

UMA CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE NUMÉRICA MECANÍSTICA DA DISPERSÃO DAS TENSÕES ATUANTES NO PAVIMENTO FERROVIÁRIO

Mayara Souza Gomes

Instituto Militar de Engenharia – IME

Marina Donato

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Filipe Souza de Jesus

Instituto Militar de Engenharia – IME

Paulo Roberto Borges

Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ

Antonio Carlos Rodrigues Guimarães

Maria Esther Soares Marques

Instituto Militar de Engenharia – IME

RESUMO

Ainda nos dias atuais, boa parte dos projetos de superestrutura se utilizam de equações empíricas para o cálculo dispersão das tensões no pavimento ferroviário. Verifica-se com a utilização destas equações, resultados conservadores quando comparados aos resultados obtidos com a aplicação dos modelos mecanísticos. O objetivo deste estudo está na apresentação de um modelo numérico simplificado, para a análise da trajetória de dispersão das tensões atuantes no pavimento ferroviário, face à variação do módulo resiliente do subleito. O modelo se aplica à verificação da capacidade de suporte da plataforma de terraplenagem para uma carga por eixo e superestrutura padrão. Os valores de dispersão das tensões atuantes no pavimento foram preliminarmente definidos com o auxílio do programa Ferrovia 3.0, procedeu-se à análise numérica com o suporte do Matlab R2016b, ajustando uma superfície à nuvem de pontos das tensões, com posterior obtenção do modelo numérico. O resultado é promissor e se apresenta como uma alternativa à avaliação da capacidade de suporte dos subleitos interceptados por pavimentos ferroviários.

ABSTRACT

Even today, most of the superstructure projects use empirical equations to calculate the dispersion of stresses in the railway pavement. It is verified with the use of these equations, conservative results when compared to the results obtained with the application of the mechanistic models. The objective of this study is the presentation of a simplified numerical model for the analysis of the dispersion trajectory of the stresses acting on the railway pavement, due to the variation of the resilient modulus of the subgrade. The model applies to the verification of the support capacity of the earthmoving platform for a standard axle load and superstructure. The dispersion values of the stresses acting on the pavement were preliminarily defined with the aid of the Ferrovia 3.0 program. The numerical analysis was carried out with the support of Matlab R2016b, adjusting a surface to the cloud of stress points and obtaining the numerical model. The result is promising and presents itself as an alternative to the evaluation of the support capacity of the intercepted rail pavements.

1. INTRODUÇÃO

A malha ferroviária é parte essencial do sistema de transporte de um país, desempenhando papel importante no desenvolvimento de sua economia. A ferrovia é responsável pelo transporte de grandes volumes de carga e passageiros, em complexas redes urbanas, atuando em um ambiente de acirrada competição, com os demais modos de transportes, quanto a velocidade, capacidade e custos. Neste contexto o transporte ferroviário tem respondido com a ampliação da carga por eixo e a frequência de trens, que passam a trafegar com maiores velocidades operacionais. A evolução destas solicitações, sobrecarrega sobretudo, o pavimento ferroviário, acelerando processos de desnivelamento da via.

A manutenção das características geométricas da via, e a segurança na circulação de trens, exige um crescente investimento na manutenção do pavimento ferroviário. A frequência em que se dão as intervenções no pavimento decorre das propriedades mecânicas do sistema de camadas assentes ao subleito, e suas respectivas iterações elasto-plásticas.

A aplicação do Modelo Mecânico nos Projetos de Superestrutura, permite o entendimento do desempenho do pavimento ferroviário, a partir da verificação dos níveis de tensões em seus horizontes. O modelo pode ser utilizado ainda para a obtenção de um diagnóstico mais acertado para problemas detectados na via.

Os modelos empíricos atualmente aplicados ao dimensionamento do pavimento ferroviário, não simulam de forma adequada o comportamento e trânsito das tensões nas camadas de lastro, sublastro e subleito, bem como, a interação entre a grade (trilho, dormentes e fixação) e as demais camadas do pavimento. Os métodos de dimensionamento baseados nestes modelos, admitem certas simplificações, que em sua maioria, minoram as resistências de suporte e majoram as solicitações.

RODRIGUES (1993), lançou à comunidade científica um software denominado de Ferrovia 2.1 como uma alternativa e modelo para simulação do comportamento estrutural dos elementos e camadas que compõem o pavimento ferroviário. Em 2002 o Ferrovia foi atualizado e sua interface recebeu melhorias, mantendo o modelo de cálculo que vem sendo amplamente utilizado desde então. O programa utiliza o método dos elementos finitos e o método das camadas finitas para a reprodução da grade ferroviária. Os trilhos e dormentes são representados por elementos de vias interconectados. O modelo desenvolvido teve suas características definidas para permitir o cálculo dos níveis de tensões na estrutura, frente às cargas aplicadas pelo material rodante, inclusive as tensões e deformações atuantes nas camadas de lastro, sublastro, reforço do subleito e subleito.

CORREIA (2007), comenta o processo matemático utilizado por Rodrigues, como uma inversão da matriz de flexibilidade para gerar uma matriz de rigidez do pavimento. O mesmo autor aborda que o cálculo dos deslocamentos e rotações nos pontos nodais da grade ferroviária é descrito por uma matriz de rigidez, somada à matriz de rigidez da superestrutura, para o mapeamento da dispersão das tensões. O processo que se assemelha ao desenvolvimento do programa Geotrack, desenvolvido pela Universidade de Cornell.

Através dos módulos de deformação resiliente, simula-se o comportamento de tensão deformação dos solos e materiais granulares, sob ação das cargas em movimento da via.

SPADA (2003) descreve a sequência de cálculo do programa:

1. Montagem da matriz de rigidez da grade;
2. A partir de valores iniciais de módulo de resiliência do sistema em camadas é montada a matriz de rigidez do conjunto de camadas;
3. Aplicação do carregamento externo e cálculo dos deslocamentos e rotações nodais;
4. Determinação do diagrama de tensões de contato entre cada dormente e o topo do lastro;
5. Aplicação do diagrama de tensões de contato sob os dormentes ao sistema em camadas, considerando-se a variação dos módulos resilientes das camadas com o estado de tensões, assim como o critério de ruptura Mohr-Coulomb, com o programa ELASTMCF incremental, calculando-se as tensões e deformações em cada camada;
6. Em sua versão atual, o Ferrovia 3.0, apresenta uma interface de entrada mais amigável dividida em três conjuntos de informações: dados da grade, dados da fundação e cargas aplicadas.

Diante da disponibilidade de recursos naturais e a disposição dos investimentos financeiros com o projeto, opta-se por um modelo de superestrutura padrão, que atenda a um comboio ferroviário e conseqüentemente a uma carga por eixo máxima. Cabe ao dimensionamento do pavimento ferroviário, verificar a capacidade de suporte dos subleitos interceptados pelo projeto, dimensionando as espessuras das camadas de reforço necessárias. Para tanto comparam-se os níveis de tensões atuantes com as tensões admissíveis do subleito. O reconhecimento das propriedades mecânicas do subleito deve prever a realização de campanhas de investigação geotécnica capazes de monitorar o desempenho mecânico dos solos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Apesar de terem se passado 36 anos desde a apresentação do GEOTRACK e outros 23 anos desde a apresentação do Ferrovia 3.0, boa parte dos pavimentos ferroviários no Brasil continuam sendo dimensionados utilizando as equações fornecidas pelo manual AREMA pelos métodos empíricos.

Em virtude da evidente necessidade de antever o comportamento do pavimento ferroviário, em 1867, Winkler formulou um modelo para o entendimento do funcionamento da propagação de cargas nos componentes da via, determinando que a ferrovia poderia ser compreendida como um sistema de vigas contínua que corresponde aos trilhos com comprimento infinito e equidistantes assentado sobre molas de módulos de rigidez invariável com um número infinito de vagões, sendo as reações dos apoios proporcionais às suas deflexões (HAY,1982 apud SPADA 2005).

A equação a seguir exprime o citado modelo:

$$p = Cy \quad (1)$$

Sendo:

P = força por unidade de área

Y = deflexão

C = coeficiente de Winkler ou coeficiente de lastro, que é definido como uma tensão por unidade de comprimento que produz uma deflexão unitária no lastro, cuja dimensional é $[F][L]^{-3}$.

Em 1888, MUNIZ (2005) relata que Zimmermann idealizou uma metodologia para calcular os esforços no pavimento ferroviário com base nas hipóteses e modelo de Winkler, deduzindo expressões para determinar os deslocamentos verticais e momentos fletores dos trilhos, levando em consideração a função das cargas, a rigidez a flexão, o coeficiente de recalque C e a largura do apoio do dormente sobre o lastro, cita ainda que a rigidez do dormente estaria incluída de forma implícita no valor do coeficiente de lastro.

Anos depois, em 1915, SPADA (2005) menciona que Timoshenko (2002) apresentou uma proposta de avaliação da via ferroviária que consistia na análise da propagação de esforços por meio de apoios discretos, formados por dormentes com espaçamento bem próximos, utilizando o mesmo critério de viga contínua apoiada elasticamente.

Somente com Talbot, ainda no século XX, que o procedimento para análise das propagações de tensões na via obteve uma nova concepção, contribuindo significativamente para o desenvolvimento dos critérios atualmente empregados no dimensionamento de pavimento ferroviário.

O modelo proposto por Talbot é basicamente análogo ao apresentado por Zimmermann, a diferença fundamental está na inserção do conceito de módulo de via, definido como único coeficiente de reação da via, com base no carregamento linear, com distribuição uniforme, no sentido das camadas inferiores para as superiores que possibilita uma deflexão unitária no trilho, conforme expressão a seguir:

$$P = -uy \quad (2)$$

Sendo:

P = o carregamento linear uniformemente distribuído de reação do lastro às cargas de tráfego;

U = módulo de via, cuja dimensional é $[F][L]^{-2}$; u

Y = deflexão do trilho.

Assim, o módulo de via é determinado através de uma prova de carga estática sobre a linha ferroviária para obtenção das variáveis da expressão supracitada (MUNIZ 2005).

SPADA (2005) ressalta que o módulo de via é um parâmetro global que leva em consideração a rigidez do trilho, o espaçamento entre dormentes, as dimensões e a rigidez dos dormentes e das camadas inferiores da via férrea, e as condições de socaria do lastro.

Talbot também propôs um método para estimativa das tensões de propagação ao longo das camadas do pavimento, idealizado um gráfico conhecido como “Isóbaras de Talbot”.

Nesse método, podem-se determinar as tensões atuantes em determinada profundidade do pavimento através da análise dos bulbos, sendo consideradas para esse procedimento as camadas totalmente homogêneas.

Segundo SPADA (2005) até 1960 nenhuma outra tentativa foi empreendida no sentido de implementar ou contrapor os procedimentos e análises de propagação de tensões propostas por Talbot.

No entanto, MUNIZ (2005) releva que a partir da década de 70 foram unânimes as críticas quanto ao método, alegando que a maneira simplória de representar a resposta da via ferroviária através de um único módulo é insuficiente para simular as condições reais das camadas.

SPADA (2005) ratifica o relatado por Muniz, citando que o emprego de um módulo de via para interpretar todo comportamento do pavimento é prejudicial para análise das camadas, uma vez que se torna impossível distinguir a contribuição isolada de cada uma delas, impossibilitando eventuais correções ou melhorias numa camada específica do pavimento.

Percebe-se que a fragilidade da formulação de Talbot está no fato de considerar toda a estrutura abaixo dos dormentes como uma camada contínua e totalmente homogênea, entretanto, sabe-se que os materiais que compõe o pavimento ferroviário são distintos, com expressiva heterogeneidade tornando inviável uma análise unificada dessas camadas.

Os primeiros estudos de análise das camadas do pavimento ferroviário, considerando separadamente as características de cada material empregado foi desenvolvido por Selig e Waters (1994) através de uma série de medições de tensões e distribuições de cargas sob várias combinações de espessuras de lastro, espaçamento de dormentes, tipos de dormentes e métodos de manutenção em diversos pontos da via férrea, e citam ainda que para o

entendimento coerente do comportamento do pavimento ferroviário, deve-se inter-relacionar todos os componentes da via férrea (DELGADO 2012).

Tal configuração da via férrea baseada nesses moldes de propagação de tensão é a mais moderna existente, resultado de anos de pesquisas e inúmeras tentativas de compreender o comportamento do pavimento, culminando assim na principal interpretação da dinâmica da via que consiste na interação de todos os componentes da ferrovia, tanto da infraestrutura quanto da superestrutura, a fim de representar o desempenho global da estrutura férrea.

3. ESTUDO DE CASO

Para o desenvolvimento dos cálculos das tensões atuantes nas camadas do pavimento, foi considerada uma geometria padrão conforme figura 1, de modo a variar apenas os módulos do subleito.

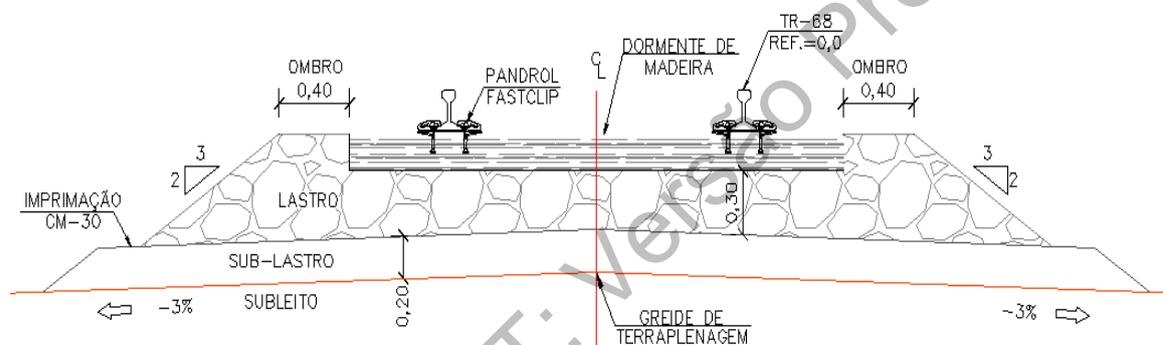


Figura 1: Pavimento Ferroviário padrão

Posteriormente utilizou-se o software Ferrovia 3.0. O programa foi utilizado para a implementação das rotinas computacionais de simulação numérica do comportamento estrutural, considerando o método dos elementos finitos e o método das camadas finitas, para a reprodução da grade ferroviária. A correta definição destes esforços conduziu a um dimensionamento racional das espessuras das camadas do pavimento e reforço do subleito, a partir do reconhecimento dos níveis de tensão atuantes.

Os dados de entrada da grade ferroviária, do lastro, do sublastro e subleito empregados para alimentar o programa estão apresentadas a seguir:

Os dados de entrada no software ferrovia foram:

SUPERESTRUTURA:

Rigidez de fixação: 170.000

kgf/cm

Carga por eixo: 40 toneladas por eixo

Bitola: 160 cm

Distância entre dormentes: 61 cm

Trilhos:

- Módulo de Elasticidade (E): 2.100.000 kgf/cm²
- Momento de Inércia (I): 3.954 cm⁴
- Largura: 15 cm
- Área de seção: 86 cm²

Dormentes:

- Módulo de Elasticidade (E): 320.000 kgf/cm²
- Momento de Inércia (I): 29.639 cm⁴
- Largura: 26 cm
- Área de seção: 585 cm²
- Comprimento: 280 cm
- Tipo: Monobloco

LASTRO:

- Espessura: 30 cm
- Coefficiente de Poisson: 0,3 Ângulo de atrito: 40°
- Módulo de Elasticidade (E): 2.000 kgf/cm²

SUBLASTRO:

- Espessura: 30 cm
- Coefficiente de Poisson: 0,4 Ângulo de atrito: 20°
- Módulo de Elasticidade (E): 1.500 kgf/cm² Coesão: 0,07 kgf/cm²

A geometria de aplicação de cargas foi empregada conforme o vagão GDU de carga de minério, apresentado na figura 2.

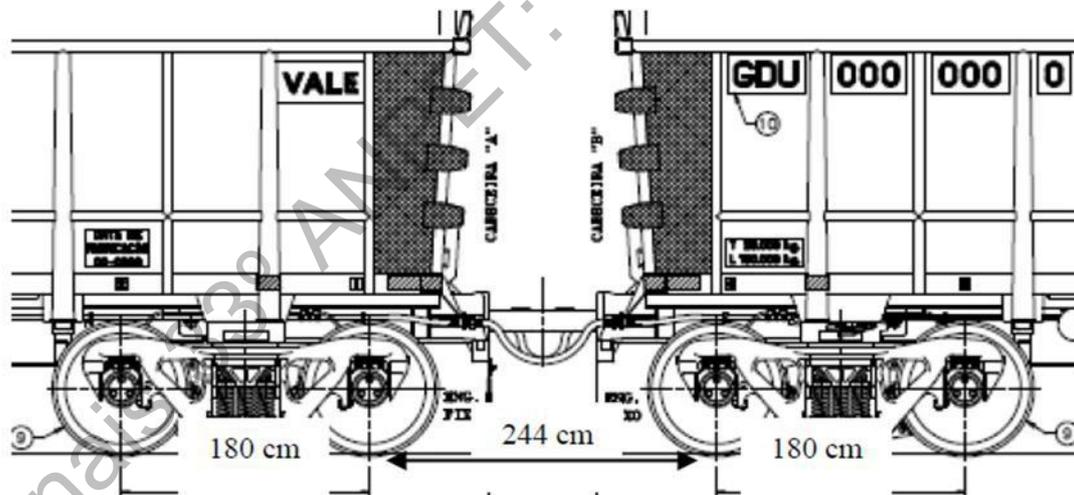


Figura 2: Geometria de Aplicação das Cargas para Vagões GDU - Ferrovia 3.0

De posse de todas as tensões atuantes no decorrer das profundidades, elaborou-se um ábaco de modo a permitir a visualização da relação de todas as tensões com os módulos de resiliência do subleito, e as profundidades.

O MatLab foi empregado no desenvolvimento do tratamento dos dados das tensões para identificação de uma equação matemática que permitisse o relacionamento entre as variáveis, tensão, profundidade e módulo de resiliência.

Por fim, verificou-se dos valores obtidos com a equação matemática com os dados de tensões atuantes obtidos pelo Ferrovias 3.0

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES – ESTUDO DE CASO

As tensões calculadas com o apoio do Ferrovias 3.0 foram colhidas do arquivo de saída do programa e organizadas conforme apresentado na tabela 1. Os valores das tensões encontram-se agrupados às características do módulo resiliente do subleito correspondente e por conseguinte possuem seus valores abatidos a medida que evoluem as profundidades. O entendimento da razão destes abatimentos para subleitos de módulos resilientes diferentes foi o que motivou o estudo.

Tabela 1: Tensões atuantes das Camadas do Pavimento

Tipo da Estrutura		Profundidade (cm)	Módulos de Resiliência do Subleito (E_R) (Kgf/cm ²)									
			100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
SUPER.	DORMENTE	3	2,352	2,248	2,353	2,256	2,258	2,260	2,331	2,265	2,302	2,362
	LASTRO	30	1,258	1,380	1,220	1,221	1,221	1,222	1,269	1,228	1,212	1,230
	SUBLASTRO	60	0,877	0,858	0,853	0,871	0,870	0,874	0,909	0,885	0,879	0,931
SUBLEITO	40cm	100	0,555	0,570	0,594	0,594	0,593	0,597	0,638	0,628	0,636	0,683
	60cm	120	0,407	0,437	0,467	0,466	0,476	0,487	0,530	0,523	0,523	0,572
	80cm	140	0,290	0,332	0,366	0,375	0,385	0,406	0,448	0,443	0,449	0,490
	100cm	160	0,209	0,255	0,290	0,302	0,323	0,345	0,378	0,374	0,374	0,408
	120cm	180	0,160	0,200	0,232	0,255	0,278	0,295	0,330	0,323	0,333	0,359
	140cm	200	0,133	0,171	0,198	0,222	0,240	0,259	0,281	0,272	0,293	0,309
	160cm	220	0,120	0,152	0,175	0,191	0,213	0,224	0,253	0,244	0,265	0,289
	180cm	240	0,108	0,135	0,155	0,175	0,187	0,203	0,224	0,217	0,237	0,269
200cm	260	0,100	0,123	0,141	0,155	0,171	0,183	0,213	0,209	0,209	0,249	
LEGENDA			1 - Carga por Eixo = 40 ton					4 - Espaçamento entre eixos no truque = 1.800 mm				
Pavimento			2 - Trilhos TR68 ($E=210.000\text{Kgf/cm}^2$, $l=3.954\text{cm}^4$)					5 - Bitola = Larga (1600mm)				
Subleito			L = 15cm, Área = 86 cm ² ;					6 - Lastro com 30cm e $E = 2.000\text{ Kgf/cm}^2$;				
A dispersão das tensões foi calculada com o auxílio do software Ferrovias 3.0.			3 - Dorm. ($E=320.000\text{Kgf/cm}^2$, $l=29639\text{cm}^4$, $e=61\text{cm}$)					7 - Sublastro com 30cm e $E = 1.500\text{ Kgf/cm}^2$;				
			L=26cm, Área = 585cm ² , Comp.=2.800mm)					8 - Rigidez de Fixação $K = 170.000\text{ kgf/cm}$.				

A obtenção de um modelo numérico capaz de descrever o comportamento das tensões como função dos módulos do subleito e profundidades, ajustou-se à uma superfície à nuvem de pontos com o auxílio do programa Matlab R2016b em seu aplicativo Curve Fitting Tool e assim associar uma superfície de regressão aos pontos calculados no Ferrovias 3.0, gerando a nuvem de pontos apresentado na figura 3.

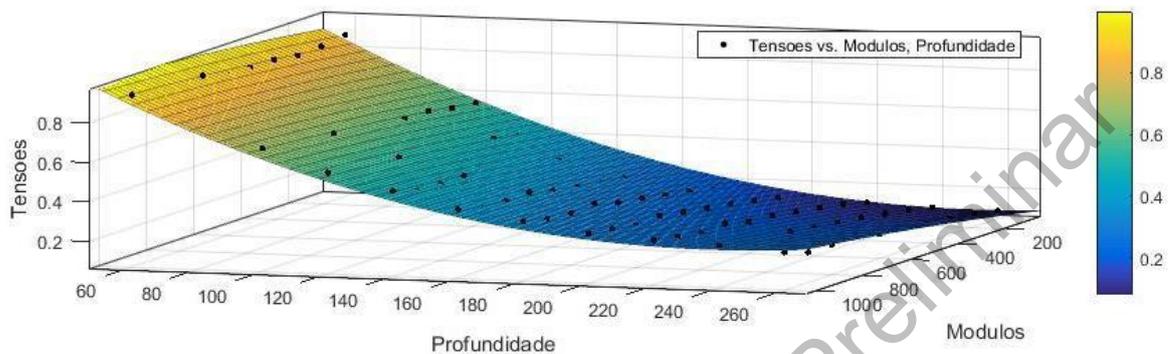


Figura 3: Superfície ajustada à nuvem de pontos das tensões

Após o ajustamento verificou-se uma função de módulo e profundidade para aproximar o valor das tensões de referência, concluindo pela escolha de um polinômio de segunda ordem para os valores de profundidade e módulos, e uma superfície de regressão. A equação com um intervalo de confiança de 95% e um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9928$ para o ajustamento do modelo estatístico resultou na equação apresentada por este estudo, como segue apresentada abaixo.

$$\sigma = p00 + p10*ER + p01*h + p20* ER^2 + p11* ER *h + p02*h^2 \quad (3)$$

Onde os coeficientes podem ser determinados, juntamente com seus limites de valores para o intervalo de confiança:

$$\begin{aligned} p00 &= 1.325 (1.29, 1.36) \\ p10 &= 0.0001572 (8.945e-05, 0.000225) \\ p01 &= -0.01003 (-0.01039, -0.009666) \\ p20 &= -5.625e-08 (-1.073e-07, -5.213e-09) \\ p11 &= 3.821e-07 (1.697e-07, 5.945e-07) \\ p02 &= 2.001e-05 (1.898e-05, 2.104e-05) \end{aligned}$$

O desvio padrão das diferenças entre os valores previstos e os valores observados (resíduos), RMSE foi de 0,01868. Confirmando o modelo como efetivo para a estimativas da dispersão das tensões no subleito, para uma geometria de superestrutura e cargas utilizadas no ensaio.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo apresenta uma equação generalizada para as estimativas das tensões no subleito interceptado pelo pavimento ferroviário, em função das profundidades e resiliência destes solos. O modelo considera o intervalo de módulos, entre 100 Kgf/cm² e 1.000 Kgf/cm², com profundidades variando de 60 cm (topo do subleito) e sua evolução até uma profundidade de 2,00m, onde os acréscimos de tensão se tornam pouco significativos.

Dadas as características geométricas da superestrutura e a carga por eixo considerada, a equação se adapta melhor ao pré-dimensionamento do pavimento ferroviário da EFC – Estrada de Ferro Carajás. Verificou-se, outrossim, que os dados de coesão e ângulo de atrito do subleito não interferem significativamente nos valores de tensões aplicadas no pavimento.

Verificada a insuficiência do subleito, fato à incompetência de atuar no regime elástico para as condições de solicitação, há que se proceder com o dimensionamento de camadas de reforço. A inclusão de novas camadas no pavimento, exige novo cálculo das iterações e conseqüentemente um novo modelo de dispersão.

A equação apresentada simplifica as análises e revela as tensões de solicitação para um modelo de superestrutura padrão adotado para a EFC. Outros modelos podem ser definidos variando-se os parâmetros de geometria da seção de superestrutura, o que permite estudar o impacto nos custos quando comparados os investimentos com a execução dos reforços contra a redução do espaçamento entre dormentes e outras modificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CORREIA, J.T. Pavimentação asfáltica: Materiais, projeto e restauração. Ed. Oficina de textos: São Paulo, Brasil, 2007.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. Solos - Determinação do Módulo de Resiliência. Norma Rodoviária DNER-ME 134. 2010.
- DELGADO, B.S. “Análise da deformabilidade de um solo tropical do oeste do Maranhão como material de sublastro na Estrada de Ferro Carajás”. Dissertação de mestrado. UFOP, Ouro Preto, 2012.
- FERNANDES, G. Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e / ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos. Brasília: Tese de doutorado. UNB, 2005.
- FORTUNATO NETO, A. “Notas de Aula de Ferrovias”. UFPR, Curitiba, 1996.
- MUNIZ DA SILVA, L.F. “Fundamentos para um Sistema de Gerência de Manutenção de Pavimentos Ferroviários Utilizando Critério de Deformação Resiliente” Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- SELIG, E.T. e WATERS, J.M. Track Geotechnology and Substructure Management. London, 1994.
- SPADA, J.L.G. “Uma Abordagem de Mecânica dos Pavimentos Aplicada ao Entendimento do Mecanismo de Comportamento Tensão-Deformação da Via Férrea”. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- STOPATTO, S. Via Permanente Ferroviária – Conceitos e Aplicações. Editora da Universidade de São Paulo, 1987. 94
- SENÇO, Wlastermiler de. Manual de Técnicas de Pavimentação. 1a Edição. São Paulo: Pini, 1997.