



Lidia Pacheco Miranda

**Análise do comportamento mecânico de pavimento
reforçado com geossintético sob carregamento cíclico em
modelo físico de verdadeira grandeza**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Michéle Dal Toé Casagrande

Co-orientadora: Profa. Laura Maria Goretti da Motta

Rio de Janeiro
Março de 2013



Lidia Pacheco Miranda

**Análise do comportamento mecânico de pavimento
reforçado com geossintético sob carregamento cíclico em
modelo físico de verdadeira grandeza**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil do Centro
Técnico Científico da PUC-Rio Aprovada pela
Comissão Examinadora abaixo assinada.

Profa. Michéle Dal Toé Casagrande

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Profa. Laura Maria Goretti da Motta

Co-orientadora

Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Alexandre Benetti Parreira

Universidade de São Paulo/EESC

Prof. Ben-Hur de Albuquerque e Silva

Instituto Militar de Engenharia (IME)/RJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de Março de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e da orientadora.

Lidia Pacheco Miranda

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade San Antonio Abad del Cusco (Cusco–Perú) em 2004. Trabalhou em projetos e obras no Perú no período 2005-2010. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2011, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental com enfoque na linha de pavimentos.

Ficha Catalográfica

Miranda, Lidia Pacheco

Análise do comportamento mecânico de pavimento reforçado com geossintético sob carregamento cíclico em modelo físico de verdadeira grandeza / Lidia Pacheco Miranda ; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande ; co-orientadora: Laura Maria Goretti da Motta. – 2013.

199 f. il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Geogrelha. 3. Carregamento cíclico. 4. Pavimento reforçado. 5. Modelo físico. 6. Verdadeira grandeza. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Motta, Laura Maria Goretti da. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Dedico este trabalho a Deus,
criador e guia de nossas vidas.

Também aos meus pais e a minha família
toda, pelo amor, apoio e por ser parte da minha vida.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por ter me permitido viver essa nova experiência. Como sempre com você tudo é possível. Obrigada Pai.

Às minhas queridas orientadoras Laura Motta e Michéle Cassagrande, obrigada pela oportunidade de trabalhar com vocês, sem dúvida alguma foi a melhor decisão eleger duas pessoas admiráveis que me ensinaram muito durante a etapa da Dissertação. Obrigada pelo apoio e compressão.

Aos professores da Engenharia Civil da PUC-Rio pelas aulas ditadas e os conhecimentos transmitidos durante estes dois anos de mestrado.

A todos os amigos e colegas do Laboratório de Geotecnia da COPPE que foram parte deste trabalho, Mariluce, Álvaro Dêlle, Marcus, Ricardo Gil, Helcio, Bororó, Sergio, Gloria, Maiara, Juliana, Mauro, Carlinho, Luizão, Roberto, Jaelson, Verônica, Ana Souza, Mario, Francesco, Gustavo, Alice, Márcia, Salviano, Eduardo.

Aos grandes amigos Sandra Oda, Thiago, Washington, Allan, Leandro, Rodrigo, Vera, Cristina, o trabalho foi pesado, mas sem vocês não seria sido possível.

Aos meus queridos pais, Ubaldina e José Augusto, que confiaram e entregaram sempre tudo por mim, sem vocês não teria chegado onde cheguei.

Aos meus tios Rômulo e Julia, que são como os meus segundos pais, aos meus irmãos Yesica, Dante, Patricia, Rômulo Enrique e Julito, uma família assim, é o melhor presente que pude ter na vida.

A Angie e ao meu sobrinho querido Emanuel Alejandro.

Ao Alfredo, uma pessoa especial, que foi parte desta etapa da minha vida.

A todos meus amigos do Mestrado e Doutorado, especialmente a minha querida turma 2011-1, e também a Mirian, Ronald, Jorge, Marle, Ximena, Carlitos, pessoas admiráveis e inesquecíveis.

A meus queridos amigos Perlita Rosmery, Gary Gary, Paola, por todos os momentos especiais que vivemos durante este tempo. Obrigada pela amizade, apoio e confidencialidade.

Ao pessoal do laboratório do Instituto de Pesquisas Rodoviárias IPR do DNIT pelo apoio no ensaio do CBR.

Ao professor Antônio Carlos Rodrigues Guimarães do IME pelo empréstimo do equipamento LWD.

À empresa Huesker por ter cedido a geogrelha para o desenvolvimento deste estudo.

À Rita de Cássia, pelo apoio e informação brindada.

Aos Professores, Celso, Alexandre e Ben-Hur, pela valorada participação na banca examinadora.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Miranda, Lidia Pacheco; Casagrande, Michéle Dal Toé; Motta, Laura Maria Goretti. **Análise do comportamento mecânico de pavimento reforçado com geossintético sob carregamento cíclico em modelo físico de verdadeira grandeza.** Rio de Janeiro, 2013. 199 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A busca por soluções geotécnicas que aumentem a vida útil das estruturas e também possam economizar material natural levou ao desenvolvimento de produtos conhecidos como geossintéticos. Dentre as várias famílias de geossintéticos, foram criados elementos que funcionassem como reforço de base-subleito em pavimentos na condição de subleito muito deformável, denominadas geogrelhas. O presente trabalho teve o objetivo de analisar o comportamento mecânico de uma estrutura de pavimento reforçado com geogrelha, submetida à aplicação de carregamento cíclico e à variação de umidade do material do subleito. Foi utilizado para o desenvolvimento dos ensaios um modelo físico de verdadeira grandeza no qual foi construída a estrutura do pavimento composta de um subleito de 100 cm de espessura e uma camada de base de brita de 20 cm de espessura. Nesta estrutura analisou-se o efeito da inserção do geossintético como reforço de camada de base e a variação da umidade do subleito. As medidas fornecidas pelos transdutores de deslocamentos (LVDTs) foram os parâmetros de comparação entre a estrutura de pavimento com e sem reforço no decorrer dos ensaios. Os refletômetros no domínio do tempo (TDRs) monitoraram a variação da umidade do subleito. A comparação entre os deslocamentos da estrutura reforçada e não reforçada permitiu determinar a influência do reforço mostrando-se eficiente na redução dos deslocamentos superficiais verticais. A utilização de equipamentos portáteis para avaliar o comportamento mecânico do pavimento “*in situ*” mostraram ser uma ferramenta recomendável para estudos defletométricos de forma pontual no pavimento.

Palavras-chave

Geogrelha; carregamento cíclico; pavimento reforçado; modelo físico verdadeira grandeza.

Abstract

Miranda, Lidia Pacheco; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor); Motta, Laura Maria Goretti (Co-advisor). **Analysis of the mechanical behavior of Geosynthetic-Reinforced Pavement under cyclic loading in a true scale physical model.** Rio de Janeiro, 2013. 199 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The search for geotechnical solutions that increase the life time of structures and can also reduce the use of natural materials carried out to the development of products known as geosynthetic. Among the various families of geosynthetics, have been created elements which function as reinforcement of base-subgrade of pavements when the condition of the subgrade is very deformable, called geogrids. This study had the objective to analyze the mechanical behavior of a structure of geogrid reinforced pavement, submitted to the application of cyclic loading and variation in subgrade layer moisture. It was used for the development of tests a true scale physical model, in which was built a structure of pavement composed of a subgrade with 100 cm of thickness and a gravel layer of 20 cm of thickness. In this structure has been analyzed the effect of insertion of geogrid like base layer reinforcement and a variation in subgrade layer moisture. The measures provided by the displacement transducers (LVDTs) were the parameters of comparison between a structure of pavement with and without reinforcement during the tests. The Time Domain Reflectometry (TDR) monitored the variation of moisture from the subgrade. The comparison between the displacements of reinforced and unreinforced structure allowed determine the influence of reinforcement showing to be efficient to reduce superficial vertical displacements. The use of mobile devices to evaluate the mechanical behavior of the pavement "*in situ*" proved to be a tool recommended for punctual studies on pavements.

Keywords

Geogrid; cyclic loading; reinforced pavement; true scale physical model.

Sumário

1 Introdução	27
1.1. Justificativa	27
1.2. Objetivo	29
1.3. Estrutura do trabalho	30
2 Revisão Bibliográfica	32
2.1. Mecanismo de ruptura de pavimentos flexíveis	32
2.1.1. Deformação elástica – Ruptura por fadiga	33
2.1.2. Deformação plástica – Afundamento de trilha de roda	37
2.2. Avaliação Estrutural do Pavimento	41
2.3. Retroanálise de Módulos de Resiliência	52
2.4. Distribuição de Tensões e Deslocamentos em Pavimentos	57
2.5. Instrumentação em estruturas de Pavimentos	59
2.6. Utilização de Geossintéticos em Pavimento Flexível	62
2.6.1. Pesquisas desenvolvidas empregando geossintético como reforço de base	69
2.6.2. Efeitos da geogrelha dentro da estrutura de pavimentos flexíveis	79
2.7. O fenômeno da capilaridade em pavimentos	83
3 Materiais e Métodos	86
3.1. Considerações iniciais	86
3.2. Materiais Empregados	87
3.2.1. Solo Fino	87
3.2.2. Brita	97
3.2.3. Elemento de reforço da base	104
3.3. Ensaio de Carregamento Cíclico em modelo físico de Grandes Dimensões	107
3.3.1. Tanque-Teste de Pavimentos	108

3.3.2. Estrutura do Pavimento Experimental no Tanque - Teste	109
3.3.3. Sistema de umedecimento e drenagem do tanque	110
3.3.4. Sistema de carregamento cíclico	111
3.3.5. Sistema de instrumentação	114
3.3.5.1. Células de Carga	115
3.3.5.2. LVDT (do inglês – “Linear Variable Differential Transformer”)	117
3.3.5.3. Refletômetros no domínio do tempo (TDR)	121
3.3.5.4. Tensiômetros de alta capacidade (TAC)	124
3.3.6. Sistema de aquisição de dados	127
3.4. Programa dos ensaios realizados no modelo físico “Tanque-Teste”	129
3.4.1. Avaliação estrutural, compactação e controle dos materiais	130
3.4.1.1. Avaliação estrutural	130
3.4.1.2. Compactação e controle dos materiais	134
3.5. Medição indireta da sucção do solo através da curva característica do solo (ou curva de retenção de água)	138
3.5.1. Método do Papel Filtro	139
3.5.2. Obtenção da curva característica com o uso do Equipamento SWC-150	145
4 Apresentação e análise de Resultados	149
4.1. Considerações iniciais	149
4.2. Ensaio de carregamento cíclico	149
4.2.1. Deslocamentos verticais superficiais sobre o subleito compactado na umidade ótima	150
4.2.1.1. Ensaio sem a utilização de geogrelha	150
4.2.1.2. Ensaio com a utilização de geogrelha na interface subleito-base	153
4.2.2. Deslocamentos verticais superficiais após a inundação do subleito	157
4.2.2.1. Ensaio com a utilização de geogrelha na interface subleito-base	159
4.2.2.2. Ensaio sem a utilização de geogrelha	161

4.2.2.3. Análise comparativa dos deslocamentos verticais elásticos para o subleito inundado	165
4.2.2.4. Análise comparativa dos deslocamentos verticais plásticos para o subleito inundado	166
4.3. Análises Complementares	168
4.3.1. Análise das deflexões obtidas pelo LWD (Light Weight Deflectometer)	168
4.3.1.1. Ensaio sobre a estrutura reforçada na condição do subleito compactado na umidade ótima	169
4.3.1.2. Ensaio sobre a estrutura reforçada na condição do subleito inundado	170
4.3.1.3. Ensaio sobre a estrutura não reforçada na condição do subleito inundado	172
4.3.1.4. Análise comparativa dos ensaios realizados com o Light Weight Deflectometer (LWD)	173
4.3.2. Análise das leituras das células de carga	176
4.3.3. Variação do Módulo de Resiliência com a umidade	179
4.3.4. Análise das leituras realizadas pelos tensiômetros de alta capacidade (TAC)	180
4.3.5. Módulos de resiliência obtidos a partir da retroanálise das bacias de deflexão	185
4.3.6. Relação entre a abertura da malha da geogrelha e o tamanho médio dos grãos da brita.	187
 5 Considerações Finais	 189
5.1. Conclusões	189
5.2. Recomendações e sugestões para trabalhos futuros	191
 6 Referências Bibliográficas	 192
 ANEXO	 198

Lista de Figuras

Figura 2.1- Tensões numa estrutura de pavimento (Medina e Motta, 2005)	33
Figura 2.2 – Tipos mais comuns de trincas que se apresentam no pavimento (Bernucci <i>et al.</i> , 2008).....	36
Figura 2.3- Deformações num pavimento flexível (Reis, 2009).....	38
Figura 2.4 - Exemplo de deformação permanente em pavimento asfáltico (Franco, 2007)	39
Figura 2.5– Afundamentos de trilha de roda segundo os modos 0, 1, 2 e 3 (Malysz, 2009).	40
Figura 2.6 – Rotação das tensões principais provocadas pela ação da carga de roda (Medina e Motta, 2005).....	45
Figura 2.7 - Equipamento GeoGauge H-4140 da Humbolt no local do presente estudo sobre a base imprimada.	47
Figura 2.8 – Esquema de um deflectômetro de impacto (Fonte Bernucci <i>et al.</i> , 2008)	49
Figura 2.9– Equipamento Light Weight Deflectometer (LWD) do IME, usado neste estudo.	50
Figura 2.10 – Visão geral do equipamento LWD (Fonte: Reis e Guimarães, 2012)	52
Figura 2.11 – Esquema dos dados necessários para a retroanálise de pavimento (Fonte: Nóbrega, 2003)	53
Figura 2.12- Distribuição de tensões (Burmister, 1945 <i>apud</i> Kakuda, 2010)	59
Figura 2.13 - Tipos de Geotêxteis utilizados em obras geotécnicas. (a) Geotêxtil não tecido (b) Geotêxtil tecido (c) Geotêxtil tricortado (CTG - ABINT, 2001).....	63
Figura 2.14 - Geogrelha flexível, utilizada para reforço de aterros/muros de contenção (CTG – ABINT, 2001)	64
Figura 2.15 – Proposta de modelo de transferência	

de tensões de cisalhamento na interface base-geossintético. (Fonte: Perkins 1999 <i>apud</i> Antunes, 2008).....	65
Figura 2.16 – Esquema da interação do reforço (geogrelha) com o material de base (Antunes, 2008).	66
Figura 2.17 – Efeito que produz o geossintético numa via não pavimentada (ANAPRE, s/d).	68
Figura 2.18 – Aplicação de geossintéticos como material de reforço em pavimentos.	69
Figura 2.19– Diagrama esquemático de equipamento de ensaio (Perkins <i>et al</i> , 1999)	70
Figura 2.20– Equipamento de ensaio (Demerchant <i>et al.</i> , 2002)	71
Figura 2.21– Diagrama esquemático de caixa de teste e configuração do carregamento (Leng e Garb, 2002).....	72
Figura 2.22– Vista em corte do LSME (Kim <i>et al.</i> , 2005)	72
Figura 2.23– Teste de pavimento em laboratório (Tingle e Jersey, 2005).....	73
Figura 2.24– Esquema geral do equipamento de carregamento cíclico de grande escala (Antunes, 2008).	76
Figura 2.25 – Caixa de ensaios utilizada por Kakuda, 2010.	77
Figura 2.26– Esquema geral do equipamento de grande escala (Góngora, 2011).	78
Figura 2.27 – Resultados de ensaios triaxiais mostrando a influência da posição do geotêxtil: a) 21kPa: b) 210kPa (Koerner 1994 <i>apud</i> Antunes, 2008).	81
Figura 3.1 – Localização da jazida de onde foi coletado o material utilizado no subleito do experimento desta pesquisa.....	88
Figura 3.2 – Armazenamento e aparência física do material utilizado como subleito no experimento deste estudo.	89
Figura 3.3 – Curva Granulométrica do material utilizado como subleito no experimento deste estudo.	90
Figura 3.4 – Curva de compactação do solo utilizado como subleito no experimento deste estudo.	91
Figura 3.5 – Gráfico de classificação MCT (Nogami & Villibor, 1995) com a classificação do solo utilizado como	

subleito no experimento deste estudo.....	93
Figura 3.6 – Esquema do permeâmetro de carga variável.....	95
Figura 3.7 – Resultado do ensaio triaxial cíclico de módulo de resiliência do material empregado como subleito.....	96
Figura 3.8 – Armazenamento e aparência física do material utilizado como base no experimento deste estudo (brita)	98
Figura 3.9 – Curva Granulométrica do material utilizado como base nesta pesquisa.....	100
Figura 3.10 - Curva granulométrica da brita deste estudo enquadrada na Faixa A.	101
Figura 3.11 - Curva de compactação do solo utilizado como base neste experimento.	102
Figura 3.12 – Resultado do ensaio triaxial dinâmico de Módulo de Resiliência do material empregado como base neste estudo.....	103
Figura 3.13 – Geogrelha Fornit J600 (30/30) utilizada neste experimento.....	105
Figura 3.14 – Ancoragem da geogrelha utilizando grampos numa lateral do modelo físico (tanque-teste) usado nesta pesquisa.	106
Figura 3.15 – Ancoragem da geogrelha no interior da camada granular na outra lateral do modelo físico (tanque-teste) usado nesta pesquisa.	107
Figura 3.16 – Prédio onde está localizado o “Tanque-Teste” da COPPE/UFRJ	108
Figura 3.17 – Planta baixa do tanque teste de pavimentos (sem escala) da COPPE/UFRJ (Bastos, 2010)	109
Figura 3.18 – Esquema das camadas do pavimento experimental desta pesquisa.....	110
Figura 3.19 – Medidor de nível d’água e tubulação para abastecimento de água no interior do tanque usado neste experimento.....	111
Figura 3.20 – Montagem do lastro de brita de (1”) neste experimento.....	111

Figura 3.21 – (a) Sistema de vigas de reação, (b) Cilindro pneumático de diâmetro de 200 mm e placa circular de 25,05 cm de diâmetro deste experimento.	112
Figura 3.22 – Calibração do cilindro utilizado na aplicação do carregamento na calibração do atuador de carga usado no experimento.	113
Figura 3.23 – Distribuição da instrumentação de aquisição de dados utilizada nesta pesquisa	115
Figura 3.24 – (a) Células de carga utilizadas (b) Sistema de aquisição de dados para o monitoramento de aplicação de carga. (c) Instalação a cada 30,0 cm no topo do subleito (d) Instalação a 15,0 cm entre células no topo da base.	117
Figura 3.25 – Suporte inicial dos LVDTs preso ao teto do laboratório no tanque-teste.....	118
Figura 3.26 – Fissuras apresentadas no teto do laboratório.	119
Figura 3.27 – Novo sistema de suporte dos LVDTs no tanque-teste	119
Figura 3.28 – Gráficos das calibrações dos LVDTs utilizados nesta pesquisa.	120
Figura 3.29 – Conjunto para medição de umidade no solo. (a) Sonda TRIME-P2Z, (b) Receptor de sinal TRIME-ES e (c) fonte de alimentação para o TDR.	121
Figura 3.30 – Distribuição dos TDRs ao longo da profundidade no interior da estrutura do pavimento.....	122
Figura 3.31 – Fluxograma para a calibração das sondas TDR (Silva, 2009).....	123
Figura 3.32 – Etapas de preparação do corpo de prova para a realização das leituras de umidade para a respectiva calibração com ambos materiais.....	123
Figura 3.33 – Equipamento do Tensiômetro de alta capacidade (corpo acrílico, pedra cerâmica porosa de 15 bar e transdutor K1 da Ashcroft®) montado na COPPE	124
Figura 3.34 – Processo de calibração do equipamento TAC. (a) Saturação da pedra porosa através de vácuo.	

(b) Pedras porosas colocadas em água deareada. (c) Montagem do corpo acrílico. (d) Tensiômetros submersos em água deareada.	125
Figura 3.35 – Detalhes da aplicação da lama bentonítica na ponta do tensiômetro para garantia de contato pedra porosa – solo.	126
Figura 3.36 – Distribuição dos tensiômetros ao longo do interior da estrutura do pavimento.	127
Figura 3.37 – Tela principal do programa SicTri utilizado para o ensaio de carga repetida, aplicado também no experimento na estrutura do pavimento.	128
Figura 3.38 – Tela principal do programa DefTan utilizados para o registro das deformações do pavimento durante os experimentos desta pesquisa.	128
Figura 3.39 – Estrutura do pavimento para as quatro etapas de ensaios no “Tanque-Teste”. (a) Estrutura compactada na umidade ótima. (b) Estrutura compactada na umidade ótima com a inserção da geogrelha na interface subleito-base. (c) Estrutura reforçada com o subleito inundado. (d) Estrutura não reforçada com o subleito inundado.	130
Figura 3.40 – Utilização do Geogauge para a avaliação do modulo de rigidez das camadas do pavimento deste estudo.	131
Figura 3.41 – Uso do equipamento LWD no desenvolvimento das deformações elásticas da presente pesquisa.	133
Figura 3.42 – Resultados de deslocamentos obtidos pelo LWD no acompanhamento do carregamento cíclico.	133
Figura 3.43 – Betoneira de 400 litros utilizada para homogeneização da umidade do material na umidade ótima para construção do pavimento no tanque-teste.	134
Figura 3.44 – (a) Distribuição do material, (b) Compactação do material utilizado como subleito no tanque teste (esquema do método de compactação), (c) Controle da compactação através do emprego do frasco de areia.	137
Figura 3.45 – Superfície do pavimento no tanque-teste	

após a imprimação	137
Figura 3.46 – (a) Inserção da geogrelha na interface do subleito-base. (b) Retirada da geogrelha ao final da etapa 3.	138
Figura 3.47 – Papel Filtro tipo Whatman, utilizado para obter os valores de sucção.	140
Figura 3.48 – Metodologia seguida para obtenção de valores de sucção através da técnica do papel filtro nesta pesquisa.	143
Figura 3.49 – Curvas Características traçadas conforme a técnica do papel filtro para os materiais utilizados nesta pesquisa.	144
Figura 3.50 – Valores de sucção ao longo do perfil do pavimento estudado para a condição do subleito compactado na umidade ótima.	144
Figura 3.51 – Valores de sucção ao longo do perfil do pavimento estudado para a condição do subleito inundado.	145
Figura 3.52 – Equipamento de determinação da curva característica de Fredlund usado nesta pesquisa.	146
Figura 3.53 – (a) Montagem da pedra porosa e do corpo de prova. (b) Colocação da câmara de pressão. (c) Equipamento montado para o início do ensaio de curva característica.....	147
Figura 3.54 – Curva característica (ramo secagem) para o subleito através do equipamento SWC-150 do Fredlund.	148
Figura 4.1 – Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais elásticos no primeiro ensaio.....	151
Figura 4.2 - Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais plásticos no primeiro ensaio.....	152
Figura 4.3 - Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais elásticos no segundo ensaio.	153
Figura 4.4 – Bacia de deslocamentos verticais em função do número de ciclos de carga – ensaio reforçado com geogrelha.	154
Figura 4.5 - Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais plásticos no segundo ensaio reforçado com geogrelha.	155
Figura 4.6 – Valores de umidade nas camadas do subleito na umidade ótima e após a sua inundação.....	158
Figura 4.7 – Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais	

elásticos no terceiro ensaio desta pesquisa	159
Figura 4.8 – Bacia de deslocamentos verticais em função do número de ciclos de carga – ensaio reforçado com geogrelha.	160
Figura 4.9 – Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais plásticos no terceiro ensaio – reforço e inundação do subleito.	161
Figura 4.10 - Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais elásticos no quarto ensaio – sem reforço e subleito inundado.	162
Figura 4.11 – Bacia de deslocamentos verticais em função do número de ciclos de carga – ensaio não reforçado.....	163
Figura 4.12 – Desenvolvimento dos deslocamentos superficiais plásticos no quarto ensaio –sem reforço mas subleito inundado.	164
Figura 4.13 – Deslocamento elástico em função do número de ciclos de carga dos ensaios com e sem geogrelha, após inundação do subleito.	165
Figura 4.14 – Bacia de deflexão após 35.000 ciclos de carga para estruturas sem e com reforço e subleito inundado.....	166
Figura 4.15 - Deslocamento plástico em função do número de ciclos de carga após 35.000 ciclos de carga para estruturas com e sem geogrelha após inundação do subleito.	167
Figura 4.16 – Esquema em planta, da superfície do pavimento, no tanque dos pontos para realização de ensaios com o LWD.....	168
Figura 4.17 – Resultados obtidos pelo programa ZFG do LWD para a estrutura do pavimento reforçada na condição do subleito na umidade ótima.....	169
Figura 4.18 – Resultados do LWD obtidos pelo programa ZFG do LWD para a estrutura do pavimento reforçada - subleito inundado.....	171
Figura 4.19 - Resultados obtidos pelo programa ZFG do LWD para a estrutura do pavimento não reforçada - subleito inundado.	172
Figura 4.20 – Instalação das células de carga no pavimento estudado.....	176
Figura 4.21 – Exemplo de pulsos de carga medidos pelas células instaladas no topo da base e do subleito para o pavimento não reforçado com o subleito compactado na umidade ótima.	177

Figura 4.22 – Pulsos de carga registrados pela célula (C-105) onde indica que sua capacidade nominal foi superada.	178
Figura 4.23 - Pulsos de carga medidos pelas células instaladas no topo da base e do subleito para o pavimento reforçado com o subleito compactado na unidade ótima.	178
Figura 4.24 – Gráfico do M_R vs a Tensão Vertical Cíclica na estrutura do pavimento reforçada para os casos do subleito compactado na umidade ótima e inundado.	180

Lista de Tabelas

Tabela 2.1– Características técnicas do equipamento GeoGauge H - 4140 da Humbolt (Fonte: Silva, 2009)	48
Tabela 2.2 – Alturas capilares e materiais comumente empregados em obras de terra (Fernandes, 2007)	85
Tabela 3.1 – Métodos de ensaios utilizados para avaliar o solo empregado no subleito no experimento deste estudo.	89
Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de caracterização do material utilizado como subleito no experimento deste estudo.	90
Tabela 3.3 – Resultados do ensaio da Metodologia MCT e a classificação do solo utilizado como subleito no experimento deste estudo	92
Tabela 3.4 – Resultados do ensaio de permeabilidade de carga variável do solo utilizado como subleito.	95
Tabela 3.5 – Valores dos parâmetros de regressão do modelo avaliado para o solo utilizado no subleito.	96
Tabela 3.6 – Análise físico-química, por ataque sulfúrico, do material do subleito	97
Tabela 3.7 – Propriedades Mecânicas do agregado da Pedreira (Fonte: Ramos, 2003)	98
Tabela 3.8 – Métodos de ensaios utilizados para avaliar o material empregado como base.	99
Tabela 3.9 - – Resultados dos ensaios de caracterização do material utilizado como base nesta pesquisa.	100
Tabela 3.10 – Valores dos parâmetros de regressão do modelo avaliado para a brita utilizada na base.	104
Tabela 3.11 – Especificações técnicas da geogrelha Fornit J600 (30/30)- Fonte: Huesker (Agosto-2010)	105
Tabela 3.12 – Resultados da calibração dos LVDTs utilizados.	120
Tabela 3.13 – Configuração dos ensaios realizados no “Tanque-Teste”	129
Tabela 3.14 – Resultados da análise do subleito	

com o equipamento GeoGauge.	132
Tabela 3.15 - Resultados da análise da camada de base com o equipamento GeoGauge.....	132
Tabela 3.16 – Características técnicas do soquete vibratório e da placa vibratória usadas neste experimento.	135
Tabela 4.1 - Características dos ensaios realizados por Antunes (2009) e Góngora (2011) com utilização de geossintéticos como material de reforço.....	156
Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de LWD na estrutura de pavimento reforçada com o subleito compactado na umidade ótima	170
Tabela 4.3 - Resultados do deflexão obtidos nos ensaios não destrutivos para a avaliação estrutural do pavimento reforçado - subleito compactado na umidade ótima.....	170
Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de LWD na estrutura de pavimento reforçada com o subleito inundado.....	171
Tabela 4.5 – Resultados de deflexão obtidos nos ensaios não destrutivos para a avaliação estrutural do pavimento reforçado no caso de subleito inundado.....	172
Tabela 4.6 – Resultados do ensaio LWD na estrutura de pavimento não reforçada - subleito inundado.....	173
Tabela 4.7 - Resultados de deflexão obtidos nos ensaios não destrutivos para a avaliação estrutural do pavimento não reforçado no caso do subleito inundado.....	173
Tabela 4.8 – Deslocamentos e módulos de resiliência obtidos com o ensaio do LWD neste estudo no tanque teste	174
Tabela 4.9 – Média e desvio padrão dos valores de deslocamentos obtidos nos ensaios com o LWD	175
Tabela 4.10 – Valores de sucção máximos registrados pelos TAC instalados na estrutura do pavimento (subleito compactado na umidade ótima).	182
Tabela 4.11 – Valores de sucção máximos registrados pelos TAC instalados na estrutura do pavimento (subleito inundado).	183

Tabela 4.12 – Valores de sucção máximos registrados nas duas condições de umidade do subleito.....	183
Tabela 4.13 – Valores de sucção e umidade apresentadas no trabalho de Silva (2009) para cada situação de umidade.	184
Tabela 4.14 - Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson típicos para os materiais que compõem um pavimento flexível.	186
Tabela 4.15 – Módulos de resiliência obtidos a partir da retroanálise das bacias de deflexões com reforço, para a condição de subleito compactado na umidade ótima.....	186
Tabela 4.16 - Módulos de resiliência obtidos a partir da retroanálise das bacias de deflexões, para a condição de subleito inundado	187

Lista de Abreviaturas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABINT	Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAPRE	Associação Nacional de Pisos e Revestimento de alto desempenho.
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATR	Afundamento de trilha de roda
CBR	California Bearing Ratio
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós- Graduação e Pesquisa de Engenharia
c.p.	Corpo de prova
CTG	Comitê Técnico Geotêxtil
DIRENG	Diretoria de Engenharia Aeronáutica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FHWA	Federal Highway Administration
FWD	Falling Weight Deflectometer
GPS	Global Positioning System
HRB	Highway Research Board
HWD	High Weight Deflectometer
IG	Índice de grupo
IME	Instituto Militar de Engenharia
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	Índice Suporte Califórnia
Ltda	Limitada
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
LWD	Light Weight Deflectometer
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical

NA	Nível da água
NBR	Norma Brasileira
PUC	Pontifícia Universidade Católica
PVC	Policloreto de polivinila
RCD-R	Resíduos de construção de demolição reciclados
RIS	Relação entre Índices de Suporte
RR-1C	Emulsão asfáltica ruptura rápida
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TAC	Tensiômetros de Alta Capacidade
TDR	Time Domain Reflectometry
TBR	Traffic Benefit Ratio
TLC	Trincas Longitudinais Curtas
TLL	Trincas Longitudinais Longas
TTC	Trincas Transversais Curtas
TTL	Trincas Transversais Longas
UFRJ	Universidade Federal de Rio de Janeiro
USACE	Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos
WT	Whitetopping

Lista de Símbolos

ε_t	Deformação de tração
ε_p	Deformação específica plástica
N	Número de repetições de carga
A,B	Parâmetros experimentais obtidos nos ensaios triaxiais que dependem do nível de tensão e das condições de moldagem
M_R	Módulo de resiliência
σ_d	Tensão desviadora
ε_R	Deformação resiliente axial
σ_1	Tensão principal maior
σ_2	Tensão principal intermediária
σ_3	Tensão confinante
τ_{oct}	Tensão cisalhante octaédrica
σ_z	Tensão vertical
σ_h	Tensão horizontal
R	Raio do prato de carga do LWD
Df	Deflexão
E_{VD}	Módulo de Elasticidade/Resiliência
p_a	Pressão atmosférica
θ	Primeiro invariante de tensão
P	Carga aplicada sobre a área circular
E	Módulo elástico
ν	Coeficiente de Poisson
T_R	Trilha de roda
d_i	Deflexão medida no ponto de distancia r_i
r_i	Distância radial do ponto de aplicação da carga
Δ	Deslocamento vertical
γ_w	Peso específico da água
T	Tensão superficial da água
h_c	Altura de ascensão capilar
$h_{cm\acute{a}x}$	Altura de ascensão capilar máxima

G_s	Massa específica real dos grãos
γ_d	Massa específica aparente seca
w	Teor de umidade
e	Índice de vazios
S	Grau de saturação
CL-ML	Argila siltosa
c'	Coeficiente do ensaio MCT
Pi	Perda de massa por imersão no ensaio MCT
e'	Índice de classificação do ensaio MCT
NS'	Não Laterítico siltoso
k_1, k_2, k_3	Parâmetros de regressão do modelo potencial e composto
k_i, k_r	Índices de intemperismo
GW	Pedregulho bem graduado
ϕ	Diâmetro
C_u	Coeficiente de uniformidade
Cc	Coeficiente de curvatura
ppm	Partes por milhão
"	Polegadas
Nº	Número
s/d	Sem data
atm	Atmosfera
kgf	Kilograma força
kPa	Kilopascal
MPa	Megapascal
kN	Kilonewton
mm	Milímetro
cm	Centímetros
°C	Graus centígrados
Hz	Hertz
m	Metros
s	Segundos