, A. (1996). Full scale laboratory testing on geosynthetics reinforced paved roads. International Symposium on Earth Reinforcement. Fukuoka. 573–578.
- Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente – (2002). Resolução nº 307 – Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html> Acesso em 13/11/2006.
- Delmas, Ph., Matichard, Y., Gourc, J.P., and Riondy, G. (1986). Unsurfaced Roads Reinforced by Geotextiles – A seven Years Experiment. Proceedings, Third International Conference on Geotextiles, Vienna, Austria. 1015-1020.
- 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.
- 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.

- Guimarães, R.C. (2002). Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 183 p.
- Jewell, R. A. (1996). Soil reinforcement with geotextiles. London: Thomas Telford. 332p.
- 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.
- 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.
- 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.
- Palmeira, E. M. (1993). Curso de Estabilização e Reforço de solos: Introdução à Utilização de Geossintéticos. Publicação G. AP-002B/93. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Brasília. 60p.
- Perkins, S.W., Ismeik, M., (1997a). 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., (1997b). A Synthesis and Evaluation of Geosynthetic-Reinforced Base Layers in Flexible Pavements: Part 2. Geosynthetics International vol 4, No 6: 605–621.
- Perkins, S.W., Ismeik, M. and fogelsong, 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., Fogelsong, M.L. (1999). Influence of geosynthetic placement position on the performance of reinforced flexible pavement systems. Geosynthetics Conference, Boston. Vol 1: 253–264.
- Potter, J.F., and Curren, E.W.H. (1981). The Effect of a Fabric Membrane on the Structural Behavior of a Granular Road Pavement. Transport and Road Research Laboratory. TRRL Laboratory Report 996.
- Raymond, G., Ismail, I. (2003). The effect of geogrid reinforcement on unbound aggregates, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 21: 355-380.
- Ruddock. E.C., Potter, J.F., and McAvoy, A.R. (1982). A Full-Scale Experiment on Granular and Bituminous Road Pavements Laid on Fabrics. Proceedings, Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Usa. Vol 2: 365 p.

- Santos, A. R., Pastore, E. L., Augusto, F., Cunha, M. A. (1985). Estradas vicinais de terra: manual técnico para conservação e recuperação. São Paulo: IPT. 140p.
- 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.
- Santos, E. G. (2010). Avaliação Experimental de Estruturas de Solo Reforçado com Materiais Alternativos. Trabalho de Qualificação - Universidade de Brasília. Brasília, DF, 60 p.
- Viswanadhama, B.V.S., König, D. (2004). Studies on Scaling and Instrumentation of a Geogrid. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 22: 307–328.
- 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.

## **ANEXOS**

## DADOS ADICIONAIS ACERCA DA INSTRUMENTAÇÃO

- **Células de Tensões totais**

Modelo: CTT-1-600kPa

Fabricante: Micro Sensores Industrial

Linearidade: 1,0%

Resistência: 350ohms nominal

Tensão de alimentação: 10 Vdc máx

Dimensões:

Ø= 75,0 mm

Espessura= 6,0 mm

Ø útil= 65,0 mm

Constantes de Calibração das células utilizadas:

CÉLULA No	CONSTANTE (V/kPa)
102101	0,0142
102102	0,0143
102103	0,0142
102104	0,0132
102105	0,0142
102106	0,0138

- **Célula de carga**

Marca: Kratos

Constante de calibração: 0,1 V/kPa

Capacidade: 100 kN

- **Medidores de deslocamento lineal:**

Marca: Gefran

Modelo: Pz-34

Curso: 100 mm

Constantes de Calibração dos medidores de deslocamento utilizados:

<b>Medidor N°</b>	<b>CONSTANTE (V/mm)</b>
1	0,0923
2	0,0940
3	0,0964
4	0,0966
5	0,0971

## DADOS COMPLEMENTARES DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA O FUNCIONAMENTO DO SISTEMA HIDRÁULICO.

- **Bomba Hidráulica**

Marca: Hidrautronica

Capacidade: 80 l

Pressão: 260 Bar

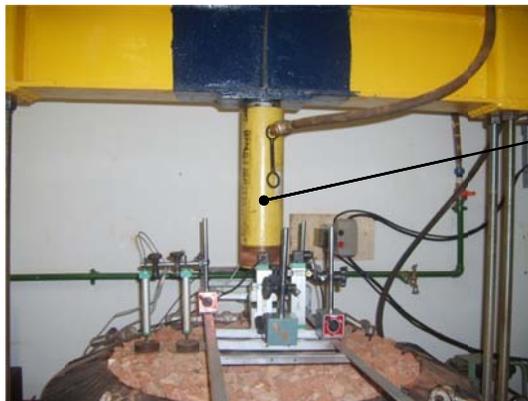
Vazão: 0,6 lpm



- **Cilindro Hidráulico**

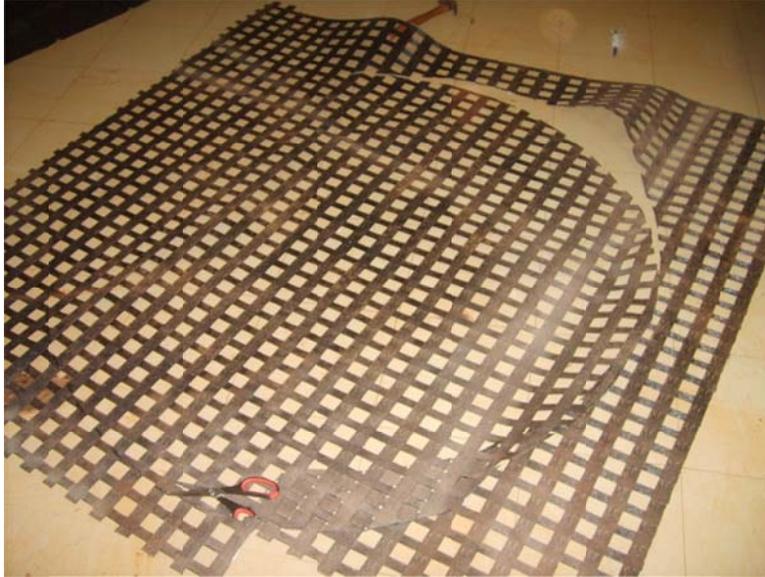
Marca: Yelow power

Capacidade: 100 kN



Cilindro Hidráulico

## FOTOGRAFIAS ADICIONAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS



Processo de corte do Geossintético



Desmontagem do ensaio (Retiro do material de aterro)



Detalhe do RCD-R colocado como aterro



Vista geral da montagem do ensaio



Detalhe do afundamento da placa



Montagem do ensaio realizado com brita



Retiro do material de aterro após a simulação de chuva.



Retiro do material de aterro após a simulação de chuva.



Disposição do material de aterro no ensaio



Colocação do reforço