

## ANÁLISE DA EXTRAPOLAÇÃO DAS FUNÇÕES MÓDULO SEMENTE DE FONSECA PARA O COEFICIENTE “N” DE ALBERNAZ EM RETROANÁLISES VIA SOFTWARE BACKMEDINA

MATHEUS DA COSTA SCHWANTZ<sup>1</sup>; PRISCILA MILECH THEISEN<sup>2</sup>; CHEYENE FERRAZ DE BORBA<sup>3</sup>; OTÁVIO KICKHOFEL DA FONSECA<sup>4</sup>; ELIZANDRA DOS SANTOS PAGANI<sup>5</sup>; KLAUS MACHADO THEISEN<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – [matheuscswantz@gmail.com](mailto:matheuscswantz@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – [priscila.milech@gmail.com](mailto:priscila.milech@gmail.com)

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas – [cheyeneferraz@gmail.com](mailto:cheyeneferraz@gmail.com)

<sup>4</sup>Universidade Federal de Pelotas – [otaviokfonseca@gmail.com](mailto:otaviokfonseca@gmail.com)

<sup>5</sup>Universidade Federal de Pelotas – [elizandradspagani@gmail.com](mailto:elizandradspagani@gmail.com)

<sup>6</sup>Universidade Federal de Pelotas – [theisenkm@yahoo.com.br](mailto:theisenkm@yahoo.com.br)

### 1. INTRODUÇÃO

O monitoramento da integridade estrutural dos pavimentos é uma tarefa central dos sistemas de gerenciamento de pavimentos para a análise das necessidades e o subsequente projeto, priorização e otimização dos projetos de manutenção e reabilitação do pavimento (KARGAH-OSTADI & STOFFELS, 2015). Devido ao extenso comprimento de redes de infraestrutura, dispositivos de teste não destrutivo (NDT), incluindo o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), tornaram-se a abordagem de monitoramento mais amplamente usada (HAAS *et al.* 1994, *apud* KARGAH-OSTADI & STOFFELS, 2015).

A partir dos dados coletados pelo FWD, faz-se a retroanálise estática, que é capaz de determinar um modelo de comportamento estrutural do pavimento e identificar os módulos elásticos das camadas do pavimento e do subleito a partir do carregamento de pico e as deflexões correspondentes (MACHADO, 2012; MATSUI *et al.*, 2006). Geralmente, a retroanálise é um procedimento instável que é muito influenciado por vários tipos de causas de erro, entre eles, os módulos semente utilizados na iteração inicial das retroanálises. Por isso, a seleção de valores de sementes para módulos de camada influenciaria altamente os resultados da retroanálise (MATSUI *et al.*, 2006).

Os módulos semente escolhidos para a retroanálise de pavimentos podem ter impactos significativos no desempenho do *software* utilizado e, às vezes, nas soluções finais dos módulos obtidos pela retroanálise. Praticamente todos os *softwares* fornecem módulos semente gerados internamente em seu procedimento de cálculo. No entanto, como os módulos semente gerados internamente nem sempre produzem resultados satisfatórios, o uso de módulos semente de entrada do usuário é geralmente encorajado, seguindo recomendações da ASTM – D5858/15 (FWA & RANI, 2005).

Fonseca (2021) propôs a criação de um modelo de cálculo de módulos semente afim de atenuar as dificuldades relacionadas ao tempo de retroanálise, imprecisão dos resultados e a subjetividade da escolha de módulos semente, considerando que a área normalizada ( $A_n$ ) abrangida estaria dentro do intervalo  $0,1 \leq A_n \leq 0,9$ , e que o coeficiente “n” oriundo do ajuste das bacias deflectométricas sugerido por Albernaz (1997) estivesse entre  $1 \leq n \leq 2$ . Nesse sentido, Fonseca (2021) fez uma comparação entre os tempos obtidos com a retroanálise utilizando os módulos sugeridos pelo BackMedina® e utilizando os módulos semente calculados pelo seu método, constatando que é possível abreviar o tempo do processo iterativo para

73,66% a 9,27% do tempo original, obtendo ganhos em termos de produtividade aliado a precisão dos resultados fornecida pelo BackMedina®.

Assim, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar se ampliar o intervalo dos valores de “n” do ajuste de Albernaz (1997), considerando  $n \leq 1$  e  $n \geq 2$ , apresenta ganhos em termos de tempo de retroanálise e precisão, utilizando o modelo proposto por Fonseca (2021) para obtenção dos módulos semente.

## 2. METODOLOGIA

Para o teste de extrapolação do método proposto por Fonseca (2021), realizou-se uma análise estatística dos tempos de processamento das retroanálises no programa BackMedina® em duas situações: i) utilizando os módulos de resiliência iniciais sugeridos pelo programa (SMS) e ii) fazendo uso dos módulos semente produzidos utilizando o método Fonseca (2021) (CMS). Para tal, utilizou-se o banco de dados de bacias deflectométricas desenvolvido por Theisen *et al.* (2020) no programa WinJULEA, para a realização do estudo.

Estabeleceu-se parâmetros para a categorização e escolha das bacias disponíveis no banco de Theisen *et al.* (2020). Primeiramente, dividiu-se as bacias conforme o valor de “n”, sendo um grupo com  $n \leq 1$ , contendo 334 bacias, sendo 25 escolhidas aleatoriamente; e outro com  $n \geq 2$ , contendo 160 bacias, com 25 escolhidas aleatoriamente, totalizando-se uma amostra de 50 bacias. Após, calculou-se o “n” médio e a área normalizada média dos universos totais, para estabelecer os subgrupos dentro das 50 bacias escolhidas, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Diretrizes da análise proposta

Grupo $n \leq 1$									
"n" médio	"A <sub>n</sub> " médio	Subgrupo 1 (G1)		Subgrupo 2 (G2)		Subgrupo 3 (G3)		Subgrupo 4 (G4)	
0,733	0,521	n	A <sub>n</sub>						
		<0,733	<0,521	<0,733	>0,521	>0,733	<0,521	>0,733	>0,521
		7 bacias		6 bacias		6 bacias		6 bacias	
Grupo $n \geq 2$									
"n" médio	"A <sub>n</sub> " médio	Subgrupo 1 (G1)		Subgrupo 2 (G2)		Subgrupo 3 (G3)		Subgrupo 4 (G4)	
2,305	0,293	n	A <sub>n</sub>						
		<2,305	<0,293	<2,305	>0,293	>2,305	<0,293	>2,305	>0,293
		7 bacias		6 bacias		6 bacias		6 bacias	

As estruturas de pavimento que geraram as bacias eram compostas de revestimento, base, sub-base e sub-leito, com espessuras que variavam conforme o seguinte: revestimento entre 10 e 45 cm; base entre 15 e 75 cm e sub-base entre 15 e 75cm. Considerou-se a carga padronizada de um equipamento FWD com pressão de contato de 600 kPa em um raio de 15cm, resultando em uma força de 4241,2 kgf. Adotou-se a temperatura do ar e do pavimento como iguais no valor de 25°C, além de camadas aderidas e coeficientes de Poisson de revestimento, base, sub-base e subleito como 0,30; 0,40; 0,40 e 0,45; respectivamente.

De posse destes dados, organizou-se tabelas para serem exportadas para o *software* BackMedina para a execução das retroanálises e levantamento dos tempos de processamento para o caso SMS. Ao final das retroanálises, armazenava-se o tempo de processamento, os módulos de resiliência gerados e o erro percentual. Enquanto esses dados eram obtidos, prosseguiu-se para a determinação dos módulos semente pelo método Fonseca (2021) em função da

deflexão máxima, área normalizada e constante “n” das bacias. Após, tais módulos eram inseridos de forma manual no programa, para essas mesmas bacias, com o fim de aplicar o caso CMS da mesma forma supracitada.

Ao final da produção dos dados, calculou-se, para todos os subgrupos e para as duas situações (SMS e CMS), a média de tempo de retroanálise, o desvio padrão e o coeficiente de variação. E, por fim, determinou-se o ganho percentual em tempo no processamento de dados. Assim, conseguiu-se determinar a validade da aplicação do método desenvolvido por Fonseca (2021) na produção de módulos semente para o escopo deste trabalho.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a média aritmética dos tempos, que estão indicados em minutos e segundos; o desvio padrão, indicado por DP; e o Coeficiente de variação, indicado por CV; a Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados encontrados.

Tabela 2: Resultados na análise do tempo de processamento

Grupo	Subgrupo	SMS			CMS			Redução de tempo
		Média	DP	CV	Média	DP	CV	
$n \geq 1$	G1	21:15	06:20	29,9%	17:23	09:10	52,8%	18,2%
	G2	25:42	03:38	14,2%	23:03	07:41	33,3%	10,3%
	G3	22:49	09:06	39,9%	10:00	06:12	62,1%	56,2%
	G4	22:37	09:37	42,5%	19:58	13:17	66,5%	11,7%
$n \geq 2$	G1	06:34	05:31	84,0%	09:05	05:04	55,8%	-38,2%
	G2	10:02	06:31	64,8%	04:41	05:20	113,5%	53,3%
	G3	12:33	10:02	80,0%	03:54	02:19	59,1%	68,9%
	G4	07:33	02:38	34,8%	06:20	04:24	69,5%	16,1%

Dos oito subgrupos, apenas um não apresentou redução do tempo médio de retroanálise. O tempo total de processamento de dados SMS geral foi de 13h09min40s, enquanto que no método CMS foi de 9h48min56s, o que representou uma média da redução de tempo de 25,42%, havendo subgrupos em que essa redução chegou a quase 70%. Os desvios padrão foram relativamente baixos em alguns casos, o que mostra que o espaço amostral pouco diferiu da média encontrada dos tempos. Entretanto, alguns grupos apresentaram coeficiente de variação altos, o que mostra que houve algumas discrepâncias nesse padrão encontrado, embora sejam raras mas significantes para o espaço amostral adotado. Apesar do subgrupo 1 de  $n \geq 2$  ter tido um aumento de 38,15% no tempo de retroanálise, o coeficiente de variação de 55,76% mostra que podem existir reduções em algumas bacias dentro da amostra, como foi o caso, em que duas das sete bacias reduziram o tempo de retroanálise com os módulos semente.

Além de reduzir o tempo de processamento, outra conclusão que corrobora o estímulo à aplicação do método Fonseca para esses intervalos de “n” refere-se ao erro associado à retroanálise. Houve redução de 4,65% no erro para  $n \leq 1$  no caso CMS e de 1,08% para  $n \geq 2$  no caso CMS, o que representa outra vantagem associada à utilização deste método.

Comparando-se os resultados apresentados com os obtidos por Fonseca (2021) na análise dos casos em que  $1 \leq n \leq 2$ , percebemos que ele concluiu que nesses casos as reduções médias de tempo chegavam a 26,34%. Tais resultados

estão de acordo entre si e ratificam a teoria inicial proposta de ampliação da aplicação deste método.

#### 4. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nesta pesquisa pode-se concluir que o cálculo de módulos semente desenvolvido por Fonseca (2021) é aplicável também para bacias com  $n \leq 1$  e  $n \geq 2$ , não somente para  $1 \leq n \leq 2$ , que foi o intervalo definido pelo referido autor. Dessa forma, com uma redução de tempo média próxima dos 25% para ambos os casos, percebemos que a utilização de módulos semente melhora significativamente o tempo de processamento, representando maior produtividade e assertividade nos cálculos.

#### 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. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

FONSECA, O. K. **Estudo de aplicação de banco de dados deflectométricos baseado em três parâmetros para geração de módulos semente em retroanálise empregando o programa BackMeDiNa**. 2021. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil) – UFPEL.

FWA, T. F.; RANI, T. S. Seed modulus generation algorithm for backcalculation of flexible pavement moduli. *Transportations Research Record*. **Journal of Transportation Research Record**, Washington, D.C. v.1905, pág.117-127, 1995.

KARGAH-OSTADI, N; STOFFELS, S. M. Backcalculation of Flexible Pavement Structural Properties Using a Restart Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy. **Journal of Computing in Civil Engineering**, Vol. 29, Issue 2, 2015. Pennsylvania.

MACHADO, A. B. A. S. B. **Contribuição para a avaliação estrutural de infraestruturas rodoviárias por métodos não destrutivos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

MATSUI, K. *et al.* Influence of Seed Layer Moduli on Finite Element Method–Based Modulus Backcalculation Results. **Journal of the Transportation Research Board**, Washington, D.C. v. 1915, pág. 122-136, 2006.

THEISEN, K. M.; THEISEN, P. M.; FONSECA, O. K. **Proposta de Modelo Baseado em Análise Mecânica para Cálculo da Deflexão Máxima Obtida via Falling Weight Deflectometer e Fatores de Correção de Temperatura**. 2020. 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET 100% Digital, 16 a 21 de novembro de 2020. Disponível em <[https://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Infraestrutura/Dimensionamento,%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimento%20I/1\\_446\\_AC.pdf](https://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Infraestrutura/Dimensionamento,%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimento%20I/1_446_AC.pdf)>.