RETROANÁLISE DE MÓDULOS DE RESILIÊNCIA: ASPECTOS INERENTES AO PROCESSO ITERATIVO DE AJUSTE DE BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS

RESILIENT MODULUS BACKCALCULATION: ASPECTS INHERENT TO THE DEFLECTOMETRIC BASIN ADJUSTMENT PROCESS

Lucas Dotto Bueno[1]; Deividi da Silva Pereira[2]; Luciano Pivoto Specht[3]; Gustavo dos Santos Pinheiro[4]; Elemar Taffe Junior[5]

[1] Engenheiro Civil da Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência da Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
Autor para correspondência. E-mail: lucas.bueno09@gmail.com
[2] Professor associado do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. E-mail: dsp@ufsm.br
[3] Professor associado do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.
E-mail: luspecht@gmail.com
[4] Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade de São Paulo, Brasil.
E-mail: gustavo.snt@hotmail.com
[5] Gerente de Engenharia – Pavesys Engenharia de Pavimentos, Brasil. E-mail: etaffe@uol.com.br

RESUMO

A retroanálise de módulos de resiliência a partir de ensaios com o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) é uma alternativa para a caracterização da rigidez dos materiais que constituem as camadas do pavimento. Em vista disso, mediante realização de campanhas semestrais com o FWD, em dois trechos monitorados na cidade de Santa Maria/RS (Brasil), buscou-se identificar as diferenças entre os resultados oriundos dos procedimentos de retroanálise efetuados com os programas BAKFAA, BackMeDiNa, Evercalc e MnLayer. Ademais, avaliou-se a influência das condições de aderência entre as camadas e da correção das bacias deflectométricas, em função da temperatura, nos resultados determinados pelo processo iterativo. Constatou-se que a atribuição de aderência total nas interfaces reduz consideravelmente os módulos retroanalisados dos materiais granulares. Em relação à correção de temperatura, verificou-se adequada a determinação da rigidez dos materiais granulares e subleito mediante a realização da retroanálise sem nenhum ajuste nas bacias de campo. Tratando-se dos distintos programas, verificou-se certa uniformidade entre os resultados obtidos, salvo os casos dos módulos discretamente superiores determinados com o BackMeDiNa para o revestimento asfáltico, e a rigidez significativamente inferior obtida para a camada de sub-base granular, com o Evercalc, quando comparados aos demais softwares.
Palavras-chave: Avaliação Estrutural, Falling Weight Deflectometer, Retroanálise.

ABSTRACT

The resilient modulus backcalculation based on tests with the Falling Weight Deflectometer (FWD) is an alternative for the characterization of the material stiffness on the pavement layers. In view of this, by conducting semi-annual campaigns with the FWD, in two monitored sites in the city of Santa Maria/RS (Brazil), this paper aims to identify the differences between the results from the backcalculation procedures carried out with the programs BAKFAA, BackMeDiNa, Evercalc and MnLayer. In addition, the influence of bounding conditions between layers and the correction of deflectometric basins, as a function of temperature, on the results determined by the iterative process was evaluated. It was found that the attribution of total bounding in the interfaces considerably reduces the backcalculated modulus of the granular materials. Regarding temperature correction, the determination of the stiffness of the granular and subgrade materials was found to be adequate by performing a backcalculation without any adjustment in the field basins. In the case of the different programs, there was a certain uniformity between the results obtained, except for the cases of slightly higher modulus determined with BackMeDiNa for the asphalt coating, and the significantly lower stiffness obtained for the granular sub-base layer, with the Evercalc, when compared to other software.
Keywords: Structural Evaluation, Falling Weight Deflectometer, Backcalculation

1. INTRODUÇÃO

Um pavimento, abordado sob a ótica mecanicista, pode ter sua resposta estrutural estimada por cálculo das tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura. Para que isso seja possível, as camadas do pavimento devem ser caraterizadas a partir das suas espessuras e dos parâmetros de rigidez dos materiais que a constituem. Em pavimentos existentes, uma alternativa para obtenção da rigidez dos materiais é a realização do processo de retroanálise, a partir de ensaios deflectométricos efetuados com equipamentos como o Falling Weight Deflectometer (FWD).

Todavia, como as medidas das deflexões são coletadas em pista, torna-se inevitável a interferência de fatores externos nos resultados obtidos durante os levantamentos. Como o concreto asfáltico (CA) exibe comportamento termossuscetível, um pavimento permite deflexões maiores quando for submetido a uma determinada carga e estiver em alta temperatura, do que quando submetido a esta mesma carga em uma temperatura mais baixa.

Conforme Lytton e Smith (1985), as medidas deflectométricas são usualmente corrigidas para uma temperatura de referência, objetivando uniformizar as leituras para uma temperatura padrão, visando sua utilização como parâmetro de projeto. Existem, todavia, alguns questionamentos quanto à correção completa da bacia em função da temperatura, já que, teoricamente, o comportamento termossuscetível do CA influenciaria apenas nas medidas dos primeiros sensores (mais representativos em relação à compressão elástica do conjunto estrutural de camadas, incluindo o revestimento).

No dimensionamento de reforço/restauração de pavimentos existentes por rotinas mecanicista-empíricas, pode-se, com as bacias deflectométricas medidas pelo FWD, identificar o módulo de resiliência das camadas, conforme as condições existentes em campo, pelas técnicas de obtenção dos módulos de resiliência por retroanálise. Neste estudo, optou-se por trabalhar com quatro diferentes programas. O primeiro deles é o BAKFAA, elaborado pela Federal Aviation Administration (FAA). O segundo programa utilizado foi o BackMeDiNa, ferramenta de retroanálise do software de dimensionamento MeDiNa, concebido originalmente por Franco (2007), com a mesma rotina de cálculos do AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas).

O Evercalc, terceiro programa empregado nas retroanálises, é uma ferramenta do software Everseries, desenvolvido pelo Washington State Department of Transportation (WSDOT). O último programa empregado foi o MnLayer, desenvolvido na Universidade de Minnesota, por Khazanovich e Wang (2007), com interface gráfica foi elaborada na USP (BALBO e KHAZANOVICH, 2007). Diferentemente dos programas anteriormente mencionados, o MnLayer não possui um módulo específico para retroanálise. Todavia, esse procedimento pode ser realizado através do cálculo dos deslocamentos simulando um ensaio com o equipamento FWD.

Dentro desta temática, a escolha do programa computacional para a realização do processo iterativo e a correção das deflexões em função da temperatura são alguns dos fatores que podem alterar os resultados da retroanálise. Ainda, a determinação das condições de aderência nas interfaces entre as camadas da estrutura avaliada é outra definição importante que impacta os resultados finais do procedimento iterativo. Segundo Romanoschi e Metcalf (2003), na rotina de cálculo dos softwares específicos para o procedimento de retroanálise, pode ser constatada diferença nos resultados causada pela condição de aderência.

Buscou-se, portanto, neste trabalho, obter os módulos de resiliência retroanalisados a partir das bacias deflectométricas coletadas com o FWD em dois trechos experimentais na cidade de Santa Maria/RS, com uso de quatro distintos programas computacionais.Com estes dados, objetivou-se identificar a influência das condições de aderência entre as camadas do pavimento nos valores de rigidez encontrados a partir de retroanálise. Além disso, buscou-se também verificar a influência da correção total ou parcial das bacias deflectométricas, em função de uma temperatura de referência de superfície (25ºC), nos resultados retroanalisados.

2. MÉTODOS E TÉCNICAS

Para cumprir com os objetivos delineados neste estudo, foi efetuado o acompanhamento deflectométrico, com uso do equipamento FWD, em dois trechos monitorados na cidade de Santa Maria/RS. Ao longo do período de 24 meses, quatro campanhas de levantamentos foram efetuadas nos locais, com periodicidade semestral, visando avaliar as estruturas em diferentes situações climáticas e sazonais. A Figura 1 ilustra a composição estrutural dos pavimentos monitorados.

O Trecho 1 está submetido a um tráfego anual médio, quantificado por contagens presenciais no ano de 2018, de $N_{USACE-ANUAL}=1,4x10^6$. Para o Trecho 2, o tráfego anual médio determinado em 2018 foi de $N_{USACE-ANUAL}=1,6x10^6$. Os segmentos são referentes a implantações de estruturas novas.

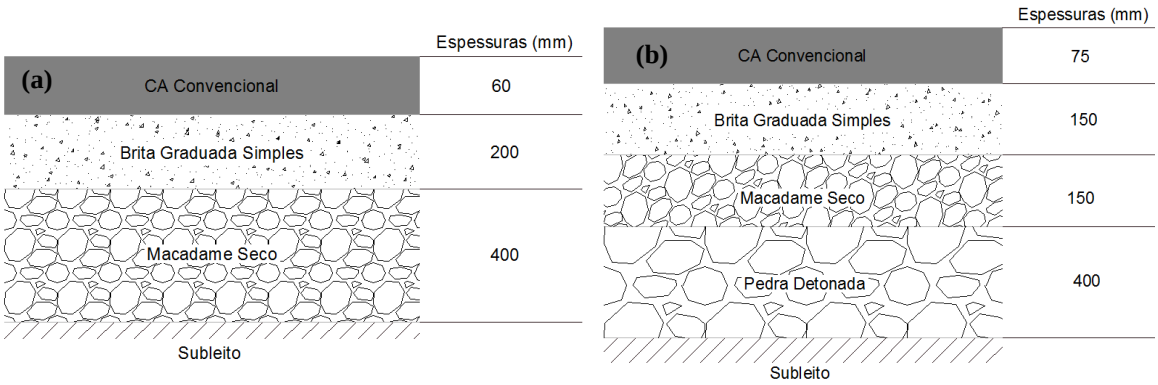

Figura 1 – Estrutura dos Trechos Monitorados – (a) Trecho 1; (b) – Trecho 2.

Ambos os pavimentos foram assentes em subleitos de solo argiloso, com classificação A-6 (Sistema Rodoviário de Classificação – TRB). O Índice Suporte Califórnia (CBR) dos Trechos 1 e 2 foi quantificado em 7%, nos dois segmentos. Salienta-se que, no Trecho 2, optou-se por executar um reforço de subleito de 400mm em rocha detonada (material que não passa por processo de britagem).

As bacias deflectométricas foram coletadas nas trilhas de roda externa da faixa adotada para monitoramento (faixa externa, com maior intensidade de tráfego), conforme recomendações da normativa DNER PRO273/1996 (DNER, 1996). Duas aplicações de carga foram efetuadas em cada uma das estacas, totalizando 30 bacias delineadas para cada trecho, em cada uma das quatro campanhas de levantamentos. Em todas as estacas dos dois trechos, foram quantificadas, juntamente com as bacias deflectométricas, as temperaturas da superfície da pista e do ar no momento do levantamento. No total, 480 bacias deflectométricas medidas com o FWD foram analisadas neste estudo.

2.1 Retroanálise de módulos de resiliência

Visando obter os módulos resilientes das camadas que constituem os pavimentos dos trechos monitorados, foi realizado, de diferentes maneiras e com diferentes programas, o procedimento de retroanálise. Os valores de rigidez foram determinados seguindo o critério de parada que propõe a análise de confiabilidade dos valores obtidos através o erro relativo calculado para cada ponto da bacia de deflexão, conforme sugerido por Bueno (2016).

Em um primeiro momento, foram realizadas retroanálises com os quatro programas citados no item introdutório, através das bacias deflectométricas obtidas pelo FWD com os valores totalmente corrigidos para a temperatura de referência (25ºC), por meio da Equação 1, proposta pelo DER-SP (2006), como forma de adaptação do ábaco desenvolvido pela AASHTO (1993).

$$D = \frac{Dp}{\left(\left(\left(\frac{h_{CA}}{1000}\right) * (T - 25)\right) + 1\right)} \qquad (1)$$

Em que:
D = deflexão corrigida para a temperatura de 25ºC (0,01mm);
Dp = deflexão medida na pista (0,01mm);
h_{CA} = espessura da camada asfáltica (cm);
T = temperatura da superfície do pavimento no momento do ensaio (ºC).

Para definir o módulo de resiliência característico das camadas de cada trecho, foi aplicado o procedimento de análise estatística descrito pelo PRO 011/79, do antigo DNER, conforme detalhamento exposto por Bueno (2016). Nesta etapa inicial, as interfaces entre todas as camadas foram consideradas sem nenhuma aderência entre si, excetuando-se os casos processados com o software Evercalc, que fixa as interfaces na condição perfeitamente aderida. Feito isso, procurou-se realizar, apenas com o programa BAKFAA, as retroanálises com a condição total de aderência entre as camadas do pavimento (para a interface de todas as camadas). Nesse momento, buscou-se avaliar a influência das condições de interface no valor de rigidez obtido a partir do processo iterativo, utilizando apenas as bacias deflectométricas totalmente corrigidas para a temperatura de referência, com uso da Equação 1.

Também utilizando o BAKFAA e com as mesmas bacias escolhidas para a avaliação dos efeitos da condição de aderência no módulo resiliente dos materiais, os procedimentos de retroanálise foram repetidos visando identificar a influência da correção de temperatura no valor de rigidez das camadas. Para este fim, os procedimentos iterativos foram efetuados sem nenhuma correção das bacias de campo em função da temperatura. Posteriormente, as mesmas bacias tiveram somente a primeira distância de leitura (D0 – abaixo do ponto de aplicação de carga) corrigida para a temperatura de 25ºC e os procedimentos de retroanálise foram repetidos. Esse processo ocorreu também com a correção de temperatura nas distâncias de leitura D0 e D1. Finalizando essa etapa, foram corrigidas as leituras nas distâncias D0, D1 e D2, para consecutiva retroanálise.

Entende-se que esses pontos (D0, D1 e D2) fornecem as leituras deflectométricas com maior influência da compressão elástica na camada do revestimento de concreto asfáltico, material sensível à variação da temperatura, diferentemente dos demais componentes da estrutura do pavimento. Sendo assim, buscou-se verificar qual seria a influência da correção dessas distâncias de leitura, em função da temperatura, no resultado de rigidez das camadas.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

Visando expor os resultados de campo e possibilitar o entendimento estrutural dos pavimentos avaliados, a Figura 2 exibe as bacias mais representativas dos Trechos 1 (a) e 2 (b), determinadas no decorrer das quatro campanhas de levantamentos realizadas. Os dados estão expostos com ajuste nas medidas de campo em relação à temperatura de referência. Por bacias mais representativas, entende-se como a bacia medida mais próxima da bacia média determinada no decorrer de todas as estacas do trecho.

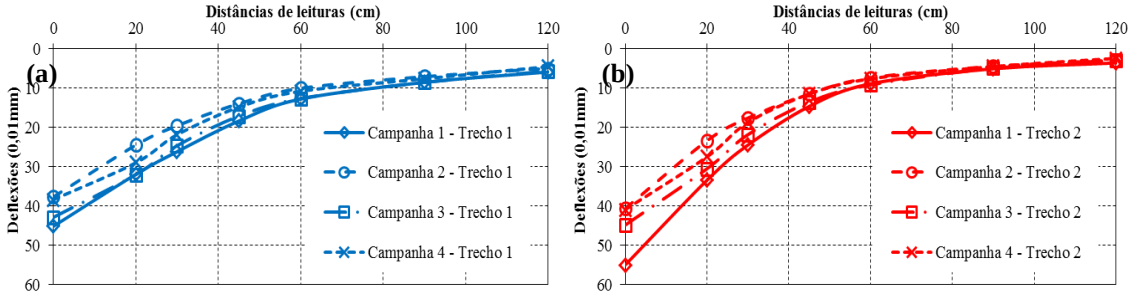

Figura 2 – Bacias deflectométricas mais representativas dos Trechos 1 (a) e 2 (b)

Pela interpretação da Figura 2, percebe-se que, com exceção do levantamento deflectométrico da Campanha 1, no Trecho 2, os resultados não sofreram significativas alterações no decorrer do período de análise, permanecendo na mesma ordem de grandeza durante a fase de monitoramento. Nesta campanha, acredita-se que o Trecho 2 ainda estava em fase de consolidação do sistema de camadas (já que este levantamento foi efetuado após passados apenas três meses da data inicial de liberação ao tráfego no local), visto que as bacias deflectométricas no local exibiram valores constantes a partir da Campanha 2.

A interpretação dos resultados pode também ser transferida para os valores de rigidez determinados por retroanálise com os quatro diferentes programas empregados neste estudo. A Tabela 1 exibe os valores característicos dos módulos resilientes dos materiais que constituem as camadas do pavimento referente ao Trecho 1, definido pela aplicação do procedimento de análise estatística descrito pelo PRO 011/79, do antigo DNER.

Tabela 1 – Resultados das retroanálises para o Trecho 1

Campanha - Programa	Módulos de Resiliência Característicos (MPa)											
	Revestimento			Base Granular			Sub-base Granular			Subleito		
	MÉD	DP.A	CV(%)	MÉD	DP.A	CV(%)	MÉD	DP.A	CV(%)	MÉD	DP.A	CV(%)
1 - BAKFAA	5.867	324	6%	461	51	11%	371	59	16%	156	17	11%
2 - BAKFAA	7.066	591	8%	530	42	8%	500	56	11%	209	30	15%
3 - BAKFAA	7.108	280	4%	450	42	9%	387	38	10%	170	14	8%
4 - BAKFAA	7.284	410	6%	517	53	10%	439	57	13%	182	6	3%
1 - BackMeDiNa	7.310	260	4%	476	46	10%	365	46	12%	152	13	9%
2 - BackMeDiNa	7.488	574	8%	575	46	8%	513	59	12%	208	28	14%
3 - BackMeDiNa	7.600	110	1%	496	57	12%	416	49	12%	171	21	12%
4 - BackMeDiNa	7.671	189	2%	525	21	4%	437	79	18%	184	5	3%
1 - Evercalc	6.000	0	0%	439	48	11%	117	23	20%	152	18	12%
2 - Evercalc	5.103	1.340	26%	490	74	15%	209	48	23%	190	33	17%
3 - Evercalc	7.000	0	0%	469	64	14%	126	28	22%	160	10	6%
4 - Evercalc	7.000	0	0%	443	35	8%	158	40	26%	169	11	7%
1 - MnLayer	6.500	782	12%	443	69	16%	371	29	8%	156	13	8%
2 - MnLayer	7.200	849	12%	575	61	11%	496	62	13%	182	8	4%
3 - MnLayer	7.100	427	6%	476	35	7%	386	37	10%	174	19	11%
4 - MnLayer	7.583	333	4%	517	43	8%	424	63	15%	186	6	3%

Visando identificar estatisticamente se há uma associação significativa entre os resultados dos módulos resilientes e os diferentes programas empregados no procedimento de retroanálise, foi utilizado o método de Análise de Variância (ANOVA), que busca verificar se determinado fator é responsável pelas variações nas respostas das variáveis de interesse, identificando se existe uma associação entre a variável de resposta e o termo avaliado.

Nos testes ANOVA, busca-se obter o valor do teste F de Snedcor ($F_{OBSERVADO}$), determinado

pela relação entre a variância entre grupos e dentro de um determinado grupo. A determinação da significância dos fatores avaliados é realizada mediante comparação de $F_{OBSERVADO}$ com um valor limite de F ($F_{CRÍTICO}$), encontrado em tabelas estatísticas de acordo com o nível de significância adotado, graus de liberdade, número de grupos (soma das variáveis dependentes e independentes) e observações.

Adicionalmente, as análises estatísticas que adotam a metodologia ANOVA também permitem avaliar o "valor P", denominado como "nível descritivo de teste". Em estudos como este, em que o nível de confiabilidade adotado foi de 95%, se o "valor P" for maior ou igual ao nível de significância (5%, ou seja, α=0,05), entende-se que não é possível concluir a ocorrência de uma associação estatisticamente significativa entre os parâmetros avaliados.

Os resultados da análise de variância para os módulos retroanalisados obtidos no Trecho 1, com diferentes programas, estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – ANOVA para diferentes programas utilizados na retroanálise (Trecho 1)

Camada	Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	$F_{OBSERVADO}$	Valor P	$F_{CRÍTICO}$
CA	Entre grupos	10.498.761,49	3,00	3.499.587,16	9,86	0,00	2,68
	Dentro dos grupos	43.996.910,64	124,00	354.813,80			
BGS	Entre grupos	15.917,05	3,00	5.305,68	1,29	0,28	2,68
	Dentro dos grupos	508.190,69	124,00	4.098,31			
MS	Entre grupos	75.484,42	3,00	25.161,47	3,02	0,03	2,68
	Dentro dos grupos	998.525,67	120,00	8.321,05			
SUBLEITO	Entre grupos	1.084,90	3,00	361,63	0,53	0,67	2,68
	Dentro dos grupos	82.645,08	120,00	688,71			

Analisando a Tabela 1, complementada pela Tabela 2, percebe-se que, de maneira geral, todos os programas identificaram integridade (em termos de rigidez) do concreto asfáltico empregado. Os testes ANOVA, todavia, indicam que há uma associação significativa entre os diferentes programas e os resultados de módulos de resiliência do revestimento asfáltico empregado no Trecho 1. Entende-se que essa associação, identificada pelos resultados de $F_{OBSERVADO}$ e "valor P", ocorre devido aos valores, geralmente superiores em relação aos demais, da rigidez do revestimento obtida com o BackMeDiNa. Quando a Análise de Variância é repetida apenas com os módulos resilientes do BAKFAA, Evercalc e MnLayer, os resultados estatísticos indicam que não há relação entre a rigidez do revestimento e os programas utilizados no processo iterativo.

Em relação à conformidade dos módulos de resiliência do revestimento encontrados por meio da retroanálise, podem-se comparar os resultados obtidos com aqueles determinados em laboratório, mediante realização do ensaio de módulo de resiliência com amostras extraídas em pista no Trecho 1, conforme recomendações da norma DNIT ME 135/2010. O teste determinou, em média, módulos de resiliência com resultados em torno de 6.500MPa, valor significativamente próximo daqueles obtidos com as retroanálises.

Em relação à uniformidade dos módulos de resiliência encontrados para as camadas granulares de base e sub-base, os programas BAKFAA, BackMeDiNa e MnLayer não exibem grande variação, quando comparados os seus resultados; todavia, os valores de rigidez determinados a partir do Evercalc, principalmente para a camada de macadame seco, foram significativamente diferentes daqueles obtidos por meio dos demais programas. Acredita-se existir duas justificativas para tal ocorrência.

A primeira delas está na condição de interface aderida entre as camadas, já que, ao contrário dos demais programas utilizados neste trabalho, o Evercalc fixa a condição de aderência entre as camadas (interface totalmente aderida), não permitindo que o usuário realize alterações neste parâmetro para o início da rotina de cálculo. O segundo ponto remete à alta sensibilidade, por parte do sistema de cálculo do Evercalc, ao módulo inicial ou à faixa de variação estabelecida pelo usuário

para o valor de rigidez das camadas. Como as camadas intermediárias são as que mais sofrem o efeito da compensação modular no decorrer do processo de retroanálise, seus módulos resilientes são os mais afetados por este problema. No que diz respeito ao módulo de resiliência do subleito, não foram encontradas diferenças significativas em seus valores com os distintos programas, impressões estatisticamente comprovadas pelos resultados da ANOVA.

Dando continuidade à apresentação dos resultados retroanalisados, a Tabela 3 exibe os valores característicos dos módulos resilientes dos materiais que constituem as camadas do pavimento do Trecho 2. Salienta-se que o reforço em aterro rochoso empregado no Trecho 2 foi considerado como parte de um "Sistema Subleito", englobando todo o conjunto localizado abaixo da sub-base granular. Os resultados da Análise de Variância (ANOVA), obtida pelo conjunto de dados determinados com os diferentes programas, está exposta na Tabela 4.

Tabela 3 – Resultados das retroanálises para o Trecho 2

Campanha - Programa	**Módulos de Resiliência Característicos (MPa)**											
	Revestimento			**Base Granular**			**Sub-base Granular**			**Sistema Subleito**		
	MÉD	DP.A	CV(%)	MÉD	DP.A	CV(%)	MÉD	DP.A	CV(%)	MÉD	DP.A	CV(%)
1 - BAKFAA	2.729	228	8%	361	46	13%	224	63	28%	219	17	8%
2 - BAKFAA	3.486	280	8%	514	28	5%	417	49	12%	275	13	5%
3 - BAKFAA	4.075	148	4%	450	52	12%	342	35	10%	234	17	7%
4 - BAKFAA	3.776	215	6%	429	27	6%	350	0	0%	269	24	9%
1 - BackMeDiNa	3.004	522	17%	348	33	9%	264	58	22%	217	11	5%
2 - BackMeDiNa	3.123	330	11%	554	84	15%	509	82	16%	267	10	4%
3 - BackMeDiNa	5.200	856	16%	427	81	19%	322	18	6%	235	17	7%
4 - BackMeDiNa	4.283	445	10%	390	32	8%	351	12	4%	273	20	7%
1 - Evercalc	1.757	784	45%	365	100	27%	59	14	24%	235	16	7%
2 - Evercalc	2.071	821	40%	505	54	11%	90	21	23%	274	7	3%
3 - Evercalc	3.812	1.589	42%	409	128	31%	64	13	20%	245	7	3%
4 - Evercalc	2.890	176	6%	350	0	0%	101	6	6%	275	23	8%
1 - MnLayer	2.845	197	7%	358	37	10%	197	57	29%	223	8	4%
2 - MnLayer	3.000	100	3%	527	59	11%	440	61	14%	274	11	4%
3 - MnLayer	3.839	403	10%	373	21	6%	328	39	12%	242	13	6%
4 - MnLayer	4.033	376	9%	396	19	5%	343	20	6%	270	13	5%

Tabela 4 – ANOVA para diferentes programas utilizados na retroanálise (Trecho 2)

Camada	**Fonte da variação**	**Soma Quadrática**	**Graus de Liberdade**	**Média Quadrática**	**$F_{OBSERVADO}$**	**Valor P**	**$F_{CRÍTICO}$**
CA	Entre grupos	24.378.737,73	3,00	8.126.245,91	8,79	0,00	2,68
	Dentro dos grupos	118.310.578,45	128,00	924.301,39			
BGS	Entre grupos	20.528,55	3,00	6.842,85	0,90	0,44	2,68
	Dentro dos grupos	974.853,81	128,00	7.616,05			
MS	Entre grupos	1.553.901,59	3,00	517.967,20	63,15	0,00	2,68
	Dentro dos grupos	1.049.950,36	128,00	8.202,74			
SUBLEITO	Entre grupos	1.144,17	3,00	381,39	0,56	0,64	2,68
	Dentro dos grupos	87.199,20	128,00	681,24			

Da interpretação dos resultados expostos na Tabela 3, complementados pela Tabela 4, nota-se certa unicidade nos módulos resilientes obtidos por meio da retroanálise para o revestimento asfáltico com o BAKFAA, Evercalc e MnLayer. Os resultados do BackMeDiNa, para a camada de revestimento, mostraram-se relativamente distintos daqueles obtidos nos demais programas, reafirmando o entendimento observado para o Trecho 1.

Ainda, vale mencionar que, no Trecho 2, os módulos de resiliência indicaram baixa rigidez da

camada asfáltica, se comparada aos valores determinados para o Trecho 1. Os ensaios de módulo de resiliência em laboratório, a partir de amostras extraídas da pista do Trecho 2, determinaram módulo de resiliência médio de 2.123 MPa.

Os resultados das retroanálises, expostos na Tabela 3, suportados pelos valores de módulo de resiliência obtidos em laboratório, identificaram problemas na dosagem e/ou execução da mistura asfáltica do Trecho 2. Esses problemas acarretaram no surgimento de afundamento em trilha de roda médio igual a 3,90mm, apenas sete meses após sua liberação para o tráfego. Entende-se, desta forma, que a retroanálise de módulos de resiliência é um procedimento capaz de identificar potenciais problemas estruturais, mediante avaliação da rigidez dos materiais.

Quanto às camadas granulares, identifica-se consistência nos resultados obtidos para os módulos de resiliência da brita graduada simples com os distintos programas. Já em relação à sub-base granular, observa-se o mesmo comportamento já verificado no Trecho 1, com discrepância dos resultados obtidos com o Evercalc em relação aos demais softwares. Em relação ao subleito, verifica-se a ausência de grandes variações nos módulos resilientes característicos, determinados com os diferentes programas, com resultados comprovados pela ANOVA. Destaca-se também que o aterro rochoso aumenta significativamente o valor do módulo de resiliência em relação ao aterro em argila empregado no Trecho 1.

3.1 Influência da condição de aderência entre as camadas nos módulos de resiliência retroanalisados

Visando investigar o efeito da aderência entre camadas nos resultados das retroanálises, foram realizadas avaliações modificando as interfaces entre os materiais que fazem parte da composição das estruturas. Essa variação foi efetuada somente com o programa BAKFAA, a partir de bacias deflectométricas totalmente corrigidas para a temperatura de referência (25ºC).

A Tabela 5 exibe, para as quatro campanhas de levantamentos efetuadas no Trecho 1, a relação entre o efeito percentual causado pelas diferentes condições de aderência, adotadas no procedimento de retroanálise, nos módulos de resiliência característicos, obtidos para as camadas de concreto asfáltico (CA), base granular (BGS), sub-base granular (MS) e subleito. Os percentuais em verde indicam acréscimo na mudança da condição não aderida para aderida e, os percentuais em vermelho, indicam redução.

Tabela 5 - Módulos resilientes para as diferentes condições de aderência (Trecho 1)

Campanha	Módulos de Resiliência Retroanálisados											
	CA (MPa)			BGS (MPa)			MS (MPa)			Subleito (MPa)		
	I N/A		I A	I N/A		I A	I N/A		I A	I N/A		I A
1	5.867	**0,1%**	5.871	461	**26%**	340	371	**61%**	143	156	**11%**	139
2	7.066	**21%**	5.574	530	**31%**	364	500	**49%**	257	209	**19%**	170
3	7.108	**3%**	6.893	450	**29%**	318	387	**54%**	176	170	**11%**	152
4	7.284	**1%**	7.215	517	**30%**	361	439	**56%**	193	182	**14%**	157

I N/A = Interface Não Aderida

I A = Interface Aderida

Conforme ocorrido para as análises estatísticas com diferentes programas empregados no procedimento de retroanálise, para identificar se as condições de interface implicam em associações significativas nos módulos retroanalisados, optou-se pela realização do teste de Análise de Variância (ANOVA). Os resultados estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – ANOVA para diferentes condições de aderência (Trecho 1)

Camada	Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	$F_{OBSERVADO}$	Valor P	$F_{CRÍTICO}$
CA	Entre grupos	2.823.303,07	1,00	2.823.303,07	4,57	0,04	4,00
	Dentro dos grupos	38.310.385,78	62,00	617.909,45			
BGS	Entre grupos	323.871,96	1,00	323.871,96	155,57	0,00	4,00
	Dentro dos grupos	129.072,70	62,00	2.081,82			
MS	Entre grupos	860.506,69	1,00	860.506,69	210,58	0,00	4,00
	Dentro dos grupos	253.355,39	62,00	4.086,38			
SUBLEITO	Entre grupos	11.616,80	1,00	11.616,80	17,62	0,00	4,00
	Dentro dos grupos	40.878,68	62,00	659,33			

Já os resultados expostos na Tabela 7 relacionam os módulos característicos retroanalisados, com diferentes condições de aderência, para o Trecho 2. Os resultados do teste ANOVA estão expostos na Tabela 8.

Tabela 7 - Módulos resilientes para as diferentes condições de aderência (Trecho 2)

Campanha	Módulos de Resiliência Retroanálisados											
	CA (MPa)			BGS (MPa)			MS (MPa)			Subleito (MPa)		
	I N/A		I A	I N/A		I A	I N/A		I A	I N/A		I A
1	2.742	**11%**	2.435	359	**44%**	201	235	**51%**	110	219	**8%**	201
2	3.486	**29%**	2.466	514	**34%**	340	417	**63%**	154	275	**12%**	241
3	4.075	**27%**	2.963	450	**36%**	289	342	**66%**	118	234	**5%**	221
4	3.776	**28%**	2.722	429	**33%**	286	350	**57%**	152	269	**8%**	248

I N/A = Interface Não Aderida

I A = Interface Aderida

Tabela 8 – ANOVA para diferentes condições de aderência (Trecho 2)

Camada	Fonte da variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	$F_{OBSERVADO}$	Valor P	$F_{CRÍTICO}$
CA	Entre grupos	9.812.537,28	1,00	9.812.537,28	46,14	0,00	3,98
	Dentro dos grupos	14.461.978,30	68,00	212.676,15			
BGS	Entre grupos	436.482,99	1,00	436.482,99	108,63	0,00	3,98
	Dentro dos grupos	273.221,68	68,00	4.017,97			
MS	Entre grupos	592.505,76	1,00	592.505,76	121,30	0,00	3,98
	Dentro dos grupos	332.159,40	68,00	4.884,70			
SUBLEITO	Entre grupos	7.041,46	1,00	7.041,46	9,23	0,00	3,98
	Dentro dos grupos	51.863,35	68,00	762,70			

Pela interpretação das Tabelas 5 e 7, complementadas pelas Tabelas 6 e 8, pode-se identificar que, para as camadas granulares, a redução na rigidez foi acentuada, com destaque para a sub-base granular, onde as alterações nas condições de interface originaram decréscimo superior a 50% no MR médio calculado, para ambos os trechos. Os testes ANOVA também indicaram que a mudança nas condições de interface alteram significativamente os resultados dos módulos resilientes dos materiais granulares, respaldados pelos altos valores de $F_{OBSERVADO}$ e baixa magnitude de "valor P".

Já para camada de revestimento e para o subleito, a mudança causada no módulo pela variação da interface entre camadas não se mostrou tão significativa em termos percentuais. Todavia, os testes ANOVA, para ambos os trechos, indicaram que há uma associação relevante entre os resultados de rigidez determinados com diferentes condições de interface, ainda que em menor magnitude do que aquelas verificadas para os materiais granulares.

Inegavelmente, a utilização de aderência plena entre as camadas origina módulos de resiliência, dos materiais granulares, com valores mais compatíveis àqueles encontrados na literatura. Todavia, sabe-se que, ao considerar as interfaces aderidas, ocorre uma redistribuição teórica da linha neutra, gerando certas incoerências causadas pelas análises elásticas de camadas. Objetivando uma avaliação mais detalhada, que também se aplica a estrutura do pavimento do Trecho 1, foram calculados, na ferramenta AEMC (MeDiNa), os diagramas de tensões verticais gerados pela aplicação do carregamento de 40kN (partindo do conjunto de módulos resilientes obtidos por meio da retroanálise) na estrutura do Trecho 2, com as interfaces entre as camadas não aderidas (a) e aderidas (b). A Figura 3 simboliza o efeito desta modificação. O caso avaliado é referente à Campanha 1.

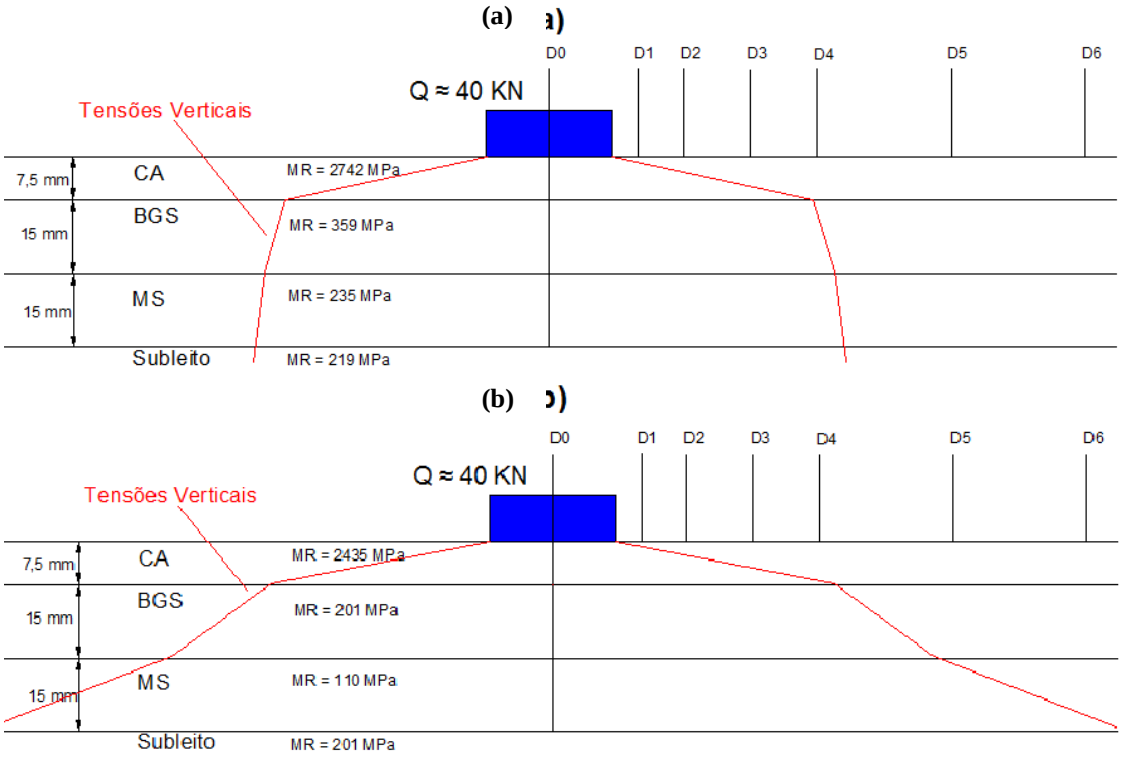

Figura 3 – Diagrama de tensões verticais no pavimento do Trecho 2 com interface entre as camadas não aderidas (a) e aderidas (b)

Pela Figura 3, pode-se interpretar que, para o sistema considerado com as condições de interface não aderidas (a), o diagrama de tensões é pouco distribuído entre as camadas da estrutura, exigindo maior rigidez dos materiais para adequar a bacia de deflexões teórica àquela medida em campo. Em relação ao diagrama de tensões gerado a partir do sistema com aderência total entre as camadas (b), identifica-se distribuição gradual dos esforços ao longo da estrutura, exigindo menores valores de rigidez dos materiais para ajustar a bacia deflectométrica teórica à de campo.

Todavia, os programas de cálculo de esforços que realizam as suas iterações a partir da teoria da elasticidade encontram, com as camadas do pavimento aderidas entre si, tensões de tração no interior das camadas granulares. Como os materiais granulares têm resistência à tração significativamente baixa (apenas decorrente da sucção e do entrosamento de agregados), esta é claramente uma condição de ruptura, que viola os critérios de Mohr-Coulomb. Em termos práticos, os estudos laboratoriais de Torquato e Silva (2017) e Scherer (2017) investigaram as condições de aderência entre concretos asfálticos e materiais granulares, indicando que a consideração de interfaces não aderidas (entre camada asfáltica e base granular) é a que mais se assemelha aos contatos existentes em pista. Ainda, Huang (2004) e Canestrari et al (2013) afirmam que assumir aderência total entre todas as camadas que constituem o sistema não representa a verdadeira condição da estrutura em campo.

Vislumbrando a concepção de futuros projetos e pesquisas que utilizem os conceitos da mecânica dos pavimentos, entende-se que, para o cálculo da vida de fadiga, o engenheiro irá trabalhar a favor da segurança mediante a opção por um sistema de camadas sem nenhuma aderência nas interfaces. Todavia, de maneira geral, entende-se que o projetista deve efetuar as retroanálises considerando as condições de interface que serão adotadas pelo software de dimensionamento do referido pavimento.

3.2 Influência da correção das deflexões em função da temperatura nos módulos de resiliência retroanalisados

A correção das bacias determinadas em campo em relação a uma temperatura de referência é prática de alguns métodos de dimensionamento de reforço de pavimentos asfálticos. Entretanto, nem todas as leituras determinadas no delineamento da bacia deflectométrica fornecem informações referentes à compressão elástica do revestimento. Apenas as distâncias de leitura iniciais resultam em medidas com influência de esforços no concreto asfáltico, material sensível à variação da temperatura, diferentemente dos demais componentes da estrutura dos pavimentos dos Trechos 1 e 2. Em vista disso, procurou-se identificar a influência de correções totais e parciais, da bacia deflectométrica, no módulo de resiliência da camada asfáltica e o efeito da modificação da geometria da bacia nos valores de rigidez das demais camadas.

Conforme descrito na metodologia, as retroanálises com o BAKFAA foram refeitas a partir de bacias sem nenhuma correção nas medidas de campo. Na sequência, foram submetidas ao processo iterativo as bacias com correção apenas da deflexão máxima (D0) em função da temperatura. Por fim, foram corrigidas as leituras D0 e D1, seguidas de correções em D0, D1 e D2 e, novamente, os módulos foram determinados. A opção por efetuar correções apenas até a terceira leitura pode ser justificada pela distribuição dos diagramas de tensões verticais, expostos anteriormente na Figura 3, que exemplifica o caso do Trecho 2. Na referida imagem, percebe-se que as distâncias mais afastadas do ponto de aplicação de carga não são influenciadas por tensões verticais existentes na camada de revestimento asfáltico, retirando a influência do material termosusscetível nos resultados das deflexões medidas nestes sensores. Já as deflexões intermediárias, mesmo com certa parcela de contribuição do material asfáltico, incidem tensões verticais de compressão apenas na região inferior do revestimento, menos suscetível às oscilações de temperatura na superfície da camada.

Ainda, optou-se por apresentar, nesta etapa, apenas os resultados oriundos das retroanálises efetuadas com resultados da Campanha 2, no Trecho 1, e Campanha 4, no Trecho 2, devido a temperatura média de superfície mais extrema, determinada em pista, no momento do ensaio (46ºC no Trecho 1, na Campanha 2, e 41ºC no Trecho 2, na Campanha 4).

Feitas as observações pertinentes, os módulos resilientes gerados sem nenhuma correção nas bacias de campo foram fixados como referência e, as demais alterações, para cada uma das diferentes formas de correções realizadas em função da temperatura, foram quantificadas percentualmente, representadas na Figura 4, respectivamente para o Trecho 1 – Campanha 2 (a) e Trecho 2 – Campanha 4 (b).

É possível afirmar que, para ambos os trechos, destacam-se as pequenas influências de correções nas deflexões iniciais no MR do subleito; todavia, quando a bacia é completamente corrigida para a temperatura de referência, os módulos do subleito aumentam significativamente. Isso acontece devido à representatividade das distâncias de leituras mais afastadas do ponto de aplicação de carga em relação à compressão elástica do subleito.

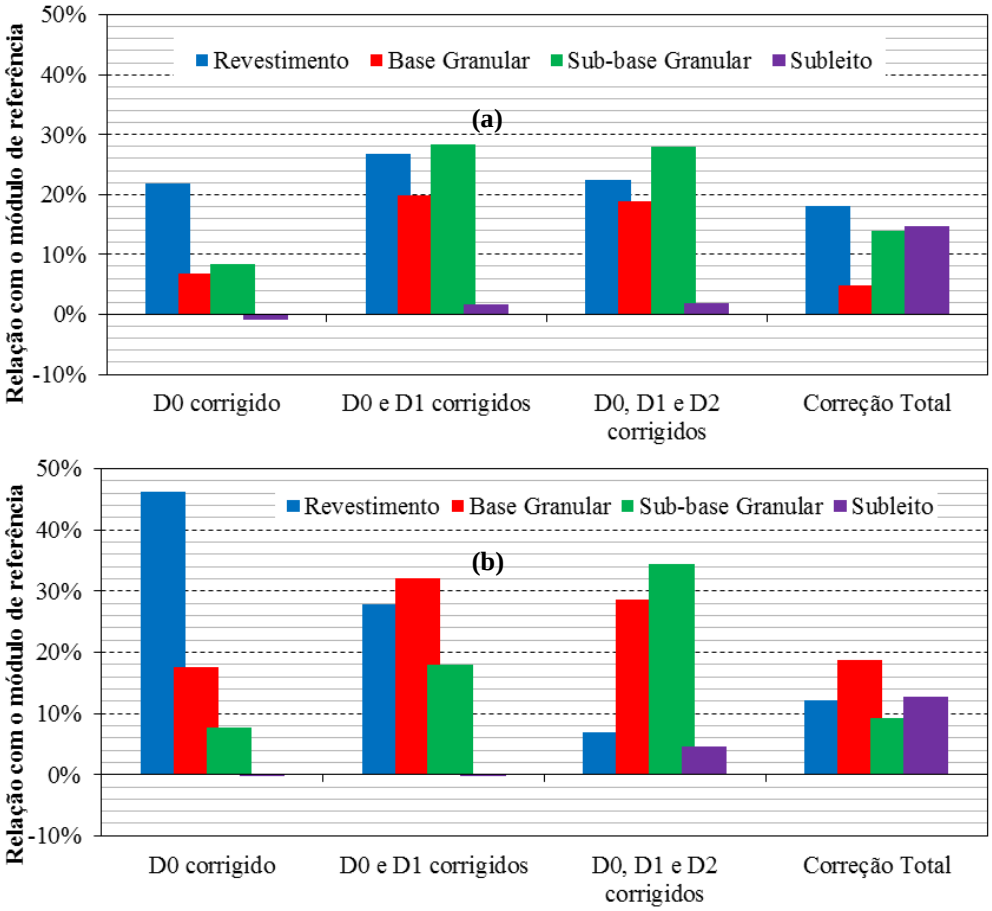

Figura 4– Relação entre os MR determinados a partir de diferentes correções de deflexões em função da temperatura no Trecho 1 - Campanha 2 (a) e Trecho 2 – Campanha 4 (b)

Em relação ao revestimento, conforme esperado, corrigindo as deflexões (de qualquer uma das maneiras) para a temperatura de 25ºC, o módulo de resiliência retroanalisado aumenta percentualmente em relação aquele determinado pelo processo iterativo a partir de bacias sem nenhuma correção nos valores medidos em campo. Isto acontece, pois, as retroanálises de referência, sem nenhum ajuste nas medidas de campo, foram realizadas com base em levantamentos deflectométricos efetuados nos pavimentos com temperaturas médias de superfície maiores do que 25ºC.

Para os materiais granulares, verifica-se que as correções parciais de D0 e D1, ou de D0, D1 e D2 alteram de maneira significativa os valores retroanalisados. Essa alteração, na parte intermediária da geometria da bacia, exige módulos maiores das camadas de base e sub-base para atender os critérios de confiabilidade estabelecidos. Todavia, a brita graduada simples, macadame seco e subleito não são materiais termossuscetíveis e, portanto, não deveriam sofrer alterações na sua rigidez quando a bacia deflectométrica é corrigida para a temperatura de referência.

Para tentar evitar os efeitos indesejados das correções deflectométricas em função da temperatura nos módulos equivalentes dos materiais terrosos, buscou-se fixar a rigidez do subleito, sub-base e base granular nos valores determinados por retroanálise sem nenhuma correção nas medidas de campo. Sem possibilitar a alteração na rigidez dessas camadas, as retroanálises foram refeitas, corrigindo apenas as leituras D0, D1 e D2, para, assim, contemplar apenas a influência da correção na rigidez da camada termossuscetível.

Considerando apenas o valor característico de módulo resiliente do concreto asfáltico para o Trecho 1, a rigidez calculada por retroanálise com as leituras iniciais corrigidas para 25ºC resultou em um valor médio 30% maior do que aquele determinado sem nenhum ajuste nas medidas de campo. Pode-se implicar, para o Trecho 1, que um decréscimo da temperatura de 46ºC para 25ºC na superfície

da pista em campo, acarreta em um acréscimo de 30% na rigidez da camada asfáltica obtida pelo processo de retroanálise. Para o Trecho 2, pode-se perceber que, numericamente, os módulos determinados para o concreto asfáltico a partir das bacias parcialmente corrigidas para 25ºC foram em média 37% maiores do que aqueles determinados a uma temperatura de 41ºC (sem nenhum ajuste nas medidas de campo).

Por fim, acredita-se que o procedimento integrado, partindo da retroanálise sem nenhum ajuste nas medidas de campo, seguido pela correção das leituras representativas a compressão elástica do concreto asfáltico (usualmente as duas ou três primeiras distâncias de leitura) e repetição da retroanálise, identificando a rigidez da camada termossuscetível à 25ºC, seja a maneira mais adequada para determinação dos módulos resilientes das camadas do pavimento. Desta forma, não são efetuadas alterações desnecessárias nas distâncias de leitura referentes apenas as compressões elásticas dos materiais granulares de base, sub-base e no sistema subleito, cujo comportamento, em termos de rigidez, não é dependente da temperatura do revestimento asfáltico.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, em acordo com o delinear metodológico deste trabalho, foi possível concluir que:

a) Os programas BAKFAA, BackMeDiNa e MnLayer resultaram em valores de módulos resilientes, obtidos por processo iterativo de retroanálise, consideravelmente parecidos para as camadas granulares e subleito que compõem as estruturas dos Trechos monitorados 1 e 2. Os resultados determinados com o programa EverCalc foram significativamente distintos para os materiais de sub-base, devido à condição de aderência total entre as camadas, fixada pelo programa. Tratando-se do revestimento, percebeu-se que o BackMeDiNa resulta em valores discretamente superiores àqueles obtidos com os demais programas;

b) Em relação à aderência entre camadas, os testes realizados reforçaram a importância deste fator na rigidez dos materiais obtida pelo processo iterativo. Os valores de módulos de resiliência, quando retroanalisados a partir de estruturas com camadas totalmente aderidas, foram significativamente menores, para as camadas granulares dos Trechos 1 e 2, do que aqueles obtidos a partir da consideração de interfaces não aderidas no sistema de camadas. Destacaram-se os módulos resilientes característicos da sub-base granular, que reduziram mais de 50% (quando comparadas as condições de interfaces não aderidas e aderidas) em grande parte dos procedimentos efetuados a partir dos resultados de campo;

c) Tratando-se das correções de bacias deflectométricas em função da temperatura, durante o processo de retroanálise, acredita-se que a forma mais adequada para obtenção de um conjunto modular sem compensações é a determinação, de maneira preliminar, dos valores de rigidez a partir da bacia de campo sem nenhum ajuste. Com os módulos das camadas granulares e subleito já determinados, verificou-se pertinente avaliar a necessidade de correção da rigidez do revestimento mediante interpretação da temperatura da superfície do pavimento no momento do ensaio. Em caso positivo, julga-se correto corrigir as distâncias de leitura inicias (usualmente as duas ou três primeiras leituras da bacia deflectométrica), referentes apenas à compressão elástica de todo o sistema estrutural (incluindo o revestimento, material termossuscetível). Feito isso, recomenda-se repetir a retroanálise, a fim de modificar apenas o módulo de resiliência do revestimento.

AGRADECIMENTOS

À Rede de Tecnologia em Asfaltos ANP/PETROBRAS e CAPES, pelo apoio às pesquisas do GEPPASV/UFSM.

5. REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. 1ed. Washington (EUA), 1993.

BALBO, J. T; KHAZANOVICH, L. Desenvolvimento de Rotina e Interface do programa MnLayer para camadas elásticas. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Relatório Final, Processo 2006/01907-6, São Paulo/SP (2007).

BUENO, L. D. Avaliação deflectométrica e de rigidez: Estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS. 471 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS (2016).

CANESTRARI, F; FERROTTI, G; LU, X; MILLIEN, A; PARTL, M. N; PETIT, C; PHELIPOT-MARDELÉ, A; PIBER, H; RAAB, C; Mechanical Testing of Interlayer Bonding in Asphalt Pavements. Advances in Interlaboratory Testing and Evaluationof Bituminous Materials, RILEM State-of-the-Art Reports 9 (2013).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (DNER). PRO 011/79: Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro/RJ (1979).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (DNER). PRO 273/96: Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer". Rio de Janeiro/RJ (1996).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. (DNIT). ME 135/2010: Pavimentação asfáltica – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ (2010).

FRANCO, F. A. C. P. Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV. 315 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ (2007).

HUANG, Y. H. Pavements analysis and design. Second Edition. Pearson: Prentice-Hall, New Jersey (2004).

KHAZANOVICH, L; WANG, Q. C. MnLayer: High-Performance Layered Elastic Analysis Program. TRR 2037. Washington (2007).

LYTTON, R. L; SMITH, R. E. Use of Nondestructive Testing in the Design of Overlays for Flexible Pavements. TRR 1007. Pág.11-20. Transportation Research Record, Washington (1985).

ROMANOSCHI, S.A; METCALF, J.B. Errors in pavement layer moduli backcalculation due to improper modeling of layer interface condition. In: Proceedings of the 82nd TRB Annual Meeting. Washington (2003).

SCHERER, R. G. Estudo da influência da condição de aderência entre camadas de pavimentos em seu comportamento mecânico. 172 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS (2018).

TORQUATO E SILVA, S. de A. Modelagem Mecanístico-Empírica da Interface Revestimento Asfáltico-Base Granular. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE (2017).