



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

PARÂMETROS DE BACIA DE DEFLEXÃO (PBD) PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

*Gisandra Faria de Paula*¹; *Paulo Costa Fernandes*² & *Rafael Cerqueira Silva*³

RESUMO

As deflexões recuperáveis são um indicativo do comportamento estrutural do pavimento, sendo a deflexão recuperável máxima (D_0) o parâmetro que indica o estado de deformabilidade elástica de todas as camadas que compõem a estrutura ensaiada. Porém, diferentes estruturas podem apresentar o mesmo valor de D_0 , tornando-se imprescindível uma correta análise de toda a bacia deflectométrica. Conhecendo as espessuras das camadas do pavimento, seja por meio de sondagens ou poços de inspeção, são realizadas retroanálises para obter os módulos de resiliência *in situ*, cujos resultados também permitem avaliar a condição estrutural das camadas. Uma alternativa de menor impacto e tempo de análise seria a obtenção dos parâmetros de bacia de deflexão (PBD), de fácil determinação e entendimento na identificação das deficiências nas camadas do pavimento e auxílio no planejamento de serviços de gerência de pavimentos e projetos de restauração. Para uma melhor compreensão dos PBD, apresenta-se um estudo de caso de um levantamento deflectométrico de um pavimento flexível por meio do ensaio não-destrutivo com *Falling Weight Defectometer* (FWD), em segmento de rodovia no Distrito Federal. Foram analisados os principais PBD, bem como uma estimativa de vida remanescente do pavimento em função destes parâmetros. Os resultados apresentados visam fortalecer a utilização dos PBD como ferramenta de auxílio no acompanhamento de serventia do pavimento e na elaboração de diagnósticos e análises preliminares, visando serviços de manutenção e restauração de pavimentos, minimizando mobilização precoce de defeitos. Assim, a aplicação dos PBD é uma técnica útil para tomadas de decisão para o gerenciamento de pavimentos, a nível de rede e de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: avaliação estrutural; bacia deflectométrica; parâmetros de bacia de deflexão; estimativa de vida remanescente

ABSTRACT

The recoverable deflections are indicative of the structural behavior of the pavement, with the maximum recoverable deflection (D_0) being the parameter that indicates the state of elastic deformability of all the layers that make up the tested structure. However, different structures can present the same value of D_0 , making it essential a correct analysis of the entire deflectometric basin. Knowing the thickness of the pavement layers, either through drilling or inspection wells, retro-analyses are carried out to obtain the *in situ* resilience modules, the results of which also allow the assessment of the structural condition of the layers. An alternative with less impact and analysis time would be to obtain the deflection basin parameters (PBD), which are easy to determine and understand in identifying deficiencies in the pavement layers and help in planning pavement management services and restoration projects. For a better understanding of PBD, a case study is presented of a deflectometric survey of a flexible pavement through non-destructive testing with FWD, on a highway segment in the Federal District. The main PBDs were analyzed, as well as an estimate of the remaining life of the pavement in terms of these parameters. The results presented aim to strengthen the use of PBD as a tool to aid in monitoring the usefulness of the pavement and in the preparation of diagnostics and preliminary analyzes, aiming at maintenance and restoration services for pavements, minimizing early mobilization of defects. Thus, the application of PBD is a useful technique for decision-making in the management of pavements, at network and project level.

KEYWORDS: structural evaluation; deflectometric basin; deflection basin parameters; remaining life estimate

^{1,2} Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF): SAM Bloco C, Setor Complementares, Ed. Sede do DER/DF, CEP 70.620-030, Brasília, DF, Brasil, gisandrafp@gmail.com; paulocostaf@gmail.com

³ Universidade de Brasília (UnB): Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil, rafael.silva@unb.br



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

É de amplo conhecimento a importância do modal rodoviário no Brasil, contribuindo para o desenvolvimento nacional da infraestrutura viária por meio de extensivos e contínuos estudos, planejamentos e desenvolvimentos de pavimentos, visando garantir e melhorar a trafegabilidade de cargas e passageiros com conforto, segurança e crescimento econômico.

O pavimento rodoviário apresenta um ciclo de vida repetitivo, com início no processo de planejamento, construção, operação, manutenção/reabilitação, reconstrução e, em seguida, retorna à fase operacional e assim sucessivamente. De todas estas etapas, o estágio de manutenção/reabilitação constitui o período mais prolongado de vida de serventia do pavimento em comparação com as outras etapas, sendo a avaliação das condições estruturais do pavimento um critério importante para a verificação do nível adequado de desempenho da estrutura para suportar as cargas transientes do tráfego e estas se relacionando com o dimensionamento do pavimento.

A avaliação estrutural do pavimento pode indicar o estado de rigidez estrutural das camadas e, assim, avaliar o estado deste conjunto de camadas. Esta avaliação é normalmente realizada por meio da medição de deslocamentos verticais recuperáveis ocasionados na superfície do pavimento na área de influência da carga aplicada na estrutura (deflexões), no qual o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) é o equipamento mais usual para a execução do ensaio, sendo um levantamento não destrutivo e de rápida realização (KIM e PARK, 2002; RABBI e MISHRA, 2019; ROCHA, MARQUES e SILVA, 2021; BASTOLA *et al.*, 2022; BERNUCCI *et al.*, 2022; ANDRADE *et al.*, 2023).

Segundo Lopes (2012), até meados da década de 80, as soluções de manutenção/reabilitação estavam sempre fundamentadas exclusivamente em medições de deflexões máxima (D_0) e a 25 cm da origem da carga (D_{25}) por meio do uso do equipamento Viga Benkelman, conforme estabelecem os procedimentos comumente utilizados DNER PRO-10/79 e DNER PRO-11/79. Entretanto, o valor somente da deflexão máxima e do raio de curvatura, obtido a partir de D_{25} , pode muitas vezes representar um indicador conclusivo insatisfatório e isolado para se diagnosticar a condição estrutural do pavimento em sua totalidade (HORAK, 1987).

Para o desenvolvimento de mecanismos imprescindíveis de avaliação estrutural do pavimento por meio de medidas de deflexões (deformações elásticas), torna-se importante uma correta medição e interpretação de toda a bacia de deflexão, contrapondo-se à análise estrutural fundamentada somente numa área mínima em torno de D_0 . Assim, por meio dos dados apresentados pela curva de deflexão gerada pelos equipamentos deflectométricos, obtém-se os parâmetros de bacia de deflexão (PBD) que podem ser utilizados para a avaliação estrutural do pavimento.

De acordo com Rabbi e Mishra (2019), estes parâmetros são índices que podem ser utilizados como diretriz para uma análise e diagnóstico estrutural do pavimento, bem como para uma decisão mais racional sobre os trechos que requerem um projeto de manutenção/reabilitação.

No intuito de divulgar e ampliar a forma de interpretação dos resultados da bacia deflectométrica, o presente estudo tem como objetivo aplicar a metodologia ora apresentada e realizar uma avaliação objetiva da condição estrutural de um pavimento asfáltico de rodovia no Distrito Federal utilizando parâmetros de curvatura da bacia deflectométrica. Estes parâmetros são conhecidos internacionalmente e vem ganhando espaço no meio técnico brasileiro e são facilmente obtidos por meio de equações matemáticas muito simples a partir dos valores de deflexões de bacias deflectométricas medidas pelo FWD.

PARÂMETROS DE BACIA DE DEFLEXÃO

Parâmetros de bacia de deflexão são importantes para a avaliação do desempenho do pavimento, pois a deflexão é diretamente proporcional à carga aplicada e inversamente proporcional à sua rigidez.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), as deflexões recuperáveis de um pavimento são as principais informações que permitem analisar a condição estrutural de um pavimento flexível. Desta forma, a sistematização de um sistema de gerência de pavimentos, bem como a realização de projetos visando a manutenção/reabilitação de pavimentos flexíveis a partir da avaliação estrutural por meio de medições na superfície da estrutura de deflexões recuperáveis no ponto de aplicação da carga deve ser complementada por medidas adicionais em outros pontos da bacia de deformação, já que a medida isolada de D_0 não identifica seguramente a condição estrutural de todas as camadas do pavimento (FABRÍCIO *et al.*, 1988).

Na Figura 1, observam-se, para uma mesma deflexão máxima, diferentes formatos de bacia deflectométrica indicando, portanto, diferentes capacidades de carga no pavimento. Bernucci *et al.* (2022) ressaltam que a forma da bacia de deflexão depende também do tipo da estrutura de pavimento, da combinação das camadas e de seu comportamento, podendo-se obter uma mesma deflexão máxima para diversas combinações estruturais.

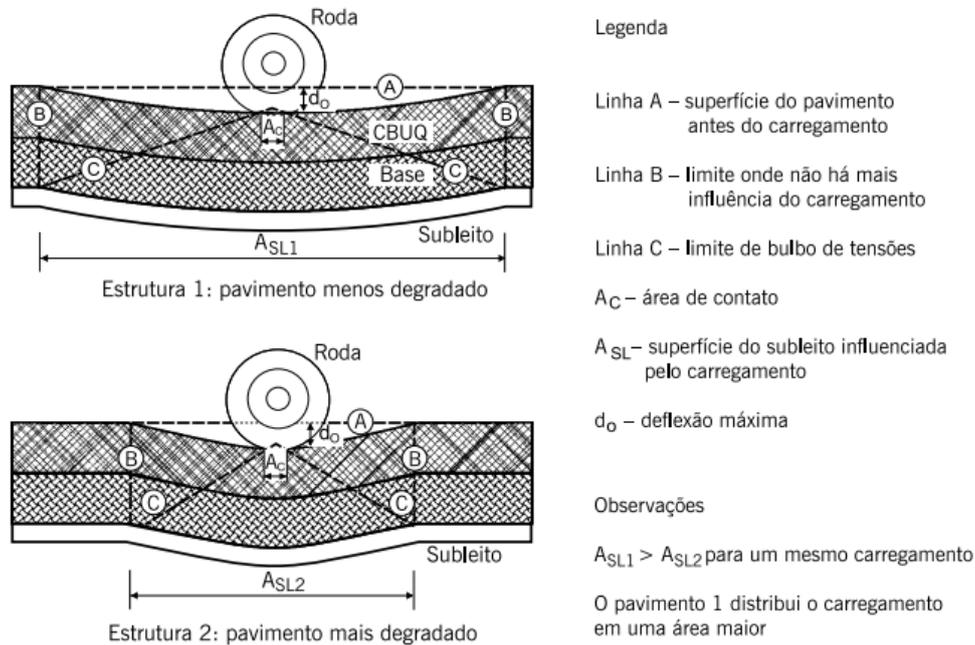


Figura 1. Diferentes formatos de bacia deflectométrica para uma mesma deflexão máxima (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Portanto, a forma e a dimensão de uma bacia deflectométrica são importantes indicadores para diagnósticos estruturais mais precisos do pavimento em sua totalidade, permitindo uma melhor decisão da solução de manutenção/reabilitação em cada situação. A utilização de parâmetros obtidos a partir da bacia de deflexão possibilita a identificação da capacidade estrutural de várias camadas e estados de comportamento do pavimento. Na Figura 2, são mostrados alguns parâmetros amplamente utilizados em estudos de diagnósticos estruturais de pavimentos como também no cálculo do módulo de elasticidade das camadas do pavimento em estudos/projetos de retroanálises (TALVIK e AAVIK, 2008; ANDRADE, 2017; ROCHA *et al.*, 2021; ANDRADE *et al.*, 2023). Na sequência, são apresentados os principais parâmetros obtidos a partir das bacias de deflexão e, por fim, na Tabela 3, são apresentadas as equações de cada parâmetro deflectométrico a ser analisado neste estudo.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

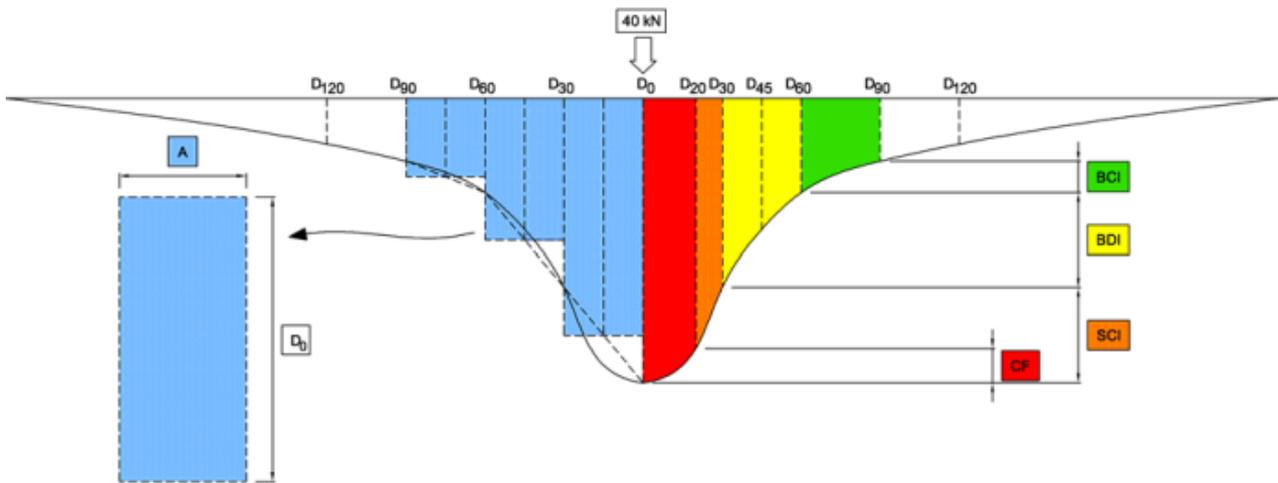


Figura 2. Representação gráfica estruturada da bacia de deflexão e alguns PBD (FERRI, 2013).

Deflexão Máxima (D_0)

A medida da deflexão reversível máxima é um importante parâmetro para a avaliação do desempenho estrutural de todas as camadas que compõem a estrutura ensaiada, o qual é influenciado pela condição do subleito e pelas camadas constituintes do pavimento. Quanto maior o seu valor, mais elástica ou resiliente é a estrutura, acarretando um maior comprometimento estrutural das camadas em estruturas de pavimentos convencionais. Porém, a sua medida isolada não fornece todos os indícios necessários para demonstrar como se está processando a distribuição de cargas no interior do pavimento.

Raio de Curvatura (RC)

Segundo Andrade (2017), o raio de curvatura indica o cenário da capacidade estrutural de pavimentos flexíveis em distribuir os esforços solicitantes para as camadas subjacentes por meio do arqueamento da bacia de deformação elástica na sua porção mais crítica, geralmente a uma distância de 25 cm do centro de aplicação da carga. O arqueamento das camadas do pavimento provocado pelo tráfego atuante e repetitivo é o responsável pelo fenômeno da fadiga das camadas betuminosas (PINTO e PREUSLLER, 2010). A norma DNER PRO 11/79 estabelece que raios de curvatura baixos apontam condições estruturais críticas do pavimento, sendo normalmente um indicativo de que os módulos de resiliência das camadas superiores do pavimento apresentam valores inferiores ao desejáveis. Devida às particularidades de cada estrutura de pavimento, a definição de um valor crítico de RC é um desafio. Entretanto, em pavimentos flexíveis, raios de curvatura inferiores a 100 m são considerados críticos. Por outro lado, a análise conjunta de D_0 e RC permite uma melhor compreensão do complexo comportamento das estruturas dos pavimentos (PINTO e PREUSLLER, 2010). Pode-se fazer uma associação entre os parâmetros, pelo produto $RC \times D_0$, ou mesmo do quociente RC/D_0 .

Parâmetro Área

O parâmetro área aponta a rigidez global da estrutura por meio da combinação de todas as deflexões medidas em função da localização dos sensores. Quanto mais elevado o seu valor, melhor será a distribuição de cargas na estrutura, variando de 90 cm (máximo valor) a 28 cm (valor mínimo), conforme as faixas de avaliação estipuladas pelo *Washington State Department of Transportation* (WSDOT, 2005), constantes na Tabela 1.

De acordo com Andrade (2017), a equação a ser utilizada neste estudo para o cálculo do parâmetro Área contempla os geofones intermediários existentes na configuração do FWD brasileiro (D_{20} e D_{45}),



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



em contraponto aos equipamentos americanos, visando auferir uma maior sensibilidade aos resultados do FWD nacional.

Tabela 1. Faixa do parâmetro área (WSDOT, 2005).

Tipo de pavimento	Parâmetro Área (cm)
Pavimento de concreto – CCP	60 – 90
Asfaltos espessos – CA > 12 cm	55 – 75
Asfaltos delgados – CA < 12 cm	40 – 55
Flexíveis “fracos”	28 – 40

Índice de Curvatura da Superfície (SCI)

Do inglês *Surface Curvature Index (SCI)*, este parâmetro é definido como a diferença entre D_0 e D_{30} (30 cm de distância de D_0). Este indicador, segundo Kim e Park (2002), é o mais sensível em relação à situação de rigidez da camada asfáltica. Este índice, assim como o raio de curvatura (RC), reflete as condições estruturais das camadas superiores do pavimento. Em termos de valores, SCI maiores que 25×10^{-2} mm associam camadas de revestimento pouco resistente ou de pequena espessura e muito deformável. E quanto menor o seu valor, mais rígido é o pavimento.

Índice de Danos à Base (BDI)

De acordo com Kim e Park (2002), o índice BDI, referência do termo em inglês *Base Damage Index*, evidencia a situação da condição da camada de base do pavimento, sendo definido como a diferença entre D_{30} e D_{60} . Valores de BDI superiores a 40×10^{-2} mm apontam para estruturas poucos resistentes ou deficiência do conjunto das camadas do pavimento.

Índice de Curvatura da Base (BCI)

Do inglês *Base Curvature Index*, este parâmetro é definido como a diferença entre D_{60} e D_{90} , sendo um bom indicador para evidenciar a condição do subleito (Kim e Park, 2002). Segundo Lopes (2012), o valor do BCI varia pouco durante a vida do pavimento, mesmo quando este já atingiu a fase da fadiga, já que é indicativo da resistência do subleito sob o pavimento. Assim, o BCI, sofre pequena ou até nenhuma influência das características das camadas estruturais do pavimento.

Fator de Curvatura (CF)

O *Curvature Function* ou Fator de Curvatura, preconizado pelo órgão australiano AUSTRROADS, estima a probabilidade de fissuração da camada asfáltica e é caracterizado pela diferença entre D_0 e D_{20} , sendo o parâmetro que melhor representa a deformação horizontal máxima de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico (ϵ_t) (AUSTRROADS, 2008).

Fatores de Forma (F_1 e F_2)

Os fatores de forma, de valores adimensionais, retratam as relações entre deflexões expressando de maneira satisfatória as diferenças de rigidez entre as diversas camadas integrantes da estrutura de pavimento, bem como o tipo de bacia de deflexão medida.

Na Tabela 2, estão dispostos os parâmetros de bacia de deflexão estudados por Horak (2008), especialmente os indicadores SCI, BDI e BCI relacionados com o desempenho e avaliação dos pavimentos, propondo critérios para classificação das estruturas como “segura”, “em alarme” e “severa”. A partir destes parâmetros e critérios, os problemas estruturais podem ser apontados com mais facilidade.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 2. Classificação da condição estrutural do pavimento a partir dos PBD, 0,01 mm (HORAK, 2008).

Condição da Estrutura	D ₀	SCI	BDI	BCI
Segura	< 50	< 20	< 10	< 5
Em alarme	50 – 75	20 – 40	10 – 20	5 – 10
Severa	> 75	> 40	> 20	> 10

Tabela 3. Parâmetros deflectométricos e equações utilizadas.

Parâmetro	Equação	Unidades
D ₀ – Deflexão Máxima	---	D ₀ [10 ⁻² mm]
RC – Raio de Curvatura	$RC = \frac{6250}{2 * (D_0 - D_{25})}$	RC [m]
A – Parâmetro Área	$A = 10 * \left[1 + 1,5 * \frac{D_{20}}{D_0} + 1,25 * \frac{D_{30}}{D_0} + 1,5 * \frac{D_{45}}{D_0} + 2,25 * \frac{D_{60}}{D_0} + 1,5 * \frac{D_{90}}{D_0} \right]$	A [cm]
SCI – Índice da Curvatura da Superfície	$SCI = D_0 - D_{30}$	SCI [10 ⁻² mm]
BDI – Índice de Danos à Base	$BDI = D_{30} - D_{60}$	BDI [10 ⁻² mm]
BCI – Índice de Curvatura da Base	$BCI = D_{60} - D_{90}$	BCI [10 ⁻² mm]
CF – Fator de Curvatura	$CF = D_0 - D_{20}$	CF [10 ⁻² mm]
F ₁ e F ₂ – Fatores de Forma	$F_1 = \frac{D_0 - D_{60}}{D_{30}}$ e $F_2 = \frac{D_{30} - D_{90}}{D_{60}}$	Adimensional

Obs: D₀, D₂₀, D₂₅, D₃₀, D₄₅, D₆₀, D₉₀ [10⁻² mm].

Deflexões com distâncias de 20 cm, 25 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm e 90 cm do ponto de aplicação da carga.

Parâmetro Área – utilizada a equação proposta por Andrade (2017).

DADOS DO ESTUDO

O estudo foi realizado a partir de levantamentos deflectométricos executados com uso de FWD na rodovia federal BR-020/DF, sob convênio administrado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF). Foram avaliados 8,4 km de extensão em um sentido da rodovia, revestimento em concreto asfáltico e base granular (cascalho), sendo apresentados, na Tabela 4, os principais dados relacionados ao trecho avaliado. O tráfego anual da rodovia é de aproximadamente $N = 7,53 \times 10^7$, com taxa de crescimento anual estimada em 4%. O segmento de rodovia é indicado na Figura 3.

Tabela 4. Dados da BR-020/DF.

Sentido	Extensão (km)	Bacias	Segmentos Homogêneos	Extensão do Segmento (m)	Estrutura (nº de camadas)
Rotatória do Colorado até Sobradinho	8,4	193	9	Variado*	4

* A divisão dos segmentos homogêneos resultou em subtrechos com diferentes comprimentos.

O equipamento utilizado para as medições das bacias deflectométricas realizou medições com sensores nas distâncias 0, 20, 30, 45, 60, 90, 120 cm do centro da placa de aplicação de carga no pavimento, cujo diâmetro é de 30 cm. Com base nas deflexões máximas, foi aplicado o método das



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



diferenças acumuladas da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASTHO, 1993) para divisão do trecho rodoviário em segmentos homogêneos. Em cada um dos segmentos constantes na Tabela 4, foram calculados os parâmetros das bacias de deflexão.

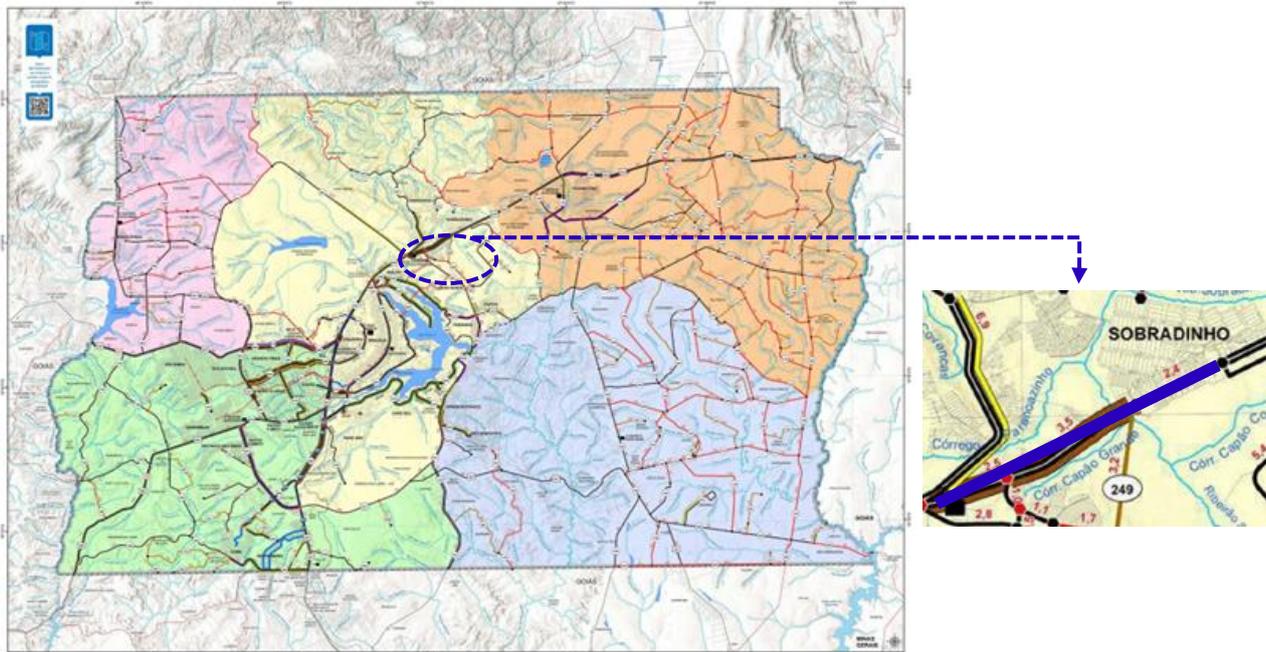


Figura 3. Sistema Rodoviário do DF e localização do segmento de estudo situado na BR-020/DF (DER/DF, 2022).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo de cada segmento homogêneo, foi elaborado o tratamento para obtenção da bacia de deflexão média. As bacias de cada segmento são apresentadas na Figura 4.

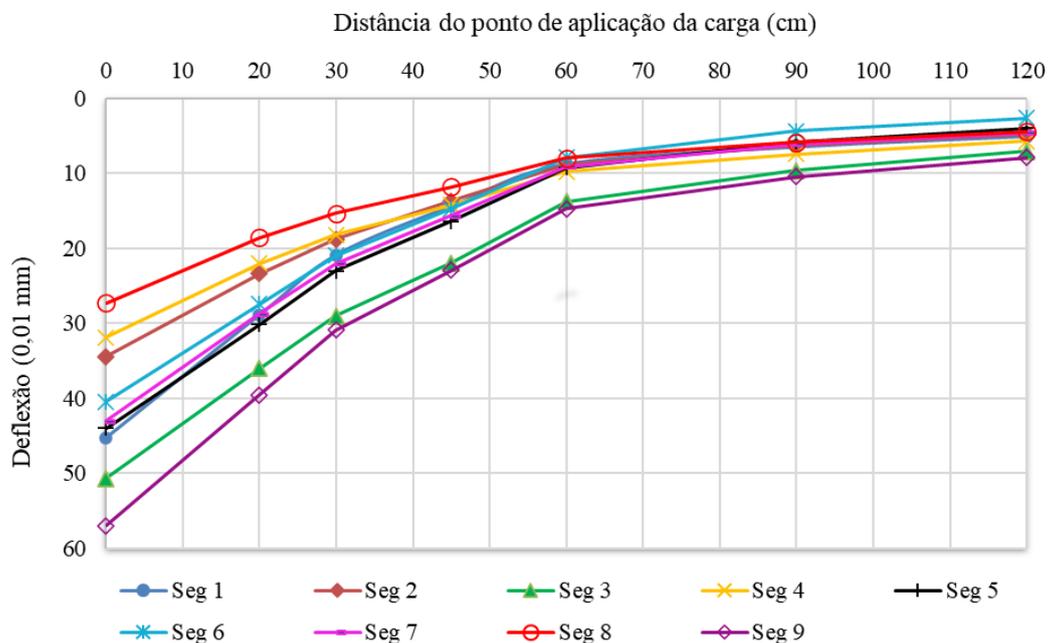


Figura 4. Bacias deflectométricas de cada segmento analisado.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Verifica-se pouca variação na forma das bacias de cada segmento e deflexões máximas variando de 27 (segmento 8) a 57 (segmento 9). Importante destacar que são segmentos contíguos, localizados na parte final do trecho analisado e apresentaram as maiores diferenças de D_0 .

Pela disposição gráfica e valores de deflexão recuperável máxima, observa-se o comportamento característico de distribuição de uma carga aplicada pelo tráfego em pavimento do tipo flexível: as deflexões próximas à aplicação de carga são significativamente maiores que aquelas obtidas a poucas dezenas de centímetros do ponto de aplicação, demonstrando uma distribuição de tensões concentrada na estrutura de pavimento próxima à aplicação da carga.

Parâmetros de Bacia de Deflexão (PBD)

Foram calculados os parâmetros de cada bacia deflectométrica visando obter as melhores indicações das propriedades das camadas dos pavimentos, complementando os já conhecidos D_0 e raio de curvatura adotados pelo DNIT, conforme expressões constantes na Tabela 3. Os resultados dos PBD de cada segmento encontram-se dispostos na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados dos PBD.

PBD	Segmentos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_0	45,3	34,4	50,7	31,9	44,0	40,4	43,0	27,3	57,0
RC	169,7	253,1	182,5	291,6	190,8	204,6	191,6	332,0	154,3
Área	37	41	43	45	39	38	39	43	42
SCI	24	16	22	14	21	19	21	12	26
BDI	12	10	15	8	14	13	13	7	16
BCI	2	3	4	2	3	3	3	2	4
CF	16	11	15	10	14	13	14	9	17
F_1	45	34	50	31	44	40	43	27	57
F_2	20	18	28	17	22	20	21	15	30

O índice D_0 denotou boa condição estrutural para a maioria dos segmentos analisados, ficando somente os segmentos 3 e 9 em estado “em alarme”, indicando um comportamento mais elástico (e, portanto, mais deformável) da estrutura nestes subtrechos. No contexto do sistema de gerência de pavimentos, estes segmentos já geram um alerta quanto ao surgimento de problemas estruturais ao longo da serventia da estrutura, sinalizando para um acompanhamento mais contínuo destes subtrechos.

O RC apresentou valores em todos os segmentos maiores que 100 m, presumindo uma boa distribuição de tensões ao longo das camadas do pavimento, uma boa capacidade estrutural do trecho analisado, a ocorrência de deformações reduzidas e que a forma do arqueamento no trecho em estudo atua de forma mais atenuada para o fenômeno da fadiga das camadas asfálticas.

O parâmetro Área, nos segmentos 1, 5, 6 e 7, apresentou, de acordo com a Tabela 1, um comportamento flexível ‘fraco’. Em contrapartida, os demais segmentos se inseriram na classificação asfalto fino (<12 cm), podendo indicar que a rigidez global da estrutura nestes segmentos está regular. Para o parâmetro SCI, os segmentos 1, 3, 5, 7 e 9 são classificados, segundo a condição estrutural proposta por Horak (2008), “em alarme”, sendo um indicativo da perda de elasticidade da camada asfáltica que, progressivamente ao longo do tempo de serventia da estrutura e incidência das cargas transientes do tráfego, contribuirá para a evolução dos defeitos na camada asfáltica (trincas). Os demais segmentos apresentaram boa capacidade estrutural. Salienta-se que quanto menor o valor do



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



SCI menor será a contribuição das camadas superiores do pavimento (revestimento) na deflexão total (D_0).

Em relação à situação da condição da camada de base do pavimento, o indicador BDI evidenciou para a maioria dos segmentos analisados uma capacidade estrutural “em alarme”, tornando-se um ponto de atenção para um monitoramento mais cuidadoso do desempenho temporal desta camada em termos de capacidade estrutural *in situ*.

No entanto, o parâmetro BCI apresentou uma boa condição estrutural do subleito em toda a extensão da rodovia analisada, corroborando para a afirmação de Lopes (2012) que se trata de um indicador que é pouco influenciado pelas características das camadas estruturais do pavimento, se executado com princípios técnicos e normativos de órgãos públicos brasileiros (por exemplo, especificações técnicas do DNIT) que regem a execução desta camada, conhecida como a fundação do pavimento.

Os parâmetros CF, F_1 e F_2 não apresentam limites para a sua classificação, pois são indicadores de probabilidade de fissuração da camada asfáltica e de previsibilidade das diferenças de rigidez entre diversas camadas do pavimento, respectivamente. O parâmetro CF apresentou uma dispersão de valores entre 9 e 17, F_1 entre 27 a 57 e F_2 variou de 15 a 30 ao longo dos segmentos analisados. Cabe destacar, conforme Lopes (2012), que F_1 e F_2 representam a variação da deformação distanciada lateralmente do centro de aplicação da carga.

Estimativa da Vida Remanescente do Pavimento

A fim de estimar a vida remanescente do pavimento em função dos parâmetros deflectométricos, apresenta-se, a seguir, relações entre os parâmetros da bacia deflectométrica e os indicadores que refletem a capacidade estrutural de pavimentos asfálticos e base granular, propostas por Lopes (2012). Estas relações visam auxiliar a avaliação da estimativa da vida útil remanescente da estrutura sob as condições de tráfego esperadas a partir dos levantamentos deflectométricos realizados com o equipamento tipo FWD.

No estudo, Lopes (2012) identificou que os PBD mais representativos em relação aos parâmetros estruturais são SCI, BDI e BCI, criando um conjunto de medições satisfatórias que direcionam para uma análise e diagnóstico estrutural do pavimento desde o subleito até o revestimento asfáltico. Além destes parâmetros, também foram considerados os índices D_0 e RC já consagrados na infraestrutura rodoviária brasileira.

Por meio de análises e correlações, Lopes (2012) verificou a relação entre os PBD e as características do pavimento, a significativa relação entre SCI e as características do revestimento, utilizando-as na caracterização do estado do concreto asfáltico usinado a quente, o parâmetro BDI como indicador das propriedades elásticas e geométricas da base e o BCI para a condição do subleito.

A seguir, são apresentadas as equações 1 a 5 dos modelos de fadiga propostos para estimar a vida remanescente do pavimento a partir dos PBD.

$$N = 7,2024 * 10^{13} * D_0^{-4,0568} \quad \text{Equação (1)}$$

$$N = 8,3928 * 10^{10} * SCI^{-3,2927} \quad \text{Equação (2)}$$

$$N = 5,7636 * 10^{10} * BDI^{-3,8417} \quad \text{Equação (3)}$$

$$N = 9,8496 * 10^{10} * BCI^{-5,1046} \quad \text{Equação (4)}$$

$$N = 0,2320 * RC^{3,2268} \quad \text{Equação (5)}$$



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



A partir destas equações, foram calculadas a vida remanescente da estrutura em estudo para cada segmento analisado. Os resultados estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6. Vida remanescente do pavimento a partir dos PBD.

Índice	Segmentos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D ₀	1,38E+07	4,19E+07	8,75E+06	5,74E+07	1,55E+07	2,18E+07	1,70E+07	1,07E+08	5,41E+06
RC	3,63E+06	1,32E+07	4,59E+06	2,08E+07	5,30E+06	6,64E+06	5,38E+06	3,17E+07	2,67E+06
SCI	2,26E+06	9,74E+06	3,35E+06	1,52E+07	3,72E+06	4,79E+06	3,73E+06	2,37E+07	1,81E+06
BDI	3,98E+06	8,67E+06	1,65E+06	1,61E+07	2,45E+06	2,90E+06	3,10E+06	2,66E+07	1,32E+06
BCI	1,40E+09	8,13E+08	6,63E+07	1,36E+09	1,68E+08	1,66E+08	3,50E+08	2,19E+09	5,39E+07

Por meio dos valores de número N remanescentes obtidos para cada PBD considerado, o ponto crítico encontra-se no segmento 9, índice BDI, com valor 1,32E+06. Considerando a taxa de crescimento anual de 4% ao ano, este valor será atingido em aproximadamente 04 anos, corroborando para um sinal de alerta neste subtrecho em relação à evolução de possíveis danos nesta camada de base frente ao seu desempenho estrutural *in situ* sob a ação de cargas de tráfego e condições climáticas.

No entanto, os maiores valores estimados para a vida remanescente da estrutura foram encontrados para o parâmetro BCI, sendo este um indicador que exerce pouca relevância no conjunto de análises das características estruturais do pavimento por se tratar do subleito.

Os segmentos 5 e 7 apresentam valores de D₀ muito próximos: 44 e 43 x 10⁻² mm (Tabela 5). Entretanto, quando obtidos os números N da vida remanescente do pavimento nestes subtrechos, para o indicador BDI, 2,45E+6 e 3,10E+6, respectivamente, observa-se uma diferença entre os resultados, evidenciando que a verificação da condição estrutural do pavimento existente não pode ser condicionada somente à deflexão máxima (D₀). Essa análise deve ser ampliada por meio de outros parâmetros, para que esses possam reproduzir de forma mais realística os valores críticos atuantes em diferentes pontos da estrutura estudada.

Com base em dados de monitoramento de pavimentos e análises de bacias de deflexão, incluindo retroanálises, Silva *et al.* (2016) observaram maior progressão de trincamento em trecho de menor D₀ (30 x 10⁻² mm) contra um de maior D₀ (100 x 10⁻² mm). Assim, um indicador complementar que pode conduzir a uma melhor interpretação dos resultados é a ocorrência de trincas, pois ainda que os PBD acusem boa condição estrutural, ainda há questões relativas à compatibilidade de rigidez das camadas do pavimento, como discutido pelos autores. Assim, é importante realizar o monitoramento da rodovia para observar a relação entre o surgimento e a evolução de trincas no revestimento asfáltico e os PBD.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da condição estrutural de pavimentos não pode ser condicionada somente à deflexão máxima (D₀) e ao raio de curvatura, índices comumente utilizados na prática da engenharia rodoviária no Brasil. Esta análise deve ser complementada usando outros parâmetros obtidos pelo formato da bacia de deflexão, denominados de Parâmetros de Bacias de Deflexão (PBD). Os PBD são obtidos por operações matemáticas simples e os resultados são de fácil entendimento. A utilização dos PBD possibilita a identificação das deficiências nas camadas do pavimento flexível de forma mais abrangente, por meio do completo aproveitamento dos dados deflectométricos. Os PBD também são indicadores que refletem valores críticos atuantes em diferentes pontos da estrutura do pavimento, além de contribuírem para as tomadas de decisões de gerenciamento do pavimento, como a seleção de técnicas de reabilitação ou de manutenção preventiva.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



As análises dos PBD e das estimativas de vida remanescente do pavimento referem-se, neste estudo, a um pavimento flexível com base granular, em que os módulos elásticos das camadas diminuem com a profundidade. Entretanto, verificações para outros tipos de estruturas, tais como pavimentos asfálticos semirrígidos e invertidos que contemplem camadas estabilizadas com aglomerante hidráulico podem ser objeto de estudos complementares sobre o assunto.

Ressalta-se que estes parâmetros não devem ser utilizados como definitivos da melhor técnica de manutenção/restauração, mas como índices orientativos nas tomadas de decisão das intervenções a serem realizadas na estrutura do pavimento, otimizando as atividades ‘do que fazer’, ‘quando fazer’ e ‘como fazer’, características essenciais em um sistema de gerência de pavimentos que já vem sendo implantado em órgãos rodoviários brasileiros.

Por fim, os PBD ao fornecerem dados sobre o estado de conservação atual do pavimento, especialmente em relação às condições estruturais das camadas constituintes, propiciam aumentar a capacidade de oferecer aos usuários das vias conforto e segurança durante o tráfego de veículos.

Além dos resultados apresentados no artigo, ressalta-se que os PBD também podem ser empregados no cálculo dos módulos de resiliência das camadas de pavimentos em estudos de retroanálises (TALVIK e AAVIK, 2008; ANDRADE, 2017; ROCHA *et al.*, 2021; ANDRADE *et al.*, 2023).

AGRADECIMENTOS

À Superintendência Técnica (SUTEC) do DER/DF pela disponibilização dos dados. À Universidade de Brasília (UnB) pelos conhecimentos técnicos-científicos oportunizados por meio do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO (1993). Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
- Andrade, L. R. (2017). Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 179 p.
- Andrade, L. R.; Bessa, I. S.; Vasconcelos, K. L.; Bernucci, L. L. B.; Suzuki, C. Y. (2023). Structural Performance Using Deflection Basin Parameters of Asphalt Pavements with Different Base Materials Under Heavy Traffic. *International Journal of Pavement Research and Technology*, p. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-023-00307-w>
- Austroroads Technical Report (2008). AP-T99/08: Technical basis of the Austroroads design procedures for flexible overlays on flexible pavements. Sidney.
- Bastola, N. R.; Souliman, M. I.; Dessouky, S.; Daoud, R. (2022). Structural health assessment of pavement sections in the southern central United States using FWD parameters. *Journal Frontiers in Built Environment*. DOI: [10.3389/fbuil.2022.1026469](https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1026469)
- Bernucci L., Motta L., Ceratti J., Soares J. (2022). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2ª edição, 759 p.
- Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (2022). Mapa rodoviário de 2022 do Distrito Federal. Disponível em: https://www.der.df.gov.br/wp-content/uploads/2022/02/Mapa_Rodov_escala_1_170.000_2022.pdf Acesso em: 24/02/2022.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (1979). DNER-PRO 010/1979. Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis: Procedimento A. Rio de Janeiro: IPR.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (1979). DNER-PRO 011/1979. Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis: Procedimento B, Rio de Janeiro: IPR.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). DNIT – Manual de Pavimentação. IPR 719. Rio de Janeiro, RJ.

Fabrício, J. M.; Gonçalves, E. A.; Fabrício, O. F. (1988). Metodologia não destrutiva para avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis através da interpretação das bacias de deformação. 23a Reunião Anual de Pavimentação, 3, p. 1415-1446.

Ferri, S. (2013). Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 331 p.

Horak, E. (1987). Aspects of deflection basin parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa. Thesis (PhD of Civil Engineering) - Department of Civil Engineering, University of Pretoria, Pretoria - South Pretoria, 312 p.

Horak, E. (2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. Technical Paper of Journal of the South African Institution of Civil Engineering, Pretoria, v. 50, n. 2, p. 2-9.

Kim, Y. R.; Park, H. (2002). Use of Falling Weight Deflectometer multi-load data for pavement strength estimation. Final Report FHWA/NC-2002-006, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh.

Lopes, F. M. (2012). Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico: avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 372 p.

Pinto, S.; Preussler, E. S. (2010). Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, Synergia: IBP, 2ª edição.

Rabbi, M. F.; Mishra, D. (2019). Using FWD deflection basin parameters for network-level assessment of flexible pavements. International Journal of Pavement Engineering, p. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1580366>

Rocha, M. L.; Marques, G. L. O.; Silva, R. C. (2021). Aplicação de parâmetros de bacia de deflexão (PBD) em análises estruturais de pavimentos flexíveis. Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), 100% virtual, 12 p.

Rocha, M. L.; Marques, G. L. O.; Silva, R. C. (2021). Predicting equations for determining layer elastic moduli by using Deflection Basin Parameters (DBPs) from Falling Weight Deflectometer. International Journal of Pavement Engineering, v. 22, p. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1972296>

Silva, R. C.; Souza Jr, J. G.; Costa, D. P.; Amaral, L. S.; Romeiro Jr, C. L. S.; Muniz, D. D. (2016). Desempenho Funcional e Estrutural de Pavimentos Flexíveis. In: 45ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), Brasília/DF. Técnicas de pavimentação e conservação rodoviária.

Talvik, O.; Aavik, A. (2009). Use of FWD deflection basin parameters (SCI, BDI, BCI) for Pavement Condition Assessment. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, vol. 4, p. 196-202. DOI: [10.3846/1822-427X.2009.4.196-202](https://doi.org/10.3846/1822-427X.2009.4.196-202)

Washington State Department of Transportation – WsDOT (2005). Everseries user guide – Pavement analysis computer software and case studies. Washington D.C.