

AVALIAÇÃO DA NÃO LINEARIDADE DE MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS DE MATERIAIS GRANULARES DE BASE DE PAVIMENTOS OBTIDOS DURANTE O CONTROLE TECNOLÓGICO DA DUPLICAÇÃO DE UMA RODOVIA NO RS

EVALUATION OF NON-LINEARITY OF BACKCALCULATED RESILIENT MODULI OF GRANULAR BASE PAVEMENTS MATERIALS OBTAINED DURING THE TECHNOLOGICAL CONTROL OF DUPLICATION OF A HIGHWAY IN RS

Márcio da Fonseca Martins¹, Lucas Dotto Bueno¹, Luciano Pivoto Specht², Rafael Rosa Hallal³, Henrique Otto Coelho³, Deividi da Silva Pereira²

¹Discentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (PPGEC-UFSM). E-mail: marciofm88@gmail.com, lucas.bueno09@gmail.com

²Professor do PPGEC-UFSM. E-mails: luspecht@ufsm.br, dsp@ufsm.br

³Analista de Infraestrutura do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Professor Assistente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). E-mails: rrhallal@hotmail.com, hocoelho@ibest.com.br

RESUMO

A retroanálise de módulos de resiliência a partir de bacias deflectométricas determinadas em campo permite estimar a rigidez das camadas do pavimento e do subleito, possibilitando comparar os valores obtidos com os módulos de projeto de pavimentos novos. Este fato, por conseguinte, permite a adoção de uma rotina mecanicista em dimensionamentos de reforço/restauração. Neste contexto, o presente trabalho busca realizar, com auxílio do *software* BAKFAA, a retroanálise de bacias de deflexão obtidas na base granular de um trecho experimental de rodovia utilizando a viga Benkelman com três diferentes cargas no eixo traseiro do caminhão (8,2, 10,2 e 12,2 tf), visando estimar os módulos de resiliência das camadas de base, sub-base e subleito, para cada caso de carga empregada. Em função dos resultados obtidos, concluiu-se que os valores de módulo de resiliência obtidos por meio de retroanálise se encontraram dentro das expectativas geradas por trabalhos desenvolvidos com materiais similares no estado do Rio Grande do Sul. Além disso, o crescimento da rigidez das camadas de base e sub-base foi diretamente proporcional ao acréscimo de carga no caminhão, indicando que essas camadas possuem uma elasticidade não linear, crescendo à medida que as tensões confinantes aumentam no interior dos materiais granulares. Quanto ao subleito, não foram notadas grandes alterações na sua rigidez com o acréscimo de carga, portanto, percebe-se um indicativo de comportamento mais próximo da linearidade.

Palavras-chave: Módulo de Resiliência. Retroanálise. Viga Benkelman.

ABSTRACT

The backcalculation of resilient moduli from deflections basins determined in field allows estimating pavement and subgrade layers stiffness, making it possible to compare the values obtained with the new pavement design modulus. This fact, therefore, allows the adoption of a mechanistic routine in reinforcement/restoration design. In this context, the present paper seeks to perform, with the help of BAKFAA software, the backcalculation of deflections basins obtained on the granular base of an experimental highway section using the Benkelman beam with three different loads on the rear axle of truck (8.2, 10.2 and 12.2 tf), aiming to estimate the resilient modulus of the base, subbase and subgrade layers, for each case of load used. Based on the results obtained, it was concluded that the values of resilient modulus obtained from backcalculation were within the expectations generated by works developed with similar materials in the state of Rio Grande do Sul. In addition, the growth of stiffness of base and subbase was directly proportional to the load increase in the truck, indicating that these layers have a non-linear elasticity, growing as the confinant stresses increase inside the granular materials. In relation to subgrade, no significant changes were observed in its stiffness with the increase of load, thus, an indication of behavior closer to the linearity is perceived.

Keywords: Resilient Modulus. Backcalculation. Benkelman Beam.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação estrutural de pavimentos é fundamental para descrever o comportamento mecânico da estrutura e verificar a integridade dos materiais que constituem as camadas. Este processo pode ser realizado por meio de ensaios não destrutivos. Macêdo (1996) afirma que os ensaios não destrutivos provocam interrupções menores no tráfego que os ensaios destrutivos, além de não causarem danos na estrutura existente do pavimento. Desta maneira, torna-se possível a avaliação da condição estrutural do pavimento em qualquer estágio da vida de serviço da rodovia, tornando possível o retorno ao mesmo ponto a cada avaliação realizada.

O desempenho de uma camada estrutural que constitui um pavimento depende de sua rigidez. Sendo assim, convencionou-se o controle em campo da deformabilidade elástica frente à ação do carregamento do tráfego, representada pelo deslocamento vertical na superfície. Essa medida, da ordem de centésimos de milímetros, é em geral chamada de deflexão e varia ao longo da vida útil do pavimento, desde a sua construção, aumentando com o tempo e com as passagens dos veículos, devido ao surgimento de trincas. Esses deslocamentos, ou deflexões, ocasionados pela passagem dos eixos rodoviários é que provocam a fadiga do revestimento.

Papagiannakis e Masad (2008) relatam a existência de uma variedade grande de equipamentos comercializados que possibilitam a medição “in-situ” dos deslocamentos verticais sofridos pelos pavimentos, simulando a atuação de carregamentos rodoviários. A viga Benkelman é o equipamento utilizado para obtenção das medidas deflectométricas mais popular no Brasil. Componente do grupo de equipamentos que medem as deflexões por meio de carregamentos quase estáticos, a viga Benkelman determina as deflexões do pavimento sob a carga aplicada por um veículo que se desloca de maneira lenta, evitando a influência de forças inerciais.

Medina et al. (1994), Macêdo (1996) e Albernaz (1997) afirmam que a viga Benkelman foi desenvolvida na década de 1950, pelo engenheiro A.C. Benkelman, do Departamento de Transporte da Califórnia (EUA). Segundo os autores, este equipamento foi introduzido no Brasil na década de 1960 pelos engenheiros Nestor José Aratangy e Francisco Bolívar Lobo Carneiro.

Com a viga Benkelman, podem ser obtidos os seguintes parâmetros: deflexão máxima, raio de curvatura e bacia de deflexão. Segundo Balbo (2007), a deflexão máxima é bastante utilizada para verificação de compactação e drenagem adequadas das camadas estruturais do pavimento. Já o raio de curvatura é utilizado para análise da qualidade estrutural do pavimento, introduzindo uma avaliação da distribuição dos esforços ao longo das camadas. Ao realizar sucessivas medições de deflexões em diferentes pontos superficiais da estrutura do pavimento, ocorre a formação das linhas de influência da carga sobre cada ponto medido, formando as chamadas bacias de deflexão. Assim, a bacia de deflexão permite analisar as condições de rigidez de todas as camadas presentes na configuração do pavimento.

Por meio da retroanálise das bacias de deflexão, obtidas com ensaios deflectométricos, é possível estimar os módulos de resiliência das camadas do pavimento e do subleito, utilizando estes resultados como critérios de conferência ou de concepção de projetos de pavimentos. Segundo Albernaz (1997), a retroanálise é importante porque permite a avaliação estrutural comparativa entre trechos de uma mesma rodovia ou de rodovias diferentes, fornece dados para projetos de drenagem, indicando a presença de possíveis camadas rígidas no subleito, bem como proporciona a elaboração de projetos mais racionais que se convertem em pavimentos mais duráveis e de custo mais baixo.

Qualquer programa de análise de tensões, deformações e deslocamentos pode obter, indiretamente, a combinação de módulos de resiliência das camadas com os quais os deslocamentos verticais (deflexões) existentes na superfície, sob ação de um carregamento específico em pontos determinados pelo usuário, se assemelham aos valores obtidos na avaliação deflectométrica em campo. Todavia, os processos indiretos de retroanálise, através de programas que realizam apenas a análise de esforços, tornam o processo exaustivo e lento. Sendo assim, programas específicos para o ajuste das curvas medidas e calculadas foram desenvolvidos, objetivando tornar o processo mais preciso e prático. Dentre estes programas, destacam-se os mais difundidos BAKFAA e Evercalc, além

do recente BackMeDiNa.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi realizar a retroanálise de bacias de deflexão obtidas na base de um trecho experimental de rodovia utilizando a viga Benkelman com três diferentes cargas (8,2, 10,2 e 12,2 tf), visando estimar os módulos de resiliência das camadas de base, sub-base e subleito, para cada caso de carga empregada. Além disso, em função dos módulos obtidos, foi realizada uma análise da influência da variação da carga nestes valores de rigidez.

2. METODOLOGIA

O trecho experimental, alvo desta pesquisa, foi implantado em uma rodovia federal situada no estado do Rio Grande do Sul, próxima a um posto de pesagem e a uma praça de pedágio. O mapa indicando a posição real do trecho no estado do Rio Grande do Sul pode ser visto na Figura 1.



Figura 1: Mapa indicando a posição real do trecho no estado do Rio Grande do Sul

O trecho experimental possui 900 m de extensão e foi dividido em três segmentos de 300 m, onde se aplicou uma variação na constituição dos materiais empregados nas camadas do subleito, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Materiais empregados nas camadas do subleito dos três segmentos do trecho experimental

Segmento	Camada	Material
1	Camada final de terraplenagem (60 cm finais)	Argila
	Camadas Inferiores	Argila
2	Camada final de terraplenagem (60 cm finais)	Argila
	Camadas Inferiores	Areia
3	Camada final de terraplenagem (60 cm finais)	Areia
	Camadas Inferiores	Areia

No caso dos aterros em argila, a camada final de terraplenagem do subleito, de espessura igual a 0,60 m, foi executada em camadas compactadas com espessura máxima de 0,20 m. O grau de compactação foi de 100% para as três camadas. Para as regiões de maior profundidade do subleito, a compactação foi feita em camadas com espessura máxima de 0,30 m, com grau de compactação mínimo de 95% (energia de compactação normal).

No caso dos aterros em areia, as condições de fundação eram relativamente aceitáveis e o nível freático era elevado. Cabe salientar que o trecho experimental, alvo deste trabalho, possuía, ao longo de toda sua extensão, um subleito constituído por solos moles, com profundidades variando de 0,80 a 1,30 m. Logo, esses solos moles precisaram ser removidos, sendo necessário utilizar material de 1ª categoria para reconstruir o subleito. Cabe salientar que areias de qualidade satisfatória para construção rodoviária foram encontradas na própria região do projeto.

A vantagem da utilização da areia em substituição a argila, tanto nas camadas inferiores do subleito quanto na camada final de terraplenagem, vem de algumas características destes materiais. A argila confinada em uma plataforma bastante larga dificulta a saída d'água que pode penetrar na estrutura, diminuindo sua rigidez e aumentando a deformabilidade plástica do material. Já as areias possuem a propriedade de expulsar rapidamente a água mantendo sua resistência ao cisalhamento. Ademais, dependendo da argila utilizada e da umidade do substrato, pode ocorrer à ascensão capilar de água chegando, após longos períodos, a contaminar o material do macadame, contribuindo para a ruína do pavimento. Por fim, entende-se que a areia facilita a execução da obra tornando os prazos de construção mais curtos.

Em relação às demais camadas do pavimento do trecho experimental, a sub-base é constituída por macadame seco, com espessura de 21 cm, e a base granular é formada por 15 cm de brita graduada simples. O revestimento consiste em CBUQ com duas camadas de ligação, com 5 cm de espessura cada, e uma camada de rolamento também com 5 cm de espessura, com CAP modificado pelo polímero elastômero termoplástico SBS.

Até a presente data, os três segmentos do trecho experimental se encontram na condição de base imprimada com CM-30, ou seja, ainda não receberam as camadas de revestimento.

O esquema das camadas do pavimento e do subleito do trecho experimental é ilustrado na Figura 2.

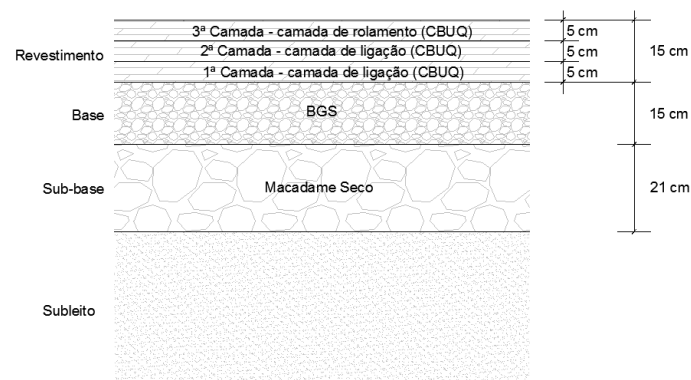


Figura 2: Esquema das camadas do pavimento e do subleito do trecho experimental

Visando a obtenção das bacias deflectométricas, foram realizados os levantamentos com a viga Benkelman na base imprimada dos três segmentos do trecho experimental, conforme exposto na Figura 3.



Figura 3: Levantamentos deflectométricos com a viga Benkelman

O ensaio com a viga Benkelman seguiu as prescrições da norma DNIT 133/2010 - ME. O caminhão utilizado possuía pneus 1000 x 20, com 12 lonas, do tipo com câmara, com frisos na banda de rodagem em boas condições e calibrados na pressão de 80 psi (0,56 MPa). Foram empregadas três diferentes cargas no eixo traseiro do caminhão, igualmente distribuídas entre as duas rodas duplas: 8,2 tf, 10,2 tf e 12,2 tf.

A relação a/b da viga empregada no ensaio foi de 2/1 (constante da viga Benkelman igual a 2). As distâncias de leitura foram: 0, 125, 250, 400, 600, 900 e 1300 mm. Essas leituras foram feitas nas estacas, de 20 em 20 m, na faixa de rolagem da direita (do lado direito) e na faixa de rolagem da esquerda (do lado esquerdo), isto é, nas faixas de rolagem que serão mais solicitadas após a abertura da pista ao tráfego.

Ao final do levantamento deflectométrico, foram obtidas 138 bacias de deflexão, no total, sendo 46 bacias para cada carga empregada.

As deflexões foram calculadas conforme a Equação 1.

$$D_n = (L_n - L_f) \times \frac{a}{b} \quad (1)$$

Em que:

D_n = deflexão nos pontos correspondentes aos diversos deslocamentos do veículo (10^{-2} mm);

L_n = leituras correspondentes aos diversos deslocamentos do veículo (10^{-2} mm);

L_f = leitura final (10^{-2} mm);

$\frac{a}{b}$ = constante da viga Benkelman.

O raio de curvatura da bacia de deflexão foi calculado por meio da Equação 2.

$$R = \frac{6250}{2 \times (D_0 - D_{25})} \quad (2)$$

Em que:

R = raio de curvatura (m);

D_0 = deflexão máxima ou deflexão no ponto de prova inicial (10^{-2} mm);

D_{25} = deflexão obtida a uma distância de 25 cm do ponto de prova inicial (10^{-2} mm).

De posse das bacias de deflexão obtidas com a viga Benkelman para cada carga, fez-se uso do *software* BAKFAA, versão 2.0, a fim de estimar os módulos de resiliência (MR) das camadas que compõem cada segmento do trecho experimental, ou seja, subleito, sub-base e base. Consideraram-se as camadas totalmente aderidas durante a realização do processo iterativo de retroanálise. Os coeficientes de Poisson utilizados na retroanálise foram de 0,40 para a base e sub-base e 0,45 para o subleito. Esses valores, por sua vez, estão de acordo com as recomendações de Bernucci et al. (2010) e Medina e Motta (2015).

Como o *software* está calibrado para um carregamento utilizado para obtenção de deflexões com o ensaio *Falling Weight Deflectometer* (FWD), onde a carga é aplicada em apenas uma área, foi necessário realizar também uma adequação da área de contato pneu pavimento no ensaio de Viga Benkelman. Essa adequação foi feita através do cálculo da área equivalente de aplicação de carga, passando de duas áreas de contato real (duas rodas) para uma área de contato equivalente de um círculo, como no caso da área de contato do FWD. Este processo está detalhado em Bueno (2016).

Findado o processo iterativo para obtenção da rigidez das camadas, o *software* apresenta a curva obtida em campo e uma curva teórica de deflexão gerada pelo programa, bem como os valores de MR de cada camada. Este procedimento busca a adequação da curva encontrada no *software* com a curva encontrada com os dados do levantamento. Como critério de parada do processo iterativo, o BAKFAA verifica internamente a precisão do ajuste das bacias pela aplicação da ferramenta RMS de

função absoluta. Esse erro obtido entre as curvas teóricas e os dados experimentais obtidos, fornecido pelo programa, é a soma dos valores absolutos das diferenças entre as deflexões medidas e calculadas em cada distância de leitura, sendo exibidos na unidade com a qual está sendo trabalhada a bacia de deflexão analisada, ou seja, no caso do BAKFAA, em milésimos de milímetros. Entende-se que este critério, que ignora a diferença percentual, pode causar compensações muito grandes nos valores modulares das camadas visando à obtenção de um valor absoluto menor.

Desta forma, o critério adotado para definir a acurácia do processo de retroanálise foi aquele proposto por Fernandes (2000), que sugere a análise de confiabilidade dos valores obtidos por retroanálise através o erro relativo calculado para cada ponto da bacia de deflexão, definido pela Equação 3.

$$\varepsilon = \left[\frac{(d_{mi} - d_{cij})}{d_{mi}} \right] \times 100 \quad (3)$$

Em que:

ε = erros aceitáveis para o ajuste entre as bacias medidas e calculadas (%);

d_{mi} = deflexão medida no ponto i da bacia medida em campo ($i = 1, 2, \dots, n$, sendo n o número de pontos analisados da bacia de deformação);

d_{cij} = deflexão calculada no ponto i da j -ésima bacia teórica ($i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, k$, sendo k , o número iterações até ser atingido o erro máximo permitido).

Em sua dissertação de mestrado, a autora trabalhou com o critério de ajuste determinado pelos erros admissíveis em cada um dos sensores avaliados, adaptados a este estudo conforme Tabela 2. Entende-se que o critério definido pela autora é adequado aos processos de retroanálise, permitindo que o operador trabalhe também com a sua sensibilidade prática de engenharia, evitando a obtenção de módulos resilientes irracionais para determinados materiais, visando apenas o alcance de ajustes percentuais rigorosos.

Tabela 2: Critério de confiabilidade adotado nas retroanálises

Distância do Ponto de Aplicação de Carga (mm)	Erro Admissível (%)
0	10
125	10
250	10
400	10
600	20
900	20
1300	50

Com os valores de MR de cada camada, referente a cada levantamento, realizou-se um tratamento estatístico conforme recomendações da norma DNER-PRO 011/1979, onde se obteve a rigidez característica dos materiais, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) dos valores de MR.

Vale salientar que o Manual de Restauração do DNIT (2006) deixa claro que a determinação de bacias deflectométricas para obtenção dos módulos resilientes por retroanálise (visando sua aplicação em projetos mecanicista-empíricos de reforço de pavimentos) deve ser realizada exclusivamente por ensaios FWD. Como este não é o objetivo deste trabalho, entende-se que, ciente dos erros envolvidos no processo, é possível trabalhar com módulos retroanalisados a partir da viga Benkelman para verificar a integridade das camadas e analisar seus comportamentos a partir de diferentes níveis de carga.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 ilustra as 138 deflexões máximas (abaixo do ponto inicial de aplicação de carga) obtidas com a viga Benkelman nos segmentos avaliados. No caso da carga de 8,2 tf, a maior deflexão máxima registrada foi 84×10^{-2} mm na bacia número 10 do segmento 1 e a menor, 14×10^{-2} mm na bacia número 5 do segmento 1. Já no caso da carga de 10,2 tf, a maior deflexão máxima registrada foi 94×10^{-2} mm na bacia número 56 do segmento 1 e a menor, 24×10^{-2} mm na bacia número 51 do segmento 1. Por fim, no caso da carga de 12,2 tf, a maior deflexão máxima registrada foi 104×10^{-2} mm na bacia número 102 do segmento 1 e a menor, 36×10^{-2} mm na bacia número 97 do segmento 1.

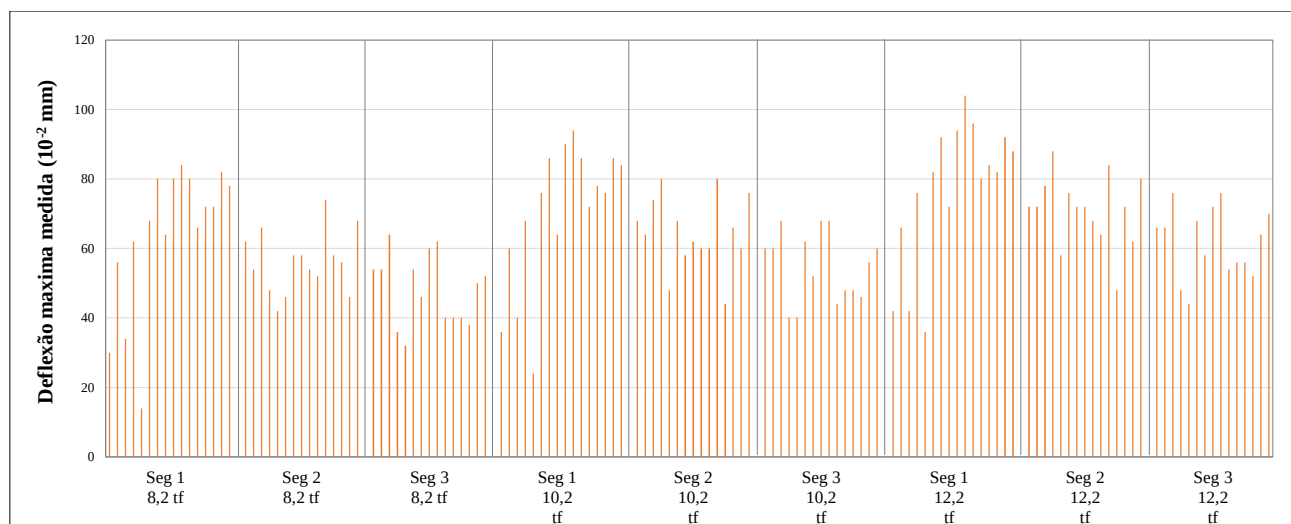


Figura 4: Deflexões máximas obtidas

A Tabela 3 apresenta a deflexão máxima média, juntamente com o seu desvio padrão e coeficiente de variação, para as três cargas empregadas no ensaio de viga Benkelman.

Tabela 3: Deflexão máxima média, juntamente com o desvio padrão e coeficiente de variação, para as três cargas empregadas no ensaio de viga Benkelman

Carga de 8,2 tf			
	Segmento 1	Segmento 2	Segmento 3
Deflexão máxima média (10^{-2} mm)	64	58	49
Desvio padrão (10^{-2} mm)	21	10	11
Coeficiente de variação (%)	32	18	22
Carga de 10,2 tf			
	Segmento 1	Segmento 2	Segmento 3
Deflexão máxima média (10^{-2} mm)	70	66	56
Desvio padrão (10^{-2} mm)	21	11	11
Coeficiente de variação (%)	29	17	20
Carga de 12,2 tf			
	Segmento 1	Segmento 2	Segmento 3
Deflexão máxima média (10^{-2} mm)	77	72	63
Desvio padrão (10^{-2} mm)	21	11	11
Coeficiente de variação (%)	27	15	17

Observando-se a Tabela 3, percebe-se que, para as três cargas empregadas no ensaio de viga Benkelman, o segmento que apresentou a maior deflexão máxima média foi sempre o segmento 1, cujo subleito é constituído por argila, tanto nas camadas inferiores, quanto na camada final de terraplenagem. Em contrapartida, para as três cargas empregadas no ensaio de viga Benkelman, o segmento que apresentou a menor deflexão máxima média foi sempre o segmento 3, cujo subleito é

composto por areia nas camadas inferiores e na camada final de terraplenagem.

A Figura 5 ilustra os 138 raios de curvatura obtidos. Cabe salientar que esses raios foram calculados conforme a Equação 2, apresentada anteriormente. O maior raio de curvatura registrado foi 521 m e o menor, 63 m.

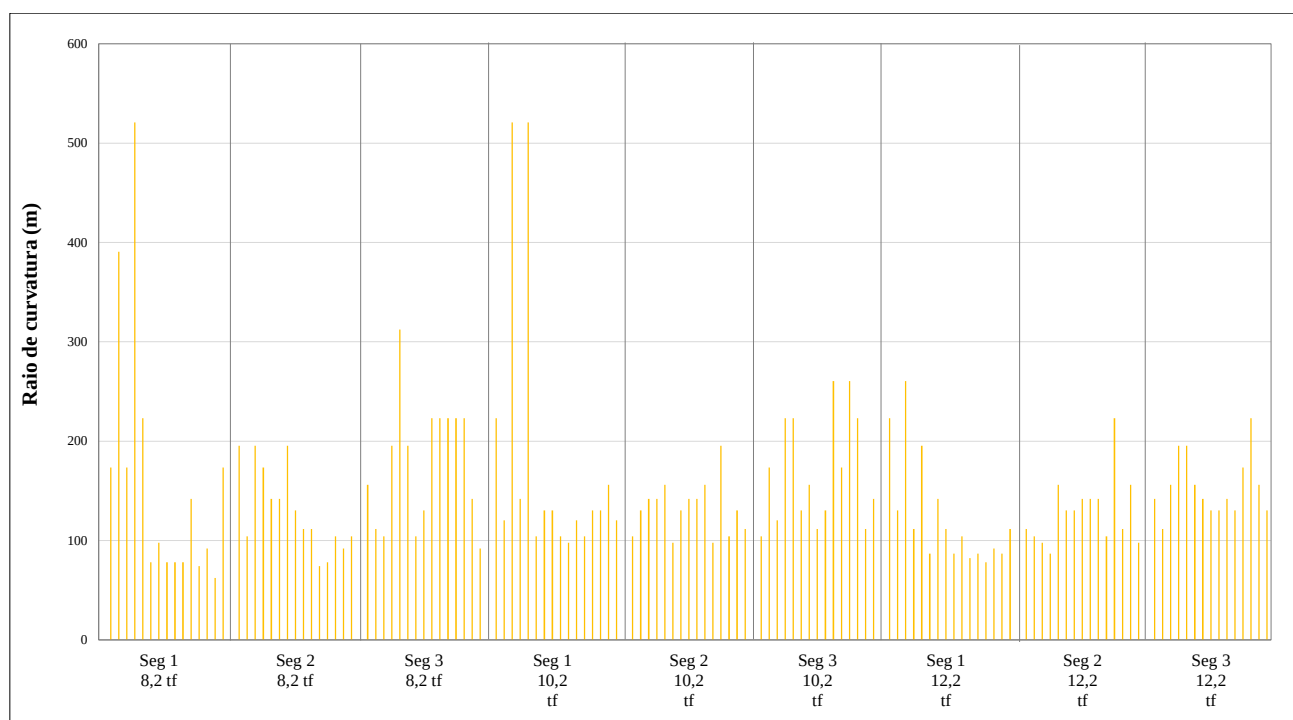


Figura 5: Raios de curvatura obtidos

A Tabela 4 apresenta o raio de curvatura médio, juntamente com o seu desvio padrão e coeficiente de variação, para as três cargas empregadas no ensaio de viga Benkelman.

Tabela 4: Raio de curvatura médio, juntamente com o seu desvio padrão e coeficiente de variação, para as três cargas empregadas no ensaio de viga Benkelman

Carga de 8,2 tf			
	Segmento 1	Segmento 2	Segmento 3
Raio de curvatura médio (m)	250	133	173
Desvio padrão (m)	372	42	64
Coeficiente de variação (%)	149	32	37
Carga de 10,2 tf			
	Segmento 1	Segmento 2	Segmento 3
Raio de curvatura médio (m)	178	131	166
Desvio padrão (m)	137	26	55
Coeficiente de variação (%)	77	20	33
Carga de 12,2 tf			
	Segmento 1	Segmento 2	Segmento 3
Raio de curvatura médio (m)	124	128	151
Desvio padrão (m)	55	33	33
Coeficiente de variação (%)	44	26	22

Observando-se a Tabela 4, percebe-se que, para as três cargas empregadas no ensaio de viga Benkelman, os raios de curvatura médio, nos três segmentos, foram valores altos, acima de 100 metros, o que pressupõe uma boa distribuição de tensões ao longo das camadas do pavimento, segundo a norma DNER-PRO 011/79.

A Tabela 5 mostra os valores médios de MR retroanalizados, por meio do *software* BAKFAA, para as camadas de base, sub-base e subleito dos três segmentos do trecho experimental para cada

caso de carga empregada.

Tabela 5: Valores médios de MR retroanalizados

	Carga de 8,2 tf								
	Segmento 1			Segmento 2			Segmento 3		
	Base	Sub-base	Subleito	Base	Sub-base	Subleito	Base	Sub-base	Subleito
MR (MPa)	294	155	187	465	191	152	522	325	158
Desvio padrão (MPa)	134	117	53	103	116	69	50	161	63
Coefficiente de variação (%)	46	75	28	22	60	45	10	50	40
	Carga de 10,2 tf								
	Segmento 1			Segmento 2			Segmento 3		
	Base	Sub-base	Subleito	Base	Sub-base	Subleito	Base	Sub-base	Subleito
MR (MPa)	622	416	87	559	399	95	562	393	112
Desvio padrão (MPa)	79	98	63	86	118	23	58	136	27
Coefficiente de variação (%)	13	23	73	15	30	24	10	35	24
	Carga de 12,2 tf								
	Segmento 1			Segmento 2			Segmento 3		
	Base	Sub-base	Subleito	Base	Sub-base	Subleito	Base	Sub-base	Subleito
MR (MPa)	583	522	125	620	465	98	725	421	133
Desvio padrão (MPa)	240	176	66	54	116	21	120	91	37
Coefficiente de variação (%)	41	34	53	9	25	21	17	22	28

As distâncias de leitura bastante aproximadas são de difícil controle e operação durante o ensaio com a viga Benkelman, tornando assim o delineamento da bacia menos confiável quando determinado a partir deste equipamento, principalmente quando a viga utilizada não realiza a aquisição de dados da forma eletrônica. O reflexo de bacias mal delineadas são dispersões acentuadas no procedimento de retroanálise e um conjunto modular com altos coeficientes de variação, fato que pode ser comprovado na Tabela 5.

A Figura 6 mostra os valores médios de MR retroanalizados, por meio do *software* BAKFAA, para as camadas de base, sub-base e subleito dos três segmentos do trecho experimental, para as três cargas consideradas.

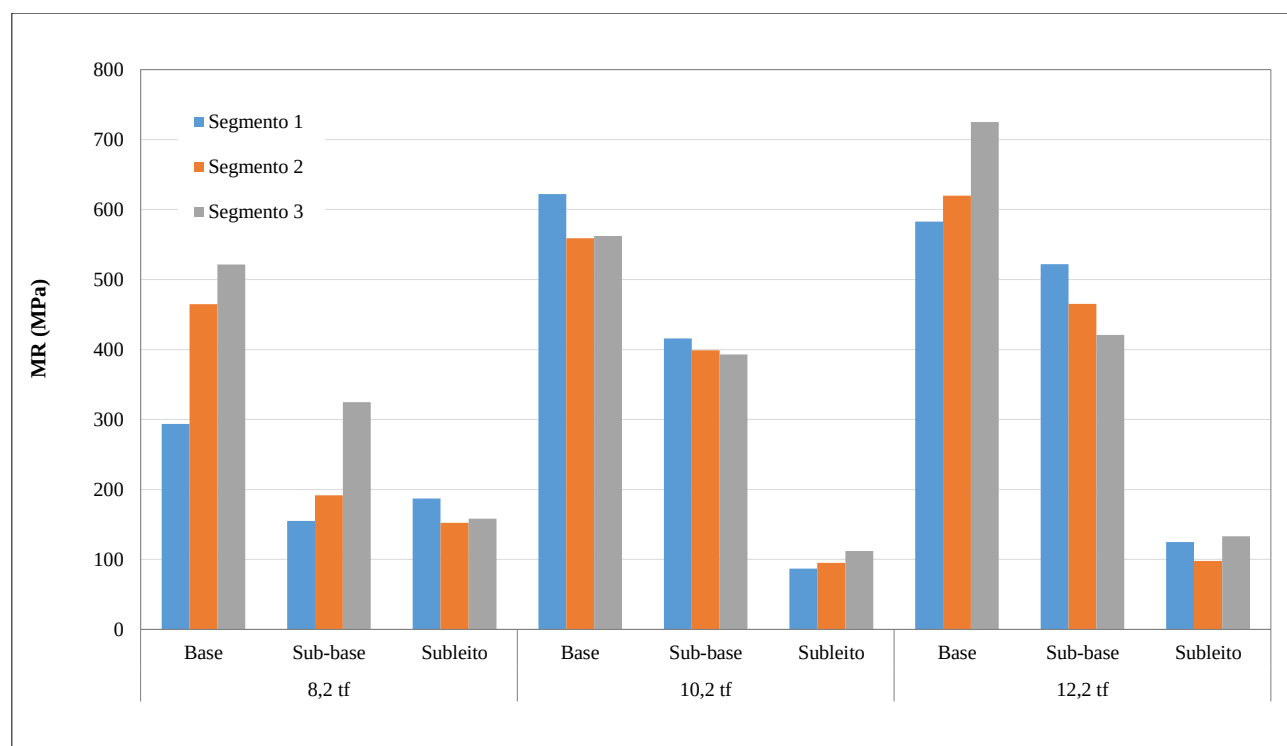


Figura 6: Valores médios de MR retroanalizados para as três cargas consideradas

Analizando a Figura 6, verifica-se que o crescimento da rigidez da base e sub-base é diretamente proporcional ao acréscimo de carga no caminhão para realização do ensaio de viga Benkelman. Já o subleito não acompanha esse comportamento, uma vez que a sua rigidez não sofre muita alteração com os acréscimos de carga.

Em relação à magnitude dos valores de rigidez encontrados por meio de retroanálise, verificou-se que os módulos de resiliência encontraram-se dentro das expectativas geradas por trabalhos desenvolvidos com materiais similares no estado do Rio Grande do Sul.

Ribas (2014), retroanalizando, por meio do *software* Sispav – Retroanálise (atualmente nomeado por BackMeDiNa), bacias deflectométricas coletadas com o FWD (carga de 8,2 tf) em cinco rodovias do Estado do Rio Grande do Sul, encontrou módulos de resiliência médios que variaram entre 119 e 345 MPa para a brita graduada simples, entre 103 e 215 MPa para o macadame hidráulico, e entre 121 e 176 MPa para a argila. Para a areia, empregada no subleito de apenas uma das rodovias estudadas, o valor mínimo foi de 40 MPa, o máximo de 500 MPa e o médio de 150 MPa.

Santos (2015), retroanalizando, por meio do *software* BAKFAA, bacias deflectométricas coletadas com a viga Benkelman (carga de 8,2 tf) em três trechos experimentais no município de Santa Maria-RS, encontrou módulos de resiliência médios que variaram entre 119 e 345 MPa para a brita graduada simples, entre 228 e 494 MPa para o macadame seco, e entre 147 e 244 MPa para a argila.

Bueno (2016), também retroanalizando bacias deflectométricas coletadas com a viga Benkelman (carga de 8,2 tf) nos mesmos trechos experimentais estudados por Santos (2015), por meio do *software* BAKFAA, encontrou módulos de resiliência médios que variaram entre 78 e 371 MPa para a brita graduada simples, entre 130 e 338 MPa para o macadame seco, e entre 142 e 227 MPa para a argila.

Assim, pode-se perceber que, em comparação com os MR citados na literatura consultada, os MR do presente trabalho estão relativamente coerentes.

Cabe salientar que o ensaio com a viga foi realizado acima da camada de base (sem a capa de revestimento), portanto, o estado de tensões nas camadas granulares é maior do que aquele determinado após a execução do concreto asfáltico. Como os módulos dos materiais granulares são dependentes do estado de tensões, foram encontrados, neste trabalho, módulos altos retroanalizando a viga diretamente sobre a base granular, o que provavelmente não aconteceria de forma tão destacada se os resultados fossem determinados a partir de bacias deflectométricas medidas sobre o revestimento.

Ressalta-se ainda que, para as três cargas empregadas, houve bastante dificuldade nos ajustes com o BAKFAA. Porém, pode-se dizer que este fato é normal para dados de viga acima de camadas granulares. Além disso, para as três cargas empregadas, houve problemas com a distância de 12,5 cm. Nos levantamentos com a viga Benkelman visando à obtenção da bacia deflectométrica para determinação dos módulos resilientes retroanalizados essa leitura não é interessante, pois é difícil que o caminhão pare a uma distância tão próxima do ponto de aplicação de carga inicial. Isso gera um erro no ponto de leitura que, por consequência, é transferido para os resultados da retroanálise.

4. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos, concluiu-se que:

a) Para a base, os valores médios de MR obtidos para a carga de 8,2 tf variaram de 294 a 622 MPa, de 465 a 620 MPa e de 522 a 725 MPa para os segmentos 1, 2 e 3, respectivamente. Para a sub-base, os valores médios de MR obtidos para a carga de 8,2 tf variaram de 155 a 522 MPa, de 191 a 465 MPa e de 325 a 421 MPa para os segmentos 1, 2 e 3, respectivamente. Para o subleito, os valores médios de MR obtidos para a carga de 8,2 tf variaram de 87 a 187 MPa, de 95 a 195 MPa e de

112 a 158 MPa para os segmentos 1, 2 e 3, respectivamente. Entende-se assim que os valores de rigidez obtidos por meio de retroanálise se encontraram dentro das expectativas geradas por trabalhos desenvolvidos com materiais similares no estado do Rio Grande do Sul, a exemplo de Ribas (2014), Santos (2015) e Bueno (2016);

b) Não obstante, destaca-se que esses valores tendem a serem menores quando a retroanálise é efetuada em estruturas de pavimento completo (com a presença do revestimento asfáltico), devido à redução das componentes atuantes do estado de tensões nas camadas granulares. Desta forma, indica-se que a escolha de valores de rigidez adotados em projeto não pode negligenciar as tensões atuantes na estrutura avaliada;

c) O crescimento da rigidez das camadas de base e sub-base foi diretamente proporcional ao acréscimo de carga no caminhão, indicando que essas camadas, nas estruturas de pavimento avaliadas no decorrer deste estudo, possuem uma elasticidade não linear, crescendo à medida que as tensões confinantes aumentam no interior dos materiais granulares;

d) Quanto ao subleito, não foram notadas grandes alterações na sua rigidez com o acréscimo de carga. Desta forma, entende-se que ele pode ter um comportamento mais próximo da linearidade para as situações avaliadas nesta pesquisa.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERNAZ, C. A. V. Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão. 1997. 107 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ. Programa de Engenharia de Transportes. Rio de Janeiro/RJ.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração. Oficina de Textos, São Paulo/SP, 2007. 558 p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Abeda, Rio de Janeiro/RJ, 2010. 504 p.

BUENO, L. D. Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS. 2016. 471 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria/RS.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (DNER). DNER-PRO 011/79: Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro/RJ, 1979. 16 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de restauração de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro/RJ, 2006. 310 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 133/2010 - ME: Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2010. 8 p.

FERNANDES, I. S. Avaliação do comportamento mecânico da camada de brita graduada “in situ”. 2000. 199 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis/SC.

MACÊDO, F. N. Retroanálise de bacias de deflexão reais e teóricas obtidas por métodos estáticos e dinâmicos. 2003. 265 p. Tese (doutorado) – Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Brasília/DF.

MACÊDO, J. A. G. Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. 1996. 478 p. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ. Programa de Engenharia de Transportes. Rio de Janeiro/RJ.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos pavimentos. Interciência, Rio de Janeiro/RJ, 2015. 640 p.

MEDINA, J; MACÊDO, J. A. G; MOTTA, L. M. G. Utilização de ensaios deflectométricos e de laboratório para avaliação estrutural de pavimentos. In: 28ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Belo Horizonte: ABPv, 1994. Anais..., 1994. p. 595-625.

PAPAGIANNASKIS, A. T. MASAD, E. A. Pavement design and materials. John Wiley & Sons, New Jersey/EUA, 2008. 544 p.

RIBAS, J. Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e sua aplicação em uma análise de custo/benefício. 2014. 190 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria/RS.

SANTOS, M. S. Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria-RS. 2015. 204 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria/RS.