

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS  
UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CIÊNCIAS  
EXATAS E TECNOLÓGICAS  
MESTRADO STRICTO SENSU EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**USO DE GEOSSINTÉTICOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS:  
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL EM UM PROTÓTIPO DE GRANDE  
DIMENSÃO.**

**Pedro Henrique Costa Neves**

Anápolis

2013

**Uso de Geossintéticos em estradas não pavimentadas: Avaliação experimental em um protótipo de grande dimensão.**

PEDRO HENRIQUE COSTA NEVES

Orientador: Professor D.Sc. Paulo Márcio Fernandes Viana

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás – UEG, Unidade de Ciências Exatas e Tecnológicas de Anápolis como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Sistemas Agroindustriais, para obtenção do título de MESTRE.

Anápolis

2013

Neves, Pedro Henrique Costa.

Uso de Geossintéticos em estradas não pavimentadas: Avaliação experimental em modelo de grande dimensão – 2013.

50 f. il.

Orientador: Prof. DSc. Paulo Márcio Fernandes Viana.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Goiás. Mestrado *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, 2013.

Bibliografia.

1. Estradas não-pavimentadas. 2. Reforços com Geossintéticos. 3. Melhoria de estradas não-pavimentadas. I. Título.

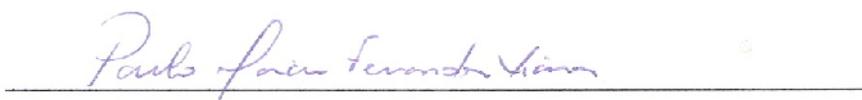
**USO DE GEOSSINTÉTICOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS:  
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL EM UM PROTÓTIPO DE GRANDE  
DIMENSÃO**

Por

Pedro Henrique Costa Neves

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Aprovado em 30 / 07 / 2013



Prof. Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana

Orientador

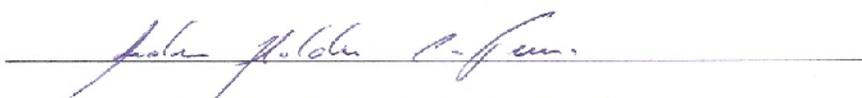
UEG/UnUCET



Prof. Dr. Elton Fialho dos Reis

Membro

UEG/UnUCET



Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira

Membro

UFPR

## AGRADECIMENTOS

À Deus por me guiar em minha caminhada e iluminar a minha vida, me dando saúde e inteligência para enfrentar todas as dificuldades da vida.

Aos meus pais Sonia e Dewilson por construir o meu futuro desde o dia em que nasci e me apoiar em todos os momentos da minha vida. Ao meu irmão Bruno pelo seu companheirismo.

Aos meus padrinhos Marizeth, Nilmar e Oswaldo pelo apoio e por estarem caminhando sempre comigo.

À minha namorada Élide por me incentivar e estar ao meu lado, crescendo junto comigo. Aos seus pais Mary e Antônio pelo apoio e orações.

Ao meu orientador, professor Paulo Márcio F. Viana, por toda orientação, confiança, amizade e conselhos nos momentos difíceis durante o mestrado.

Ao professor Elton Fialho pelo apoio nos momentos difíceis desta pesquisa.

A professora Roberta Passini pela amizade e participação na qualificação.

Ao meu colega Arlindo Modesto que teve uma participação significativa na construção e execução do projeto.

Aos meus colegas e amigos Vandoir Holtz e Rodney Couto que foram primordiais em todas as fases deste trabalho.

Aos funcionários da UEG: Eliete Fernandes e Waldeir Costa.

A UEG pela oportunidade de realização dos cursos de graduação em Engenharia Agrícola e mestrado em Engenharia Agrícola.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Ao André pelo material utilizado nos experimentos.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>x</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1. Estradas não pavimentadas</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2. Trilhas de rodas</b> .....	<b>15</b>
<b>2.3. Compactação do solo</b> .....	<b>15</b>
<b>2.4. Índice de Suporte Califórnia – CBR</b> .....	<b>16</b>
<b>2.5. Bulbo de tensões</b> .....	<b>16</b>
<b>2.6. Modelos empíricos</b> .....	<b>18</b>
<b>2.7. Geossintéticos</b> .....	<b>20</b>
2.7.1. GEOTÊXTEIS.....	22
2.7.2. GEOGRELHAS .....	22
<b>2.8. Estudos de campo em escala real</b> .....	<b>23</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1. O local</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2. O solo</b> .....	<b>24</b>
<b>3.3. Carga aplicada sobre a estrada protótipo</b> .....	<b>25</b>
<b>3.4. Os geossintéticos</b> .....	<b>26</b>
<b>3.5. A estrada protótipo</b> .....	<b>27</b>
<b>3.6. Delineamento estatístico</b> .....	<b>29</b>
<b>3.7. Ensaios utilizados na estrada protótipo</b> .....	<b>29</b>
3.7.1. DETERMINAÇÃO DO RECALQUE.....	29

3.7.2.	DETERMINAÇÃO DO DESLOCAMENTO DOS GEOSSINTÉTICOS .....	30
3.7.3.	DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA .....	31
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>33</b>
4.1.	Ensaio de campo – Estrada em escala real.....	33
4.2.	Capacidade de carga .....	34
4.3.	Deslocamento dos geossintéticos.....	38
4.4.	Recalque da estrada protótipo .....	39
4.5.	Estimativa dos recalques por formulações analíticas .....	41
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>44</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>45</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Propriedades dos geossintéticos utilizados nos ensaios.....	27
TABELA 2: Distribuição dos tratamentos nas parcelas experimentais (GG1, GG2, GG3, GG4, GTNW1, GTNW2, GTNW3, GTNW4, GTW1, GTW2, GTW3, GTW4). No trecho (SG) não foi instalado G.....	29
TABELA 3: Resumo da análise de variância das variáveis: resistência superficial (RSup), recalque da estrada (R) e deslocamento dos geossintéticos (DG).....	34
TABELA 4: Valores médios do recalque resultante da passagem da carga na estrada.....	42

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Seção típica de uma estrada não pavimentada (DNER, 1999) .....	15
FIGURA 2 - Distribuição de pressões num plano vertical do solo sob uma pressão de 2060 kPa aplicada numa área de 0,2 m <sup>2</sup> (VANDEN BERG et al., 1957) .....	18
FIGURA 3 - Geometria do eixo do veículo e áreas de contato dos pneus (OLOO et al., 1997) .....	19
FIGURA 4 - Representação das cargas dos rodados, onde B é a largura de contato do pneu com a superfície, L é o comprimento de contato do pneu, h <sub>0</sub> e h são as alturas do aterro sem e com reforço, respectivamente, $\alpha$ é ângulo de distribuição da carga. (a) Geometria sem reforço de G; e (b) Geometria com reforço de G (GIROUD e NOIRAY, 1981) .....	20
FIGURA 5 - Contribuição dos geossintéticos em solos moles (PALMEIRA, 1993) .....	22
FIGURA 6 - Imagem aérea da localização do experimento na área da Universidade Estadual de Goiás .....	25
FIGURA 7 - Distribuição granulométrica da areia utilizada .....	26
FIGURA 8 - Geossintéticos utilizados no projeto. a) Geogrelha, b) Geotêxtil tecido, c) Geotêxtil não tecido .....	27
FIGURA 9 - Esquema representando a estrada de simulação, a profundidade de instalação dos geossintéticos e o bulbo de tensão resultante da tensão aplicada pelo rodado .....	28
FIGURA 10 - Esquema de ancoragem utilizado no reforço de geossintético .....	28
FIGURA 11 - Imagem da vala aberta, onde foi construída a estrada protótipo.....	29
FIGURA 12 - Medição do recalque da trilha de roda formada pela passagem da carga. O equipamento utilizado foi um perfilômetro de barras .....	31
FIGURA 13 - Representação esquemática da instalação dos extensômetros mecânicos que determinarão os deslocamentos dos Gs. À direita, o detalhe dos pesos de suspensão para medição do deslocamento .....	31
FIGURA 14 - Sistema de medição do deslocamento dos geossintéticos. A régua é a parametrização das medidas no software AutoCAD 2010. O peso foi preso ao geossintético por meio de um cabo .....	32
FIGURA 15 - Equipamentos utilizados no ensaio de resistência superficial do solo: um macaco de rosca, pistão de 150 mm de diâmetro, régua para medição da profundidade e célula de carga .....	33
FIGURA 16 - Equipamentos de aquisição de dados do ensaio de resistência superficial: notebook, cabo serial e datalogger .....	33

FIGURA 17 - Carregamento em seis níveis de recalque, comparando as quatro profundidades de instalação e a testemunha .....	36
FIGURA 18 - Carregamento em seis níveis de recalque, comparando o tipo de material em cada profundidade de instalação .....	38
FIGURA 19 - Média dos deslocamentos dos geossintéticos instalados em quatro profundidades .....	39
FIGURA 20 - Força de tração resultante da carga aplicada na estrada, onde F é a força de tração do geossintéticos e h é a altura do aterro .....	40
FIGURA 21 - Perfil do recalque resultante da passagem da carga em cada tipo de geossintético instalado em quatro profundidades e sem reforço .....	41
FIGURA 22 - Recalque na estrada resultante da passagem da carga em função da profundidade de instalação do geossintético, para cada tipo de geossintético instalado .....	41
FIGURA 23 - Tensão resultante no subleito da estrada .....	43
FIGURA 24 - Tensão no subleito da estrada com e sem reforço .....	43

## **USO DE GEOSSINTÉTICOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL EM UM PROTÓTIPO DE GRANDE DIMENSÃO**

### **RESUMO**

As estradas não pavimentadas são sistemas onde o desafio tem sido melhorar o desempenho e diminuir os custos manutenção. A instalação de reforços nesse tipo de estrada é bem-vinda. Isto se deve ao fato de que os reforços melhoram a capacidade de suporte e minimiza os custos de manutenção. Considerando esta temática, objetivou-se estudar o desempenho de geossintéticos aplicados como reforço em estradas não pavimentadas, por meio da verificação da resistência superficial (tensão admissível) e dos recalques de um protótipo de estrada, e dos deslocamentos dos geossintéticos, além de estimativas por formulações analíticas. Os ensaios foram realizados em uma estrada protótipo, onde foi utilizada uma camionete como carga dinâmica. Foram utilizados como reforço: geogrelha (GG), geotêxtil tecido (GTW) e geotêxtil não tecido (GTNW). O delineamento experimental foi blocos casualizados, em esquema fatorial com testemunha,  $3 \times 4 + 1$ , correspondendo aos três tipos de Gs (GG, GTNW e GTW), quatro profundidades de instalação dos Gs (1, 2, 3 e 4) e uma testemunha sem G (G0). Os resultados mostraram que a inclusão do reforço melhora o desempenho do protótipo estudado, reduzindo os recalques e diminuindo as tensões sobre o subleito.

**Palavras-Chave:** Reforços com Geossintéticos. Recalque. Deslocamento.

## USE OF NON-PAVED ROADS GEOSYNTHETICS IN: ASSESSMENT IN AN EXPERIMENTAL PROTOTYPE LARGE

### ABSTRACT

Unpaved roads are systems where the challenge has been to improve performance and reduce maintenance costs. The installation of reinforcements in this type of road is welcome. This is due to the fact that the reinforcements improve the bearing capacity and minimize maintenance costs. Considering this issue, aimed to study the performance of geosynthetics applied as reinforcement in unpaved roads, through the verification of surface resistance (allowable stress) and the repression of a prototype road, and displacement of the geosynthetic, and estimates for analytical formulations. The tests were performed on a prototype road where a van was used as a dynamic load. Were used as reinforcement: geogrid (GG), geotextile fabric (GTW) and nonwoven geotextile (GTNW). The experimental design was a randomized block design in factorial with witness,  $3 \times 4 + 1$ , corresponding to the three types of Gs (GG, GTNW and GTW), four installation depths of Gs (1, 2, 3 and 4) and a untreated G (G0). The results showed that the inclusion of the reinforcement improves the performance of the prototype study, reducing the repression and decreasing the tension on the subgrade.

**Keywords:** Reinforcement with Geosynthetics. Repression. Displacement.

## 1. INTRODUÇÃO

As estradas não pavimentadas, em sua grande maioria, não possuem condições adequadas para suportar o tráfego diário de caminhões e equipamentos agrícolas de porte elevado, principalmente no período chuvoso quando diminui a capacidade de suporte tornando-as mais suscetíveis a danos como deformações, rupturas localizadas e erosões. Associado a isto, na maioria das vezes, as estradas não pavimentadas são implantadas em subleitos com baixa capacidade de suporte o que agrava ainda mais o problema.

Várias soluções, como substituição da camada do subleito, reforço com brita ou até pavimentação da via tem sido utilizadas, entretanto, existem muitas desvantagens associadas a cada uma das soluções usualmente empregadas, dentre elas o custo, a possibilidade do material se misturar com o solo de baixa capacidade de suporte e problemas com trincas e deformações do pavimento o que gera danos estruturais nas vias.

Uma solução mais adequada tem sido a utilização de reforços com geossintéticos, tais como geogrelhas e geotêxteis. Dentre as várias funções destes elementos, quando utilizados em estradas não pavimentadas implantadas em subleito de baixa capacidade de suporte, são: separação, confinamento lateral, redistribuição das tensões (espraiamento das tensões) e o efeito membrana.

A contribuição de geossintéticos utilizados em estradas não-pavimentadas tem sido amplamente divulgada na literatura (HUFENUS et al., 2006; PIMENTEL, 2007; YANG et al., 2011). O geossintético utilizado como elemento separador evita que o solo da base (mais gráudo) se misture com o solo do subleito (menos gráudo) aumentando a vida útil dessas estradas. Utilizado como reforço, o geossintético aumenta a resistência e melhora a capacidade de suporte devido principalmente ao espraiamento das tensões, o confinamento e o efeito membrana.

Com isso, objetivou-se estudar o desempenho de geossintéticos aplicados como reforço em estradas não pavimentadas, por meio da verificação da resistência superficial (tensão admissível) e dos recalques em um protótipo de estrada, e dos deslocamentos dos geossintéticos, além de estimativas por formulações analíticas utilizadas na literatura Giroud e Noiray (1981) e Barenberg e Bender (1978).

Este projeto teve como objetivos específicos: a) Construir uma estrada protótipo de grandes dimensões; b) Instalar diferentes geossintéticos em diferentes profundidades; c)

Avaliar a resistência superficial (tensão admissível) da estrada por meio de ensaios de prova de carga superficial; d) Avaliar os recalques da estrada resultante do tráfego através do registros dos deslocamentos de superfície; e) Avaliar os deslocamentos dos geossintéticos, analisando sua influência no desempenho da estrada com relação as razões de benefício; f) Aplicar formulações analíticas de modo quantificar o aumento da rigidez da estrada e as tensões sobre o subleito.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Estradas não pavimentadas**

As estradas não pavimentadas são constituídas basicamente de um subleito e uma camada de base construída sobre ele (leito da estrada). São extremamente importantes para o desenvolvimento da agroindústria brasileira visto que praticamente toda a produção as utiliza de maneira direta ou indireta.

As estradas não pavimentadas ou estradas vicinais de terra, também, denominadas estradas rurais ou agrovias, são de fundamental importância econômica e social para as comunidades rurais. Essas vias exercem a função de “alimentadoras”, ou seja, através delas é estabelecida a ligação entre as comunidades produtoras e as grandes rodovias pavimentadas, por onde circularão as mercadorias até o seu destino final (NUNES, 2003).

A principal rota para o escoamento da produção agropecuária brasileira são as estradas. Contudo, verifica-se que grande extensão da rede viária é composta por estradas não pavimentadas (JÚNIOR e FERREIRA, 2010). Atualmente, 78,8% das estradas no Brasil não são pavimentadas (ANTT, 2008).

Os custos relacionados à manutenção de estradas não-pavimentadas é enorme e qualquer contribuição para diminuir estes custos é muito bem vinda. Estudos do Banco Mundial 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).

Em Goiás, segundo dados da Agência Goiânia de Transportes e Obras – AGETOP, o estado possui 8.483,5 km de rodovias não pavimentadas (AGETOP, 2010), que custam mensalmente, R\$ 240,97 (duzentos e quarenta reais e noventa e sete centavos) por quilômetro (um total que supera R\$ 2,6 milhões de reais), para manutenção e conservação das mesmas (AGETOP, 2006).

Segundo Nunes (2003) em uma estrada não pavimentada, as principais características, em relação ao conforto dos seus usuários, são a capacidade de suporte as condições de rolamento e aderência. Góngora (2011) diz que as condições de rolamento e aderência estão relacionadas com os defeitos na estrada como buracos ondulações e materiais soltos.

A capacidade de suporte está relacionada a estrutura do solo do leito da estrada (geralmente compacto) e a resistência do subleito que na maioria dos casos apresenta baixa capacidade de carga, principalmente quando submetidos a elevados valores de umidade.

Em relação à aderência, é a propriedade que a estrada possui quando tem em contato um rodado, tendo interferência direta do material e da forma de construção dessa estrada, além do tipo de pneu utilizado pelo automóvel.

Essas estruturas apresentam, como característica comum, o fato de serem sistemas de transferência de cargas construídas, na maioria das vezes, em solos granulares, onde a espessura das camadas é relativamente pequena comparada à largura da área carregada (ISMAIL e RAYMOND, 1995).

As condições das estradas não pavimentadas dependem de atributos relacionados com as especificidades de cada região, tais como: tipo de solo, clima, topografia, tráfego e frequência de manutenção. ODA (1995) comenta que existem três agentes externos que alteram as condições dessas estradas: o tráfego, que através das rodas aplica tensões; a água da chuva, que diminui a capacidade de suporte; e a atividade de manutenção, que modifica os perfis da estrada.

Estes fatores, quando combinados em cenários desfavoráveis, influenciam diretamente no aparecimento de defeitos com grau de severidade maiores ou menores no leito das vias, o que acarreta problemas que, quando não reduzem a velocidade de tráfego, são responsáveis pela interrupção da via (NUNES, 2003). A Figura 1 mostra o formato de construção de uma estrada não pavimentada, conforme DNER (1999).

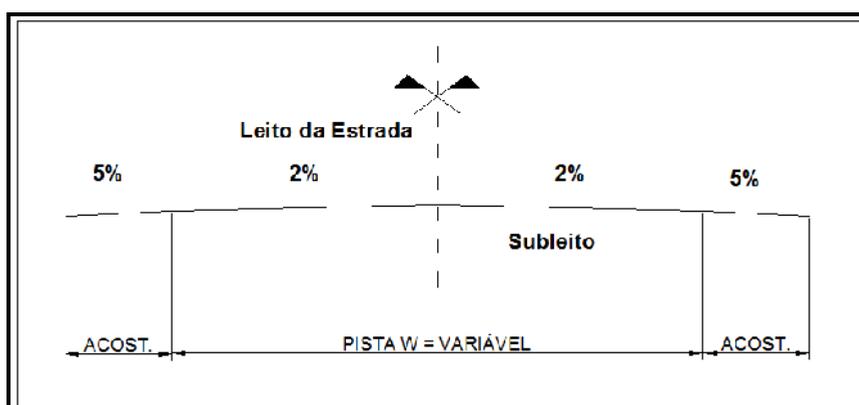


FIGURA 1: Seção típica de uma estrada não pavimentada.  
Fonte: DNER (1999).

A seguir, apresentam-se os principais conceitos relacionados à temática do sistema de estradas não pavimentadas.

## 2.2. Trilhas de rodas

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 regiões saturadas (atoleiros).

Um problema encontrado nesse tipo de estrada são as trilhas de rodas, que se caracterizam como depressões na superfície da estrada no percurso dos pneus (rodados) dos veículos. O afundamento é causado por uma deformação permanente em qualquer camada da estrada, causado pela compressibilidade dos solos e a grande quantidade de tráfego (GÓNGORA, 2011). Esse problema depende da capacidade de suporte da estrada, podendo ser minimizado com a instalação de reforço na estrutura da estrada.

Fontenele (2001) considera que, nas estradas não pavimentadas, as trilhas de roda de 50 a 100 mm alcançam o Estado Limite de Utilização – ELUt (ruptura por deslocamento excessivo) e cobrem em torno de 20% da área superficial, ou seja, numa parte da estrada com 5 m<sup>2</sup> de superfície, apenas 4 m<sup>2</sup> estão não sofreram deformações excessivas e o restante é resultado do afundamento das trilhas de rodas; e para os sulcos com profundidades superiores a 100 mm atingem o Estado Limite Último – ELU (ruptura geral) cobrindo mais que 30% da área superficial, sendo consideradas totalmente fora de serviço.

## 2.3. Compactação do solo

Compactar o solo é um método de estabilização e melhoria da estrada por meio de processo manual ou mecânico, visando à redução do volume de vazios de um solo. A compactação aumenta o contato entre os grãos e torna o solo mais competente, melhorando as suas características de resistência, deformabilidade e permeabilidade (SOARES et al., 2002).

Geralmente as estradas não pavimentadas são pouco compactadas ou somente as camadas superiores, devido ao tráfego, acabam sendo compactadas. O grande efeito se deve com a saturação do solo, principalmente em camadas mais profundas, que acarreta na expansão das camadas do leito da estrada, provocando rupturas. O solo mal compactado geralmente é submetido a ciclos de expansão (período chuvoso) e contração (períodos de estiagem), com o tempo, a fadiga (promovida pelos ciclos) afetam a estrutura do solo

provocando o surgimento de trincas, que por sua vez, promove o surgimento de caminhos preferências de fluxo que deterioram rapidamente a estrada reduzindo a sua vida útil.

#### **2.4. Índice de Suporte Califórnia – CBR**

Um dos ensaios para determinar a resistência do solos é o Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (California Bearing Ratio – CBR), padronizado no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da NBR 9895/87, que mede a resistência de um solo compactado e a capacidade de suporte das bases compactadas, sendo o valor obtido em porcentagem. Koerner (2005) recomenda que a utilização de reforços seja indicada para uma estrada não pavimentada somente com subleito com  $CBR < 10\%$ .

#### **2.5. Bulbo de tensões**

Quando há passagem de um veículo na estrada, os seus rodados causam compactação da mesma, sendo que a intensidade da compactação diminui conforme a quantidade de passadas aumenta no mesmo local, seguindo uma escala logarítmica (JAKOBSEN e GREACEN, 1985). Os maiores níveis de compactação ocorrem até oito passagens de veículos, enquanto acima de quinze passagens tornam-se insignificante (CANARACHE et al., 1984; SECCO et al., 2004).

Durante o tráfego, as tensões atuantes de cada rodado é propagada pelo solo formando um bulbo de tensões, onde numa altura relativa à cerca de duas a quatro vezes a largura do rodado ( $Z = 2$  a  $4B$ ), corresponde a 10% das tensões aplicadas. Nesta profundidade influência das tensões é insignificante (SIMONS e MENZIES, 1981; KÖGLER e SCHEIDIG, 1929). A Figura 2 ilustra a distribuição das tensões no interior do solo.

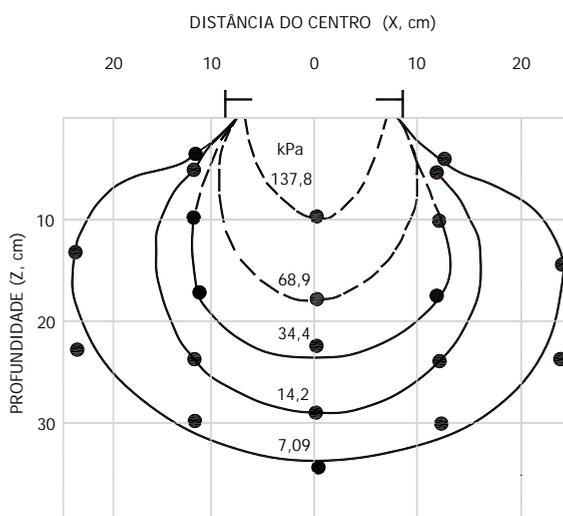


FIGURA 2: Distribuição de pressões num plano vertical do solo sob uma pressão de 2060 kPa aplicada numa área de 0,2 m<sup>2</sup>.

Fonte: VANDEN BERG et al. (1957).

Para determinar o bulbo de tensões considera-se como eixo padrão o eixo simples de rodas simples. A área de contato ( $A_c$ ) é representada no estudo teórico por um retângulo  $L \times B$ , conforme apresenta a Figura 3. Para automóveis em geral, tem-se as seguintes expressões para  $L$  (1) e  $B$  (2):

$$L = \frac{B}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

$$B = \sqrt{\frac{P}{p_c}} \quad (2)$$

Onde:

$L$  e  $B$  = comprimento e largura da área de contato do pneu com o solo, respectivamente, em m;

$P$  = carga axial, em N; e

$p_c$  = pressão de calibragem dos pneus, em N/m<sup>2</sup>.

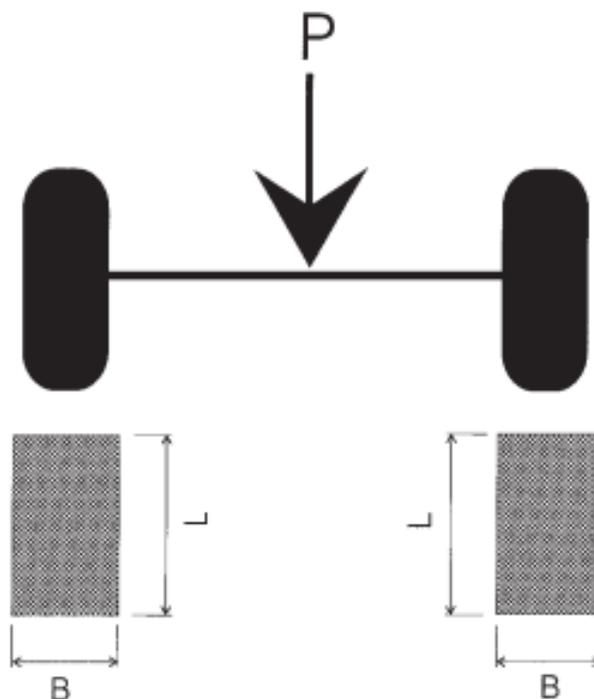


FIGURA 3: Geometria do eixo do veículo e áreas de contato dos pneus.

Fonte: OLOO et al. (1997).

## 2.6. Modelos empíricos

Giroud e Noiray (1981) usam modelos geométricos para a carga da roda com pressão na área  $B \times L$ , que são dissipadas na altura do aterro  $h_0$  sem reforço e na altura  $h$  com reforço (geossintéticos – G). Os modelos resultam nas tensões no subleito da estrada, sendo  $p_0$  sem reforço e  $p$  com reforço, de acordo com as Equações 3 e 4, mostradas na Figura 4:

$$p_0 = \frac{P}{2(B+2h_0 \tan \alpha_0)(L+2h_0 \tan \alpha_0)} + \gamma h_0 \quad (3)$$

$$p = \frac{P}{2(B+2h \tan \alpha)(L+2h \tan \alpha)} + \gamma h \quad (4)$$

Onde:

$B$  e  $L$  = largura e comprimento da área de contato do pneu, em m;

$p_0$  = tensão resultante no subleito sem G, em Pa;

$p$  = tensão resultante no subleito com G, em Pa;

$h_0$  = altura do aterro sem G, em m;

$h$  = altura do aterro com G, em m;

$P$  = carga axial, em N;

$\alpha$  = ângulo de distribuição da carga com G, em radianos;

$\alpha_0$  = ângulo de distribuição da carga sem G, em radianos; e

$\gamma$  = peso específico dos agregados do aterro, em  $\text{kg.m}^{-3}$ .

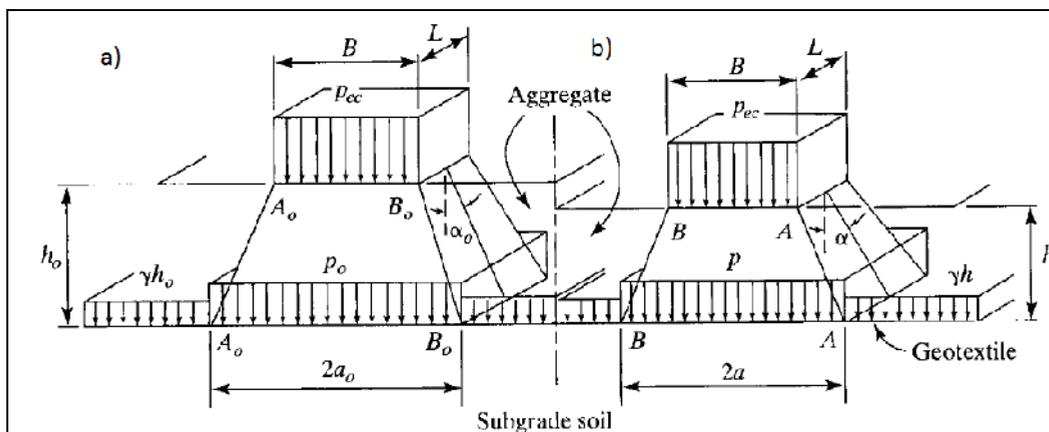


FIGURA 4: Representação das cargas dos rodados, onde  $B$  é a largura de contato do pneu com a superfície,  $L$  é o comprimento de contato do pneu,  $h_0$  e  $h$  são as alturas do aterro sem e com reforço, respectivamente, e  $\alpha_0$  e  $\alpha$  são os ângulos de distribuição da carga com e sem reforço. (a) Geometria sem reforço de G; e (b) Geometria com reforço de G.

Fonte: GIROUD e NOIRAY (1981).

Barenberg e Bender (1978) por meio de testes em pequena escala de laboratório, apresentam a Equação 5, que calcula a carga no subleito em relação à altura do aterro, sem a utilização do reforço.

$$c = \frac{P}{2\pi(\sqrt{P/p_c + 2h_0 \tan \alpha_0})(\sqrt{P/2p_c + 2h_0 \tan \alpha_0})} \quad (5)$$

Onde:

$c$  = tensão resultante no subleito, em Pa;

$P$  = carga axial, em N;

$h_0$  = altura do aterro sem G, em m;

$\alpha_0$  = ângulo de distribuição da carga sem G, em radianos; e

$p_c$  = pressão do pneu, em kPa.

No caso da utilização do reforço, deve-se considerar a deflexão do G na base do solo, conforme a Equação 6:

$$(\pi + 2)c = \frac{P}{2\pi(\sqrt{P/p_c+2h \tan\alpha})(\sqrt{P/2p_c+2h \tan\alpha})} - \frac{E\epsilon}{\alpha\sqrt{1+(\alpha/2S)^2}} \quad (6)$$

Onde:

$c$  = tensão resultante no subleito, em kPa;

$P$  = carga axial, em N;

$h$  = altura do aterro com G, em m;

$\alpha$  = ângulo de distribuição da carga com G, em radianos;

$p_c$  = pressão do pneu, em kPa;

$E$  = rigidez à tração do G, em kN/m;

$\epsilon$  = deformação específica do G, em %; e

$S$  = área de contato do pneu, em m<sup>2</sup>.

## 2.7. Geossintéticos

Segundo a ABNT (2003), geossintético é a “denominação genérica de produtos poliméricos (sintéticos ou naturais), industrializados, desenvolvidos para utilização em obras geotécnicas, desempenhando uma ou mais funções, entre as quais se destacam: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial”. A qualidade na fabricação, a agilidade na instalação, alta resistência aos esforços físicos são características positivas que determinam a utilização desse tipo de material nos projetos (KOERNER, 2005).

Desde 1970 os geossintéticos (Gs) tem 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 do leito da estrada (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 altura, o que implica em redução de custos e benefícios ambientais.

Sigurdsson (1991) estudou seções experimentais com o objetivo de investigar o desempenho de diferentes tipos de geossintéticos em estradas não-pavimentadas sobre solos moles. Verificou-se que as seções reforçadas apresentaram melhor desempenho do que as não-reforçadas. Nas camadas de aterro mais espessas, os geossintéticos apresentaram basicamente o mesmo desempenho, apesar de possuírem valores de rigidez diferentes. Nas camadas de aterro menos espessas observou-se a ocorrência do efeito membrana.

Segundo Pimentel (2007), os geossintéticos mais empregados como reforço do solo são as geogrelhas e os geotêxteis tecidos e não tecidos. Esses geossintéticos formam juntamente com o solo, uma superfície com menor deformabilidade e maior resistência que o solo isolado. A Figura 5 ilustra estes efeitos.

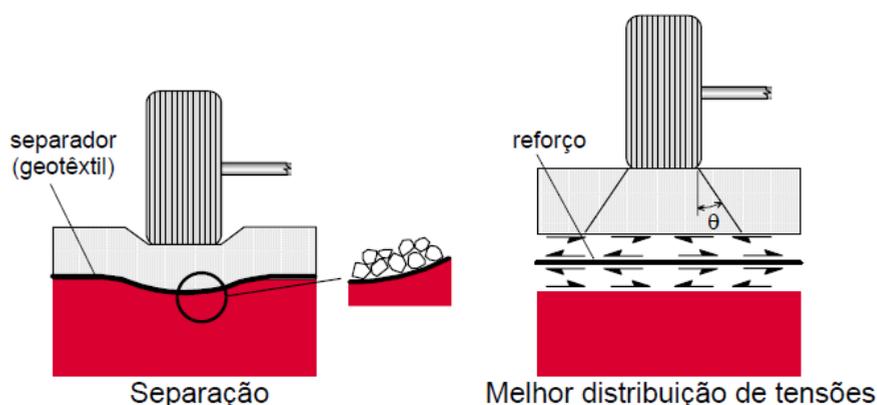


FIGURA 5: Contribuição dos geossintéticos em solos moles.  
Fonte: PALMEIRA (1993).

Dentre as propriedades dos geossintéticos, são particularmente importantes a resistência e a rigidez à tração e os parâmetros de interação mecânica entre o solo e o reforço (PALMEIRA, 1993).

O geossintético não só melhora a resistência da estrada, mas reduz o custo da construção e manutenção, diminuindo a espessura da camada granular e reduzindo o tempo necessário para a construção (SOM e SAHU, 1999). Segundo Hufenus et al. (2006), a utilização de geossintéticos como reforço em estradas não pavimentadas têm influenciado em uma redução de 30% na espessura da estrada.

### 2.7.1. GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis (GTs) consistem em fibras sintéticas ou naturais, distribuídas de forma aleatória ou não, unidas por diferentes processos físicos ou químicos de ligação como: calor, costuras, resinas ou por amarração (GÓNGORA, 2011). Sua estrutura permite que haja passagem de fluido e gases, devido à disposição das fibras, aplicando-se como material para drenagem e filtração. Outras aplicações são como reforço para o solo e como separador de camadas. Entre os tipos de geotêxteis, há dois tipos utilizados para essas aplicações: o geotêxtil não tecido (GTNW) e o geotêxtil tecido (GTW), onde o primeiro é um produto composto por filamentos contínuos, e o segundo é obtido do entrelaçamento dos fios (VERTEMATTI, 2004).

Os geotêxteis tecidos são feitos de fios fibrilados, multifilamentos ou monofilamentos. Em seu processo de fabricação, faz-se o uso do sistema convencional de tecelagem, tendo-se em vista que os fios da manta permanecem ordenados em duas direções, geralmente ortogonais (ANTUNES, 2008). A manta é formada pela disposição das fibras dispostas transversalmente ao sentido de fabricação.

Estes materiais são utilizados para reforçar estradas não pavimentadas em subleito de baixa compactação há muitos anos. Eles são instalados entre subleito e estrada com o objetivo de reforçar ou separar os materiais das duas camadas. Como a probabilidade de passagem dos grãos finos é alta, a separação é uma função essencial (AL-QADI e APPEA, 2003), porém, com a diminuição da capacidade de carga do subleito, a importância do reforço aumenta significativamente.

### 2.7.2. GEOGRELHAS

As geogrelhas (GGs), segundo a ABNT (2003), são “produtos com estrutura em forma de grelha, com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas, constituído por elementos resistentes à tração, sendo considerado unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração apenas em uma direção e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais (ortogonais). Em função do processo de fabricação, as geogrelhas podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas”.

## 2.8. Estudos de campo em escala real

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.

Fannin e Sigurdsson (1996) relataram que a inclusão de um geossintético, entre a camada de base conduziu a uma melhoria significativa na transitabilidade. O reforço teve melhor desempenho na camada de base mais fina, com espessura de 25 cm, e diminuiu com o aumento da espessura da camada. Algumas implicações são discutidas nas observações de campo para a seleção de um geossintético, com referência à separação e reforço de camadas de cascalho sobre solos moles.

Palmeira (2007) afirma que, apesar dos complexos dispositivos de ensaio disponíveis para o estudo da interação entre o solo e o geossintético, deve se salientar que as técnicas de ensaio são, na maioria dos casos, ainda aproximações do comportamento real do geossintético no campo devido ao efeito de escala dos ensaios.

Em situações reais onde foram instalados geossintéticos, ficou evidente que a inclusão de um geossintético melhora o desempenho de uma estrada não pavimentada construída sobre solo de baixa capacidade de suporte.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. O local

O experimento foi realizado na Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas, da Universidade Estadual de Goiás, Campus Henrique Santillo, localizado no município de Anápolis, GO, cuja localização geográfica é definida pelas coordenadas  $-16^{\circ} 23'$  S e  $48^{\circ} 57'$  W, com altitude média de 980m, onde a área experimental é mostrada na Figura 6.



FIGURA 6: Imagem aérea da localização do experimento na área da Universidade Estadual de Goiás.

#### 3.2. O solo

O solo da base e do subleito da estrada protótipo foi composto por areia média. A areia foi utilizada por permitir manter uma baixa compactidade quando lançada para confecção do subleito e ainda por reproduzir uma situação homogênea no leito da estrada. Almeida et al. (2010) indicam a utilização desta metodologia em experimentos protótipos de grandes dimensões.

A areia utilizada é proveniente de uma jazida natural existente as margens do rio Corumbá, no município de Abadiânia, GO. Ela foi classificada como média, com grãos arredondados, bem graduada, sem pedregulhos e baixa porcentagem de finos. Os minerais predominantes são quartzosos.

Com amostras preparadas segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT/NBR 6457 (1986) realizaram-se ensaios de granulometria (ABNT/NBR 7181, 1984), e peso específico dos sólidos (ABNT/NBR 6508, 1982). A curva granulométrica, mostrada na Figura 7, apresenta a porcentagem de material que passa nas peneiras utilizadas sem sedimentação, resultante do ensaio de granulometria. Os resultados das análises de caracterização física e mecânica do solo, realizadas no Laboratório de Mecânica dos Solos dos cursos de Engenharia Civil e Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Goiás, mostraram que o solo possui 5,6% de areia grossa, 48,4% de areia média e 46,0% de areia fina, com  $D_{60} = 0,30$  mm e  $D_{10} = 0,07$  mm resultando no coeficiente de uniformidade  $C_{NU} = 4,28$ . O peso específico dos sólidos foi  $\gamma_s = 25,8$  kN.m<sup>-3</sup>.

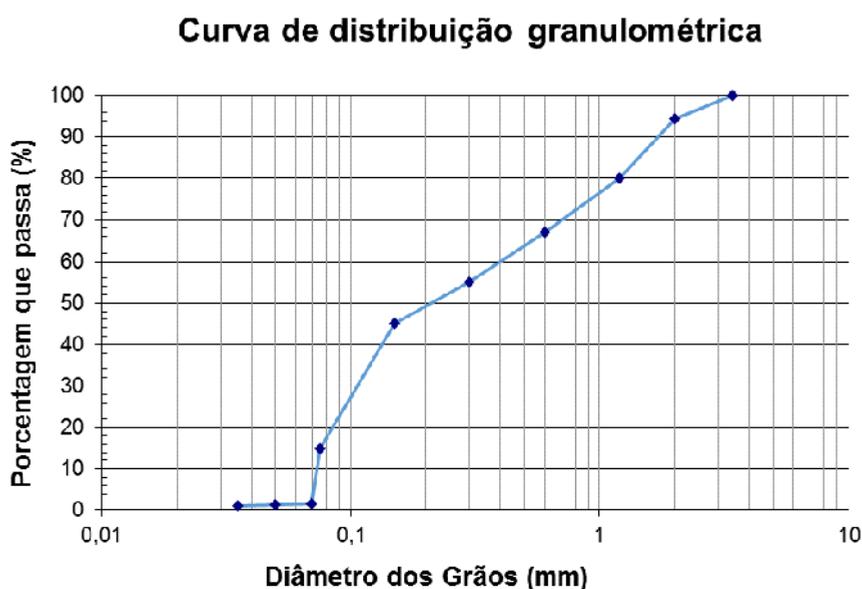


FIGURA 7: Distribuição granulométrica da areia utilizada.

### 3.3. Carga aplicada sobre a estrada protótipo

Para simulação do tráfego nos ensaios, foi utilizada uma camionete modelo F-1000, da marca Ford, motor 3.9 litros a diesel da MWM com 86,4 cv de potência e peso de 2445 kg. O peso efetivo sobre a estrada foi de 1340 kg, somando a carga atuante que foi a metade da camionete e o motorista. O pneu dianteiro e traseiro com especificações técnicas P265/70R16

111 T, modelo Radial Long Trail T/A<sup>®</sup>, da marca BFGoodrich, com pressão de inflagem de 220,63 kPa.

A influência do tráfego foi avaliada logo após as 10 passadas dos pneus do lado do motorista a 0,35 m da extremidade lateral da estrada, de tal forma que os pneus não trafegassem sobre a ancoragem dos geossintéticos.

### 3.4. Os geossintéticos

Foram utilizados três tipos de Gs: um GTNW, um GTW e uma GG, e um trecho sem o reforço dos Gs (SG). A Tabela 1 mostra as características dos geossintéticos utilizados.

TABELA 1: Propriedades dos geossintéticos utilizados nos ensaios.

Nome	Tipo	Abertura (mm)	Resistência à tração J (kN/m)
FORNIT J600-40	GG	40	600
HATE 35/35	GTW	0,2	35
HATE B40	GTNW	0,15	28

Fonte: CATÁLOGO DO FABRICANTE (2013).

A Figura 8 mostra os geossintéticos utilizados no projeto.

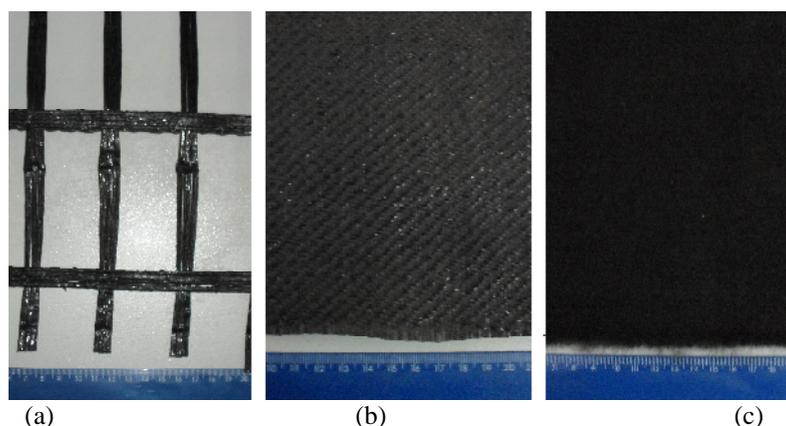


FIGURA 8: Geossintéticos utilizados no projeto. a) Geogrelha (GG), b) Geotêxtil tecido (GTW), c) Geotêxtil não tecido (GTNW).

Os geossintéticos foram instalados em quatro profundidades (1, 2, 3 e 4), correspondendo respectivamente a  $Z1 = 0,10$  m,  $Z2 = 0,20$  m,  $Z3 = 0,30$  m e  $Z4 = 0,40$  m. Estas profundidades foram definidas conforme orientação de autores (MOAYED e NAZARI, 2011; GÓNGORA, 2011; HUFENUS et al., 2006; SOM e SAHU, 1999). Elas se localizam na área mais efetiva da distribuição das tensões no solo ou seja, dentro do bulbo de tensões, demonstrado na Figura 9.

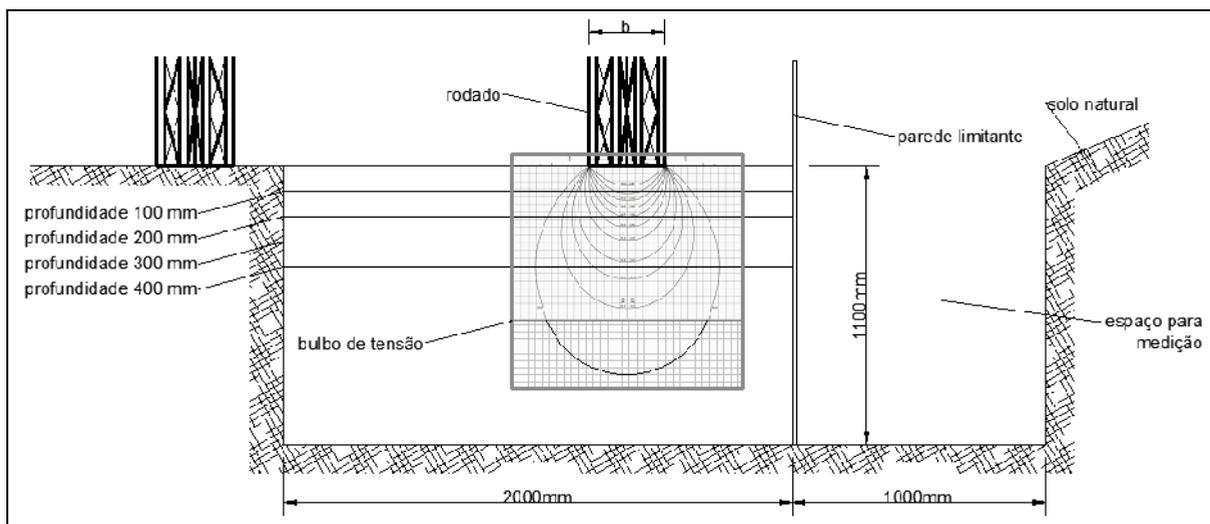


FIGURA 9: Esquema representando a estrada de simulação, a profundidade de instalação dos geossintéticos e o bulbo de tensão resultante da tensão aplicada pelo rodado.

No processo de montagem, os reforços foram ancorados no interior da base, em todos os geossintéticos, onde o material foi dobrado na lateral em dois segmentos, de 10 cm e 20 cm na extremidade ficou embutido dentro da camada da base, conforme Antunes (2008), mostrado na Figura 10.

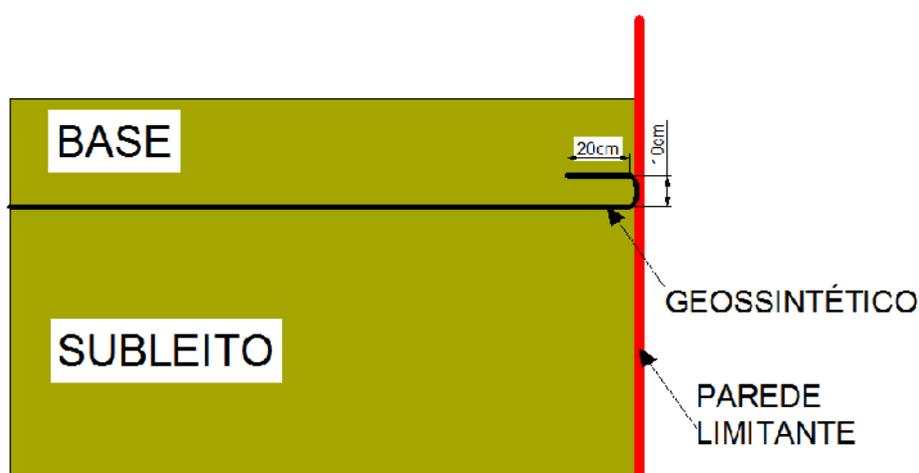


FIGURA 10: Esquema de ancoragem utilizado no reforço de geossintético.

### 3.5. A estrada protótipo

Para análise da resistência superficial e dos recalques da estrada, e do deslocamento dos Gs, foi construída uma estrada vicinal em escala real composta de um subleito de areia com baixo valor de CBR = 5,1%, uma manta de geossintético e o corpo estradal (aterro) em areia mediamente compacta CBR > 8,6%.

A estrada foi construída em uma vala com 3,50 m de largura, 14,00 m de comprimento e 1,50 m de profundidade, sendo 2,00 m de largura utilizado para estrada e o restante para a coleta dos dados (deslocamento dos geossintéticos), mostrada na Figura 11.



FIGURA 11: Imagem da vala aberta, onde foi construída a estrada protótipo.

Cada parcela experimental possui as seguintes dimensões: a largura (L) de 1,60 m, e o comprimento (c) de 1,00 m, mantendo uma bordadura de 1,00 m no comprimento total (0,50 m de cada lado) e 0,40 m na largura da estrada, possuindo medidas suficientes para a coleta e realização dos ensaios. A Tabela 2 mostra a distribuição dos tratamentos nas parcelas, conforme o delineamento estatístico utilizado, onde as letras correspondem ao tipo de geossintético instalado e os números às profundidades de instalação dos geossintéticos.

TABELA 2: Distribuição dos tratamentos nas parcelas experimentais (GG1, GG2, GG3, GG4, GTNW1, GTNW2, GTNW3, GTNW4, GTW1, GTW2, GTW3, GTW4). No trecho (SG) não foi instalado G.

<b>Parcela</b>	<b>Bloco 1</b>	<b>Bloco 2</b>	<b>Bloco 3</b>
1	GTNW4	GTW2	GG3
2	GG1	SG	GG1
3	GTNW3	GTW4	GG4
4	GG3	GG2	GTNW1
5	GTNW2	GTW3	GTW1
6	SG	GG3	GTNW3
7	GTW1	GTNW3	GTNW4
8	GG4	GTNW2	GTW2
9	GTW4	GG1	GTW3
10	GG2	GG4	SG
11	GTW3	GTNW1	GTNW2
12	GTNW1	GTNW4	GTW4
13	GTW2	GTW1	GG2

### **3.6. Delineamento estatístico**

O delineamento experimental foi blocos casualizados, em esquema fatorial com testemunha,  $3 \times 4 + 1$ , correspondendo aos três tipos de Gs (GG, GTNW e GTW), quatro profundidades de instalação dos Gs (1, 2, 3 e 4) e uma testemunha sem G (G0), totalizando 12 tratamentos + 1 (GG1, GG2, GG3, GG4, GTNW1, GTNW2, GTNW3, GTNW4, GTW1, GTW2, GTW3, GTW4, G0), com 3 blocos para cada tratamento (R1, R2, R3), totalizando 39 unidades experimentais. Em cada parcela amostral foram analisados os seguintes atributos: a resistência superficial e os recalques da estrada, e o deslocamento dos Gs. As análises estatísticas foram realizadas pelo programa ASSISTAT – Assistência Estatística (SILVA e AZEVEDO, 2009). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Em caso de valores significativos, foi aplicada análise de regressão.

### **3.7. Ensaios utilizados na estrada protótipo**

Os ensaios foram realizados na estrada protótipo, utilizando uma camionete como carga atuante. Essa carga passou dez vezes em todos os trechos de cada bloco antes que fossem coletados os resultados dos ensaios. Apenas os rodados do lado esquerdo (lado motorista) passaram sobre a área de coleta de dados.

Após a passagem da carga, foram coletadas as informações sobre: os recalques, os deslocamentos dos geossintéticos e a resistência superficial de cada trecho. Posteriormente são descritos os ensaios utilizados.

#### **3.7.1. DETERMINAÇÃO DO RECALQUE**

O recalque da estrada, resultante da trilha do rodado, foi obtido por um perfilômetro de barras sendo registrado o perfil do solo depois das passagens da carga, no centro de cada amostra (longitudinalmente), na trilha de roda. O perfilômetro, mostrado na Figura 12, constitui-se de barras metálicas verticais, que foram instaladas na superfície do solo, e sua medição foi realizada por um painel na parte superior do aparelho com escalas de 0,05 m. Em cada parcela amostral coletou-se dois perfis de recalque (duas trilhas de roda), antes e depois das passagens carga, assim obteve-se o recalque pela diferença dos dois recalques obtidos.



FIGURA 12: Medição do recalque da trilha de roda formada pela passagem da carga. O equipamento utilizado foi um perfilômetro de barras.

### 3.7.2. DETERMINAÇÃO DO DESLOCAMENTO DOS GEOSSINTÉTICOS

Conforme Benjamim et al. (2007), utilizou-se o método dos deslocamentos dos Gs por meio de extensômetros mecânicos, que consistem em fios de aço inoxidável, instalados no interior de tubos de nylon, utilizados para reduzir o atrito e para proteger os fios. O fio é ligado aos geotêxteis utilizando grampos, e a outra extremidade foi fixada em um peso de suspensão para manter o fio esticado e sendo assim a efetuada a medição. As medidas foram realizadas antes e depois das passagens da carga, sendo a medida do deslocamento a diferença entre as duas medições.

A Figura 13 mostra a instalação dos extensômetros e, no detalhe, como realizaram as medições dos deslocamentos.

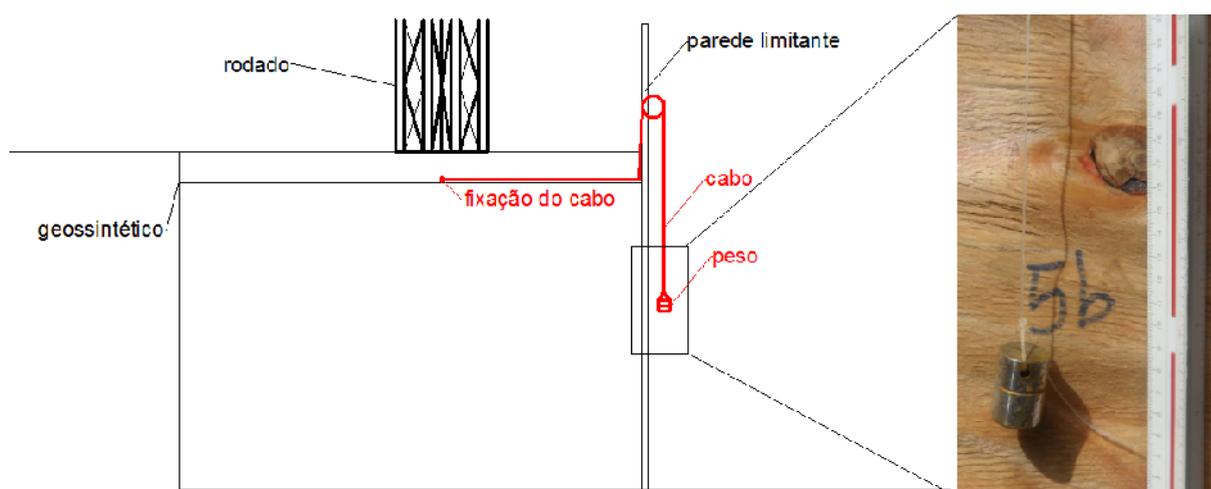


FIGURA 13: Representação esquemática da instalação dos extensômetros mecânicos que determinarão os deslocamentos dos Gs. À direita, o detalhe dos pesos de suspensão para medição do deslocamento.

Em cada parcela foram instalados três extensômetros, presos no geossintético no mesmo sentido da trilha de roda. Os pesos foram ligados ao geossintéticos por linhas, sendo estas linhas passadas por conduítes para minimizar o efeito do atrito com a areia da estrada na medição.

Os valores dos deslocamentos foram registrados por fotografia, com auxílio de uma régua para parametrizar a fotografia na escala real, e mensurados no software AutoCAD 2010, como mostrado na Figura 14.



FIGURA 14: Sistema de medição do deslocamento dos geossintéticos. A régua é a parametrização das medidas no software AutoCAD 2010. O peso foi preso ao geossintético por meio de um cabo.

### 3.7.3. DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA

A determinação da resistência superficial foi obtida por meio da norma NBR 6489/ABNT (1984) - Prova de carga direta sobre terreno de fundação, adaptada para atender a necessidade do projeto, onde o solo utilizado é fofo e não exigiu grande esforço, consistindo na instalação de um pistão de 150 mm de diâmetro, colocado sobre o solo natural (fora da trilha de roda) na superfície da estrada. Aplicou-se cargas verticalmente no centro do pistão, em seis estágios, e mediu-se os deslocamentos simultaneamente com os incrementos da carga. Os resultados são apresentados em gráficos de *tensão x recalque*. As Figuras 15 e 16 mostram os equipamentos utilizados na execução do ensaio.



FIGURA 15: Equipamento utilizados no ensaio de resistência superficial do solo: um macaco de rosca, pistão de 150 mm de diâmetro, régua para medição da profundidade e célula de carga.



FIGURA 16: Equipamentos utilizados na aquisição de dados do ensaio de resistência superficial: notebook, cabo serial e datalogger.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Ensaio de campo – Estrada em escala real

A análise de variância das variáveis de resistência superficial (RSup), deslocamento dos geossintéticos (DG) e recalque da estrada (R), obtidos nos ensaios de campo, estão apresentados na Tabela 3.

TABELA 3: Resumo da análise de variância das variáveis: resistência superficial (RSup), recalque da estrada (R) e deslocamento dos geossintéticos (DG).

FV	GL <sup>(1)</sup>	Quadrado médio		
		RSup	R	DG
Geossintético (G)	2	0,33826	373,4444*	0,01474
Profundidade (P)	3	1,91702	1285,43519*	0,06529
G x P	6	3,61990	86,96296	0,02478
Fat. X Test.	1 (0)	12,09940	147,79701	-
Tratamentos	12 (11)	3,35386	439,39744*	0,03400
Blocos	2 (2)	13,07570*	1381,64103*	0,07638
Resíduo	24 (22)	3,72184	72,05769	0,09713
Total	38 (35)			
	CV (%)	27,07	10,85	82,79
	Média	8,23670	82,50	0,78715

<sup>(1)</sup> Valores de GL entre parênteses referem-se ao deslocamento dos Gs, por não existir testemunha.

\* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

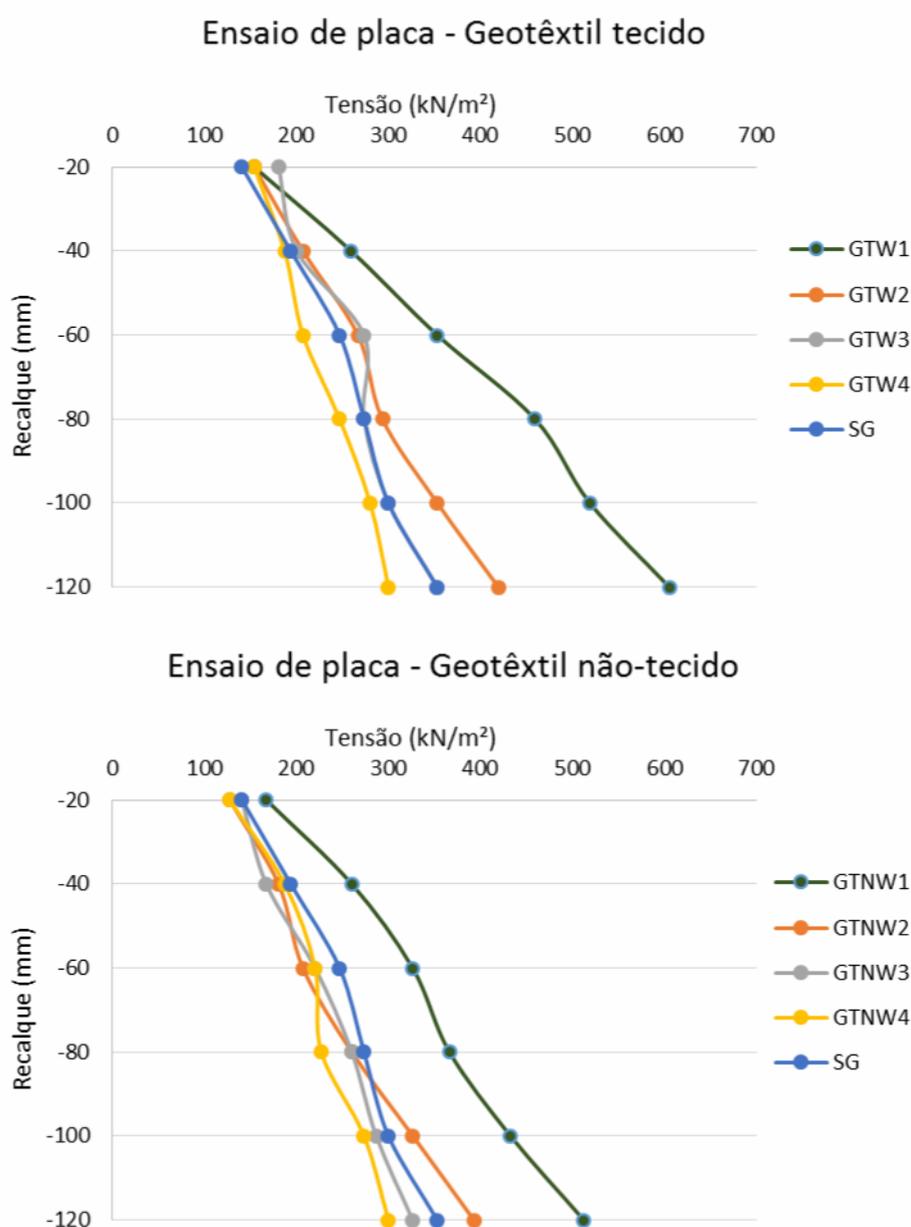
Na Tabela 3 observa-se que o recalque da estrada sofreu alteração estatisticamente significativa, alterando tanto na profundidade quanto no tipo de geossintético instalado na estrada, entretanto a interação entre eles não obteve efeito no recalque. Nota-se que as outras variáveis: resistência superficial e deslocamento do geossintético não tiveram modificações estatisticamente significativas nas diferentes profundidades e nos geossintéticos avaliados.

Isto pode estar associado ao efeito dos pequenos deslocamentos registrados nos reforços e na variabilidade espacial das tensões do sistema (observe o elevado valor do CV para os deslocamentos dos reforços - DG). Em especial, um outro fator que pode ter contribuído foi o confinamento do reforço, que parece ter sofrido forte influência no processo de instalação, gerando imperfeições iniciais.

## 4.2. Capacidade de carga

Os valores obtidos no ensaio de placa são resultantes de um carregamento aplicado em seis níveis de profundidade, determinando a resistência superficial de cada parcela do experimento. Os resultados são apresentados na Figura 17 com gráficos de comparação do carregamento aplicado nas profundidades de instalação dos geossintéticos.

Os gráficos apresentados na Figura 17 ilustram as curvas *tensão x recalque* dos experimentos realizados na estrada protótipo.



Continua...

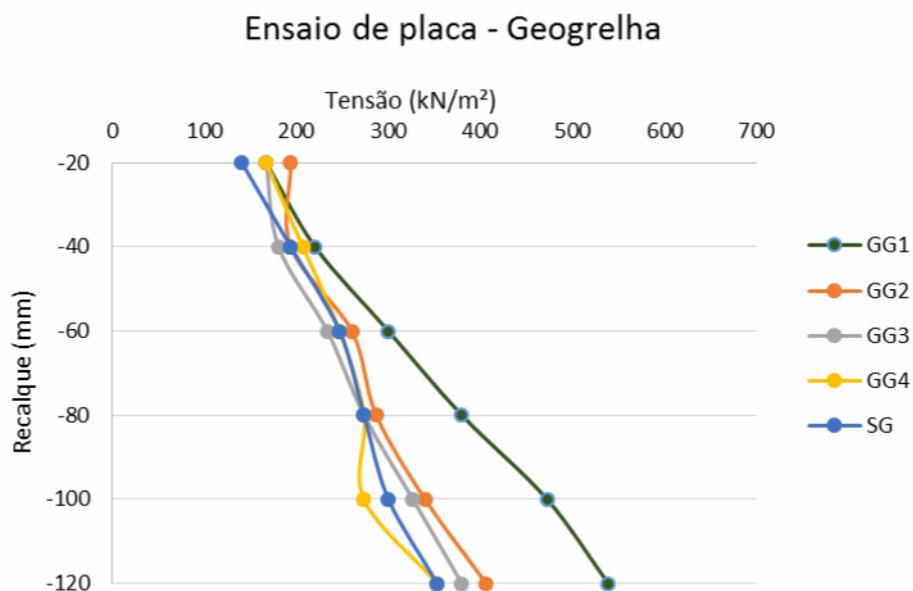
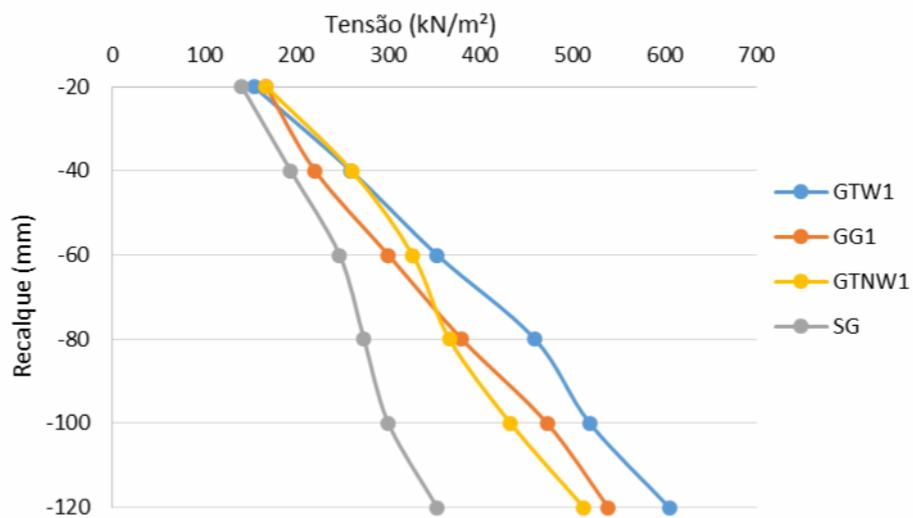


FIGURA 17: Carregamento em seis níveis de recalque, comparando as quatro profundidades de instalação e a testemunha.

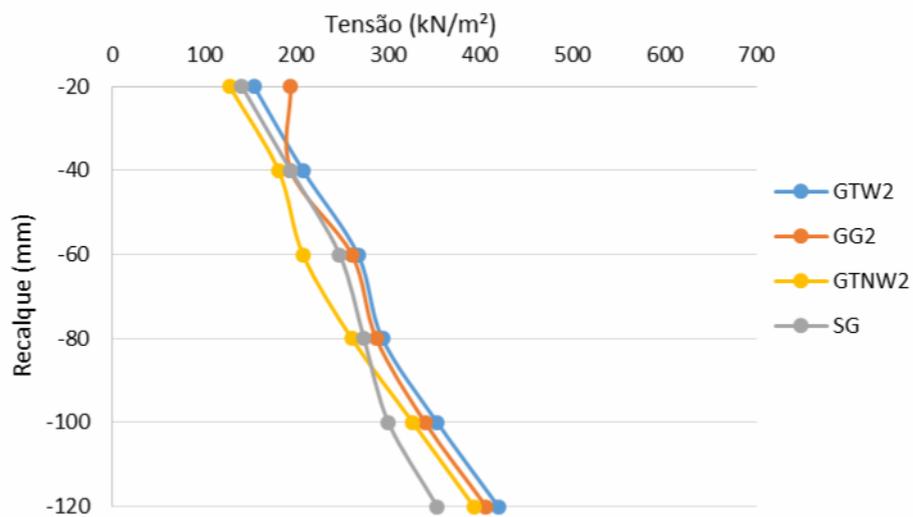
Observa-se que a estrada reforçada com os geossintéticos os reforços GTW1, GG1 e GTNW1 instalados a 100 mm da superfície possuem uma capacidade de carga consideravelmente maior que o restante dos tratamentos. Considerando a instalação de 100mm (instalação mais próxima do rodado) a razão de benefício de recalque (RBR) foi maior que 3, o que corrobora com experimentos descritos na literatura (SOM e SAHU, 1999; LATHA e MURTHY, 2007; MOAYED e NAZARI, 2011)

A Figura 18 mostra os gráficos de comparação do carregamento na estrada com e sem reforço, em cada profundidade de instalação dos geossintéticos.

### Ensaio de placa - 100 mm de profundidade do G



### Ensaio de placa - 200 mm de profundidade do G



Continua..

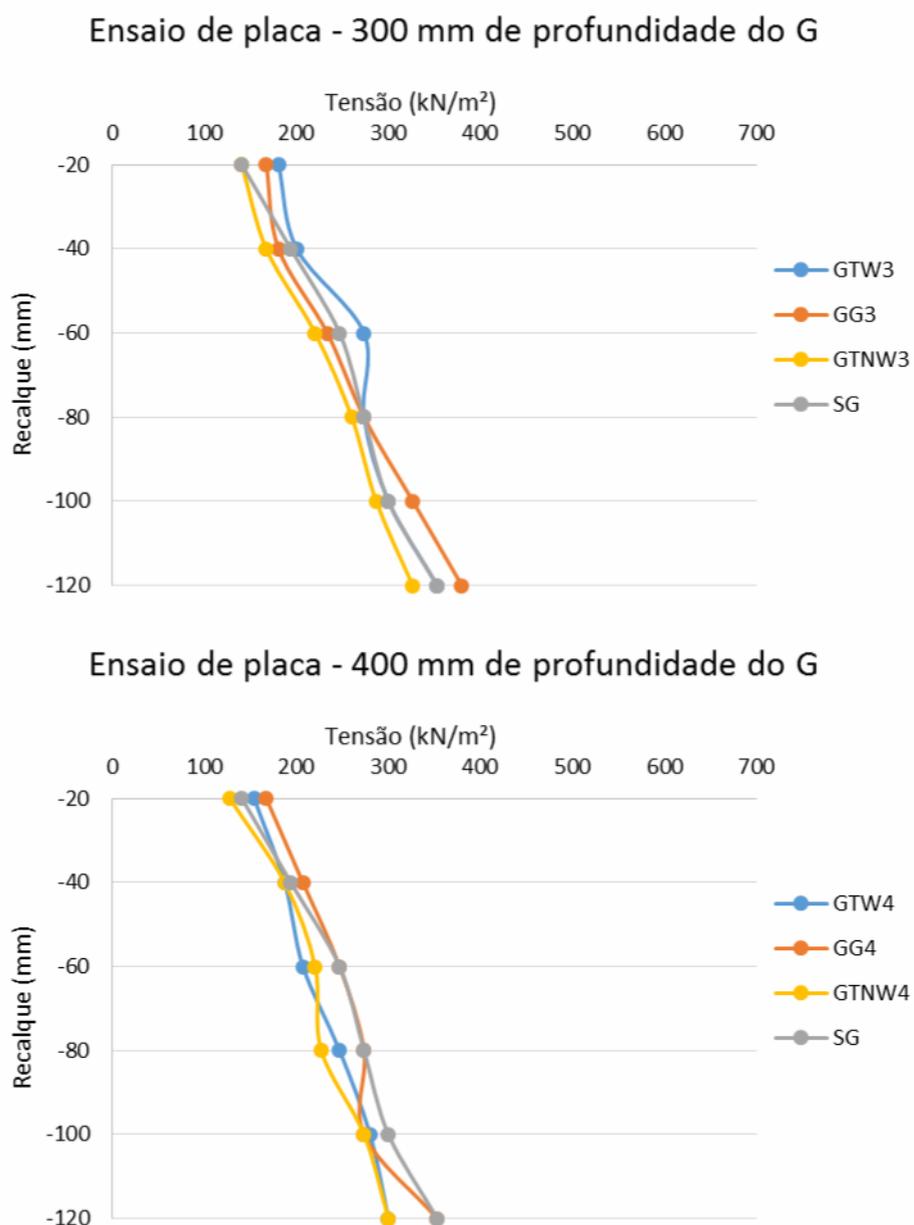


FIGURA 18: Carregamento em seis níveis de recalque, comparando o tipo de material em cada profundidade de instalação.

Observe nos gráficos da Figura 18 que a RBR é maior para profundidade de 100mm. De fato quanto mais intenso a ação do carregamento sobre o reforço maior será o seu benefício e maior será a sua interação, considerando os estados limites. É interessante observar que para um mesmo carregamento os recalques são consideravelmente menores, sendo mais expressivos nos ensaios a 100mm de profundidade. Neste caso, considerando a tensão de 300 kPa, a razão de benefício de recalque  $RBR > 2.0$ .

Este resultado ilustra claramente o efeito benéfico da inclusão no aterro da estrada.

### 4.3. Deslocamento dos geossintéticos

O deslocamento de um geossintético na estrada está diretamente ligado à tensão que atinge o reforço proveniente da superfície. Ao receber a tensão o reforço instalado no leito da estrada deforma proporcionalmente a rigidez relativa solo/reforço. A Figura 19 apresenta, graficamente, a média dos deslocamentos e das profundidades dos Gs instalados.

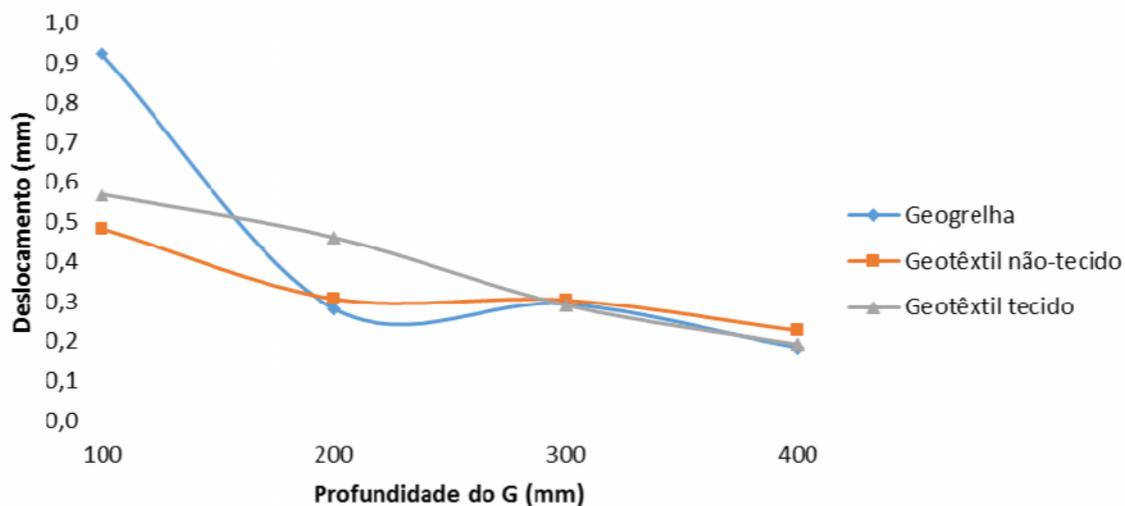


FIGURA 19: Média dos deslocamentos dos geossintéticos instalados em quatro profundidades.

Observa-se na Figura 19 que quanto menor a espessura da camada do leito da estrada acima do geossintético, maior foi o deslocamento do geossintético, isso mostra que nestes casos a interferência do carregamento teve maior efeito no reforço. Observa-se que os reforços foram pouco mobilizados, sendo na ordem de  $0,55 \pm 0,35$  mm.

A Figura 22 evidencia a força de tração resultante estimada nos reforços, em função da deformação e do módulo de resistência dos reforços.

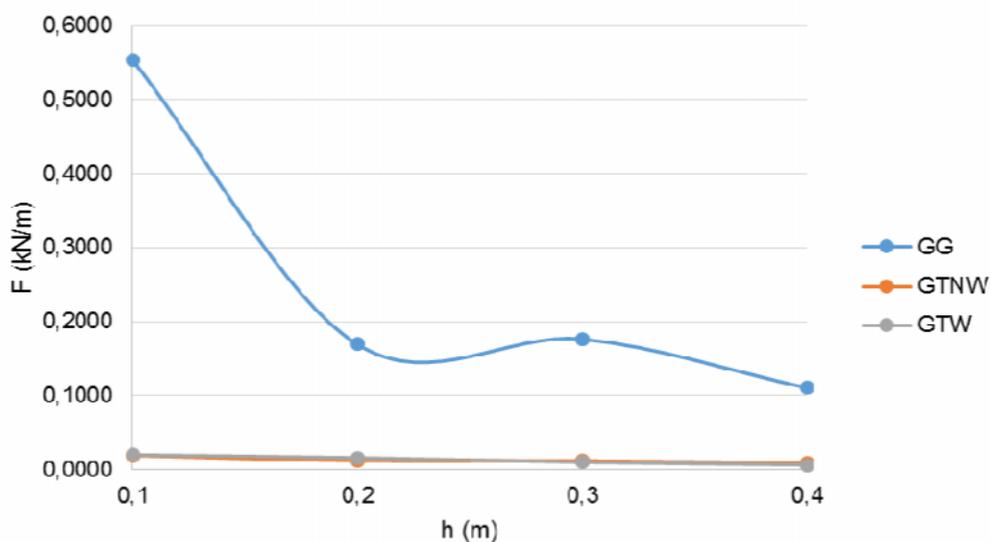
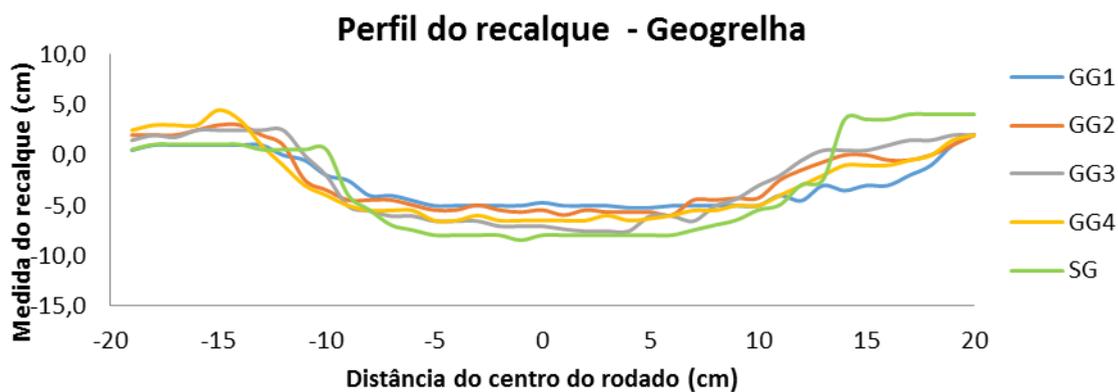


FIGURA 20: Força de tração resultante da carga aplicada na estrada, onde F é a força de tração do geossintéticos e h é a altura do aterro.

Considerando que a rigidez da geogrelha é superior, o esforço de tração mobilizado também foi superior aos demais geossintéticos. Isto mostra que em aplicações de reforços em estradas não pavimentadas deve-se considerar a rigidez do reforço.

#### 4.4. Recalque da estrada protótipo

O deslocamento proveniente da passagem da carga na estrada, registrada pelo perfilômetro, geraram os perfis dos recalques ilustrados na Figura 21.



Continua...

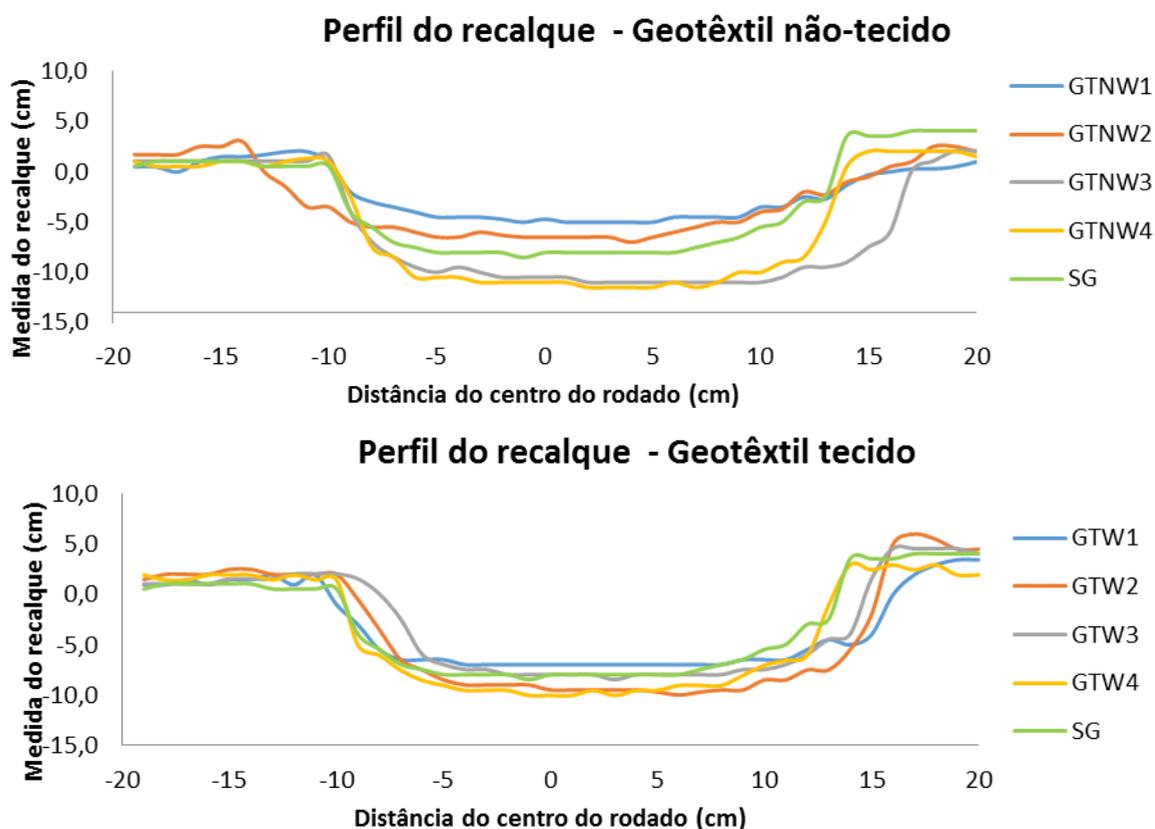


FIGURA 21: Perfis de recalque resultante da passagem da carga em cada tipo de geossintético instalado em quatro profundidades e sem reforço.

O recalque foi o único fator que diferiu estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises de regressão de cada geossintético instalado em função da profundidade de instalação são mostradas na Figura 22.

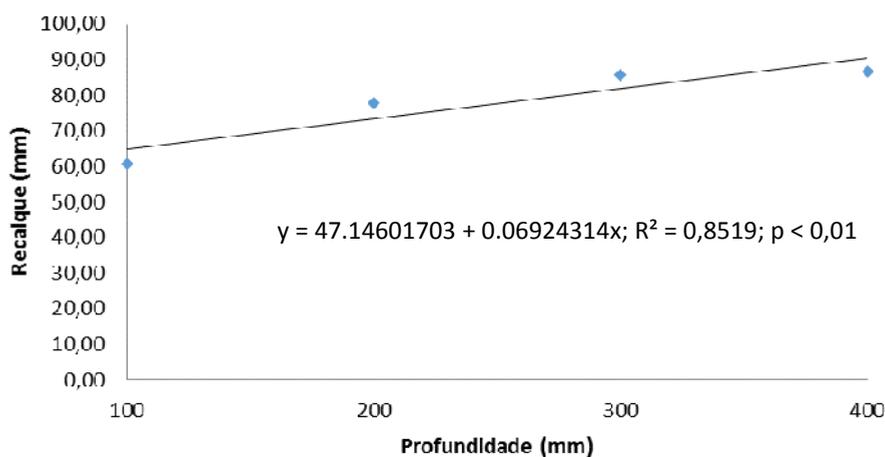


FIGURA 22: Recalque na estrada resultante da passagem da carga em função da profundidade de instalação do geossintético, para cada tipo de geossintético instalado.

Houve efeito significativo para a variável recalque na estrada protótipo, conforme Tabela 3. Logo, foi feito o teste de comparação de médias demonstrou que o recalque da estrada foi menor quando o geossintético foi instalado a 100 mm da superfície e que não houve diferença significativa entre o tipo de geossintético instalado, conforme mostrado na Tabela 4.

TABELA 4: Valores médios do recalque resultante da passagem da carga na estrada.

Geossintético	Profundidade (mm)			
	100	200	300	400
GG	57,33 aB	73,33 aAB	81,67 aA	73,33 bAB
GTNW	63,33 aC	76,67 aBC	90,00 aAB	98,83 aA
GTW	61,67 aB	83,33 aA	85,00 aA	88,33 abA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 5\%$ ). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de F do agrupamento de experimentos ( $P > 5\%$ ).

Os valores da Tabela 4 mostram o efeito benéfico quando comparados a estradas não reforçadas. Certamente a associação dos fatores: espraiamento das tensões, efeito membrana e confinamento lateral contribuíram para obtenção deste resultado.

#### 4.5. Estimativa dos recalques por formulações analíticas

Foram estimados os recalques e as tensões no subleito, resultantes do efeito da carga por métodos analíticos, utilizando os dados reais obtidos no experimento de campo.

Para os cálculos, o ângulo de distribuição da carga compreende entre 21,8 a 42,0 graus para solos sem reforço, e entre 28,1 a 51,0 graus para solos com reforço instalado. Para cálculo dos recalques, foram admitidas 30° no trecho sem reforço, 35°, 40°, 45° e 50° nos trechos com reforço a 400, 300, 200 e 100 mm, respectivamente, de acordo com Pimentel (2007).

A tensão resultante no subleito, determinada segundo Giroud e Noiray (1981), resultou em um gráfico que mostra a variação da tensão no subleito em relação à altura do aterro, com e sem reforço, demonstrado na Figura 23.

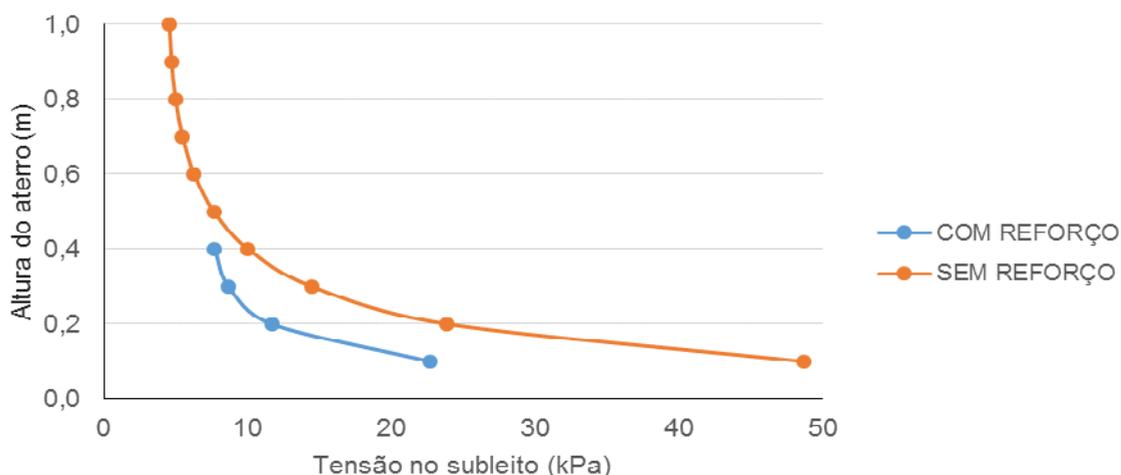


FIGURA 23: Tensão resultante no subleito da estrada com reforço e sem reforço.

A Figura 23 mostra que quanto menor a altura do aterro, maior a tensão aplicada no subleito da estrada. Nota-se que a distribuição da carga foi mais efetiva com aterro de 0,10 m. A instalação de geossintético diminui tanto a tensão resultante no subleito quanto a altura do aterro da estrada. Henry (1999) obteve resultados semelhantes.

As tensões foram determinados conforme Barenberg e Bender (1978). A partir das formulações dos autores produziu-se curvas de tensão no subleito em relação à altura do aterro, com e sem a utilização do reforço. A Figura 24 mostra a *tensão no subleito x altura do aterro*.

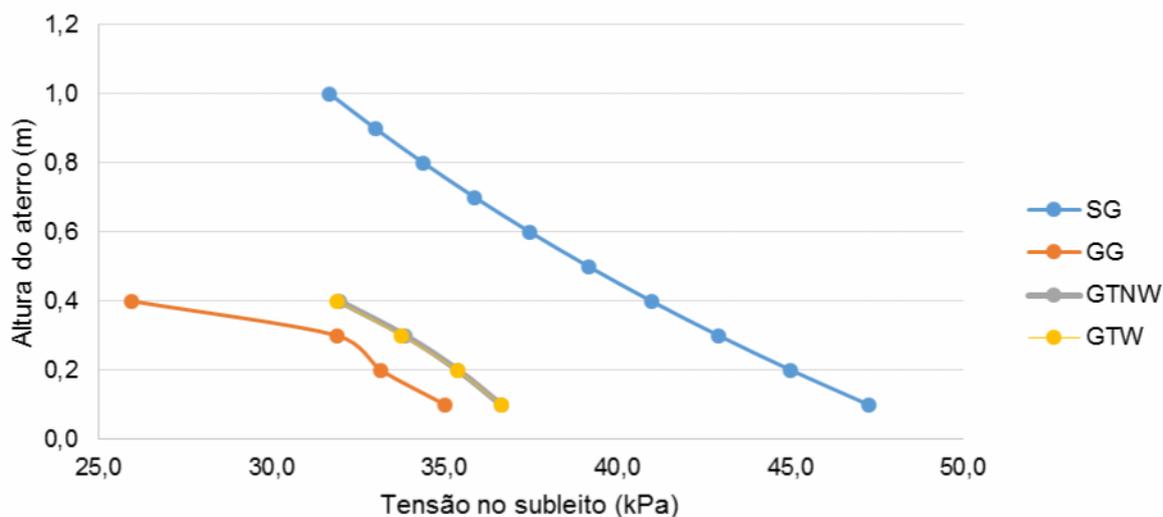


FIGURA 24: Tensão no subleito da estrada com e sem reforço.

Observa-se na Figura 24 que a tensão no subleito sem o geossintético foi consideravelmente maior que nos trechos reforçados. As tensões resultantes nos solos reforçados com geotêxteis foram muito semelhantes, isto se deve a rigidez dos reforços serem semelhantes. Quando a estrada é reforçada com geogrelha, reforço com maior rigidez, o recalque foi menor que os demais casos, principalmente quando a geogrelha foi instalada à 0,40 m de profundidade, onde nota-se a menor tensão no subleito.

Considerando estes resultados pode-se verificar que a inclusão do reforço, em um meio arenoso homogêneo, quando submetido a carregamentos externos, provoca um redistribuição de tensões no interior do sistema. Considerando-se o carregamento atuante no subleito como sendo o estimado pelas formulações de Barenberg e Bender (1978) pode-se verificar que as tensões atuantes sobre o subleito são reduzidas. A redução das tensões esta relacionada aos efeitos combinados: confinamento, espraçamento e o efeito membrana.

## 5. CONCLUSÕES

Após análises dos resultados pode-se concluir que:

1. É notável que a instalação do reforço melhorou o desempenho da estrada não pavimentadas em areia, fato observado pelos ensaios de campo realizados e pelas ilustrações dos resultados teóricos obtidos mediante as formulações aplicadas;
2. Nos ensaios de campo, houve diferença estatística significativa foi o recalque;
3. A resistência superficial da estrada foi maior quando o reforço foi instalado mais próximo da superfície, independente do tipo de geossintético. Assim como nas outras variáveis, houve um destaque quando foi colocado a geogrelha;
4. Neste sentido é importante considerar que quanto mais próxima estiver à inclusão do reforço maior será o benefício (para as alturas investigadas);
5. A geogrelha foi a que mais se deslocou com a menor altura de aterro. Nas demais alturas, o comportamento de todos os reforços foi semelhante;
6. O recalque foi significativamente menor quando a geogrelha foi instalada a 0,10 m de profundidade;
7. Os métodos analíticos de Giroud e Noiray (1981) e de Barenberg e Bender (1978) confirmaram os resultados dos ensaios na estrada protótipo, onde houve diferença quando foi instalado geossintético principalmente a geogrelha.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12553: Geossintético - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2003. 3p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13134: Geotêxteis – Ensaio de tração de faixa larga**. Rio de Janeiro, 1994. 5p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6489: Prova de carga direta sobre terreno de fundação**. Rio de Janeiro, 1984. 2p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia**. Rio de Janeiro, 1987. 14p.

AGETOP. Agência Goiana de Transportes e Obras. **ESTADO DE GOIÁS: Rede rodoviária - 2006 - 10**. 2010. Disponível em: <<http://www.seplan.go.gov.br/sepin/pub/Godados/2011/12-transporte/12-tab01.htm>>. Acesso em: 22 mar. 2012.

AGETOP. Agência Goiana de Transportes e Obras. **Serviço de conservação Rodoviária – Malha Estadual não pavimentada**. 2006. Disponível em: <<http://www.agetop.go.gov.br/index.php?idEditoria=2302>>. Acesso em: 22 mar. 2012.

ALMEIDA, M. S. S.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B.; MACHADO, C. M.; BARBOSA, P. S. A.; SILVA, C. H. C. Correção granulométrica de solos para aplicações em estradas florestais: estudo de caso com solos da Cenibra. **Revista Árvore**. Viçosa-MG, v. 34, n. 6, p. 1085-1090, 2010.

AL-QADI, I. L.; APPEA, A. K. Oito anos de desempenho de campo de estradas secundárias que incorporam alguns geossintéticos na interface subleito. In: Annual Meeting, **Transportation Research Board**, 82. Washington, 21p. 2003.

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Rede rodoviária**. 2008. Disponível em: [http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/10874/1\\_1\\_REDE\\_RODOVIARIA.html](http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/10874/1_1_REDE_RODOVIARIA.html). Acesso em: 20 jun. 2013.

ANTUNES, L. G. S. **Reforço de pavimentos rodoviários com geossintéticos**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, 158p. 2008.

BAESSO, D. P.; GONÇALVES, F. L. **Estradas Rurais: Técnicas Adequadas de manutenção**. Manual Técnico, Florianópolis, Der. 236p. 2003.

BARENBERG, E. J.; BENDER, D. A. Projeto e comportamento de sistemas solo-tecido-agregados, **Transportation Research Record**. 671, p. 64-75, 1978.

BENJAMIM, C. V. S.; BUENO, B. S.; ZORNBERG, J. G. Avaliação monitorada de campo dos muros de solo reforçados com geotêxtil. **Geosynthetics Internacional** 2, p. 100-118, 2007.

CANARACHE, A.; COLIBAS, I; COLIBAS, M; HOROBEANU, I.; PATRU, V.; SIMOTA, H.; TRANDAFIRESCU, T. Efeito da compactação induzida por tráfego roda sobre as propriedades físicas do solo e produtividade do milho na Romênia. **Soil and Tillage Research**. Romênia, v. 4, p. 199–213, 1984.

CATÁLOGO DO FABRICANTE. Huesker. **Catálogo de produtos**. 2013. Disponível em: <<http://www.huesker.com/br/geossinteticos/produtos>>. Acesso em: 17 jan. 2013.

DELMAS, P. H., MATICHARD, Y., GOURC, J.P., AND RIONDY, G. **Estradas não pavimentadas reforçadas por Geotêxteis** - A sete anos experiência. Terceira Conferência Internacional sobre Geotêxteis, Vienna, Austria, p.1015-1020. 1986.

DNER. Departamento nacional de Estradas e Rodagem. Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais, Ministério dos Transportes, 228p. 1999.

FANNIN, R.; SIGURDSSON, O. Observações de campo sobre a Estabilização de Estradas não pavimentadas com Geossintéticos. **Revista de Engenharia Geotécnica**. v. 122 , p. 544-553. 1996.

FONTENELE, H. B. Estudo para adaptação de um método de classificação de estradas não pavimentadas às condições do município de São Carlos/SP. 2001. 227 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

GIROUD, J. P.; NOIRAY, L. **Projeto de estrada não pavimentada reforçada com geossintético**. Proceedings ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, p. 1233–1254, 1981.

GÓNGORA, I. A. G. **Utilização de Geossintéticos como reforço de estradas não pavimentadas**: Influência do tipo de reforço e do material de aterro. 2011. 76 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

HENRY, K. S. Reforço de solos de baixa capacidade com geotêxteis: comparação de dois métodos de projeto aplicáveis ao descongelamento solos. **U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory**. Hanover. 36 p. 1999.

HUFENUS, R.; RUEEGGER, R.; BANJAC, R.; MAYOR, P.; SPRINGMAN, S. M.; BRÖNNIMANN, R. Testes de campo em escala completa sobre estradas não pavimentadas com subleito macio reforçadas com geossintéticos. **Geotextiles and geomembranes**. 24 ed, p. 21 -37, 2006.

ISMAIL, I.; RAYMOND, G.P. Reforço de geossintéticos em camadas granulares de solo. **Geosynthetics**, Vol. 1, Nashville, p. 317-330. 1995.

JAKOBSEN, B.F.; GREACEN, E.L. Compactação de solos florestais de areia por operações de transportes. **Soil & Tillage Research**. Amsterdam, v.5, p.55-70, 1985.

JÚNIOR, H. H. S.; FERREIRA, O. M. **Processos erosivos e perda de solo em estradas vicinais**. Engenharia Ambiental. Universidade Católica de Goiás. Goiânia, 20p. 2010.

KOERNER, R. M. **Projetando com geossintéticos**. 5 ed. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 816p. 2005.

KÖGLER, F.; SCHEIDIG, A. **Distribuição de pressão no solo**. Die Bautechnik, v. 7, 1929.

LATHA, G. M.; MURTHY, V. S. Efeitos da forma de reforço sobre o comportamento da areia reforçada com geossintéticos. **Geotextiles and geomembranes**. 25 ed., p. 23 – 32. 2007.

MOAYED, R. Z.; NAZARI, M. **Efeito da utilização de geossintéticos na redução da espessura necessária da camada de aterro em um solo de duas camadas**. Academia Mundial de Ciência, Engenharia e Tecnologia, p. 73, 2011.

NUNES, T. V. L. **Método de previsão de defeitos em estradas vicinais de terra com base no uso das redes neurais artificiais: trecho de Aquiraz – CE**. 118p. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2003.

ODA, SANDRA. **Caracterização de uma rede municipal de estradas não-pavimentadas**. 1995. 186 p. Dissertação (Mestrado em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

OLOO, S. Y.; FREDLUND, D. G.; GAN, J. K-M. Capacidade de rolamento de estradas não pavimentadas. **Geotech**, Canadá, ed. 34, p. 398 – 407. 1997.

PALMEIRA, E. M. **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. 1993.

PALMEIRA, E. M. **Interação solo-geossintético: Modelagem e análises**. Mercer Lecture, 17p. 2007.

PALMEIRA, E. M. **Utilização de Geotêxteis como reforço de aterros sobre solos moles**. 282p. 1981. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1981.

PIMENTEL, K. C. A. **Estradas não-pavimentadas e ferrovias reforçadas com geossintéticos**. 293p. 2007. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SANTOS, A.R.; PASTORE E.L.; AUGUSTO, F.; CUNHA, M.A. **Estradas vicinais de terra: Manual técnico para manutenção e conservação**. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 125 p. 1988

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 28, n. 5, p. 797-804, 2004.

SIGURDSSON, O. **Estabilização com geossintéticos de estradas não pavimentadas em solo mole: uma avaliação de campo**. Dissertação (Mestrado em Ciência Aplicada), University of British Columbia, Canada, 149p. 1993.

SILVA, F. A. S. E.; AZEVEDO, C. A. V. **Principais componentes de análises no Software ASSISTAT – Assistência estatística**. In: Congresso mundial de computadores na agricultura, 7, Reno-NV-USA: Sociedade americana de engenheiros agrícolas e biológicos, 2009.

SIMONS, N. E.; MENZIES, K. E. **Introdução à Engenharia de Fundações**. Interciência, Rio de Janeiro, 199p., 1981.

SOARES, C. S.; NEVES, H. M. G. S.; TEIXEIRA, R. S. **Parâmetros de compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR) da camada porosa superficial da região de Londrina/PR**. In: Encontro Anual de Iniciação Científica, 11, Maringá, 2002.

SOM, N.; SAHU, R.B. Capacidade de suporte de uma estrada não pavimentado geotêxtil reforçado como uma função da deformação: Um modelo de estudo. **Geosynthetics International**, v. 6, n. 1, p. 1-17, 1999.

VANDEN BERG, G. E.; COOPER, A.W.; ERICKSON, A.E.; CARLTON, W.M. Distribuição da pressão no solo sob tráfego de trator e implemento. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.38, p.854-855, 1957.

VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 1ª ed. Edgard Blücher, 428 p. 2004.

YANG, X.; HAN, J.; POKHAREL, S. K.; MANANDHAR, C.; PARSONS, R. L.; Teste pavimento acelerado de estradas não pavimentadas com bases de areia reforçadas com geocélula. **Geotextiles and geomembranes**. 2011.