

UM MÉTODO SIMPLIFICADO PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO ESTRUTURAL DA PLATAFORMA FERROVIÁRIA

Laila de Oliveira e Silva Ribeiro da Cruz¹, Antonio Carlos Rodrigues Guimarães² e Gabriel de Carvalho Nascimento³

¹Instituto Militar de Engenharia (IME), Departamento de Engenharia de Fortificação e Construção, Praça General Tibúrcio 80, 22290-270 Urca, Rio de Janeiro, Brasil

email: lailaoliveira.eng@gmail.com <http://www.ime.eb.mil.br>

²Instituto Militar de Engenharia (IME), Departamento de Engenharia de Fortificação e Construção, Praça General Tibúrcio 80, 22290-270 Urca, Rio de Janeiro, Brasil

³Universidade Federal Fluminense, Departamento de Hidráulica, Rua Passo da Pátria 156, 24210-240 São Domingos, Niterói, Brasil

Sumário

Grande maioria das malhas ferroviárias brasileiras são antigas e apresentam níveis de degradação em vários trechos prejudicando a operação das ferrovias. Este trabalho apresenta um método simplificado para avaliar as condições da infraestrutura com uma sequência de ações considerando ensaios de campo com DCP e LWD, ensaios de laboratório para verificar o módulo resiliente e a deformação permanente, e a simulação numérica para analisar a plataforma ferroviária. Para as etapas realizadas, verificou-se que a infraestrutura do trecho apresenta subleito com módulos resilientes altos enquanto o lastro e o sublastro o módulo tem valores baixos e desproporcionais no mesmo ponto.

Palavras-chave: Ferrovia; Infraestrutura; DCP; LWD; Módulo Resiliente.

1 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário no Brasil representa, em [1], 20,7% da matriz de transporte brasileira, sendo um dos modais estratégicos que auxilia no desenvolvimento da economia.

A maioria das malhas ferroviárias brasileiras são antigas, datadas entre o início do século XX até um pouco mais da metade do mesmo século, e atualmente apresentam níveis de degradação em vários trechos. Assim, operação das ferrovias é prejudicada pelos problemas ocorridos nos elementos da infraestrutura, acarretando interrupções na circulação da via e gerando custos diretos e indiretos por causa dos atrasos ao retorno da normalização da via, despesas de manutenção e prejuízos financeiros de receita.

E assim para melhorar a gestão e controle, e minimizar os problemas mencionados acima, apresenta-se um método simplificado para avaliar as condições estruturais da plataforma ferroviária, considerando ensaios in situ com os equipamentos Dynamic Cone Penetrometer (DCP) e Light Weight Deflectometer (LWD) e os ensaios de laboratório de módulo resiliente e deformação permanente. E com os dados obtidos nos ensaios, gerar uma simulação numérica do comportamento estrutural da plataforma no software Sysrain.

2 A PLATAFORMA FERROVIÁRIA

A plataforma ferroviária pode ser dividida em duas categorias: superestrutura e infraestrutura. Na literatura, a divisão dos componentes de cada categoria ainda não estão completamente alinhados. Em [2], por exemplo, a superestrutura é constituída pelos trilhos, sistema de fixação, dormentes, lastro e sublastro. Em [3], a superestrutura é definida pelos trilhos, sistema de fixação e dormentes, enquanto que os componentes da infraestrutura são o lastro, o sublastro e o subleito, como pode ser visto na figura 1.

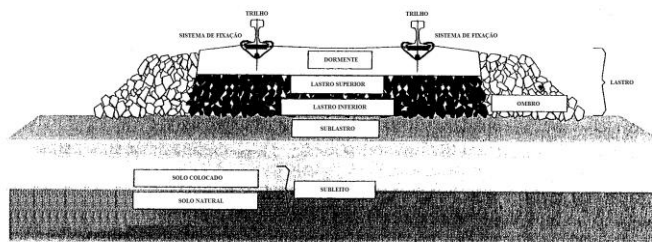


Fig.1. Plataforma Ferroviária (Adaptado de Selig e Waters, 1994)

Para este estudo foi utilizada a concepção de divisão [3] e a metodologia foi feita para a infraestrutura ferroviária. Em [4], os problemas ocasionados na via em muitas análises apontam como responsável a superestrutura, porém como todas as camadas tanto da superestrutura quanto da infraestrutura interagem diretamente uma com as outras é necessário haver uma abordagem conjunta para verificar as causas da degradação da malha ferroviária.

2.1 Lastro

O lastro é um material granulado que pode ser constituído de granito, basalto, pedra calcária, escória e cascalho e não pode conter sujeira ou pó.

Conforme visto na figura 1, o lastro pode ser dividido em berço, ombro, lastro superior e lastro inferior. E a função do lastro consiste em resistir verticalmente, lateralmente e longitudinalmente as forças aplicadas aos dormentes, fornecer resiliência na via e drenagem das águas.

Em [3], a degradação do lastro pode ocorrer durante a construção, manutenção e sob efeito da carga do tráfego. Além disso pode ocorrer a degradação em relação as alterações ambientais e por causa de partículas oriundas da superfície e das camadas subjacentes, quando isso ocorre acaba-se gerando uma camada entre o lastro e o sublastro denominada Interlayer (lastro contaminado).

2.2 Sublastro

O sublastro é a camada interposta entre o lastro e o subleito. Usualmente constituída por uma mistura de areia e cascalho.

Em [2], as principais funções do sublastro consistem em distribuir as tensões oriundas dos dormentes para o subleito, evitar a penetração do lastro no subleito, evitar a migração do material fino do subleito para o lastro e servir como camada drenante das águas vindas do subleito. Além disso ele auxilia na redução da espessura do lastro, que é um material com um custo mais elevado.

2.3 Subleito

O subleito é a camada inferior da plataforma ferroviária e a influência de tensões geradas pelo tráfego se estende até 5 metros abaixo do fundo dos dormentes, assim além do lastro e do sublastro, o subleito é muito importante na infraestrutura e influência tanto no desempenho quanto na manutenção da via, como visto em [3].

O subleito pode ser de solo natural existente no local ou de solo colocado que consiste de um preenchimento de solo para substituir a parte superior do solo existente inadequado ou apenas para elevar a plataforma até o nível necessário de projeto.

E para o subleito trabalhar de forma estável, é necessário evitar o adensamento progressivo e excessivo exercido pela carga repetida, o assentamento consolidado e a falha no cisalhamento sob as combinações do peso do trem, trilho, estrutura e subleito, a falha progressiva no cisalhamento em virtude da carga repetida da roda e a mudança do volume de água presente no solo por causa das mudanças da umidade no local.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho apresenta-se uma sequência de ações que podem ser visto na figura 2, denominada metodologia, a qual reúne ensaios de campo e de laboratório, seguido de simulação numérica a qual tem por objetivo analisar a condição estrutural da plataforma ferroviária. Tal metodologia foi aplicada para um segmento ferroviário nacional na região sudeste do Brasil, conhecido como Corredor Centro Sudeste Paulista.

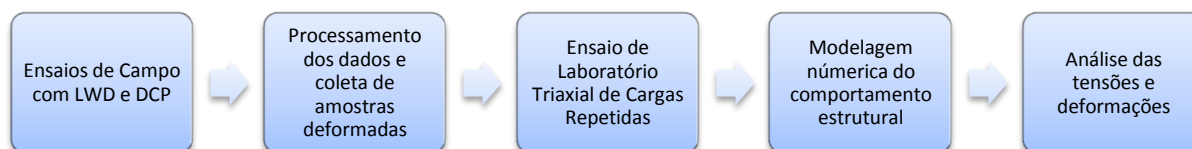


Fig.2. Fluxograma da Metodologia

Para este estudo foram selecionados 5 pontos a serem analisados, sendo 1 ponto em cada extremidade e 3 pontos no meio do trecho próximos um dos outros, os pontos escolhidos foram os de números 50, 46, 45, 44 e 34 que estão localizados, respectivamente, nos Km 226+700, Km 242+600, Km 258+900, Km 261+00 e Km 391+500.

3.1 LWD - Light Weight Deflectometer

Desde 1995 o FWD (Falling Weight Deflectometer) vem sendo utilizado nas ferrovias por muitos autores como [5], [6] e [7], para a avaliação da subestrutura. Para [8], o uso do LWD é uma alternativa simples para o FWD. O uso do LWD na ferrovia para avaliar as propriedades do pavimento ainda é muito recente, mas alguns autores como [9], [10] e [11] já estão utilizando o LWD para ensaios nas camadas de lastro, sublastro e subleito.

O LWD, como visto na figura 3, é um aparelho leve e portátil que avalia as propriedades físicas do pavimento, determinando a rigidez dos materiais. E por meio de ensaio dinâmico de placa de carga, ele fornece dados impressos de deflexões e módulo de resiliência. O equipamento pode mostrar os resultados na tela do datalog, também há a possibilidade de imprimir as informações na hora do ensaio e os resultados também são salvos através de um cartão de memória. Além dessas características, o LWD inclui GPS que identifica as coordenadas UTM para cada ponto realizado do ensaio.



Fig.3. Ensaio LWD

Os principais parâmetros fornecidos pelo LWD são o E_{LWD} ou E_{VD} que é o módulo de deflexão dinâmica em MPa.

3.2 DCP - Dynamic Cone Penetrometer

O DCP também é um equipamento leve e portátil como visto na figura 4 e em [12] é utilizado para determinar a resistência do solo a ser estudado. Em [13], a utilização do equipamento serve desde solos moles ou pouco consistentes até camadas constituídas por brita graduada ou pedregulho.



Fig.4. Ensaio DCP

O ensaio consiste na queda livre do martelo por uma haste gerando uma penetração no solo, esta penetração é medida em milímetros e é identificada como DPI ou Índice de Penetração Dinâmica.

$$DPI = \frac{L_n - L_1}{n-1} \quad (1)$$

Onde L_n é o deslocamento produzido pelo n-ésimo golpe, L_1 é o deslocamento produzido pelo primeiro golpe e n é o n-ésimo golpe.

Em [14], uma das vantagens da realização do ensaio de DCP é o fato dele ser semi não destrutivo, assim as perturbações são menores na estrutura. Além disso, ele não necessita de perfurações grandes, gerando economia no ensaio, visto em [15].

3.3 Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas

O ensaio triaxial é feito em um equipamento constituído por uma prensa em uma estrutura acoplada a cilindros de pressão de ar comprimido com pistão de carga, ver figura 5.



Fig.5. Ensaio Triaxial de Carga Repetida

O sistema pneumático do equipamento simula os carregamentos gerando o estado de tensão-desvio e o de tensão confinante. Essas tensões são aplicadas alternadamente por meio de força vertical axial no topo do corpo de prova, previamente homogeneizado na umidade ótima e compactado, que está protegido por uma membrana de borracha.

Este ensaio foi desenvolvido para reproduzir, em um meio controlado, os efeitos impostos pelo carregamento dinâmico do tráfego sobre a estrutura do pavimento.

O ensaio é dividido em duas etapas, como visto em [16] a primeira é a fase de condicionamento onde é aplicado uma sequência de carregamentos, na frequência de 1Hz, que visa eliminar as deformações permanentes que surgem nas primeiras aplicações da tensão desvio. Em seguida inicia-se a segunda etapa, sendo esta a realização do ensaio para obter os resultados de módulo de resiliência, onde deve-se aplicar 18 pares de tensões desvio para se obter as leituras das deformações específicas após as 10 repetições de carga.

3.4 Módulo de Resiliência (MR)

Como visto em [17], o módulo resiliente e o coeficiente de Poisson dos solos são determinados através de ensaios de cargas cíclicas no laboratório com o ensaio triaxial.

Em [16], o módulo resiliente no ensaio triaxial é definido pela relação entre a tensão desvio (σ_d), aplicada repetidas vezes no corpo de prova, e a deformação resiliente (ϵ_r).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (3)$$

Sendo MR o módulo de resiliência em MPa, σ_d a tensão desvio aplicada repetidamente em MPa, ϵ_r a deformação específica resiliente, ΔH a deformação resiliente registrada e H_0 a distância entre alças utilizadas para a fixação do LVDT (Linear Variable Differential Transformer) na amostra.

Com os resultados do módulo resiliente é possível avaliar o comportamento mecânico do solo. Para solos arenosos e materiais granulares, o módulo aumenta com a tensão confinante e a tensão desvio não gera nenhuma influência significativa e como verificado em [18], o comportamento do material ao ser submetido ao carregamento repetido pode ser elástico não linear. Em [19] e [20], o modelo linear usualmente adotado no Brasil para o módulo descrito acima pode ser visto na equação (3).

$$MR = K_1 \times \sigma_3^{K_2} \quad (4)$$

Sendo K_1 e K_2 os coeficientes obtidos experimentalmente para cada tipo de material granular e σ_3 a tensão confinante aplicada.

Para solos finos coesivos, siltsos e argilosos, observa-se que o módulo de resiliência é mais influenciado pela tensão desvio enquanto que a tensão confinante tem pouca influência como pode ser visto em [21].

Em [20] e [19], para determinar o módulo para os solos finos é utilizado o modelo elástico bilinear.

$$MR = K_2 + K_3 \times [K_1 - \sigma_d] \rightarrow K_1 > \sigma_d \quad (5)$$

$$MR = K_2 + K_4 \times [\sigma_d - K_1] \rightarrow K_1 < \sigma_d \quad (6)$$

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (7)$$

Onde, MR é o módulo de resiliência, K_1 , K_2 , K_3 e K_4 são os parâmetros de resiliência determinados no ensaio triaxial de carga repetida e σ_d é a tensão de desvio.

Há um modelo chamado Composto que atende os dois tipos de solos. Como visto em [22] e [23], este modelo é vantajoso por não depender do conhecimento do tipo do material, além de poder obter o valor do módulo resiliente com maior precisão que os outros dois modelos.

$$MR = K_1 \times \sigma_3^{K_2} \times \sigma_d^{K_3} \quad (8)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados obtidos nos ensaios de campo, construiu-se o gráfico da curva DCP para os 5 pontos estudados. O gráfico que pode ser visto na figura 6 representa o número de golpes acumulado com a profundidade.

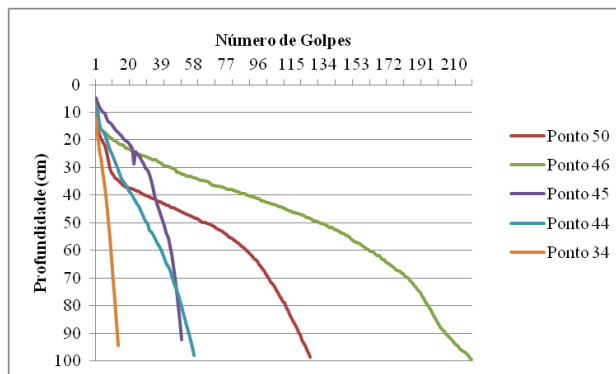


Fig.6. Curva DCP

Ao analisar as curvas de cada ponto, o trecho estudado apresenta variações de comportamento, indicando a não homogeneidade do material.

Os valores dos índices de penetração (DPI), variaram entre 4,3 a 17,5 mm/golpe, porém para o ponto 34 o DPI foi de 63,6 mm/golpe caracterizando uma localidade com solo de baixa resistência à penetração.

Para os ensaios realizados com LWD, para as amostras estudadas obteve-se os resultados como mostra no quadro 1 para o lastro e no quadro 2 para o sublastro.

Quadro 1. Resultados do LWD para o Lastro

Amostra	Esquerdo	Eixo	Direito
	Evd (MPa)	Evd (MPa)	Evd (MPa)
Ponto 50	17,2	41,0	18,2
Ponto 46	49,9	56,9	37,6
Ponto 45	48,0	36,2	46,3
Ponto 44	19,0	43,4	36,6
Ponto 34	36,4	40,1	41,5

Quadro 2. Resultados do LWD para o Sublastro

Amostra	Esquerdo	Direito
	Evd (MPa)	Evd (MPa)
Ponto 50	-	44,1
Ponto 46	26,7	-
Ponto 45	67,0	-

Ponto 44	-	46,9
Ponto 34	-	20,9

É possível verificar que o módulo resiliente encontrado no lastro se manteve com valores aproximados em 3 amostras, pontos 46, 45 e 34, ao serem ensaiados nos 3 locais da via, do lado direito da via, do lado esquerdo da via e no eixo da via. Já no ponto 50 houve uma variação significativa, onde é possível verificar que no lado direito e esquerdo da via desse trecho o módulo está muito baixo. E no ponto 44 o único módulo que deu muito baixo em comparação aos outros 2 foi o do lado esquerdo da via.

Como proposto por [24], uma das razões que os valores do módulo resiliente obtido no ensaio do lastro estarem relativamente baixos e desproporcionais no mesmo ponto estudado pode ser pelo fato do subleito nesses pontos estarem saturados o que proporcionaria uma acomodação diferente das partículas e com isso a variação no ensaio de campo.

Os resultados obtidos no sublastro, é possível notar que em algumas amostras não foi realizado o ensaio dos dois lados da via, esse fato ocorreu pela degradação que a via se encontra no momento onde há a ocorrência da contaminação do subleito com o sublastro e em alguns casos o lastro excede a altura de projeto. Verifica-se pelos valores encontrados que o módulo de resiliência dos pontos 34 e 46 estão abaixo do que o esperado ao se comparar com as outras amostras.

Para os ensaios de laboratório, foram analisados os módulos de resiliência do subleito nas 5 amostras. Nos 3 modelos descritos anteriormente, o modelo que obteve o melhor resultado foi o composto como é possível ver no quadro 3.

Quadro 3. Módulo Resiliente do Subleito no Modelo Composto

Amostra	MR (MPa)
Ponto 50	$MR = 846 x \sigma_3^{0,52} x \sigma_d^{-0,25}$
Ponto 46	$MR = 1012,3 x \sigma_3^{0,52} x \sigma_d^{-0,23}$
Ponto 45	$MR = 828,8 x \sigma_3^{0,56} x \sigma_d^{-0,30}$
Ponto 44	$MR = 794,3 x \sigma_3^{0,50} x \sigma_d^{-0,28}$
Ponto 34	$MR = 310,3 x \sigma_3^{0,52} x \sigma_d^{-0,58}$

Os valores do módulo resiliente das amostras ensaiadas em laboratório variaram de 218 a 432 MPa para o ponto 50, de 264 a 521 MPa para o ponto 46, de 219 a 469 MPa para o ponto 45, de 238 a 465 MPa para o ponto 44 e de 174 a 499 MPa para o ponto 34. Com isso, verificou-se que os materiais no subleito são materiais com alta resistência, além disso verificou-se, com o ensaio de laboratório de Miniatura Compactado Tropical (MCT), que para os trechos estudados há uma predominância de solos arenosos, que pode ser visto no quadro 4.

Quadro 4. Classificação MCT

Amostra	Classificação MCT
Ponto 50	Não laterítico arenoso (NA')
Ponto 46	Não laterítico siltoso (NS')
Ponto 45	Não laterítico areia (NA)
Ponto 44	Não laterítico areia (NA)
Ponto 34	Laterítico argiloso (LG')

5 CONCLUSÕES

Já foram finalizados todos os ensaios de campo e de laboratório, e a modelagem numérica para avaliar o comportamento da estrutura ainda está em andamento. Após a finalização da modelagem, será realizada a análise completa das tensões e deformações e comparar com o valores admissíveis.

A análise dos resultados dos ensaios já concluídos permite verificar que a condição estrutural da infraestrutura do trecho estudado possui um subleito resistente quando ensaiado na umidade ótima e adequado porém as camadas superiores de sublastro e lastro estão apresentando módulos um pouco abaixo do esperado ou desproporcionais em comparação aos ensaios feitos no mesmo ponto porém em posições diferentes, tendo como possível causa a saturação do subleito nesses pontos o que pode ocasionar uma acomodação distinta das partículas do subleito. Ao finalizar a modelagem numérica, será possível ter uma análise de todas as camadas atuando conjuntamente.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Cappes por disponibilizar o auxílio para custear o tempo dos pesquisadores, a empresa VLI por disponibilizar a malha ferroviária para o estudo e ao Instituto Militar de Engenharia por disponibilizar toda a infraestrutura para a realização dos ensaios.

7 REFERÊNCIAS

1. Confederação Nacional do Transporte, *Boletim Estatístico*, Fevereiro 2015. Disponível em <http://www.cnt.org.br/Paginas/Boletins_Detalhes.aspx?b=3>
2. C. E. L. Paiva, *Super e Infraestruturas de Ferrovias*, Editora Elsevier, Rio de Janeiro, 2016.
3. E. T. Selig e J. M. Waters, *Track Geotechnology and Substructure Management*, Editora Thomas Telford, Londres, 1994.
4. J. C. Silva Filho e A. C. R. Guimarães, *Um Estudo sobre a influência da Infraestrutura Ferroviária na Manutenção da integridade estrutural de uma via férrea tipo Heavy Haul*, 43a Reunião Anual de Pavimentação e 17o Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Maceió, Agosto 2014.
5. P. H. Abdulrazagh e M. T. Hendry, *Case study of use of falling weight deflectometer to investigate railway infrastructure constructed upon soft subgrades*, Canadian Geotechnical Journal, v.53 n.12 1991-2000, 2016.
6. P. Sharpe e C. Govan, *The use of Falling Weight Deflectometer to Assess the Suitability of Routes for Upgrading*, 2nd Int. Conf. Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Corsica, Abril 2014.
7. M. P. N. Burrow, A. H. C. Chan e A. Shein, *Deflectometer-based analysis of ballasted railway tracks*, Geotechnical Engineering, 160 169-177, 2007.
8. M. D. Nazaal, *Field Evaluation of in situ Test technology for Q_c/Q_a During Construction of Pavement Layers and Embankments*, Louisiana State University, USA, 2003.
9. F. Lamas-Lopez, Y. J. Cui, S. C. D'Aguiar e N. Calon, *Geotechnical auscultation of a French conventional railway track-bed for maintenance purposes*, Soils and Foundations, 56 (2) 240-250, 2016.
10. R. Costa, R. Motta, L. L. B. Bernucci, E. Moura, J. Pires e L. Oliveira, *Bearing capacity evaluation of a subgrade in a heavy haul railway in Brazil*, The 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Athenas, 2017.
11. A. J. Rubin, C. L. Ho e C. P. Oden, *A comparison of railroad ballast elastic modulus as estimated from lightweight deflectometer (LWD) and Dynamic Cone Penetrometer (DCP)*, Transportation Research Board 97th Annual Meeting, Washington DC, 2018.

12. Y. D. Costa, *Influência da energia de compactação em resultados de ensaios com o cone de penetração dinâmica (DCP)*, XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado, 2010.
13. J. S. Nogami e D. F. Villibor, *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*, Editora Villibor, Brasília, 1995.
14. R. P. Claus e S. R. M. Ferreira, *Um proposta para se avaliar o grau de compactação e a homogeneidade da camada compactada utilizando DPL*, XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia, Setembro 2014.
15. A. B. C. Alves, *Avaliação da Capacidade de Suporte e Controle Tecnológico de Execução da Camada Final de Terraplenagem utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
16. DNER-ME 134/2014, *Pavimentação - Solos - Determinação do Módulo de Resiliência*, Norma Brasileira, Rio de Janeiro, 1979.
17. S. Pinto e E. S. Preussler, *Pavimentação rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis*, Copiarte, Rio de Janeiro, 2010.
18. L. M. G. Motta, *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
19. R. G. Hicks, *Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Material*, Tese de Doutorado, Universidade da Califórnia, Berkley, 1970.
20. J. M. Duncan, C. L. Monismith e E. L. Wilson, *Finite element analysis of pavements*, Highway Research Record, DC n.228 18-33, 1968.
21. M. Svenson, *Ensaio Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1980.
22. J. G. H. M. Ferreira, *Elaboração e Análise da Base de Dados de Ensaio Triaxiais Dinâmicos da Coppe/UFRJ*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
23. L. M. G. Motta e J. Medina, *Investigação e Desenvolvimento em Mecânica dos Pavimentos na Coppe - Brasil*, Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho, n.26 85-97, 2006.
24. L. P. Miranda, M. D. T. Casagrande e L. M. G. Motta, *Comportamento Defletométrico de Pavimento Reforçado com Geogrelha*, XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia, 2014.