

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

**Uso de geossintéticos como reforço em estradas não
pavimentadas**

Lorena Alves de Oliveira

Anápolis
2013

USO DE GEOSSINTÉTICOS COMO REFORÇO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

LORENA ALVES DE OLIVEIRA

Orientador: Professor D.Sc. Paulo Márcio Fernandes Viana

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás – UEG, Unidade Universitária 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

Oliveira, Lorena Alves de.

Uso de geossintéticos como reforço em estradas não pavimentadas / Lorena Alves de Oliveira. - 2013.

63 f. il.

Orientadora: Prof. DSc. Paulo Márcio Fernandes Viana.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Goiás. Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas. Mestrado *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, 2013.

Bibliografia.

1. Capacidade de suporte de carga. 2. Trilha de roda. 3. Simulador de tráfego. I. Título.

USO DE GEOSINTÉTICOS COMO REFORÇO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Por

Lorena Alves de Oliveira

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

Aprovada 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

Aos meus pais,
Oswaldo e Márcia, que sempre me
motivaram a sempre seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo o que tens feito e por tudo o que vais fazer em minha vida e através da minha vida. Agradeço a todos que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

À minha querida família; ao meu pai, Osvaldo de Oliveira, pelo exemplo de humildade e honestidade... te amo pai. À minha mãe, Márcia Alves Dutra, pela vida, educação, paciência, orações, amor, conselhos... te amo mãe! Aos meus familiares e amigos que sempre acreditaram em mim e me ajudaram a conquistar mais esta vitória.

Ao meu orientador Paulo Viana por toda a orientação, fico agradecida pela valiosa ajuda em minha pesquisa, foram muitas sugestões e dúvidas esclarecidas.

Aos professores da UEG, em especial ao Elton Fialho, que sempre acreditou em mim, obrigada pelos conselhos, orientações e amizade. A professora Sueli Freitas, Roberta Passini e ao André Campos. Não posso deixar de agradecer aos professores Francisco Assis e ao Daniel Marçal da UFV pelo acolhimento, sugestões e oportunidades.

Aos meus amigos da UEG, em especial ao Ródney Couto, pela ajuda nas coletas das amostras, a Divina pela ajuda integral, coletando amostras, ajudando no laboratório o dia todo, me dando seu ombro amigo nos dias difíceis, ao Vandoir Holtz e o Waldeir Costa pelas ajudas técnicas, a Eliete pela colaboração por parte da Secretaria, obrigada pelo empenho e rapidez colocada em alguns processos, além da amizade.

Aos amigos de Viçosa-MG, em especial ao Anderson Gomes, Lucas e ao Túlio, foi ótimo “sofrer” junto com vocês, coletar amostras em cima de morros, estudos aos finais de semana. Aos amigos, Raphaela Gomes, Antônio Cruvinel, Itallo Lacerda, Flívia Fernandes, Ranielly Sousa, Maria Olivia, João e o Lucas Roberto, por estarem sempre a disposição.

Ao Marcos Vinicius pela ajuda em procurar pontos nas estradas, pelo carinho, paciência e por entender bem essa fase na minha vida.

A UEG pela oportunidade de realização dos cursos de graduação em Engenharia Agrícola e mestrado em Engenharia Agrícola, e a UFV por me acolher no mestrado sanduiche. Ao PROCAD e a CAPES pela concessão da bolsa de estudos. Ao LTEC – Laboratório Técnico e Engenharia Ltda pelo suporte laboratorial em alguns ensaios e apoio nesta pesquisa.

Muito Obrigada a todos!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Problemas encontrados em estradas não pavimentadas	2
2.2. Geossintéticos	4
2.2.1. Classificação dos geossintéticos	5
2.2.2. Aplicações dos geossintéticos	7
2.3. Uso de geossintéticos como reforço em estradas	8
2.4. Pressão de contato	10
2.5. Simulador de tráfego	11
2.6. Recalque	12
2.7. Razão de Benefício de Tráfego – RBT	12
3. MATERIAL E MÉTODO	14
3.1. Representação da pior situação da via em laboratório	14
3.2. Seleção da área	15
3.3. Coleta das amostras deformadas	16
3.4. Caracterização física e mecânica do solo	17
3.5. Bulbo de tensão	17
3.6. Características dos reforços utilizados nos ensaios	18
3.7. Profundidade de instalação do geossintético	19
3.8. Área de contato do pneu do simulador de tráfego com o solo	20
3.9. Pressão aplicada ao solo	22
3.10. Moldagem de amostras com e sem geossintético	22
3.11. Experimento com simulador de tráfego em condição laboratorial	23
3.11.1. Sistema de leitura dos recalques do solo nas amostras	23
3.11.2. Sistema de leitura dos recalques do solo nas amostras	24
3.12. Estudo analítico de cálculo aplicado ao problema	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. Ensaios de caracterização	27
4.2. Distribuições das tensões no solo	29
4.3. Profundidade de instalação do geossintético	30
4.4. Ensaio de CBR	31
4.5. Avaliação do recalque no simulador de tráfego	33
4.6. Estudo analítico de cálculo	41
5. CONCLUSÕES	44
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
ANEXO	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Classificação dos Geossintéticos (adaptado de BATHURST, 2011).....	5
TABELA 2 - Aplicações dos Geossintéticos (adaptado de BATHURST, 2011).	7
TABELA 3 - Valores de CBR para cada trecho analisado.....	17
TABELA 4 - Características dos geossintéticos utilizados na pesquisa.	18
TABELA 5 - Porcentagens das frações de solos dos trechos estudados.....	28
TABELA 6 - Porcentagens de solo que passam nas peneiras... ..	28
TABELA 7 - Classificação TRB das amostras dos trechos 1, 2 e 3.....	28
TABELA 8 - Caracterização física e mecânica dos solos.....	29
TABELA 9 - Resumo da análise de variância da variável CBR, com subleito saturado.	30
TABELA 10 - Resumo da análise de variância da variável CBR.	31
TABELA 11 - Razão de benefício de tráfego para o geotêxtil não tecido.....	34
TABELA 12 - Razão de benefício de tráfego (RBT) para o geotêxtil tecido.	35
TABELA 13 - Razão de benefício de tráfego para o geotêxtil não tecido.....	36
TABELA 14 - Razão de benefício de tráfego para o geotêxtil tecido.....	37
TABELA 15 - Razão de benefício de tráfego para a geogrelha.....	38
TABELA 16 - Razão de benefício de tráfego para o geotêxtil tecido.....	39
TABELA 17 - Razão de benefício de tráfego para o geotêxtil não tecido.....	40
TABELA 18 - Razão de benefício de tráfego para a geogrelha.....	41
TABELA 19 - Módulo de deformabilidade – D (kPa) estimado.. ..	43
TABELA 20 - Tensão estimada (kPa).....	43

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Problemas encontrados nas estradas brasileiras em 2013: a) Município de Bom Jesus-Piauí; b) Formoso do Rio Preto-Bahia; e c) Formoso do Rio Preto- Bahia (GLOBO RURAL, 2013).	2
FIGURA 2. Mecanismos potenciais de reforço: a) restrição da movimentação lateral do solo de aterro; b) aumento da capacidade de carga produzido pelo geossintético; e c) efeito membrana no geossintético (modificado – PERKINS E ISMEIK, 1997)	9
FIGURA 3. Seção típica de uma estrada com afundamento (trilha-de-roda)	12
FIGURA 4. Problema encontrado em muitas estradas (Transamazônica região de Novo Repartimento – PA).	14
FIGURA 5. a) ponto crítico (costelas de vaca); e b) retirada da amostra indeformada.	15
FIGURA 6. Pontos onde foram coletadas as amostras para realização do trabalho.	16
FIGURA 7. Geossintéticos utilizados: a) geotêxtil não tecido; b) geotêxtil tecido; e c) geogrelha tecida.	18
FIGURA 8. a) cilindro CBR com marcação das alturas; b) subleito saturado com aplicação do reforço; e c) prensa CBR com a amostra pronta.	19
FIGURA 9. a) cilindro CBR com marcação das alturas; b) subleito saturado com aplicação do reforço; e c) prensa CBR com a amostra pronta.....	20
FIGURA 10. Determinação da área de contato do pneu do simulador por meio do software AutoCad 2007	21
FIGURA 11. Gráfico de calibração da célula de carga.	22
FIGURA 12. Esquema de utilização dos reforços nas amostras moldadas em laboratório.	23
FIGURA 13. Vistas do simulador linear de tráfego: a) frontal; e b) lateral direita.....	24
FIGURA 14. Fotografias mostrando o perfil do solo: a) antes; e b) após o tráfego.	25
FIGURA 15. Curva granulométrica do solo para os diferentes pontos das estradas.....	27
FIGURA 16. Bulbo de tensão obtido para carregamentos exercidos pelo pneu do simulador na superfície do solo.	29
FIGURA 17. Valores médios de CBR para o subleito saturado. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 5\%$).....	30

FIGURA 18. Valores médios de CBR para o subleito saturado, na altura 6 cm.....	31
FIGURA 19. Gráfico de deslocamento em função da força para o solo do trecho 1	32
FIGURA 20. Gráfico de deslocamento em função da força para o solo do trecho 2	32
FIGURA 21. Gráfico de deslocamento em função da força para o solo do trecho 3	32
FIGURA 22. Recalque em função do número de passadas para a estrada 1 sem geossintético (SG) e com geotêxtil não tecido (GNT).....	33
FIGURA 23. Recalque em função do número de passadas para a estrada 1 sem geossintético (SG) e com geotêxtil tecido (GT).	34
FIGURA 24. Recalque em função do número de passadas para a estrada 1 sem geossintético (SG) e com geogrelha (GG).	35
FIGURA 25. Recalque em função do número de passadas, ponto 2 Recalque em função do número de passadas para a estrada 2 sem geossintético (SG) e com geotêxtil não tecido (GNT).	36
FIGURA 26. Recalque em função do número de passadas para a estrada 2 sem geossintético (SG) e com geotêxtil tecido (GT).	37
FIGURA 27. Recalque em função do número de passadas para a estrada 2 sem geossintético (SG) e com geogrelha (GG).	38
FIGURA 28. Recalque em função do número de passadas para a estrada 3 sem geossintético (SG) e com geotêxtil tecido (GT)	39
FIGURA 29. Recalque em função do número de passadas para a estrada 3 sem geossintético (SG) e com geotêxtil não tecido (GNT).	40
FIGURA 30. Recalque em função do número de passadas para a estrada 3 sem geossintético (SG) e com geogrelha (GG)	41
FIGURA 31. Recalque em função do número de passadas, sem geossintético	42
FIGURA 32. Recalque em função do número de passadas, com geotêxtil não tecido	42
FIGURA 33. Recalque em função do número de passadas, com geotêxtil tecido	42
FIGURA 34. Recalque em função do número de passadas, com geogrelha	42

USO DE GEOSSINTÉTICOS COMO REFORÇO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

RESUMO

O Brasil enfrenta grandes problemas para o escoamento dos seus produtos, o que acaba contribuindo para o desperdício e aumento de custos sobre o produto final. 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, pois sua execução é rápida e o seu custo é baixo. Muitas estradas não pavimentadas atravessam locais onde o solo apresenta baixa capacidade de suporte de carga, o que pode ocasionar deformações superficiais excessivas e em períodos chuvosos favorece a formação de atoleiros deixando muitas vezes a via intrafegável. Nesse contexto, realizou-se um estudo com o objetivo de avaliar o uso de diferentes geossintéticos aplicados como reforço em solos de três estradas não pavimentadas e verificar as razões de benefício que a inclusão do mesmo oferece. Foram selecionadas três estradas não pavimentadas que apresentassem um trecho com baixa capacidade de suporte de carga. Retiraram-se amostras de solos de cada trecho e levou para o laboratório. Foi realizado o estudo para determinar a profundidade de instalação do geossintético analisando a capacidade de suporte de carga (CBR) do sistema (subleito saturado-reforço-base) por meio de um delineamento em blocos com esquema fatorial 4x3, sendo 4 tipos de geossintético (GT, GNT, GG e SG) e 3 profundidades de instalação do geossintético (0,09 m, 0,06 m e 0,03 m) com duas repetições. Encontrada a profundidade ideal moldou-se as amostras com subleito próximo a umidade de saturação e utilizou um simulador de tráfego de laboratório para simular o tráfego na via, mediu-se o recalque por meio de fotografia para 2, 8, 20, 36, 60 e 100 passadas nas situações com e sem reforço. Realizou-se o estudo de regressão e a partir das equações ajustadas calculou-se o número de passadas para um mesmo valor de recalque permitindo o cálculo da razão de benefício de tráfego fornecida pela inclusão do reforço. Com o estudo pode-se concluir que o presente trabalho mostra a viabilidade técnica do uso do simulador de tráfego para reproduzir a situação real considerando o efeito escala. O melhor resultado foi obtido para o solo da estrada 3 com o geotêxtil tecido e o não tecido, alcançando razões de benefício de tráfego - RBT média de 2,71 e 2,23, respectivamente, enquanto que para as outras situações foi em média RBT = 1,43. O ensaio de CBR não se apresentou efetivo para simular o efeito da inclusão do reforço, nas condições avaliadas, pois o CBR não apresenta condições de ancorar o geossintético, por isso ele não é indicado para testar o uso de reforços em solos. Foi verificado que o reforço é mais efetivo para grandes deslocamentos do aterro, portanto para vias com baixo fluxo de veículo (pequena trafegabilidade) e pequenas deformações a efetividade do reforço é menor. E as deformações vão diminuindo com o aumento de passadas.

Palavras-Chave: capacidade de suporte de carga, trilha de roda, simulador de tráfego.

GEOSYNTHETICS USE AS REINFORCEMENT IN UNPAVED ROADS

ABSTRACT

Brazil faces serious problems for the marketing of your products, which ultimately contributing to waste and increase costs on the final product. The main routes for the flow of Brazilian agricultural production are the roads. However, observes that great extension of the road network is composed of unpaved roads, because its implementation is fast and its cost is low. Many unpaved roads crossing places where the soil has a low bearing capacity load, which can cause excessive surface deformations and rainy periods are formed puddles often leaving the road impassable. In this context, a study conducted with the objective to find a solution quickly and effectively when the subgrade is fully saturated. Were selected three points on unpaved roads to submit low load-bearing capacity. Withdrew soil samples from each point and led to the laboratory. The study was conducted to determine the depth of installation of the geosynthetic analyzing the load-bearing capacity (CBR) of the system (saturated subgrade-reinforcing base) by was in randomized blocks with a 4x3 factorial, with four types of geosynthetic (GT, GNT, GG and SG) and 3 of geosynthetic installation depths (0.09 m, 0.06 m e 0.03 m) with two replicates. With the ideal depth molded samples with saturated subgrade and traffic simulator utilized a laboratory to simulate the road traffic, permanent deformation (rutting) was measured by means of photography for 2, 8, 20, 36, 60 and 100 in the past situations with and without reinforcement. Conducted the study through regression equations and set the has calculated number of passes for the same amount of permanent deformation permitting calculation of the traffic benefit ratio provided by the inclusion of the reinforcement. With the study concludes that the present work shows the technical feasibility of using traffic simulator to reproduce the actual situation considering the scale effect. The best result was obtained to road three, reaching the reasons benefit of traffic - TBR average of 2.71 for the geotextile woven and 2.23 for the geotextile non-woven geotextile, while for other situations averaged TBR = 1.43. The CBR test is not performed effectively to simulate the effect of including strengthening the conditions evaluated, because the CBR does not have conditions to anchor the geosynthetic, so it is not suitable to test the use of reinforcements in soils. It was found that reinforcement is more effective for large displacements of the embankment thus to roads with low flow of vehicle (small trafficability) and small deformations the effectiveness of reinforcement is lower. And the deformations are decreasing with increasing past.

Keywords: load bearing capacity, permanent deformation, traffic simulator.

1. INTRODUÇÃO

A malha viária, representada pelas rodovias e estradas pavimentadas e não-pavimentadas, é de vital importância para o Brasil. Em especial, as estradas não pavimentadas são responsáveis pelo acesso da população rural aos serviços urbanos, além de escoar grande parte da produção agrícola. Sem uma adequada manutenção, o processo de deterioração provoca imensuráveis prejuízos, aumentando os custos operacionais dos veículos, promovendo significativo acréscimo no número de acidentes e prejudicando o desenvolvimento da região por ela servida. Porém, registros existentes indicam que grandes partes dessas estradas se encontram em estado precário, necessitando de serviços de manutenção.

O dimensionamento, construção e serviços de manutenções periódicas devem ser realizados de forma a permitir um adequado funcionamento das estradas não pavimentadas durante sua vida útil. Varias estradas são construídas em locais onde o solo apresenta baixa capacidade de suporte de carga o que geralmente ocasionam deformações superficiais excessivas o que aumenta ainda mais a necessidade de manutenção.

Devido limitações na utilização e/ou custos de materiais de qualidade tem se tornado significativo o aumento do emprego de novos materiais ou materiais alternativos para melhorar a capacidade de suporte de carga da via. Nesse contexto, os geossintéticos que são materiais aplicáveis a praticamente todas as obras geotécnicas, 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 (devido ao efeito membrana), reduzem a altura de aterro necessária e aumentam a vida útil da estrada.

O trabalho teve como objetivos específicos: a) avaliar o uso de diferentes geossintéticos aplicados como reforço em solos de três estradas não pavimentadas e verificar as razões de benefício que a inclusão do mesmo oferece; b) avaliar a viabilidade técnica do uso de um simulador de tráfego; c) comparar o uso de diferentes tipos de geossintéticos como reforço; d) avaliar o recalque da via (trilhas de roda); e e) saber a razão de benefício de tráfego para cada situação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Problemas encontrados em estradas não pavimentadas

O Brasil enfrenta grandes problemas para o escoamento dos seus produtos, o que acaba contribuindo para o desperdício e aumento de encargos sobre o produto final. 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).

Segundo o Boletim Estatístico, o Brasil tem 1.580.964,00 km de rodovias. Apesar da grande extensão de rodovias no Brasil, a distribuição entre rodovias pavimentadas e não pavimentadas é desigual. Apenas 13,45% das rodovias brasileiras são pavimentadas, o que equivale a 212.738,00 km (CNT, 2011).

Os produtores das novas fronteiras agrícolas (Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia) consideram que o grande gargalo do escoamento da produção são as estradas em péssimas condições de trafegabilidade. Neste contexto, os custos com combustível, manutenção do veículo e com usuário são enormes o que, em muitos casos, inviabilizam o escoamento. Como exemplo, pôde-se verificar que o custo com transporte na safra de 2013 aumentou em 30% com relação ao ano de 2012 (GLOBO RURAL, 2013).



FIGURA 1. Problemas encontrados nas estradas brasileiras em 2013: a) Município de Bom Jesus-Piauí; b) Formoso do Rio Preto-Bahia; e c) Formoso do Rio Preto- Bahia (GLOBO RURAL, 2013).

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.

As estradas não pavimentadas, conhecidas também como “estradas de terra”, geralmente são localizadas no meio rural, sem qualquer tratamento superficial com asfalto ou com cimento Portland, com sua camada superficial constituída de solo local ou de outra região misturados ou não com agregados granulares decorrentes de manutenções (EATON et al., 1987a).

De acordo com Dobson e Postill (1983), normalmente as estradas não pavimentadas são caracterizadas por um volume baixo de tráfego diário, variando de 0 a 400 veículos. Suas larguras variam com a necessidade imposta pelo tráfego. O intervalo entre as manutenções das estradas não pavimentadas são menores que os das vias pavimentadas.

Varias dessas estradas originaram-se de caminhos ou de pequenas trilhas utilizados pelos primeiros grupos de pessoas da região. Às vezes o traçado da estrada atravessa solos de baixa capacidade de suporte de carga (solo mole), sendo necessários aterros leves, substituição ou remoção parcial desse solo ou estabilização com rachão e pedras britadas, além de outras soluções que na maioria das vezes são caras, de difícil e lenta execução (BAESSO e GONÇAVES, 2003).

Por estradas serem obras lineares, às vezes para alcançar um nível satisfatório de resistência com o uso de materiais granulares, é necessário um volume significativo de material. Para diminuir a quantidade de material tem surgido o uso de geossintéticos na interface aterro-subleito para aumento da capacidade de suporte de carga, resultando na redução da altura do aterro ou, para uma mesma altura de aterro, a diminuição da trilha de roda (MACCAFERRI, 2009).

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. Estes fatores influenciam diretamente no aparecimento de defeitos com grau de severidade maiores ou menores no leito das vias, o que acarreta problemas que comumente, quando não reduzem a velocidade de tráfego, são responsáveis pela interrupção da via (NUNES, 2003).

Vários usuários, dessas estradas, acreditam que a única solução seria a pavimentação da via, porém o custo de tal solução é elevado, além do tempo construtivo ser maior. Por causa das limitações na utilização e/ou no custo de materiais de qualidade tem se tornado significativo o aumento do emprego de novos materiais ou materiais alternativos nesse tipo de obra.

2.2. Geossintéticos

Desde 1970 os geossintéticos têm sido utilizados para estabilização do subleito e reforço de aterros para a construção de estradas não pavimentadas. Normalmente, este material é colocado entre a camada de aterro (base) e o subleito. Com a presença de geossintético o solo consegue suportar maiores cargas e maior intensidade de tráfego. Além disso, a capacidade de reforço do geossintético pode viabilizar a utilização de material de aterro de menor qualidade, o que implica em redução de custos e benefícios ambientais (GÓNGORA, 2011). Vários autores vêm estudando o emprego de geossintéticos em estradas não pavimentadas nas últimas décadas, como: Palmeira (1980), Love et al. (1987), Cunha (1991), Hufenus et al. (2006), Zhou e Wen (2008), Basu et al. (2009), Subaida et al. (2009), Bhandari e Han (2010) e Gongorá (2011).

Segundo a NBR 12553 (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”. Segundo Koerner (2005) 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.

Os geossintéticos mais empregados como materiais de reforço do solo são as geogrelhas e os geotêxteis tecidos e não tecidos (PIMENTEL, 2007).

Os geotêxteis são definidos como um produto têxtil permeável, tendo cinco funções básicas (drenagem, filtração, proteção, reforço e separação) podendo ser de dois tipos: geotêxteis tecidos e geotêxteis não tecidos. Essa classificação é feita de acordo com sua estrutura e técnica de manufatura, onde o primeiro é um produto composto por filamentos contínuos e o segundo é obtido do entrelaçamento dos fios, NBR 12553 (ABNT, 2003).

As geogrelhas 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, NBR 12553 (ABNT, 2003).

2.2.1 Classificação dos Geossintéticos

Os geossintéticos podem ser classificados genericamente em categorias dependendo do processo de fabricação. As denominações usuais e breves descrições dos geossintéticos estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos Geossintéticos (adaptado de BATHURST, 2013).

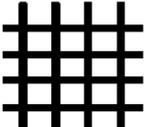
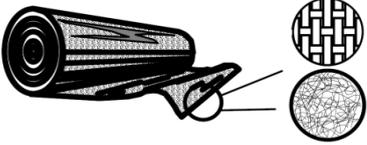
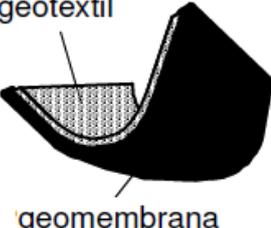
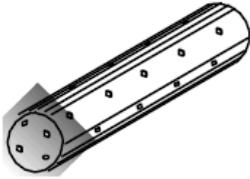
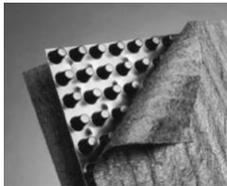
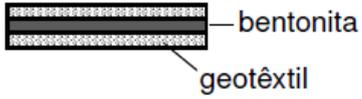
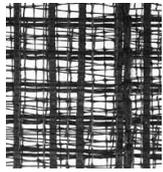
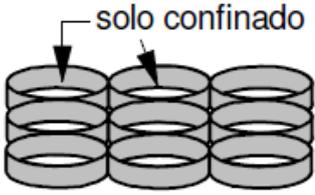
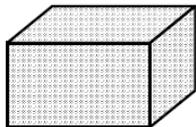
<p>Geogrelhas (GG) são materiais geossintéticos com forma de grelha. A principal aplicação das geogrelhas é em reforço de solos. Estas podem ser extrudada, soldada ou tecidas.</p>	
<p>Geotêxteis (GT) são mantas contínuas de fibras ou filamentos, tecidos, não tecidos, tricotados ou costurados. As mantas são flexíveis e permeáveis. Geotêxteis são usados para aplicações de separação, proteção, filtração, drenagem, reforço e controle de erosões.</p>	
<p>Georredes (GN) são materiais com aparência semelhante à das grelhas formados por duas séries de membros extrudados paralelos, que se interceptam em ângulo constante. Possui alta porosidade ao longo do plano, sendo usada para conduzir elevadas vazões de fluidos ou gases.</p>	
<p>Geomembranas (GM) são mantas contínuas e flexíveis constituídas de um ou mais materiais sintéticos. Elas possuem baixíssima permeabilidade e são usadas como barreiras para fluidos, gases ou vapores.</p>	
<p>Geocompostos (GC) são geossintéticos formados pela associação de dois ou mais tipos de geossintéticos como, por exemplo: geotêxtil-georrede; geotêxtil-geogrelha; georrede-geomembrana. Geocompostos drenantes pré-fabricados ou geodrenos são constituídos por um núcleo plástico drenante envolto por um filtro geotêxtil.</p>	

Tabela 1. (Continuação).

<p>Geotubos (GP) são tubos poliméricos perfurados ou não usados para drenagem de líquidos ou gases (incluindo coleta de chorume ou gases em aplicações de aterros sanitários). Em alguns casos o tubo perfurado é envolvido por um filtro geotêxtil.</p>	
<p>Geoespaçadores (GS) são geossintéticos com estrutura tridimensional que apresenta grande volume de vazios, com função drenante.</p>	
<p>Geocompostos argilosos (GCL's) são geocompostos fabricados com uma camada de bentonita geralmente incorporada entre geotêxteis de topo e base ou ligadas à uma geomembrana ou à uma única manta de geotêxtil. Os geotêxteis que compõem os GCLs geralmente são costurados ou agulhados através do núcleo argiloso para aumentar a resistência interna do produto ao cisalhamento. Quando hidratados eles atuam efetivamente como barreira para líquido ou gás e são comumente usados em aterros sanitários em conjunto com geomembranas.</p>	
<p>Geomantas (GA) são geossintéticos com estrutura tridimensional permeável, usado para controle de erosão do solo. Também conhecido como biomanta, quando biodegradável.</p>	
<p>Geocélulas (GL) são arranjos tridimensionais relativamente espessos, constituídos por tiras poliméricas. As tiras são soldadas para formar células interconectadas que são preenchidas com solo e, às vezes, concreto. Em alguns casos, faixas de 0,5 a 1m de largura de geogrelhas podem ser ligadas por hastes poliméricas verticais para se formar geocélulas mais espessas, também denominadas “geocolchão”.</p>	
<p>Geoexpandidos (GE) são blocos ou placas produzidos por meio da expansão de espuma de poliestireno para formar uma estrutura de baixa densidade. O geoexpandido é usado para isolamento térmico, como um material leve em substituição a aterros de solo ou como uma camada vertical compressível para reduzir pressões de solo sobre aterros rígidos.</p>	

2.2.2 Aplicações dos Geossintéticos

É conveniente identificar a aplicação primária dos geossintéticos, onde se destacam as seguintes: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial. Em alguns casos, o geossintético poderá desempenhar dupla função. A Tabela 2 apresenta as principais aplicações dos geossintéticos.

Tabela 2. Aplicações dos Geossintéticos (adaptado de BATHURST, 2013).

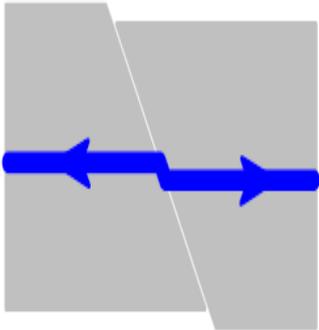
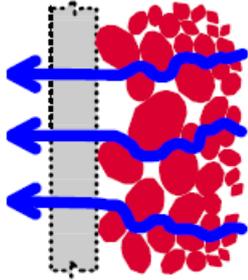
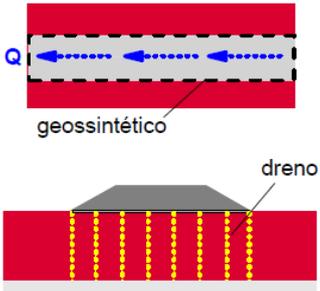
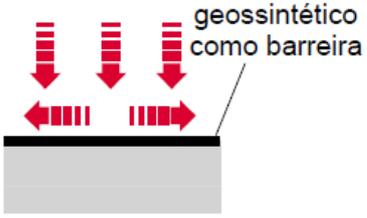
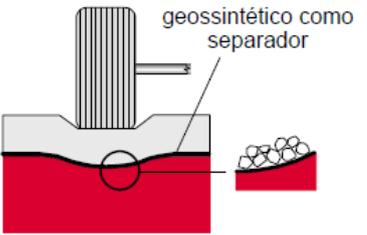
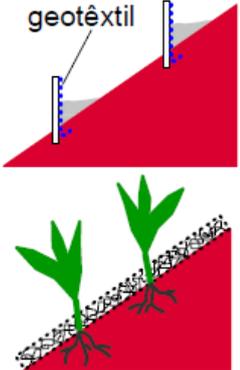
<p>Reforço: O geossintético atua como elemento de reforço inserido no solo ou em associação com o solo para a melhoria das propriedades de resistência e de deformabilidade do solo natural. Por exemplo, geotêxteis e geogrelhas são usados para restringir as deformações de expansão na massa de solo de forma a possibilitar paredes de solo reforçado verticais ou aproximadamente verticais. O emprego do reforço possibilita a construção de aterros sobre fundações de solos extremamente moles, bem como a de aterros íngremes improváveis de serem viabilizados em solos não-reforçados. Geossintéticos (geralmente geogrelhas) têm sido também usados para sobre passar vazios que podem se desenvolver sob carregamentos em camadas granulares (estradas e auto-estradas) ou sob sistemas de cobertura de aterros sanitários.</p>	
<p>Filtração: O geossintético desempenha papel similar a um filtro de areia, permitindo a livre passagem de água através do solo enquanto retém as partículas sólidas. Por exemplo, geotêxteis são empregados para evitar a migração do solo para dentro do agregado drenante ou de tubulações, enquanto mantém o fluxo do sistema. Geotêxteis são também utilizados abaixo de “rip-rap” e de outros materiais em sistemas de proteção costeira e de rios para prevenir a erosão do solo.</p>	
<p>Drenagem: O geossintético age como um dreno que conduz os líquidos. Por exemplo, geotêxteis são utilizados para dissipar poro-pressão na base de aterros rodoviários. Para fluxos mais elevados, drenos geocompostos foram desenvolvidos. Esses materiais têm sido utilizados como drenos laterais de estradas, drenos de taludes e drenos de aterros e aterros de contenção. Drenos verticais pré-fabricados (DVP's) têm sido utilizados para acelerar a consolidação do solo argiloso mole de fundações de aterros.</p>	

Tabela 2. (Continuação).

<p>Proteção: O geossintético pode reduzir solicitações localizadas, homogeneizando o nível das tensões que atingiriam determinada superfície ou camada. Pode ser utilizados como proteção, por exemplo, dutos para evitar a perfuração.</p>	 <p>geossintético como barreira</p>
<p>Separação: O geossintético atua na separação de duas camadas de solo que têm distribuições de partículas diferentes. Por exemplo, geotêxteis são usados para evitar que os materiais da base penetrem no solo arenoso fofo de camadas subjacentes, assim mantendo a espessura da camada de projeto e a integridade da estrada. O geossintético também auxilia na prevenção do “bombeamento” de finos para o interior da camada granular permeável das estradas.</p>	 <p>geossintético como separador</p>
<p>Impermeabilização: O geossintético atua como uma barreira relativamente impermeável a fluídos e gases. Por exemplo, geomembranas, geocompostos, geocompostos argilosos (GCL's) e geotêxteis revestidos são empregados como barreiras para impedir o escoamento de líquidos e gases.</p>	
<p>Controle de Erosão Superficial: O geossintético trabalha para reduzir os efeitos da erosão do solo causados pelo impacto da chuva e pelo escoamento superficial da água. Por exemplo, mantas ou colchões de geossintéticos, temporários e permanentes, são dispostos ao longo do talude. Barreiras de geotêxtil são também usadas na retenção de sedimentos carregados durante o escoamento superficial. Algumas barreiras de controle de processos erosivos são fabricadas com materiais biodegradáveis.</p>	 <p>geotêxtil</p>

2.3. Uso dos geossintéticos como reforço em estradas

Segundo Perkins e Ismeik (1997), quando os geossintéticos são utilizados como reforço, normalmente apresentam três mecanismos potenciais de reforço, os quais podem ser identificados como restrição á movimentação lateral do solo, aumento da capacidade de carga e efeito membrana (Figura 2).

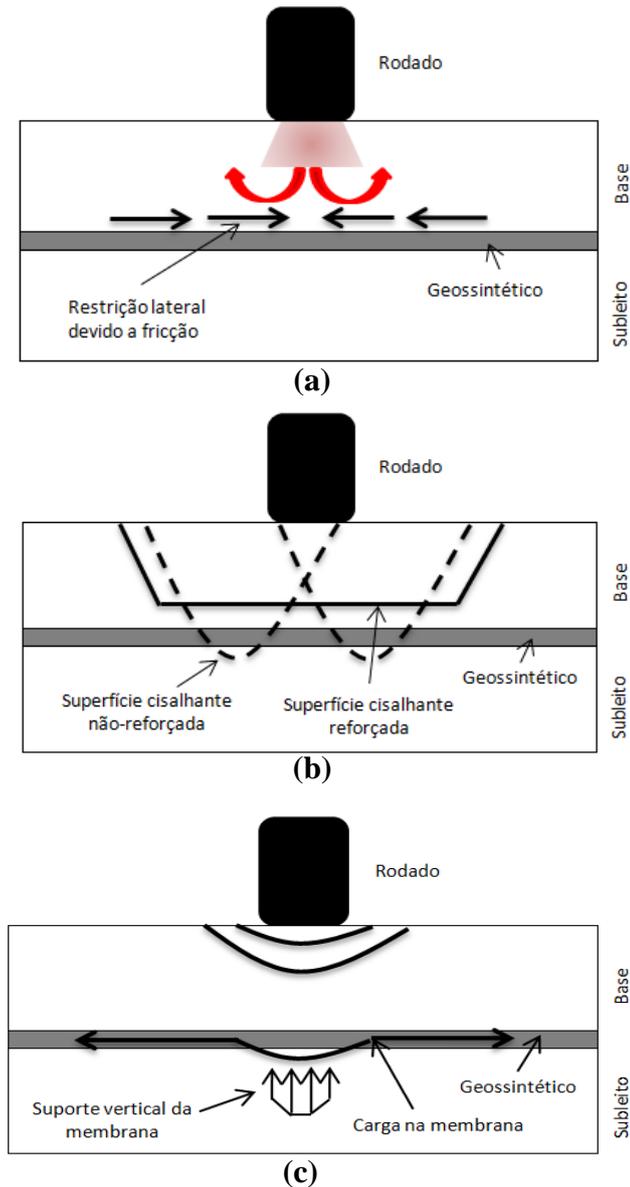


FIGURA 2. Mecanismos potenciais de reforço: a) restrição da movimentação lateral do solo de aterro; b) aumento da capacidade de carga produzido pelo geossintético; e c) efeito membrana no geossintético (modificado – PERKINS E ISMEIK, 1997)

A restrição lateral é causada pela interação por atrito e intertravamento entre o solo de aterro (base) 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 maior capacidade de carga do solo provocada pela presença do geossintético acontece devida à redução das tensões cisalhantes instabilizadoras transmitidas ao subleito. Isso é particularmente relevante para subleitos com baixa capacidade de suporte.

O terceiro mecanismo de reforço fundamental tem sido chamado de “Efeito Membrana”. O “Efeito Membrana” é baseado no conceito de um aumento das tensões

verticais resultante de cargas desenvolvidas em uma membrana deformada. A ação combinada dos esforços de tração no reforço e 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.

A intensidade do efeito membrana é função da rigidez e da deformação do geossintético e da profundidade das trilhas de roda. Este tipo de solicitação é mais relevante apenas para altos valores de profundidade da trilha de rodas. Jeweel (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. Para Giroud et. al (1984), o efeito membrana é desprezível para trilhas de roda com profundidades menores que 75mm e contribui com apenas 10% na melhoria do sistema para um deslocamento vertical de 150 mm.

Nesse contexto, os geossintéticos podem ser utilizados como reforço, uma vez que contribuem para o aumento da capacidade de suporte de carga da estrada, distribuem melhor as tensões para o subleito e reduzem a altura necessária de aterro da estrada.

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. Contudo, a padronização de equipamentos e procedimentos de ensaio utilizados na avaliação da interação solo/geossintético é de extrema importância em termos práticos e também para um melhor entendimento da interação solo-geossintético.

2.4. Pressão de contato

A pressão exercida na superfície é igual ao peso total aplicado dividido pela área de contato entre o solo e o pneu. Cada tipo de rodado aplica uma dada carga de modo particular e com pressão de contato característica. Esta carga pode ser distribuída de diversas formas na superfície, como pneus simples estreitos, pneus duplos, pneus largos de baixa pressão e esteiras.

A fórmula abaixo pode ser utilizada, segundo Wasterlund (1994), para fazer comparações entre diferentes configurações de pneus e analisar o potencial de dano que um

determinado equipamento possa trazer ao solo. A pressão de contato é a carga distribuída sobre a área de contato solo/pneu e a área de contato em função das dimensões do rodado.

$$P_c = \frac{W}{A} \quad (1)$$

Em que:

P_c = pressão de contato (kPa);

W = peso por roda (N);

A = área de contato (m^2)

Ainda segundo o autor, pneus mais largos têm como vantagem melhor distribuição das forças aplicadas ao solo, reduzindo a pressão por área e aumentando a capacidade de tração e de transpor obstáculos.

2.5. Simulador de tráfego

No período de 1968 a 1970, o Laboratoire Central des Ponts et Chaussées da França desenvolveu um equipamento para auxiliar no estudo do comportamento mecânico das misturas asfálticas, denominado de l'orniéreur type LPC ou, como é conhecido na literatura brasileira, simulador de tráfego. Este equipamento tem por objetivo estudar o comportamento das misturas asfálticas, quando submetidas a um número elevado de ciclos de uma roda afundamento na trilha-de-roda solevamento passando sobre um trecho definido de uma placa com material a ser ensaiado previamente compactado (GRIMAUX e HIERNAUX, 1977).

Os simuladores de tráfego de laboratório (também podendo ser denominados como simuladores de pequeno porte) desempenham papel complementar aqueles das pistas experimentais. São ensaios acelerados, capazes de estimar em poucas horas o comportamento de uma mistura de concreto asfáltico ao longo de sua vida de serviço.

Os simuladores de laboratório normalmente avaliam apenas a camada de revestimentos e são empregados principalmente para a avaliação das estradas quanto à contribuição do revestimento para as deformações permanentes (afundamento de trilha de roda).

2.6. Recalque

A deformação permanente na trilha de roda, de acordo com Yoder e Witzak (1975) pode ser definida como uma distorção na superfície da estrada causada pela consolidação de uma ou mais camadas da estrada. A norma americana ASTM D 5340 (1997) define esse defeito como uma depressão superficial na trilha de roda, podendo ocorrer o levantamento das bordas ao longo da trilha, e complementa que um aumento excessivo da deformação permanente pode provocar a ruptura da estrutura da estrada.

Na Figura 3, observa-se um esquema de seção típica de uma estrada com deformação permanente ou afundamento na trilha-de-roda.

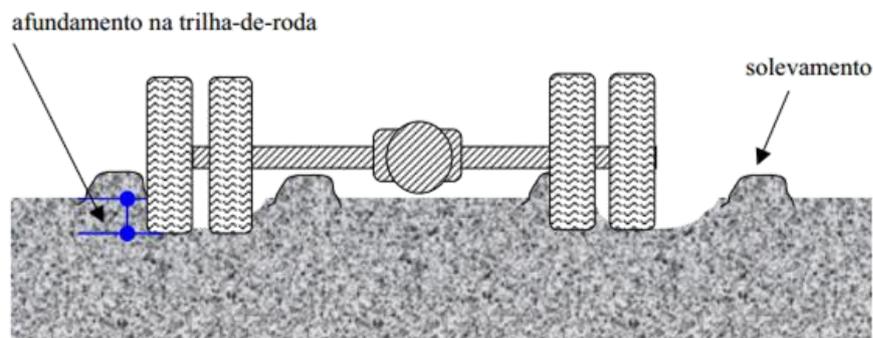


FIGURA 3. Seção típica de uma estrada com afundamento (trilha-de-roda).

Eaton et al. (1987b) e RSMS (1991) na avaliação das estradas não pavimentadas classificam a qualidade da estrada de acordo com os seguintes níveis de severidade e extensão das trilhas de rodas:

Baixa: sulcos com profundidade menor que 2,5 cm (severidade baixa) e menos que 10% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos;

Média: sulcos com profundidade entre 2,5 e 7,5 cm (severidade média) e entre 10% e 30% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos;

Alta: sulcos com profundidade maior que 7,5 cm (severidade alta) e mais que 30% da área total da superfície da estrada coberta por afundamentos.

2.7. Razão de Benefício de Tráfego – RBT

Han et al. (2011) relatam que “em quase todos os experimentos, o principal indicador que quantifica a melhoria do desempenho da estrada por inclusão do geossintético é a razão de benefício de tráfego [...]”, definida pela Equação 2:

$$RBT = \frac{N_{geo}}{N} \quad (2)$$

Em que:

N_{geo} = número de repetições do eixo padrão que produz determinada trilha de roda na estrada com geossintético;

N = número de repetições do eixo padrão que produz o mesmo afundamento de roda na estrada sem o geossintético.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Representação da pior situação da via em laboratório

Na Figura 4 pode-se visualizar uma estrada com baixa capacidade de suporte de carga, que em períodos chuvosos a via fica praticamente intransitável, este problema é muito comum nas estradas não pavimentadas do Brasil.



FIGURA 4. Problema encontrado em muitas estradas (Transamazônica região de Novo Repartimento – PA).

No intuito de encontrar uma solução rápida e eficaz para esse problema reproduziu-se em laboratório a situação mais crítica supracitada para representar o subleito da via. Com isso objetivou avaliar o uso de diferentes geossintéticos aplicados como reforço em solos de três estradas não pavimentadas e verificar as razões de benefício que a inclusão do mesmo oferece.

Primeiramente selecionaram-se no município de Anápolis-GO três trechos de estradas que apresentassem tráfego considerável, solos com baixa capacidade de suporte de carga e características granulométricas diferentes.

Após seleção dos trechos das estradas foram coletadas amostras indeformadas de solo e as mesmas foram levadas ao laboratório de solos, realizaram-se ensaios de caracterização física e mecânica dos solos e com o intuito avaliar o uso de diferentes geossintéticos aplicados como reforços foram realizados ensaios na prensa CBR, no simulador de tráfego de laboratório e com os resultados foram calculadas as razões de benefício de tráfego.

3.2. Seleção da área

Em Anápolis predomina o clima tropical com estação seca, do tipo Aw conforme classificação climática de Köppen-Geiger, com chuvas concentradas no verão (outubro-abril) e estação seca no inverno (maio-setembro). Precipitação anual pluviométrica em torno de 1450 mm, com maior concentração de novembro a março. Temperatura média anual de 22°C com variação de 5° em média ao longo do ano.

Primeiro foi realizada uma avaliação subjetiva, que selecionou os pontos críticos por meio da sensação de conforto e suavidade ao trafegar pela via. As estradas foram percorridas na velocidade de aproximadamente 40 km/h e de dentro do veículo (DNIT, 2003), quando verificado baixa sensação de conforto identificava-se as coordenadas desse ponto por meio de GPS e retirava-se uma amostra indeformada do solo.

A amostra indeformada foi retirada da estrada (Figura 5) de forma a evitar o local de trilha de roda, sendo utilizado um amostrador de formato cilíndrico, o próprio cilindro usado para realizar o ensaio Índice de Suporte Califórnia (California Bearing Ratio – CBR) e foi levada para o laboratório onde se realizou o ensaio de ISC ou CBR segundo a norma NBR 9895 (ABNT, 1987).

No ensaio de CBR foi medida a resistência à penetração de um pistão em uma amostra saturada compactada segundo método de Proctor. Para essa finalidade, um pistão com seção transversal de 3 pol² penetrou a amostra a uma velocidade de 0,05 pol/min. O valor de resistência a penetração foi obtida em porcentagem, sendo que 100% é o valor correspondente a penetração em uma amostra de brita graduada de elevada qualidade que foi adotada como padrão de referência.



FIGURA 5. a) ponto crítico (costelas de vaca); e b) retirada da amostra indeformada.

Na Figura 6 está à localização dos trechos das estradas que apresentaram CBR menor que 10%, ou seja, os trechos que foram estudados em laboratório.



FIGURA 6. Pontos onde foram coletadas as amostras para realização do trabalho.

As avaliações foram realizadas na Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas, da Universidade Estadual de Goiás, Campus Henrique Santillo, localizado no município de Anápolis - GO.

3.3. Coleta das amostras deformadas

Depois de realizado os ensaios de CBR e comprovado que a capacidade de suporte de carga do ponto foi abaixo de 10%, como pode ser vista na Tabela 3, retornaram-se aos pontos e retiraram-se as amostras deformadas no mesmo ponto onde retiraram as indeformadas, aproximadamente 50 kg de solo. As amostras deformadas foram extraídas por escavação, implicando na destruição da estrutura e na alteração da consistência natural.

TABELA 3. Valores de CBR para cada trecho analisado.

Trechos	ICS ou CBR (%)
Estrada 1 – trecho 1	2,43
Estrada 2 – trecho 2	4,86
Estrada 3 – trecho 3	3,09

3.4. Caracterização física e mecânica do solo

Foram realizados os ensaios de caracterização física e mecânica do solo: análise granulométrica, norma NBR 7181 (ABNT, 1984d), massa específica dos sólidos e umidade (EMBRAPA, 1997), massa específica, norma NBR 6508 (ABNT, 1984b), limite de liquidez, norma NBR 6459 (ABNT, 1984a), limite de plasticidade, norma NBR 7180 (ABNT, 1984c) e o ensaio de Proctor normal, norma NBR 7182 (ABNT, 1986).

3.5. Bulbo de tensão

Para definir as dimensões necessárias para moldagem das amostras tanto para determinar a capacidade de suporte de carga do sistema (solo mole-geossintético-base) quanto para o sistema levado ao simulador, foi necessário determinar a região ativa do solo definida pelo bulbo de tensão.

Uma prática utilizada para estimar o valor das tensões em certa profundidade consiste em considerar que as tensões se espalham segundo áreas crescentes, mas sempre se mantendo uniformemente distribuídas. Foi utilizada a Equação de Love (LOVE, 1929), obtida a partir da integração da solução de Boussinesq para o cálculo do acréscimo de tensão em pontos ao longo da vertical, que passa pelo centro de uma placa circular uniformemente carregada. Conforme Equação 3:

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{R}{Z}\right)^2} \right]^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (3)$$

Em que:

σ_z = tensão vertical efetiva;

σ_0 = carregamento.

R = raio da área carregada;

Z = profundidade considerada.

Para pontos situados fora da vertical que passa pelo centro da área de contato, o acréscimo de tensão efetiva vertical foi calculado por meio do ábaco de Love (1929), que forneceu as isóbaras de σ_z/p , em função do afastamento e da profundidade relativa X/R e Z/R , respectivamente. O ábaco pode ser visualizado no Anexo B.

3.6. Características dos reforços utilizados nos ensaios

Foram utilizados três tipos de geossintéticos nesta pesquisa, um geotêxtil não tecido agulhado produzido com fios de poliéster (GNT), um geotêxtil tecido produzido a partir do entrelaçamento em ângulo reto de laminetes de polipropileno (GT) e uma geogrelha feita a partir de elevado peso molecular, construída com fios de poliéster com múltiplos filamentos (GG) e como testemunhas foram utilizadas amostras sem nenhum tipo de reforço (SG). As características dos reforços são apresentadas na Tabela 4.

TABELA 4. Características dos geossintéticos utilizados na pesquisa.

Propriedades	GNT	GT	GG
Resistência longitudinal a tração (kN/m)	14,0	25,0	25,0
Alongamento longitudinal (kN/m)	50,0-65,0	25,0	11,0
Espessura do elemento (mm)	1,6	1,4	1,2



FIGURA 7. Geossintéticos utilizados: a) geotêxtil não tecido; b) geotêxtil tecido; e c) geogrelha tecida.

3.7. Profundidade de instalação dos geossintéticos

Para determinar qual a altura ideal de base ou a profundidade ideal de instalação do geossintético, considerou-se o bulbo de tensão, a partir do mesmo foram selecionadas 3 alturas a primeira na região crítica do bulbo de tensão (0,03 m), a segunda abaixo da região crítica mas ainda na área de atuação do bulbo de tensão (0,06 m) e a terceira fora da área de atuação do bulbo de tensão (0,09 m).

Para avaliar qual altura gerou maior resistência, ou seja, maior capacidade de suporte de carga para o sistema (subleito-geossintético-base) foi utilizado a prensa CBR, o ensaio não foi realizado saturando-se a amostra, pois o interesse foi simular o subleito com umidade elevada e a base compactada na umidade ótima para situações com e sem reforço.

Separaram-se duas bandejas com solo, em uma adicionou-se água até que o mesmo ficasse com umidade elevada, próxima a situação saturada ($S=100\%$) e na segunda bandeja adicionou-se água até chegar à umidade ótima de compactação de cada solo. Utilizou-se o molde grande (Cilindro grande: diâmetro = 152 mm; altura total = 180 mm; disco espaçador com altura = 50,8 mm; altura efetiva = 127 mm), nos primeiros 9 mm o molde foi preenchido com solo saturado de modo a eliminar o ar existente, em seguida compactou o solo (soquete grande de 4,5 kg e 12 golpes) na umidade ótima em diferentes alturas (0,03 m, 0,06 m e 0,03 m) em situações com e sem reforço (geogrelha, geotêxtil tecido, geotêxtil não tecido e sem geossintético), conforme Figura 8.



FIGURA 8. a) cilindro CBR com marcação das alturas; b) subleito saturado com aplicação do reforço; e c) prensa CBR com a amostra pronta.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com duas repetições. Os tratamentos constituíram-se de um fatorial 3 x 4, três altura (0,03 m, 0,06 m e 0,03 m) e quatro tipos de reforço (GT, GNT, GG e SG). A análise de variância do CBR foi

realizada pelo teste de F, a 5% de probabilidade e suas médias foram comparadas pelo teste de Tukey, foi utilizado o programa SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2007).

3.8. Área de contato do pneu do simulador de tráfego com o solo

Para encontrar a pressão a ser aplicar pelo simulador de trafego foi necessário determinar a pressão média de contato do pneu de um caminhão bitrem, que é o mais utilizado para transportar a safra agrícola.

No cálculo da pressão média aplicada ao solo, pelo caminhão, foi necessário determinar a área de contato do pneu com o solo e o peso por eixo do caminhão carregado. Para medir a área média de contato do pneu do caminhão utilizaram-se duas tiras de papel, deslizando-os na parte dianteira e traseira do pneu até sentir que eles não podiam mais avançar, então mediu a distancia entre os papeis.

O pneu com pressão de inflagem de aproximadamente 90 psi (620,53 kPa) apresentou área média de 0,065 m². O caminhão utilizado tinha oito pneus por eixo (Figura 9), dividiu-se 17 toneladas por oito pneus, encontrando um peso por roda de aproximadamente 20,80 kN. A pressão média de contato do pneu do caminhão foi de 320,00 kPa.



FIGURA 9. a) cilindro CBR com marcação das alturas; b) subleito saturado com aplicação do reforço; e c) prensa CBR com a amostra pronta.

A diferença entre o simulador de tráfego e um veículo qualquer, esta basicamente na escala e na forma como a carga é aplicada ao solo. Por exemplo, um caminhão com 4 eixos, a carga é o próprio peso do eixo, no simulador devido as características construtivas, o carregamento é aplicado por um macaco hidráulico que comprime a superfície da amostra contra a banda de rodagem do pneu.

No simulador de tráfego como a carga vertical é passível de alteração, pode-se obter valores de área de contato e conseqüentemente pressões de contato variadas. Por isso foi realizado um procedimento iterativo de aplicação de carregamentos sobre amostras de teste e inflagem do pneu, fazendo varias medições das áreas de contato até obter-se um valor de pressão de contato próxima a condição de campo.

Para medir a área de contato do pneu do simulador de trafego foi polvilhado gesso em pó em toda a área em volta do pneu preocupando-se em preencher todos os espaços vazios entre as ranhuras do pneu.

Em seguida, descarregou a pressão do macaco hidráulico na roda, tomando o cuidado para não danificar o desenho produzido pelo rodado no solo. A área de contato foi registrada por fotografia digital em alta resolução obtida perpendicularmente ao solo, utilizando uma câmera fotográfica SONY Cyber-Shot 14,1 Mega Pixels.

Para conseguir uma pressão de contato de 255,72 kPa, aproximadamente 80% da pressão de contato do caminhão o valor da pressão de inflagem do pneu foi de 60 psi (413,68 kPa). As imagens foram analisadas utilizando-se o software AutoCad 2007, onde efetuou-se a correção da escala e a determinação das áreas de contato.

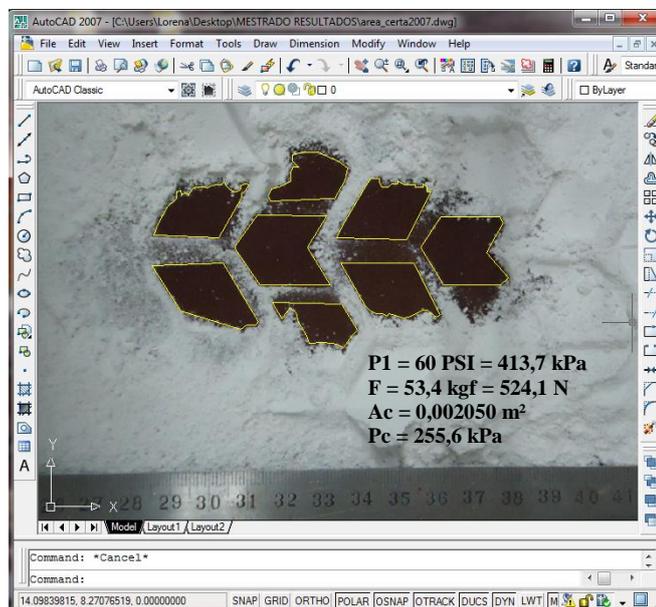


FIGURA 10. Determinação da área de contato do pneu do simulador por meio do software AutoCad 2007.

3.9. Pressão aplicada ao solo

Utilizou-se um macaco hidráulico com capacidade de duas toneladas para aplicar carga na superfície das amostras. A carga aplicada pelo macaco hidráulico foi controlada por uma célula de carga de 500 kgf posicionada entre o macaco hidráulico e a plataforma onde foram colocadas as amostras de solo. A curva de calibração da célula de carga pode ser vista na Figura 11.

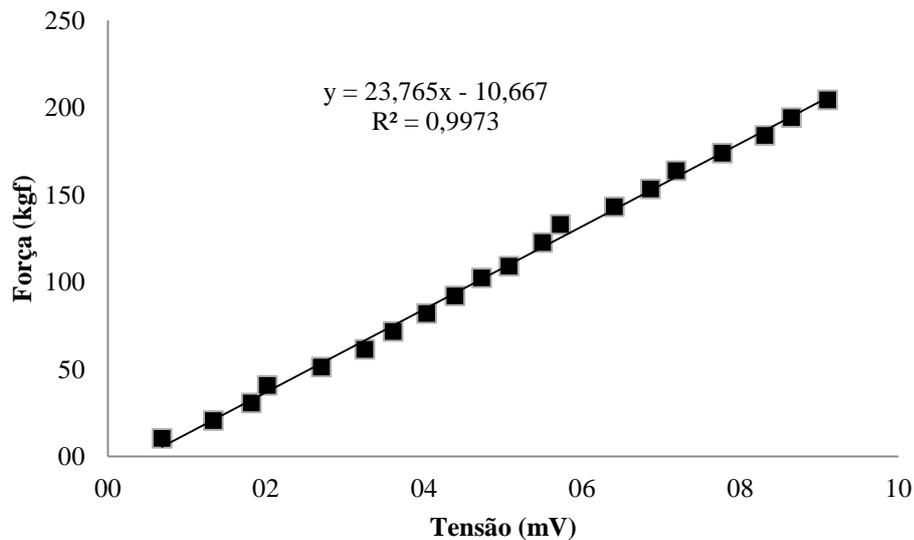


FIGURA 11. Gráfico de calibração da célula de carga.

Utilizou-se um sistema de aquisição de dados, modelo CR 800, fabricado pela Campbell Scientific Ltd para conectar a célula de carga, as leituras foram realizadas utilizando o Software PC 400 versão 1.5 fornecido pelo fabricante do equipamento. O carregamento foi aplicado até que as amostras de solo fossem submetidas a valores de pressão de contato próximas de 255,72 kPa.

3.10. Moldagem de amostras com e sem geossintético

Após definir qual a altura ideal para a base foi moldada uma amostra com dimensões 0,16 x 0,20 x 0,40 m (altura, largura e comprimento) em uma caixa de metal, da mesma forma que a amostra ensaiada no CBR, subleito com alta umidade e base compactada na umidade ótima.

Os primeiros 10 cm de altura da caixa de metal foram preenchidos com solo de alta umidade de forma a retirar o ar. A base foi dividida em três camadas e cada camada foi compactada com o auxílio da máquina Universal de Ensaio, modelo WDW-100E de 100 kN de capacidade. As amostras foram montadas com diferentes tipos de reforço, na interface entre a camada de base e o subleito, Figura 12.

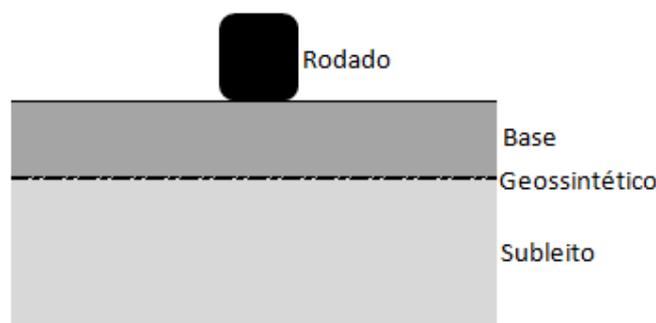


Figura 12 – Esquema de utilização dos reforços nas amostras moldadas em laboratório.

As amostras foram levadas ao simulador de tráfego para determinação da trilha de roda, com e sem reforço, em diferentes números de passadas (0, 2, 8, 20, 36, 60 e 100). O recalque (trilha de roda) foi medido pelo método fotográfico, descrito por Bueno (1987). Após obter o recalque com o número determinado de passadas, foi avaliada a razão de benefício de tráfego (RBT).

3.11. Determinação do recalque em condição laboratorial

3.11.1. Simulador linear de tráfego

Para avaliar o efeito dos diferentes níveis de tráfego do pneu a partir do recalque (trilha de roda), em condição laboratorial, foi utilizado um simulador linear de tráfego.

O simulador possui um conjunto mecânico constituído basicamente por um braço articulado acoplado, em uma extremidade a um redutor e na outra ligado a um eixo que contém uma roda. O acionamento se dá por motor elétrico monofásico de $\frac{3}{4}$ CV (0,55 kW) e a transmissão de torque do motor para o redutor é feita por polia - correia.

O tráfego foi simulado pela repetição da carga aplicada por uma roda submetida a esforço vertical e seu movimento longitudinal se dá sobre o corpo de prova. Na roda do simulador utilizou-se um pneu com as seguintes características: Levorin, tube type, 4.80/4.00-

8, carretilha, capacidade de carga B e carga máxima 435 kg, 70 lbs.pol⁻² a frio. Na Figura 13 têm-se as vistas do simulador linear de tráfego utilizado.

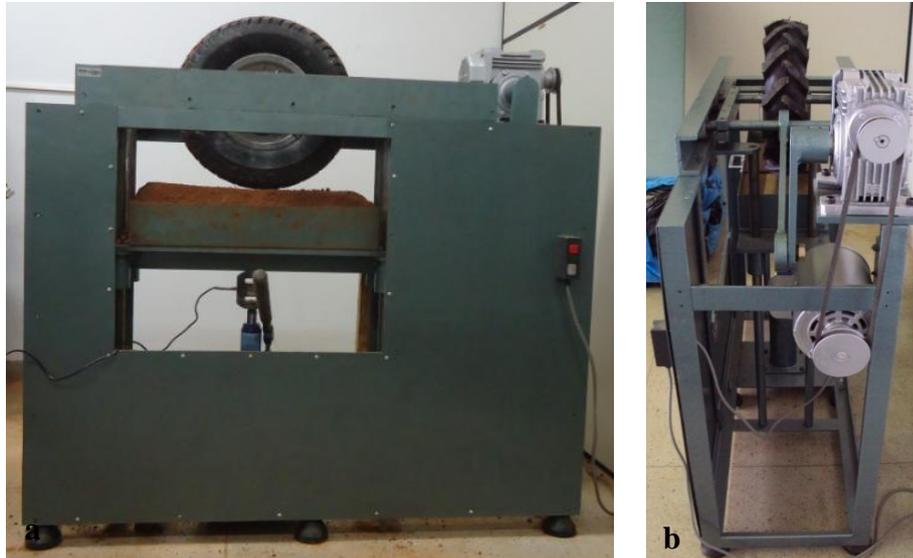


FIGURA 13. Vistas do simulador linear de tráfego: a) frontal; e b) lateral direita.

3.11.2. Sistema de leitura dos recalques do solo nas amostras

O método utilizado para a leitura dos recalques desenvolvidos na superfície do solo foi o fotográfico descrito por Bueno (1987). Esse método baseia-se no conhecimento da posição real de pontos que possam determinar um plano, chamado de plano de referência global. Com essas referências pode-se conhecer a posição real de qualquer ponto presente numa imagem a ser trabalhada, através de um fator de escala obtido de um sistema de equações escrito em função das coordenadas locais dos pontos de leitura medidas na foto (AutoCad) e das coordenadas dos marcos de referência do sistema global. O modelo matemático desenvolvido por Bueno (1987) utiliza duas equações básicas:

$$X = A + Bx + Cy + Dy + \dots \quad (4)$$

$$Y = A' + B'x + C'y + D'xy + \dots \quad (5)$$

Em que:

X e Y: as coordenadas globais ou reais do ponto em questão;

x e y: as coordenadas locais do ponto em questão; e

A, A', B, B', C, C', D, D',...: as constantes de transformação de coordenadas do sistema.

Desta forma, cada foto tem suas próprias constantes obtidas aplicando-se às equações 4 e 5 as coordenadas globais e locais dos pontos de referência. Após a obtenção destas constantes, têm-se as equações capazes de obter as posições reais de pontos na foto relativas ao sistema de coordenadas criado.

As fotografias antes e ao término dos ensaios foram registradas com uma máquina fotográfica digital da marca SONY Cyber-Shot 14,1 Mega Pixels, que permitiu verificar a trilha de roda (recalque) do solo. Na Figura 14 têm-se as fotos referentes a um ensaio.

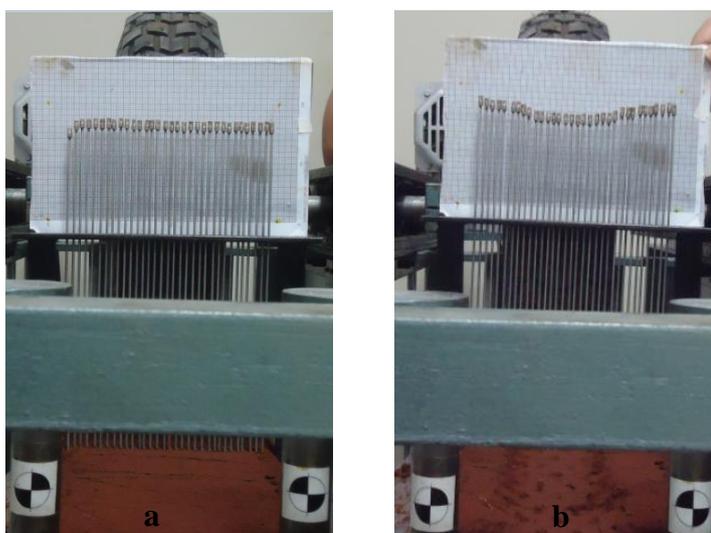


FIGURA 14. Fotografias mostrando o perfil do solo: a) antes; e b) após o tráfego.

Para facilitar o processo de obtenção dos recalques do solo foi desenvolvida uma planilha eletrônica no programa Excel 2010. A planilha realiza os cálculos dos recalques, onde o usuário entra com os dados das coordenadas globais e que marque as posições das miras referentes aos pontos das coordenadas globais e as miras dos pontos aos quais se desejam serem calculados os deslocamentos.

3.12. Estudo analítico de cálculo aplicado ao problema

Considerando que o reforço re-distribui as tensões na base do subleito, espera-se que as tensões na base do subleito da estrada reforçada sejam menores, considerando que o ângulo de espraiamento das tensões aumenta. Deste modo, os recalques do solo na região superior ao reforço tendem a ser menores. Deste modo, sendo determinado o recalque da camada pode-se obter, mediante a Equação 4, as deformações do sistema e o módulo de deformabilidade, Equação 5.

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} \quad (4)$$

$$D = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

Em que:

ε = deformações axiais, (%);

D = Modulo de deformabilidade, em kPa;

Δh = recalque, em m;

σ = tensão axial, em kPa;

h = altura da camada do subleito, em m;

A tensão na base da camada pode ser obtida considerando o método de distribuição de tensões calculado no item 3.4.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ensaio de caracterização

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, são apresentados a seguir. A Figura 15 representa as curvas granulométricas dos trechos avaliados em cada estrada, seguindo a norma NBR 7181 (ABNT, 1984) para granulometria por peneiramento e para granulometria por sedimentação.

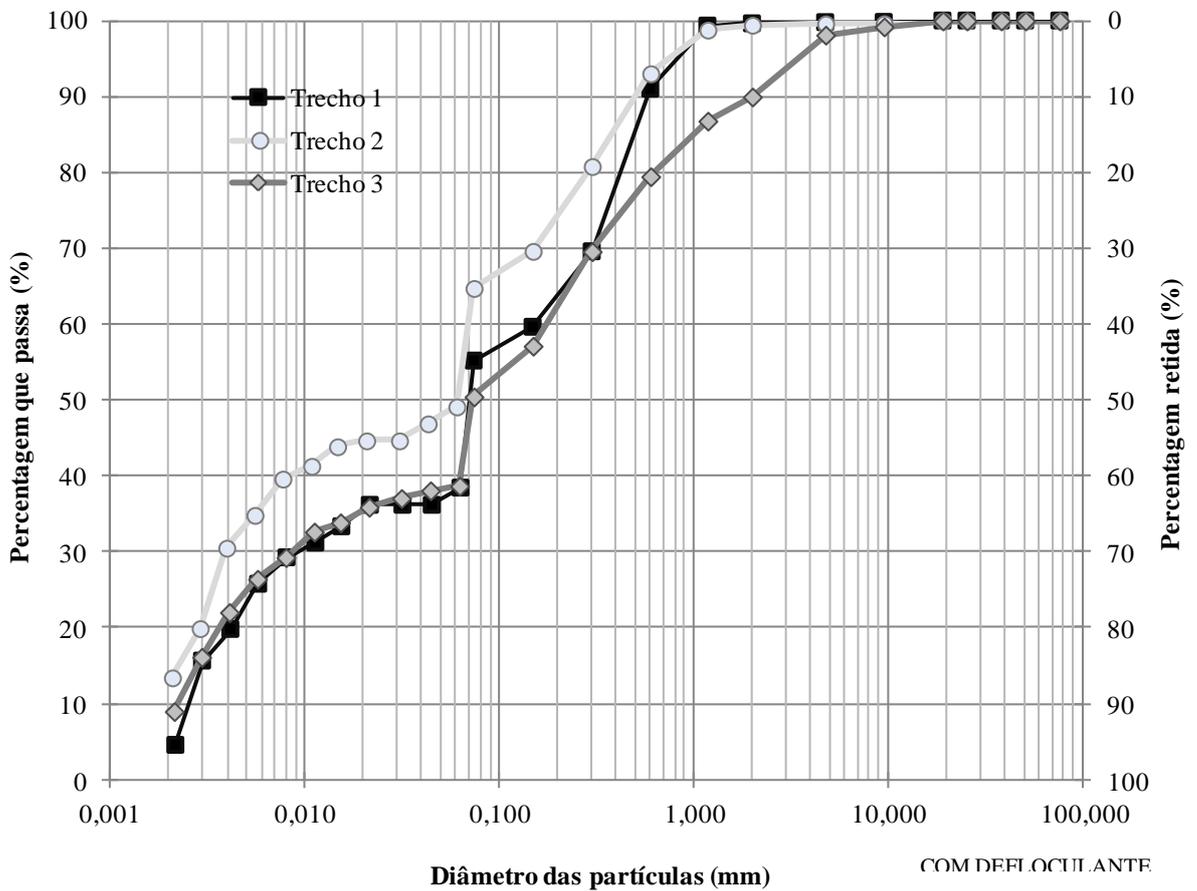


TABELA 5. Porcentagens das frações de solos dos trechos estudados.

Fração	Faixa (mm)	Trecho 1 (%)	Trecho 2 (%)	Trecho 3 (%)
Argila	< 0,002	4,5	13,4	9,0
Silte	0,002 - 0,06	31,7	34,6	29,1
Areia Fina	0,06 - 0,20	27,8	16,0	24,9
Areia Média	0,20 - 0,60	27,0	29,0	16,5
Areia Grossa	0,60 - 2,0	9,0	7,0	20,5
Pedregulho	2,0 - 60	0,0	0,0	0,0
Total		100,00	100,00	100,00

A Tabela 6 apresenta as porcentagens que passam nas peneiras dos trechos 1, 2 e 3.

TABELA 6. Porcentagens de solo que passam nas peneiras.

Amostras	Peneiras					
	N 4	N 10	N 50	N 100	N 200	0,002 mm
Trecho 1	99,8	99,6	69,6	59,6	55,2	2,5
Trecho 2	99,6	99,4	80,8	69,6	64,7	12,8
Trecho 3	98,1	90,0	69,6	57,1	50,4	8,0

A classificação TRB (Transportation Research Board) é aplicada no reconhecimento de solos para construção de pavimentos rodoviários em todo o mundo ela é recomendada pela AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

Com os resultados de granulometria, limite de plasticidade e limite de liquidez foi realizado a classificação TRB seguindo a norma DNIT (2006), apresentada na Tabela 7.

Tabela 7. Classificação TRB das amostras dos trechos 1, 2 e 3.

Amostras	Classificação TRB	Comportamento como subleito (TRB)
Trecho 1	A-7-5 (Solo Siltoso)	Sofrível a mau
Trecho 2	A-6 (Solo Argiloso)	Sofrível a mau
Trecho 3	A-6 (Solo Argiloso)	Sofrível a mau

Na Tabela 8 segue os resultados da caracterização física e mecânica dos solos para cada trecho avaliado. Como o Limite de Liquidez LL é menor que 50 % para cada trecho, os solos são de baixa compressibilidade. Como o IP de cada ponto esta entre o intervalo de $7 < IP \leq 15$, os solos são caracterizados como medianamente plástico.

TABELA 8. Caracterização física e mecânica dos solos.

Propriedades	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Físicas			
Índices Físicos			
Umidade - (w - %)	24,72±0,16	18,34±0,47	21,37±0,15
Massa específica real dos grãos - (ρ - tm^{-3})	2,69±0,01	2,70±0,01	2,74±0,01
Massa específica aparente seca - (ρ_d - tm^{-3})	1,15±0,07	1,32±0,05	1,20±0,07
Porosidade total - (η - %)	52,88±1,38	50,46±1,86	57,90±1,24
Limites de Consistência			
Limite de liquidez - (LL - %)	42,84±0,20	33,80±0,42	39,65±0,37
Limite de Plasticidade - (LP - %)	31,88±1,14	26,42±0,70	29,56±0,66
Mecânicas			
Massa específica aparente seca máxima - ($\rho_{\text{máx}}$ tm^{-3})	1,56±0,03	1,74±0,02	1,48±0,05
Umidade ótima de compactação - (w_{otm} - %)	23,48±0,52	18,40±1,6	28,03±2,53
Grau de Compactação - (GC - %)	73,72±2,98	75,86±3,24	81,08±2,58

4.2. Distribuições das tensões no solo

Na Figura 16 tem-se representado os valores de tensões normais aplicados nas superfícies das amostras. As distribuições de tensões mostram que com o aumento da profundidade e da distância do centro do pneu, as tensões normais reduzem em grandeza, proporcionando possivelmente menores deformações do solo em maiores profundidades, mas se estendem em áreas maiores.

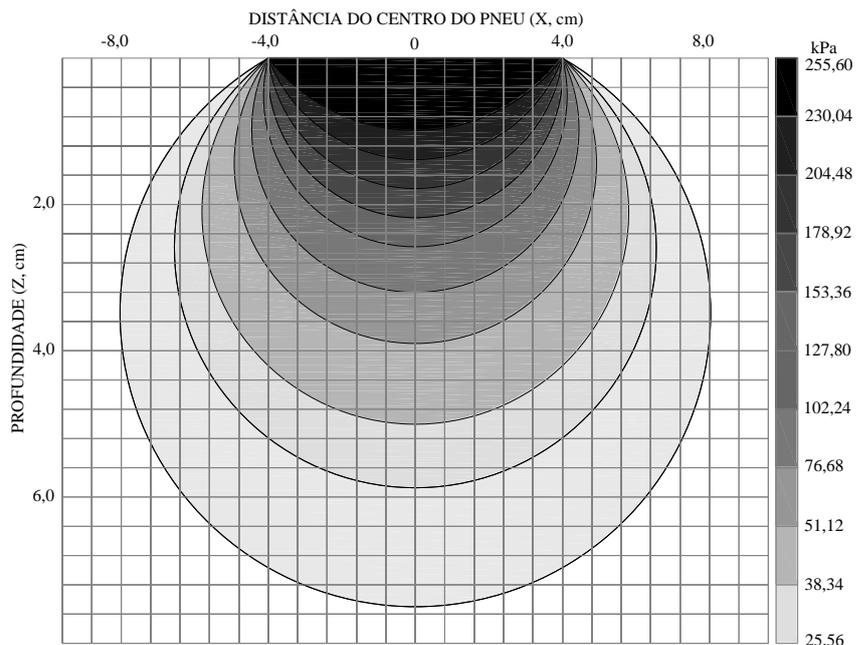


FIGURA 16. Bulbo de tensão obtido para carregamentos exercidos pelo pneu do simulador na superfície do solo.

4.3. Profundidade de instalação do geossintético

A análise de variância para a variável CBR em diferentes alturas está apresentada na Tabela 9. Ao variar a altura de solo da base o valor de CBR sofreu alterações estatísticas significativas a 5%, para as avaliações realizadas com e sem reforço para o valor de CBR o resultado não foi significativo a 5 %.

TABELA 9. Resumo da análise de variância da variável CBR, com subleito saturado.

Fator de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio
Trechos	2	9,306393*
Reforços	3	0,576983
Altura	2	49,076918*
Reforço x Altura	6	1,011005
Erro	58	0,508010
Total	71	
	Coeficiente de variação (%)	21,69
	Média	3,2856944

* Significativos a 5% de probabilidade.

Foi realizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade para a altura (Figura 17). Estatisticamente todas as três alturas (0,03 m, 0,06 m e 0,09m) foram diferentes. Ao analisar o gráfico médio de CBR percebe-se que ao aumentar a altura da camada de solo da base o CBR aumenta. Com 0,03 m de altura o valor de CBR alcançou 1,82%, nessa altura o geossintético esta na área efetiva do bulbo de tensão, porém a camada não foi suficiente para conter a água, portanto aumentou significativamente a umidade do solo da base. Ao dobrar a altura (0,06 m) o CBR alcançou o valor de 3,37% aumentando em 50% e ao triplicar a altura o CBR alcançou o valor de 4,67% porém o incremento foi apenas de 30%, ou seja, a altura da base não é proporcional ao ganho no valor do CBR. A altura de base escolhida foi de 0,06 m.

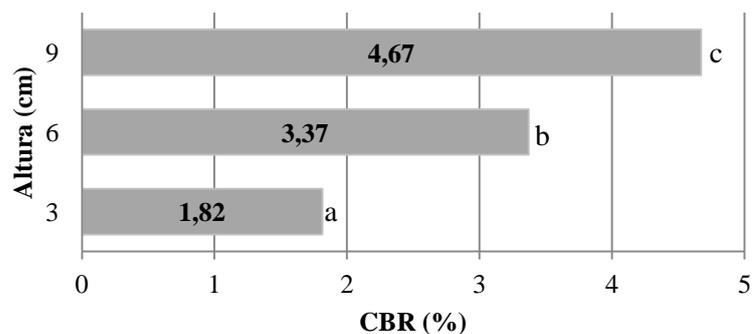


FIGURA 17. Valores médios de CBR para o subleito saturado. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 5\%$).

4.4. Ensaio de CBR

A análise de variância para o valor de CBR com altura de base de 0,06 m está apresentada na Tabela 10.

TABELA 10. Resumo da análise de variância da variável CBR.

Fator de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio
Trechos	2	6,939800*
Reforços	3	1,155522
Erro	19	0,381169
Total	23	
	Coefficiente de variação (%)	18,32
	Média	3,37

* Significativos a 5% de probabilidade.

Observa-se que não há diferença significativa entre os geossintéticos utilizados. Apesar da diferença não ser significativa entre os experimentos, houve uma tendência do tratamento sem reforço obter maior valor de CBR (Figura 18). Pode-se concluir que o CBR não é o melhor teste para indicar qual geossintético é melhor, pois o valor de CBR é medido no início do ensaio, ou seja, com uma deformação de duas polegadas e para a condição proposta o geossintético começa a ser efetivo com deformações maiores.

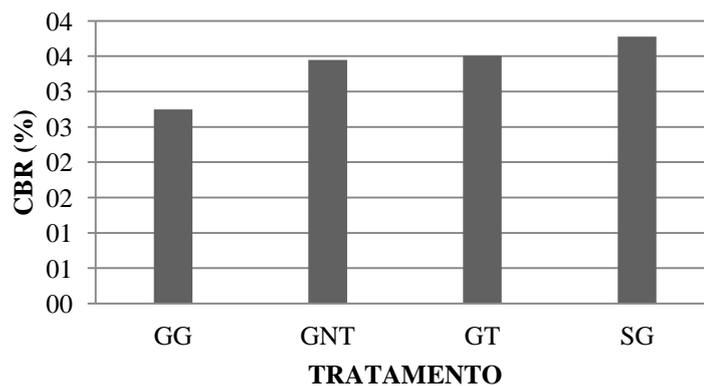


FIGURA 18. Valores médios de CBR para o subleito saturado, na altura 0,06 m.

Para comprovar o que está supracitado deve-se analisar os gráficos de deslocamento em função da força nas Figuras 19, 20 e 21.

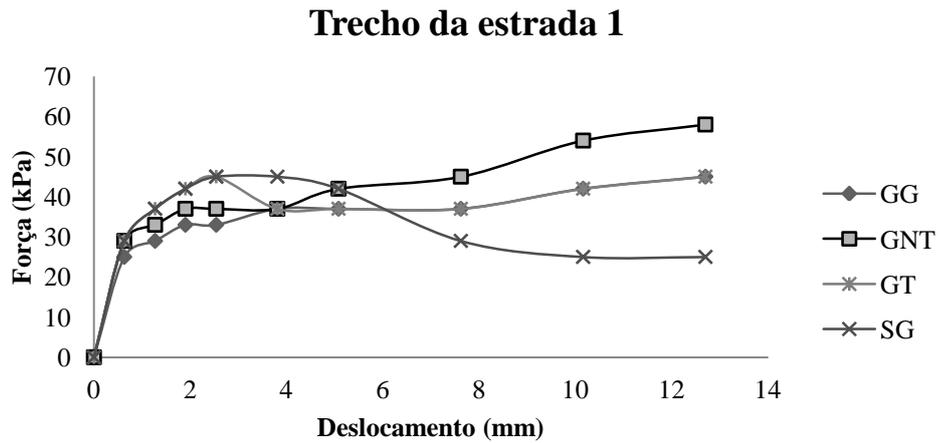


FIGURA 19. Gráfico de deslocamento em função da força para o solo do trecho 1.

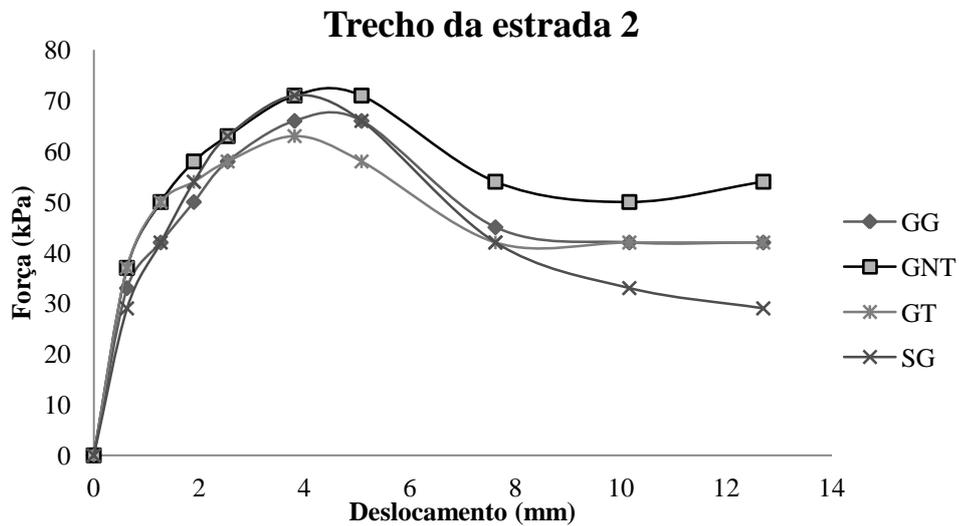


FIGURA 20. Gráfico de deslocamento em função da força para o solo do trecho 2.

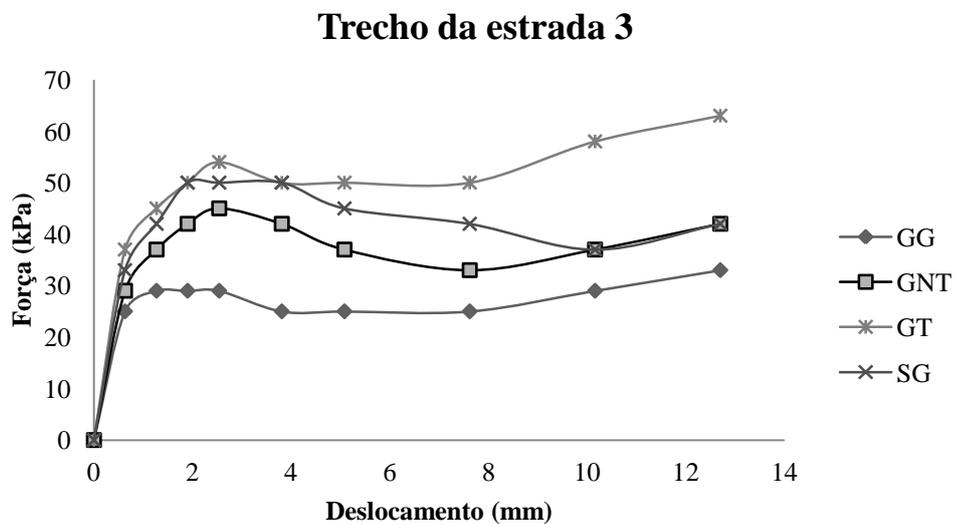


FIGURA 21. Gráfico de deslocamento em função da força para o solo do trecho 3.

Para deslocamentos superiores a 6 mm as amostras dos solos dos trechos 1 e 2 que foram reforçados deformaram menos com o acréscimo de carga do que os sem geossintéticos, ou seja, a condição de reforço do geossintético começa a ser efetiva a partir da mobilização da carga que ocorre em maiores deslocamentos (o que efetivamente se traduz no efeito membrana e no espraiamento das tensões), ou seja, para estradas onde o tráfego é baixo (carregamento e deformações de pequena magnitude) ou os veículos que ali trafegam são de pequeno porte, a efetividade dos reforços é pequena. Com relação ao trecho 3 observou-se que o reforço com GG não se apresentou efetivo na redução dos deslocamentos, isto pode estar associado ao efeito escala do sistema GG/solo. Considerando que a abertura da malha da geogrelha (ver Figura 8) não proporcionou uma interação solo/reforço adequada para reduzir os deslocamentos.

4.5. Avaliação do recalque no simulador de tráfego

A Figura 22 mostra o comportamento do recalque (trilha de roda) para a condição (Trecho 1) sem reforço e com reforço de um geotêxtil não tecido. O recalque é menor ao utilizar o geotêxtil não tecido, quando aumenta o número de passadas essa diferença é significativa. A análise de regressão indicou comportamento linear para os dois tratamentos, com e sem reforço, as equações expressas na Figura 22 representam 99% dos casos para os níveis de tráfego adotados.

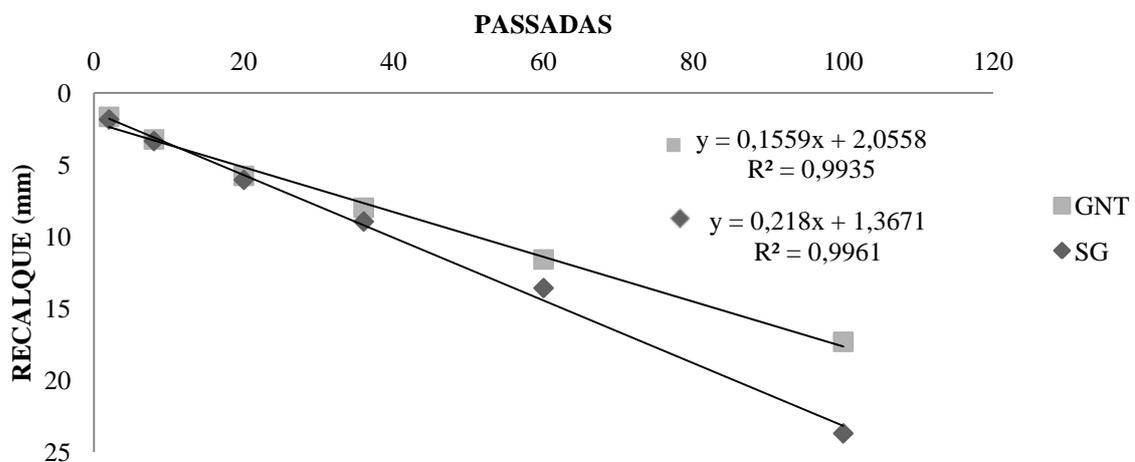


FIGURA 22. Recalque em função do número de passadas para a estrada 1 sem geossintético (SG) e com geotêxtil não tecido (GNT).

A partir desse ajuste foi calculado o número de passadas que o tratamento com reforço precisaria para alcançar a mesma trilha de roda que o sem reforço, os valores estão apresentados na Tabela 11.

A discussão é parecida com a realizada para o ensaio de CBR, visto que com poucas passadas não há benefício de tráfego e o mesmo aumenta com o aumento do número de passadas. Essa razão de benefício evidencia um considerável aumento da vida útil da estrada não pavimentada com a utilização de geossintéticos como reforço. Observe que o valor de RBT foi de até 1,36 o que é expressivo considerando que as obras são lineares. Este efeito deve-se principalmente ao espraiamento das tensões, com tensões menores atuando sobre o reforço os recalques diminuem.

TABELA 11. Razão de benefício de tráfego para o geotêxtil não tecido.

Recalque (mm)	Número de Passadas (SG)	Número de Passadas (GNT)	Razão de benefício de tráfego
1,84	2	-	-
3,35	9	-	-
6,05	21	26	1,19
8,95	35	44	1,27
13,58	56	74	1,32
23,70	102	139	1,36

A Figura 22 mostra o comportamento do recalque ou trilha de roda para a condição (trecho 1) sem reforço e com reforço de um geotêxtil tecido. O comportamento desse modelo é similar com o reforçado com geotêxtil não tecido. A análise de regressão indicou comportamento linear para os dois tratamentos, as equações expressas na Figura 23 representam 98 e 99%, respectivamente, dos casos para os níveis de tráfego adotados.

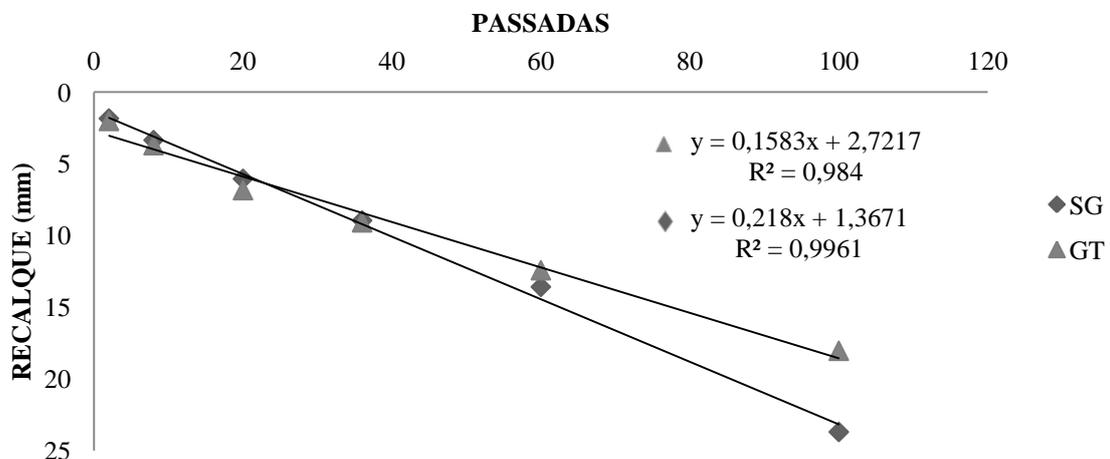


FIGURA 23. Recalque em função do número de passadas para a estrada 1 sem geossintético (SG) e com geotêxtil tecido (GT).

Na Tabela 12 são apresentados os valores de razão de benefício de tráfego para o geotêxtil tecido. O reforço com geotêxtil tecido foi eficiente como o tratamento reforçado com geotêxtil não tecido para o trecho 1. Observe que, neste caso a RBT é um pouco inferior, isto pode estar associado à compatibilidade de deformações e a rigidez do reforço ser diferente do primeiro caso. Finalmente, é perceptível que há uma razão de benefício de tráfego com o aumento do número de passadas.

TABELA 12. Razão de benefício de tráfego (RBT) para o geotêxtil tecido.

Recalque (mm)	Número de Passadas (SG)	Número de Passadas (GT)	Razão de benefício de tráfego
1,84	2	-	-
3,35	9	-	-
6,05	21	-	-
8,95	35	39	1,13
13,58	56	69	1,22
23,70	102	133	1,29

A Figura 24 mostra o recalque ou trilha de roda para o trecho 1 com reforço de uma geogrelha comparado com o sem reforço. Pode-se observar que a utilização da GG não contribuiu para o aumento da RBT, praticamente não houve alteração no estado de tensões do sistema. Neste caso, o efeito pode estar relacionado à pequena interação promovida pela inclusão do reforço sob a camada de subleito. A interação pode estar associada à escala do experimento, considerando que a malha da GG utilizada possui uma área efetiva menor o que diminui a mobilização e re-distribuição das tensões.

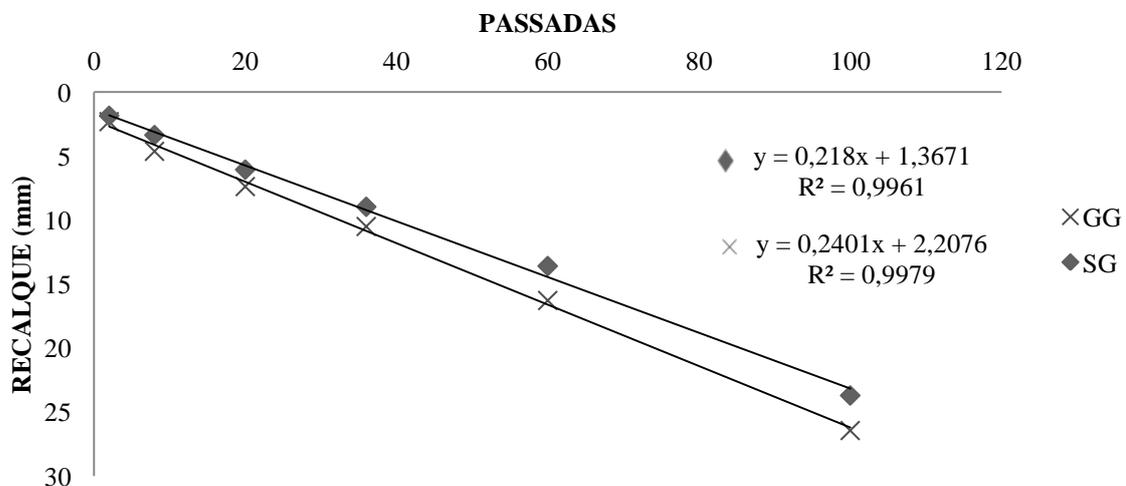


FIGURA 24. Recalque em função do número de passadas para a estrada 1 sem geossintético (SG) e com geogrelha (GG).

A Figura 25 mostra o comportamento do recalque ou trilha de roda para a condição (trecho 2) sem geossintético e com reforço de um geotêxtil não tecido. O recalque também foi menor ao utilizar o geotêxtil não tecido para a amostra de solo do trecho 2, porém ao compará-lo com a amostra do trecho 1, percebe-se que é mais intensa para o tipo de solo do trecho 1, provavelmente por este apresentar menos finos.

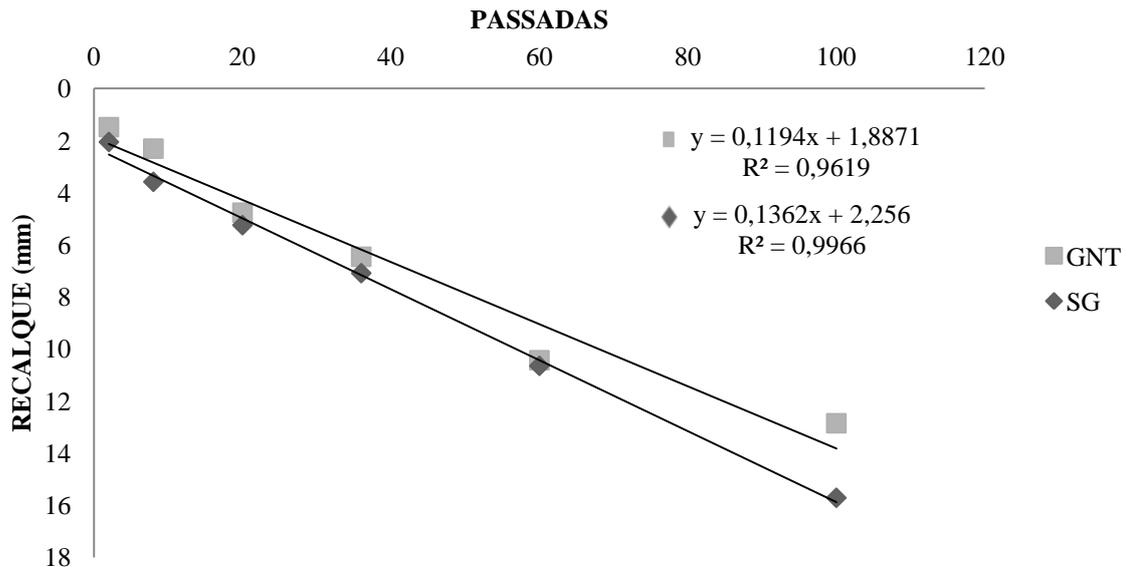


FIGURA 25. Recalque em função do número de passadas para a estrada 2 sem geossintético (SG) e com geotêxtil não tecido (GNT).

A análise de regressão indicou comportamento linear para o tratamento com reforço e o sem reforço, as equações expressas na Figura 25 representam coeficiente de correlação 96 e 99%, respectivamente, dos casos para os níveis de tráfego adotados. A partir desse ajuste foi calculado o número de passadas que o tratamento com reforço precisaria para alcançar a mesma trilha de roda que o sem geossintético, os valores estão apresentados na Tabela 13. A RBT para o reforço com geotêxtil não tecido não foi tão eficiente para o trecho 2 quanto para o trecho 1, sendo que o mesmo diminuiu com o aumento do número de tráfego.

TABELA 13. Razão de benefício de tráfego para o geotêxtil não tecido.

Recalque (mm)	Número de Passadas (SG)	Número de Passadas (GNT)	Razão de benefício de tráfego
2,40	2	5	2,50
3,58	10	15	1,50
5,25	22	29	1,32
7,09	36	44	1,22
10,65	62	74	1,19
15,71	99	116	1,17

A Figura 26 mostra a trilha de roda para o trecho 2 com reforço de um geotêxtil tecido comparado com um sem reforço. O recalque é menor ao utilizar o geotêxtil tecido, comparando com o solo não reforçado. A análise de regressão indicou comportamento linear para o tratamento com reforço e o sem reforço, as equações expressas na Figura 25 representam 99% dos casos para os níveis de tráfego adotados.

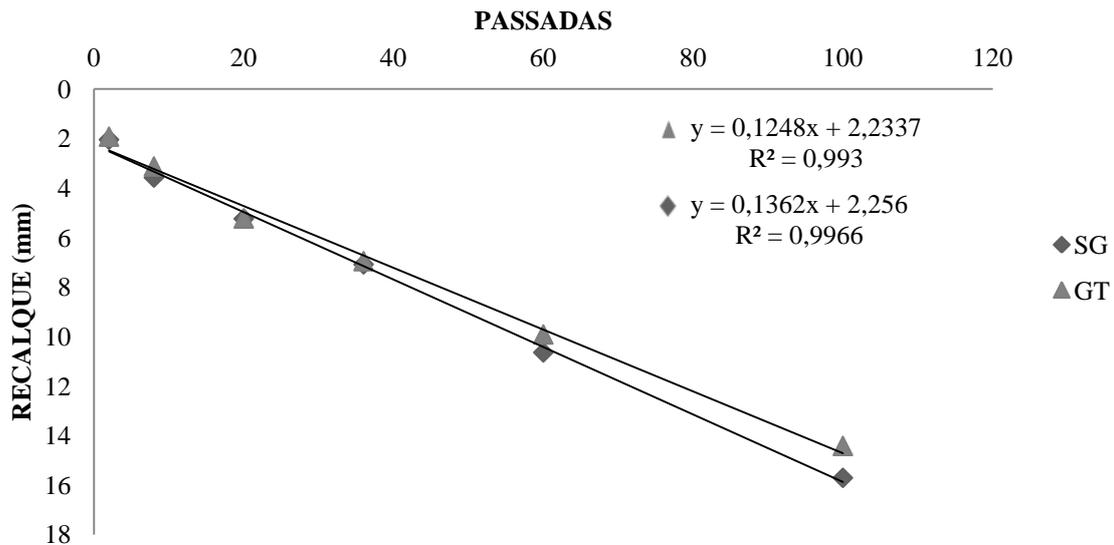


FIGURA 26. Recalque em função do número de passadas para a estrada 2 sem geossintético (SG) e com geotêxtil tecido (GT).

Na tabela 14 são apresentados os valores da razão de benefício de tráfego para o geotêxtil tecido. A razão de benefício de tráfego máxima foi de 1,74 para o reforço com geotêxtil tecido e o aumento foi proporcional ao tráfego.

TABELA 14. Razão de benefício de tráfego para o geotêxtil tecido.

Recalque (mm)	Número de Passadas (SG)	Número de Passadas (GT)	Razão de benefício de tráfego
2,40	2	-	-
3,58	10	-	-
5,25	22	31	1,41
7,09	36	54	1,50
10,65	62	91	1,47
15,71	99	172	1,74

A Figura 27 mostra o recalque ou trilha de roda para o trecho 2 com reforço de uma geogrelha comparado com um sem reforço. A análise de regressão indicou comportamento

linear para o tratamento com e sem reforço, as equações expressas na Figura 27 representam 98 e 99%, respectivamente, dos casos para os níveis de tráfego adotados.

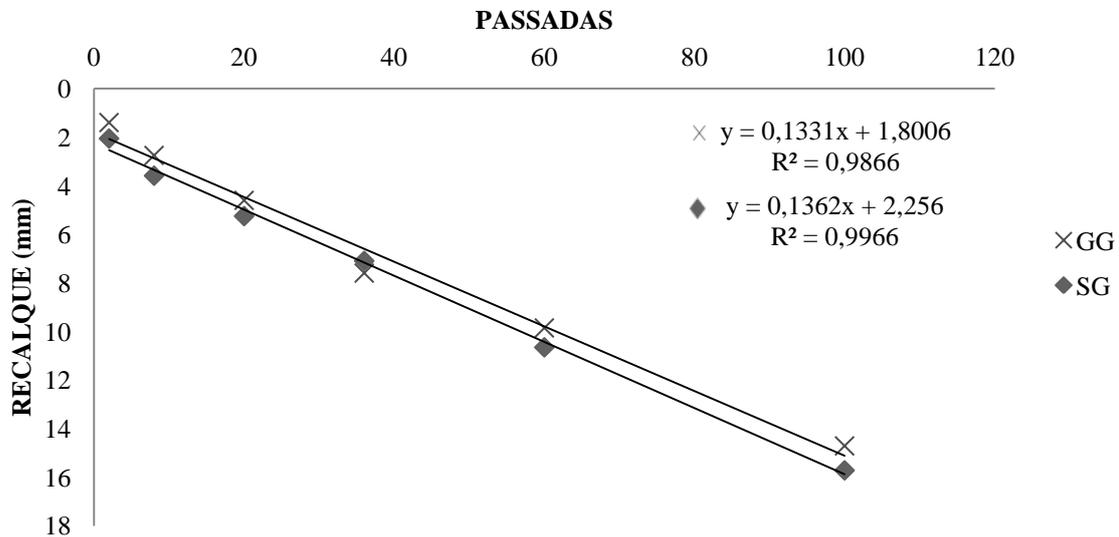


FIGURA 27. Recalque em função do número de passadas para a estrada 2 sem geossintético (SG) e com geogrelha (GG).

A partir desse ajuste foi calculado o número de passadas que o tratamento com reforço precisaria para alcançar a mesma trilha de roda que o sem geossintético, os valores estão apresentados na Tabela 15. A razão de benefício de tráfego máxima foi de 1,67 para o reforço com a geogrelha.

TABELA 15. Razão de benefício de tráfego para a geogrelha.

Recalque (mm)	Número de Passadas (SG)	Número de Passadas (GG)	Razão de benefício de tráfego
2,40	2	-	-
3,58	10	12	1,20
5,25	22	32	1,45
7,09	36	54	1,50
10,65	62	89	1,44
15,71	99	165	1,67

A Figura 28 mostra o recalque ou trilha de roda para o trecho 3 com reforço de um geotêxtil tecido comparado com um sem reforço. A diferença entre o solo reforçado e o não reforçado aumentou bastante. Este efeito parece estar associado ao aumento da área mobilizada na GG, o que eleva o carregamento no reforço e permite a redistribuição das tensões e redução dos recalques. A análise de regressão indicou comportamento de potência

para o tratamento com reforço e o sem reforço, as equações expressas na Figura 28 representam 97 e 99%, respectivamente, dos casos para os níveis de tráfego adotados.

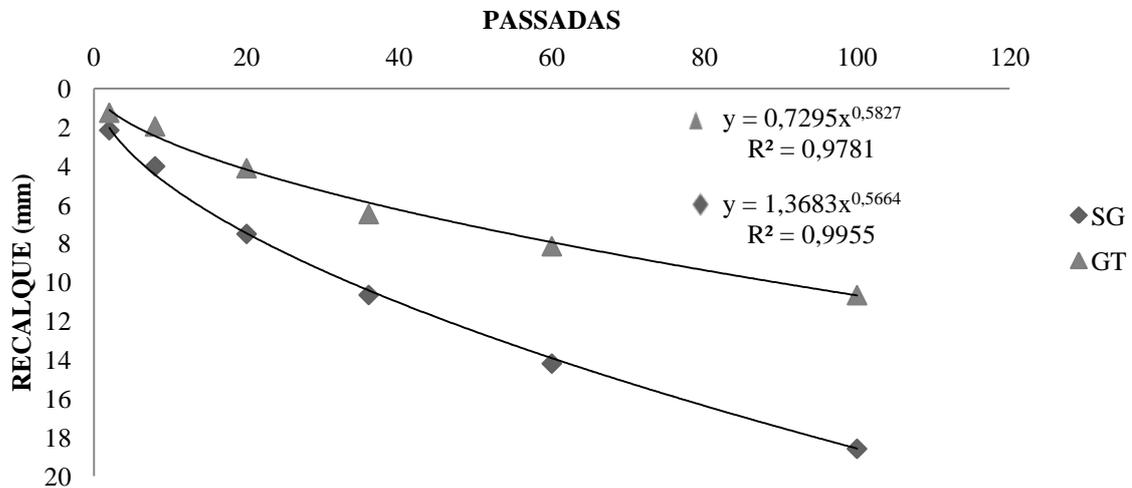


FIGURA 28. Recalque em função do número de passadas para a estrada 3 sem geossintético (SG) e com geotêxtil tecido (GT).

A partir dos ajustes foi calculado o número de passadas que o tratamento com reforço precisaria para alcançar a mesma trilha de roda que o sem geossintético, os valores estão apresentados na Tabela 16.

TABELA 16. Razão de benefício de tráfego para o geotêxtil tecido.

Recalque (mm)	Número de Passadas (SG)	Número de Passadas (GG)	Razão de benefício de tráfego
2,14	2	6	3,00
4,00	7	19	2,71
7,50	20	55	2,75
10,65	38	99	2,61
14,19	62	163	2,63
18,59	100	259	2,59

A Figura 29 mostra o recalque (trilha de roda) para o ponto 3 com reforço de um geotêxtil não tecido comparado com um sem reforço.

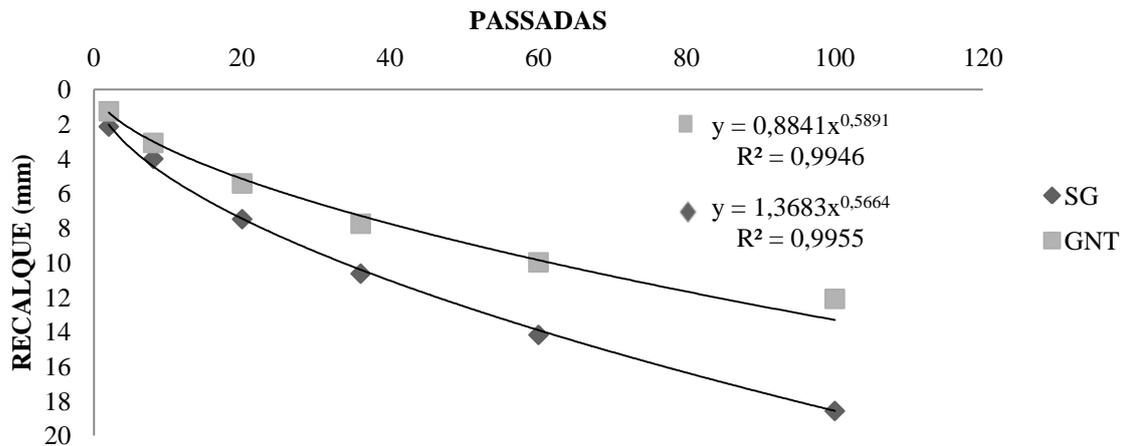


FIGURA 29. Recalque em função do número de passadas para a estrada 3 sem geossintético (SG) e com geotêxtil não tecido (GNT).

A análise de regressão indicou comportamento de potência para o tratamento com reforço e o sem reforço, as equações expressas na Figura 29 representam 99%, dos casos para os níveis de tráfego adotados. A razão de benefício de tráfego esta apresentada na Tabela 17.

TABELA 17. Razão de benefício de tráfego para o geotêxtil não tecido.

Recalque (mm)	Número de Passadas (SG)	Número de Passadas (GG)	Razão de benefício de tráfego
2,14	2	5	2,50
4,00	7	13	1,86
7,50	20	38	1,90
10,65	38	68	1,79
14,19	62	111	1,79
18,59	100	176	1,76

A Figura 30 mostra o recalque ou trilha de roda para o trecho 3 com reforço de uma geogrelha comparado com a situação sem reforço.

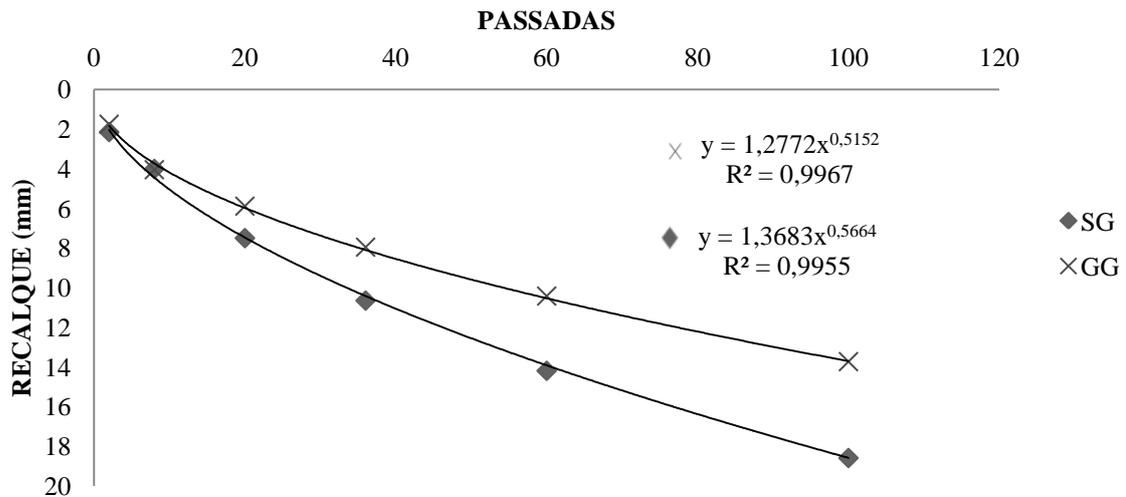


FIGURA 30. Recalque em função do número de passadas para a estrada 3 sem geossintético (SG) e com geogrelha (GG).

A análise de regressão indicou comportamento de potencia para o tratamento com reforço e o sem reforço, as equações expressas na Figura 30 representam 99%, dos casos para os níveis de tráfego adotados. A razão de benefício esta apresentada na Tabela 18.

TABELA 18. Razão de benefício de tráfego para a geogrelha.

Recalque (mm)	Número de Passadas (SG)	Número de Passadas (GG)	Razão de benefício de tráfego
2,14	2	3	1,50
4,00	7	9	1,29
7,50	20	31	1,55
10,65	38	61	1,61
14,19	62	107	1,73
18,59	100	181	1,81

4.6. Estudo analítico de cálculo

As Figuras 31, 32, 33 e 34 apresentam o número de passadas do rodado x recalque da camada (mm) para as situações sem e com geossintético.

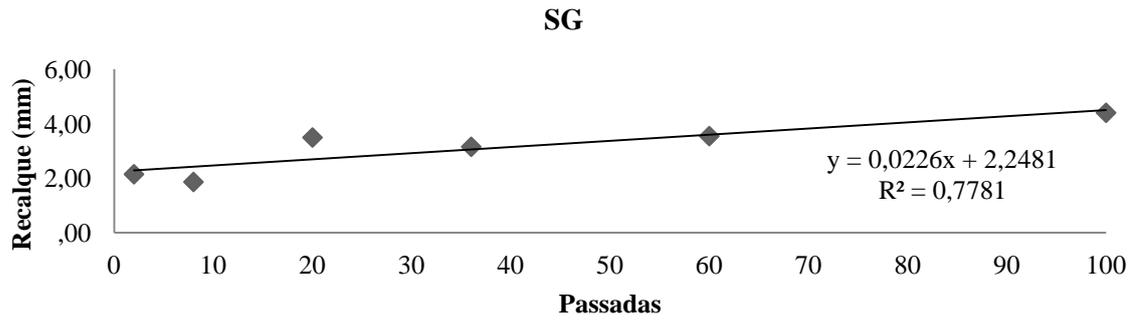


FIGURA 31. Recalque em função do número de passadas, sem geossintético.

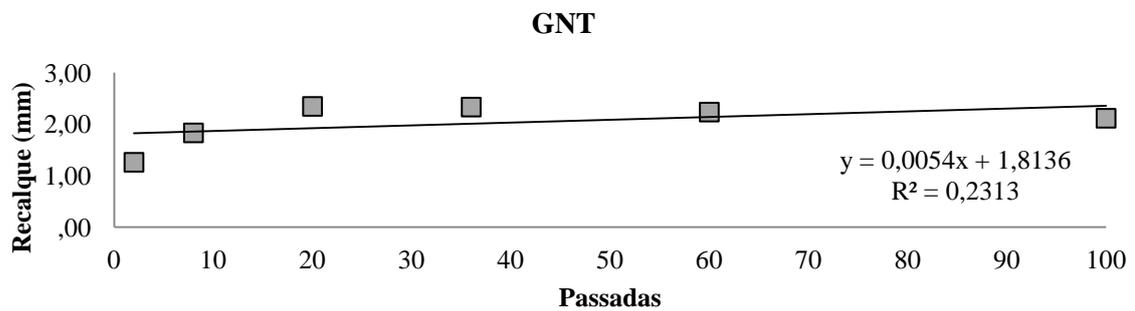


FIGURA 32. Recalque em função do número de passadas, com geotêxtil não tecido.

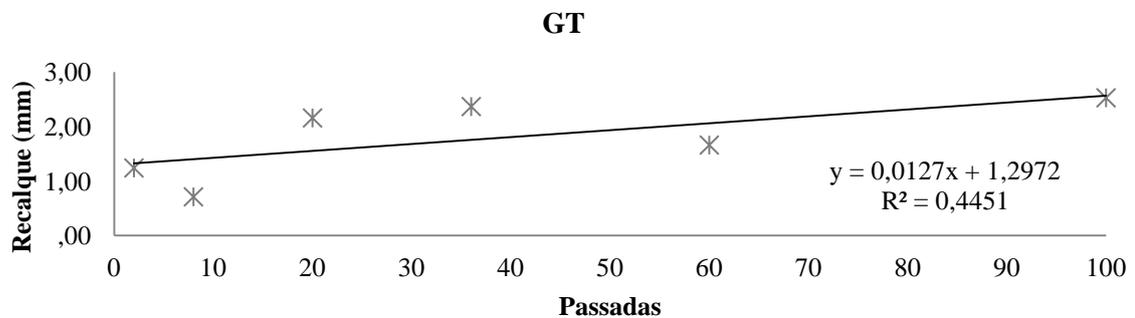


FIGURA 33. Recalque em função do número de passadas, com geotêxtil tecido.

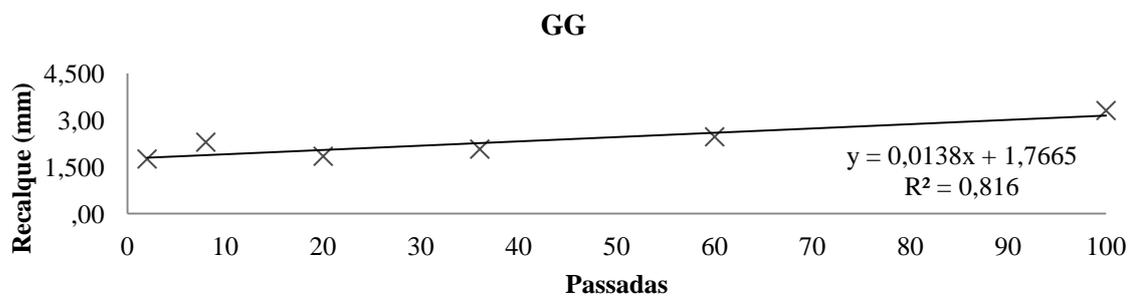


FIGURA 34. Recalque em função do número de passadas, com geogrelha.

Ao analisar as Figura 31, 32, 33 e 34 observa-se que o recalque pode ser considerado aproximadamente linear para todas as situações (com e sem reforço), principalmente a partir de 20 passadas do rodado, portanto a partir das equações do item 3.13 pode-se estimar o valor do módulo de deformabilidade do sistema (Tabela 19), bem como, as tensões necessárias para que a situação com reforço apresente o mesmo recalque sem reforço (Tabela 20).

TABELA 19. Módulo de deformabilidade – D (kPa) estimado.

Reforço	Passadas					
	2	8	20	36	60	100
SG	1191,79	1373,36	731,99	811,13	721,59	581,10
GNT	2030,99	1397,31	1090,92	1096,98	1144,67	1209,73
GT	2061,77	3597,53	1185,00	1080,30	1539,91	1011,92
GG	1457,82	1115,22	1390,01	1235,06	1036,93	772,50

Ao analisar a Tabela 18 observa-se que ao utilizar o geossintético como reforço para um subleito com baixa capacidade de suporte de carga obtém-se um módulo de deformabilidade maior do que o sem reforço. A Tabela 20 apresenta os resultados de tensão para que todas as situações (SG, GNT, GG e GG) apresentem o mesmo valor de recalque para sem geossintético.

TABELA 20. Tensão estimada (kPa).

Reforço	Passadas					
	2	8	20	36	60	100
	Deformações normais (%)					
	0,0214	0,0186	0,0349	0,0350	0,0354	0,0440
SG	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56
GNT	43,56	26,01	38,09	34,57	40,55	53,21
GT	44,22	66,95	41,38	34,04	54,55	44,51
GG	31,27	20,76	48,54	38,92	36,73	33,98

Ao analisar a Tabela 19 verifica-se que é necessária uma tensão maior para obter um mesmo recalque do sistema não reforçado. Observe que em média o ganho de rigidez é de 1,4 vezes para o sistema com geotêxtil não tecido, 1,9 vezes para o sistema com geotêxtil tecido e 1,4 vezes para o sistema com geogrelha.

5. CONCLUSÕES

Considerando os resultados apresentados e as análises realizadas pode-se concluir que:

1. O resultado do presente estudo mostra a viabilidade técnica do uso do simulador de tráfego para reproduzir a situação real considerando o efeito escala;
2. O melhor resultado foi obtido para o solo da estrada três com o geotêxtil tecido e o não tecido, alcançando razões de benefício de tráfego - RBT média de 2,71 e 2,23, respectivamente, enquanto que para as outras situações foi em média RBT = 1,43;
3. O ensaio de CBR não se apresentou efetivo para simular o efeito da inclusão do reforço, nas condições avaliadas;
4. Foi verificado que o reforço com geossintéticos é mais efetivo para grandes deslocamentos do aterro;
5. Para vias com baixo fluxo de veículo (pequena trafegabilidade) e pequenas deformações a efetividade do reforço é menor;
6. O CBR não apresenta condições para ancorar o geossintético, por isso ele não é indicado para testar o uso de reforços em solos.
7. As deformações vão diminuindo com o aumento das passadas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após análises e discussão dos resultados podem-se propor maiores investigações no que se refere:

1. Variar a altura do geossintéticos acima da camada de subleito;
2. Variar a rigidez do reforço para cada profundidade acima do subleito;
3. Registrar as tensões que atingem o reforço;
4. Registrar o deslocamento do reforço;
5. Variar o tipo de solo do subleito e da base da estrada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRONEGÓCIO É RESPONSÁVEL POR AMPLIAÇÃO DE FRONTEIRAS DA MAPITOBA. Globo rural, Rio de Janeiro: Rede Globo, 14 de abril de 2013. Programa de TV. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2013/04/agronegocio-e-responsavel-por-ampliacao-de-fronteiras-da-mapitoba.html>> Acesso em: 26 jun. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 1984a. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Solo – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984b. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984c. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984d. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte califórnia - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12553**: Geossintético – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 3p.

ASTM - **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 5340 – 93**, Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys, 1997. 577p.

BAESSO, D.P.; GONÇALVES, F.L.R. **Estradas Rurais: Técnicas Adequadas de Manutenção**. Governo do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2003. 204p.

BASU, G.; ROY, A.N.; BHATTACHARYYA, S.K.; GHOSH, S.K. Construction of unpaved rural road using jute synthetic blended woven geotextile: a case study. **Geotextiles and Geomembranes**, v.27, n.6, p.506-512, 2009.

BATHURST, R.J. Funções e Classificações do Geossintéticos. **IGS** (International Geosynthetic Society). Disponível em: <<http://www.geosyntheticssociety.org/Resources.aspx>>. Acesso em: 27 de mar. 2013.

BHANDARI, A.; HAN, J. Investigation of geotextile-soil interaction under a cyclic vertical load using the discrete element method. **Geotextiles and Geomembranes**, v.28, n.1, p.33-43, 2010.

BUENO, B.S. **The behavior of thin walled pipes in trenches**. 1987. 325p. (Ph.D. in Civil Engineering) – Leeds University, Leeds.

Confederação Nacional de transportes - CNT. **BOLETIM ESTATISTICO JANEIRO 2011**. Rio de Janeiro 2011. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%20C3%ADstico/BoletimEstatistico.Jan.2011.pdf>>. Acesso em: 07 maio. 2012.

CUNHA, M.G. **Estudo do comportamento de estradas vicinais reforçadas com geotextil através de modelos físicos**. 1991. 130p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 1991.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 009/2003 PRO: Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento**. Rio de Janeiro: DNIT, 2003. 6p.

DNIT. **Manual de Pavimentação**. Departamento Nacional de Transportes. Diretoria de Planejamento e pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 3.ed., 2006. 274p.

DOBSON, E.F; POSTILL, L.J. Classification of Unpaved Roads in Ontario. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE, 1983, Washington. **Transportation Research record**, Washington, EUA, n.898, p.36-46, 1983.

EATON, R.A.; GERARD, S.; CATE, D.W. **Rating Unsurfaced Roads** – A field manual for measuring maintenance problems. Special Report 87-15. Cold Regions Research & Engineering Laboratory, US Army Corps of Engineers, 1987a. 35p.

EATON, R.A.; GERARD, S.; DATTILO, R.S. **A method for rating unsurfaced roads**. Transportation Research Record 1106, v.02, p. 34-42, 1987b.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 1997. 212p.

FERREIRA, D.F. **Sisvar - Sistema de análise de variância**. Versão 5.3. Lavras: UFLA, 2007.

GIROUD, J.P., AH-LINE, C., BONAPARTE, R. **Design of Unpaved Roads and Trafficked Areas With Geogrids**. Proceedings of the Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering, London, U.K. p.116-127, 1984.

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

GRIMAUX, J-P. & HIERNAUX, R. **Utilisation de L'Ornière Type LPC**, in Liaison Laboratoire Ponts et Chaussées, spécial Bull, 1977. 165p.

HAN, J.; ZHANG, Y.; PARSONS, R.L. Quantifying the Influence of Geosynthetics on Performance of Reinforced Granular Bases in Laboratory. **Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA**, v.42, n.1, p.1-10, 2011.

HUFENUS, R.; RUEEGGER, R.; BANJAC, R.; PIERRE MAYOR, P.; SARAH M. SPRINGMANC, S.M.; ROLF BRONNIMANND, R. Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade. **Geotextiles and Geomembranes**, v.24, p.21-37, 2006.

JEWELL, R. A. Soil reinforcement with geotextiles. London: Thomas Telford, 1996. 332p.

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

KOERNER, R.M. **Designing with geosynthetics**. 5 ed. Pearson Prentice Hall, New Jersey. 2005. 816p.

LOVE, A.E.H. The stress produced in a semi-infinite solid by pressure on part of the boundary. **Philosophical Transaction of the Royal Society Serie A**, Londres, v.228, p.377-420, 1929.

LOVE, J.T.; BURD, H.J.; MILLIGAN, G.W.E.; HOULSBY, G.T. Analytical and model studies of reinforcement of a granular layer on a soft clay subgrade. **Canadian Geotechnical Journal**, v.24, n.4, p.611-622, 1987.

MACCAFERRI. Critérios gerais para projeto, especificação e aplicação de geossintéticos: **Manual Técnico**. São Paulo: Maccaferri do Brasil, 2009. 321p.

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**. 2003. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

ODA, S. **Caracterização de uma Rede Municipal de Estradas Não-Pavimentadas**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, 1995. 176p.

PALMEIRA, E.M. **Utilização de geotêxteis como reforço de aterros sobre solos moles**. 1980. 282p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 1980.

PALMERIA, E.M. Soil-Geosynthetic Interaction: Modelling and Analysis. **Mercer Lecture**, 2007-2008. 2007. 17p.

PERKINS, S.W., ISMEIK, M. A. Synthesis and Evaluation of Geosynthetic-Reinforced Base Layers in Flexible Pavements: Part 1. **Geosynthetics International**, v.4, n.6, p.549–604, 1997.

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

RSMS. Road surface management system. Technology transfer Center the University of New Hampshire, Department of Civil Engineering, Durham, New Hampshire, 1991.

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, 1988. 125p.

SUBAIDA, E.A.; CHANDRAKARAN, S.; SANKAR, N. Laboratory performance of unpaved roads reinforced with woven coir geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v.27, p.204-210, 2009.

ZHOU, H.; WEN, X. Model studies on geogrid or geocell reinforced sand cushion on soft soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v.26, n.3, p.231-238, 2008.

WASTERLUND, I. Enviromentally soft machines. **Small Scale Forestry**, v.1, p.13-15, 1994.

YODER, E.J. & WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design.** John Wiley & Sons, Inc. New York , Second Edition, 1975.

Anexo A

Ensaio Simulador Linear de Tráfego

Método Fotográfico

Planilha para Cálculos das Deformações na Superfície de Amostras de Solo

Leitura Amostra 03
Cálculo Lorena Oliveira

Foto 0.0

Coord. Globais dos Pontos de Referência:

Ponto	X	Y
GR1	0	0
GR2	185	0
GR3	185	100
GR4	0	100

Coord. Locais dos Pontos de Referência:

Ponto	x	y
GR1	16.6115	37.5783
GR2	16.857	37.5698
GR3	16.8614	37.7026
GR4	16.6146	37.7123

Coord. Locais dos Pontos de Medição:

Ponto	x	y	Cam
a	16.67790	37.65630	
b	16.69730	37.65580	
c	16.71030	37.65630	
d	16.72370	37.65450	
e	16.75030	37.65470	
f	16.75850	37.65190	
g	16.77150	37.65280	
h	16.78380	37.65200	

Cálculo das constantes do sistema

	X =	A	+B	x	+C	y	+D	xy
1)	0.000000	A	+B	16.611500	+C	37.578300	+D	624.231930
2)	185.000000	A	+B	16.857000	+C	37.569800	+D	633.314119
3)	185.000000	A	+B	16.861400	+C	37.702600	+D	635.718620
4)	0.000000	A	+B	16.614600	+C	37.712300	+D	626.574780

A = -30909.264560
B = 1899.892932
C = 489.796101
D = -30.527935

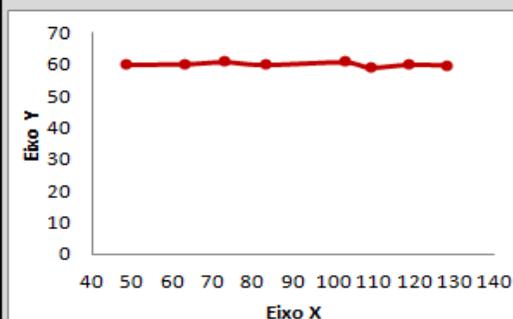
	Y =	A'	+B'	x	+C'	y	+D'	xy
1)	0.000000	A'	+B'	16.611500	+C'	37.578300	+D'	624.231930
2)	0.000000	A'	+B'	16.857000	+C'	37.569800	+D'	633.314119
3)	100.000000	A'	+B'	16.861400	+C'	37.702600	+D'	635.718620
4)	100.000000	A'	+B'	16.614600	+C'	37.712300	+D'	626.574780

A' = -12033.990934
B' = -962.213935
C' = 308.727626
D' = 26.298476

Coord. globais dos Ptos de Med.

Ponto	X	Y
a	48.4706	60.0207
b	63.0369	60.1918
c	72.7811	60.9308
d	82.8728	59.9599
e	102.8286	60.8556
f	109.0427	58.9872
g	118.7787	60.0256
h	128.0270	59.7699

Gráfico das Coord. Globais dos Ptos de Medição



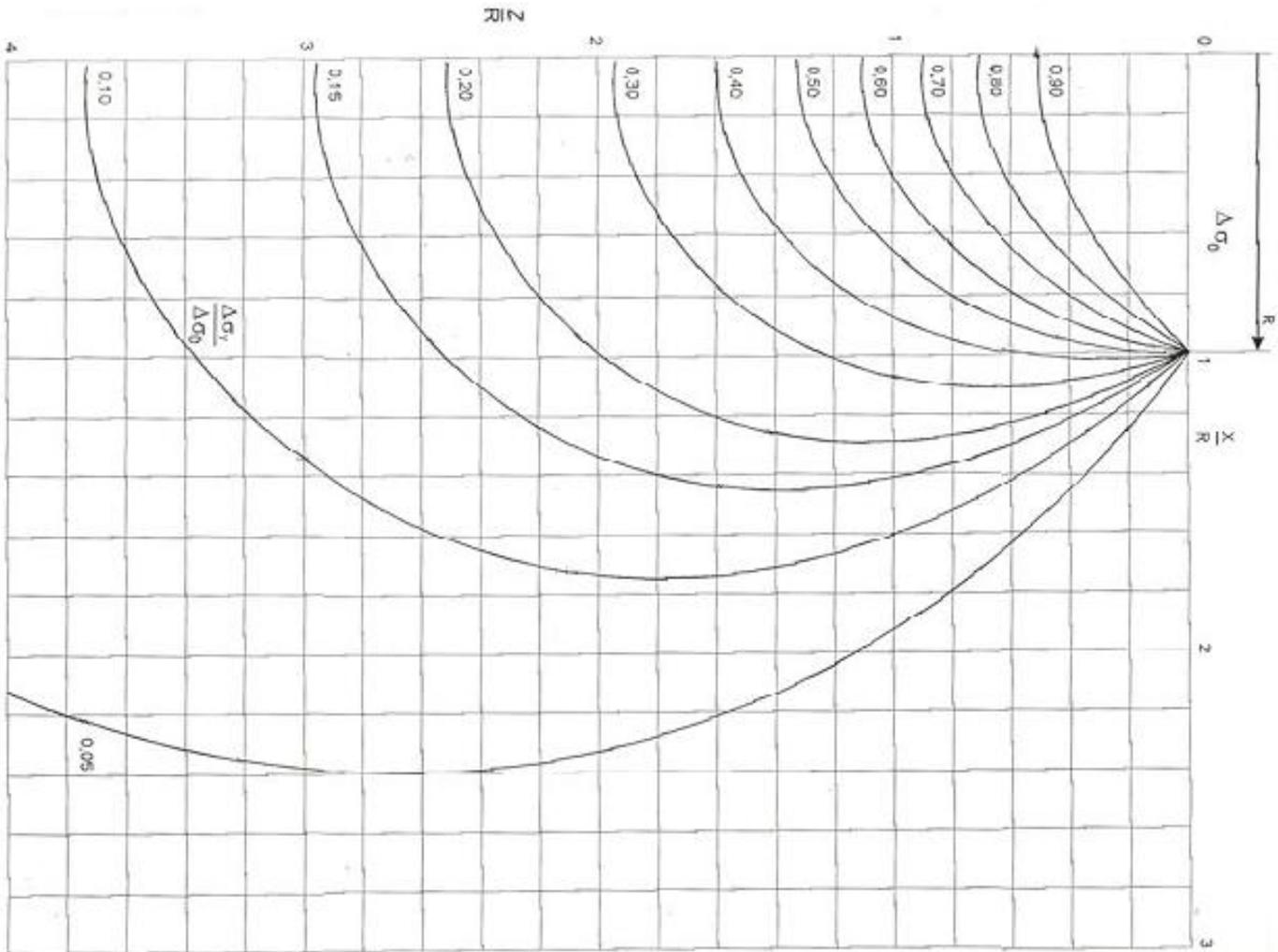
Conferência das equações do sistema:

Ponto	X	Y
GR1	0.00	0.00
GR2	185.00	0.00
GR3	185.00	100.00
GR4	0.00	100.00

...continua...

Foto		1.0					
Coord. Globais dos Pontos de Referência:		Cálculo das constantes do sistema				Coord. globais dos Ptos de Med.	
Ponto	X	Y	$X = A + Bx + Cx + Dy + xy$		Ponto	X	Y
GR1	0	0	1) 0.000000 A +B 16.611500 +C 37.578300 +D 624.231930		a	49.1401	60.2702
GR2	185	0	2) 185.000000 A +B 16.857000 +C 37.569800 +D 633.314119		b	64.3494	56.0485
GR3	185	100	3) 185.000000 A +B 16.861400 +C 37.702600 +D 635.718620		c	79.1982	54.2787
GR4	0	100	4) 0.000000 A +B 16.614600 +C 37.712300 +D 626.574780		d	88.8249	53.9613
Coord. Locais dos Pontos de Referência:					e	99.6340	54.3619
Ponto	x	y			f	109.4782	54.3517
GR1	16.6115	37.5783		A = -30909.264560	g	120.1724	56.0991
GR2	16.857	37.5698		B = 1899.892932	h	129.4458	57.5698
GR3	16.8614	37.7026		C = 489.796101	Gráfico das Coord. Globais dos Ptos de Medição		
GR4	16.6146	37.7123		D = -30.527935			
Coord. Locais dos Pontos de Medição:							
Ponto	x	y	Cam	$Y = A' + B'x + C'x + D'y + xy$			
a	16.67880	37.65660		1) 0.000000 A' +B' 16.611500 +C' 37.578300 +D' 624.231930			
b	16.69890	37.65020		2) 0.000000 A' +B' 16.857000 +C' 37.569800 +D' 633.314119			
c	16.71860	37.64710		3) 100.000000 A' +B' 16.861400 +C' 37.702600 +D' 635.718620			
d	16.73140	37.64620		4) 100.000000 A' +B' 16.614600 +C' 37.712300 +D' 626.574780			
e	16.74580	37.64620			A' = -12033.990934		
f	16.75890	37.64570			B' = -962.213935		
g	16.77320	37.64750			C' = 308.727626		
h	16.78560	37.64900			D' = 26.298476		
				Conferência das equações do sistema:			
Pto	X	Y					
GR1	0.00	0.00					
GR2	185.00	0.00					
GR3	185.00	100.00					
GR4	0.00	100.00					

Anexo B



Tensões verticais induzidas por carga uniformemente distribuída em anel circular