



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

Uma Análise da Malha Rodoviária Federal Brasileira usando parâmetros obtidos com o ensaio FWD.

*Bruno Marques de Castro¹; Victor Hugo Dalostro de Oliveira¹;
Emerson Aparecido de Anhaia¹; Victor Leandro Chaves Garcia¹; Giulia Araújo Carvalho¹*

RESUMO

O artigo tem como objetivo avaliar a condição estrutural da malha rodoviária federal sob administração do DNIT, fazendo o uso apenas de parâmetros obtidos com o ensaio não destrutivo do levantamento deflectométrico do FWD. Foram avaliados os resultados dos levantamentos de pavimento flexível levantados nos anos de 2020, 2021 e 2022, compreendendo a uma extensão de 53.292,8 km, equivalente a 266.464 pontos de ensaios espaçados a cada 200 metros. O artigo propõe uma análise da malha utilizando a norma DNER PRO-11/79 e o método proposto por Horak (2008), permitindo-se classificar a condição estrutural das rodovias, fazendo-se uma análise geral, regional e por estado. Os resultados indicaram que o cálculo com Horak apresentou resultados semelhantes aos da norma DNER PRO-11/79, onde foi encontrado que aproximadamente 19% da malha total analisada está em um estado classificado como Severo. A análise regional mostrou que o Nordeste tem o melhor desempenho estrutural, com 47% da malha no estado Seguro, enquanto a região do Norte tem a pior classificação, possuindo cerca de 39% de sua malha em um estado Severo. A análise individual dos parâmetros revelou que as camadas inferiores do pavimento, como a base e o sub-leito, possuem resultados melhores de desempenho do que as camadas mais superiores, como a camada de revestimento. Conclui-se que a avaliação de desempenho de pavimentos é uma tarefa complexa e que requer a análise de muitos parâmetros, tornando importante a realização regular de avaliações para identificar possíveis problemas e implementar medidas preventivas de manutenção, garantindo a segurança dos usuários das rodovias e a eficiência do transporte rodoviário como um todo.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento; Deflexão; FWD.

ABSTRACT

The article aims to evaluate the structural condition of the federal road network under the DNIT administration, using only parameters obtained from the non-destructive FWD deflection survey. The flexible pavement surveys carried out in 2020, 2021, and 2022 were evaluated, covering a length of 53,292.8 km, equivalent to 266,464 FWD test points spaced every 200 meters. The article proposes an analysis of the network using the DNER PRO-11/79 standard and the method proposed by Horak (2008), allowing the classification of the structural condition of the roads, through a general, regional, and state-by-state analysis. The results indicated that the calculation with Horak presented similar results to those of the DNER PRO-11/79, where it was found that approximately 19% of the total network analyzed is in a state classified as Severe. The regional analysis showed that the Northeast has the best structural performance, with 47% of the network in a Safe state, while the North region has the worst classification, with about 39% of its network in a Severe state. The individual parameter analysis revealed that the lower pavement layers, such as the base and subgrade, have better performance results than the upper layers. It is concluded that pavement performance evaluation is a complex task that requires analysis of many parameters, making regular evaluations important to identify possible problems and implement preventive maintenance measures, ensuring the safety of road users and the efficiency of road transportation.

KEY WORDS: Pavement; Deflection; FWD.

¹ ENGEFOTO Engenharia e Aerolevantamentos S.A., e-mails: bmcastroo@gmail.com



1 - INTRODUÇÃO

O desempenho da rodovia é um dos fatores principais que garantem a segurança e o conforto dos usuários, além de desempenhar um papel fundamental na economia do país. Uma das formas de se avaliar esse desempenho é através da análise da condição estrutural do pavimento.

Entre as técnicas não destrutivas e eficientes para se avaliar a condição estrutural do pavimento, destaca-se o ensaio de deflexão pela queda de um peso, o *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Esse é um ensaio já bem estabelecido mundialmente, e que fornece resultados valiosos para análises estruturais dos pavimentos (Horak e Emery, 2023).

O ensaio do FWD tenta simular o pavimento sob o efeito de tráfego de veículos em movimento, através da queda e impacto de um objeto sobre um sistema, a partir de uma altura pré-determinada, transferindo a força aplicada para uma placa apoiada no pavimento e medindo-se a deflexão pela recuperação elástica desse impacto. (DNER PRO-273, 1996).

Essa técnica é essencial para monitorar a capacidade de suporte e a durabilidade do pavimento, permitindo-se uma análise das necessidades de manutenção e reparo, garantindo, assim, uma gestão mais eficiente e econômica das rodovias

Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo analisar a condição estrutural dos pavimentos flexíveis de toda a malha rodoviária federal sob administração do DNIT, usando os resultados dos levantamentos deflectométrico realizado nos anos de 2020, 2021 e 2022, seguindo a norma de procedimentos de ensaio para o FWD no DNIT, a DNER PRO-273/96.

No entanto, o artigo propõe-se a analisar apenas o comportamento estrutural dos pavimentos. São avaliados parâmetros como as deflexões, o raio de curvatura e o tipo de pavimento utilizado. Com isso, são apresentados vários índices que permitem aferir o desempenho das bacias de deflexões de toda a malha.

2 - METODOLOGIA

Nos anos de 2020, 2021 e 2022, foi realizada uma campanha de levantamento deflectométrico em toda a malha rodoviária federal sob a administração do DNIT, utilizando os procedimentos descritos na norma rodoviária DNER PRO-273/96.

O ensaio foi realizado em todo pavimento flexível da malha, ensaiando pontos a cada 200 metros, resultando em uma extensão total de 53.292,8 km ensaiada, o que equivale a 266.464 pontos FWD. A carga aplicada no ensaio foi de 40 kN, de forma distribuída em uma placa de 30 cm de diâmetro, por um tempo aproximado de 2 centésimos de segundo, permitindo-se a leitura simultânea dos assentamentos reversíveis em sete pontos, situados sob as distâncias do centro de aplicação conforme apresentado na Tabela 1.

Sensores / Geofone	D_0	D_{20}	D_{30}	D_{45}	D_{65}	D_{90}	D_{120}
Distância (mm)	0	200	300	450	650	900	1200



Tabela 1 Posicionamento dos sensores de deflexão

2.1 – Parâmetros analisados

Os parâmetros que serão analisados estão apresentados nos itens a seguir.

2.1.1 – Índice da Curvatura da Superfície (*SCI*)

O parâmetro *SCI* (*Surface Curvature Index*) é utilizado como um indicativo da resistência das camadas superiores do pavimento. É calculado com a Equação 1 como a diferença entre as deflexões no ponto de aplicação da carga (D_0) e a deflexão a 30 cm da aplicação da carga (D_{30}). Valores de *SCI* superiores a $25 \cdot 10^{-2}$ mm estão geralmente associados a camadas superiores do pavimento pouco resistentes ou de pequenas espessuras com acentuado arqueamento da bacia.

$$SCI = D_0 - D_{30} \quad (1)$$

O valor do *SCI* é inversamente proporcional à rigidez global do pavimento podendo indicar se as causas das deficiências num pavimento podem ser atribuídas às camadas de revestimento e base.

2.1.2 – Índice de Danos à Base (*BDI*)

O *BDI* (*Base Damage Index*) é um indicador da condição para a camada de base do pavimento, sendo calculado com a Equação 2 como a diferença entre as deflexões a 30 cm (D_{30}) e 60 cm (D_{60}) de distância do ponto de aplicação da carga, sendo medido geralmente em 10^{-2} mm.

$$BDI = D_{30} - D_{60} \quad (2)$$

Os valores de *BDI* diminuem com o aumento da espessura equivalente do pavimento analisado. Valores acima de $40 \cdot 10^{-2}$ mm podem indicar pavimentos pouco resistentes ou com problemas, sendo considerado um dos melhores indicadores da condição da camada de base do pavimento, geralmente também sendo utilizado para avaliar a resistência da estrutura do pavimento.

2.1.3 – Índice da Curvatura da Base (*BCI*)

O parâmetro *BCI* (*Base Curvature Index*) é calculado com a Equação 3 como sendo a diferença entre as deflexões a 60 cm (D_{60}) e 90 cm (D_{90}) do ponto de aplicação da carga, medido em 10^{-2} mm. Este parâmetro é apresentado como o melhor indicador da condição do subleito.

$$BCI = D_{60} - D_{90} \quad (3)$$

O *BCI* é inversamente proporcional ao CBR, sendo que valores menores indicam maiores resistências. O valor do *BCI* varia pouco durante a vida do pavimento e está associado a valores de CBR próximos a 10% ou menores. Pode ser usado no diagnóstico de comportamento de um



pavimento para identificar se as deficiências são atribuídas a todas as camadas ou especificamente ao subleito. O limite para o BCI é de $10 \cdot 10^{-2}$ mm

2.1.3 – Raio de Curvatura (R_c)

O Raio de curvatura (R_c) é um parâmetro importante para analisar a bacia de deflexão do ensaio. O cálculo é realizado conforme a Equação 4, assumindo a deformação por uma parábola do 2º grau, com origem no ponto aplicação de carga (D_0) até um ponto de referência crítico a 25 cm (D_{25}).

$$R_c = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})} \quad (4)$$

Devido ao fato dos ensaios realizados pelo DNIT ter os Geofone a 20cm e a 30cm do eixo, e nenhum a 25 cm, o cálculo de D_{25} é obtido por meio de interpolação.

A Figura 2 apresenta uma ilustração da bacia de deflexão e os parâmetros analisados.

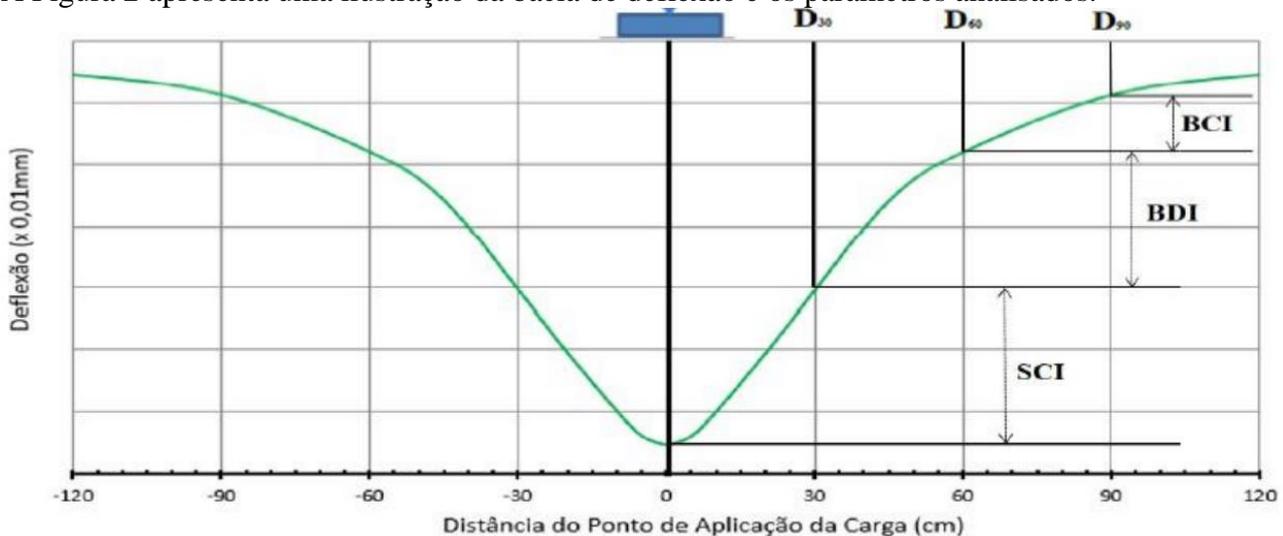


Figura 2 – Representação gráfica dos parâmetros analisados

2.2 – Critérios de classificação

A DNER PRO-11/79 permite avaliar pavimentos baseando-se em critérios de deformabilidade. Segundo o item de avaliação estrutural, a norma propõe casos para avaliar a estrutura do pavimento, classificando-o em: “BOA”, “REGULAR”, “REGULAR PARA MÁ” ou “MÁ”.

Os cálculos dos critérios de avaliação necessitam de parâmetros como a deflexão de projeto (D_{adm}). Como o escopo desse artigo não abrange essa análise criteriosa, os cálculos irão avaliar apenas o Raio de Curvatura (R_c), permitindo classificar as rodovias em “Regular para MÁ” e “MÁ”, ou em uma classificação “Incerta”, que requer mais análises para uma classificação mais precisa.

Outras classificações são realizadas com os estudos apresentados por Horak (2008), que apresenta intervalos que correlacionam o nível de desempenho do pavimento com os parâmetros do FWD. Em seu artigo, Horak apresentou correlações para diferentes tipos de bases de pavimento. Considerando



que o tipo de base granular é o material mais utilizado na execução da base no Brasil, os resultados das análises serão calculados para este tipo de material, conforme estão na Tabela 2.

Avaliação da condição estrutural (Horak, 2008)	Parâmetros de análise da bacia (10^{-2} mm)				Avaliação da condição estrutural (DNER PRO)	Parâmetro analisado
	D_0	SCI	R_c	BCI		R_c
Seguro	< 50	< 20	< 10	< 5	Boa ou Regular	≥ 100
Em alarme	50 – 75	20 – 40	10 – 20	5 – 10	Regular para má ou má	< 100
Severo	> 75	> 40	> 20	> 10		

Tabela 2 – Avaliação da condição estrutural de pavimentos flexíveis segundo parâmetros do FWD

3 - RESULTADOS

O Gráfico 1 apresentado a seguir mostra um resumo da classificação da malha rodoviária federal, através dos parâmetros analisados e dividindo-os segundo o seu nível de severidade.

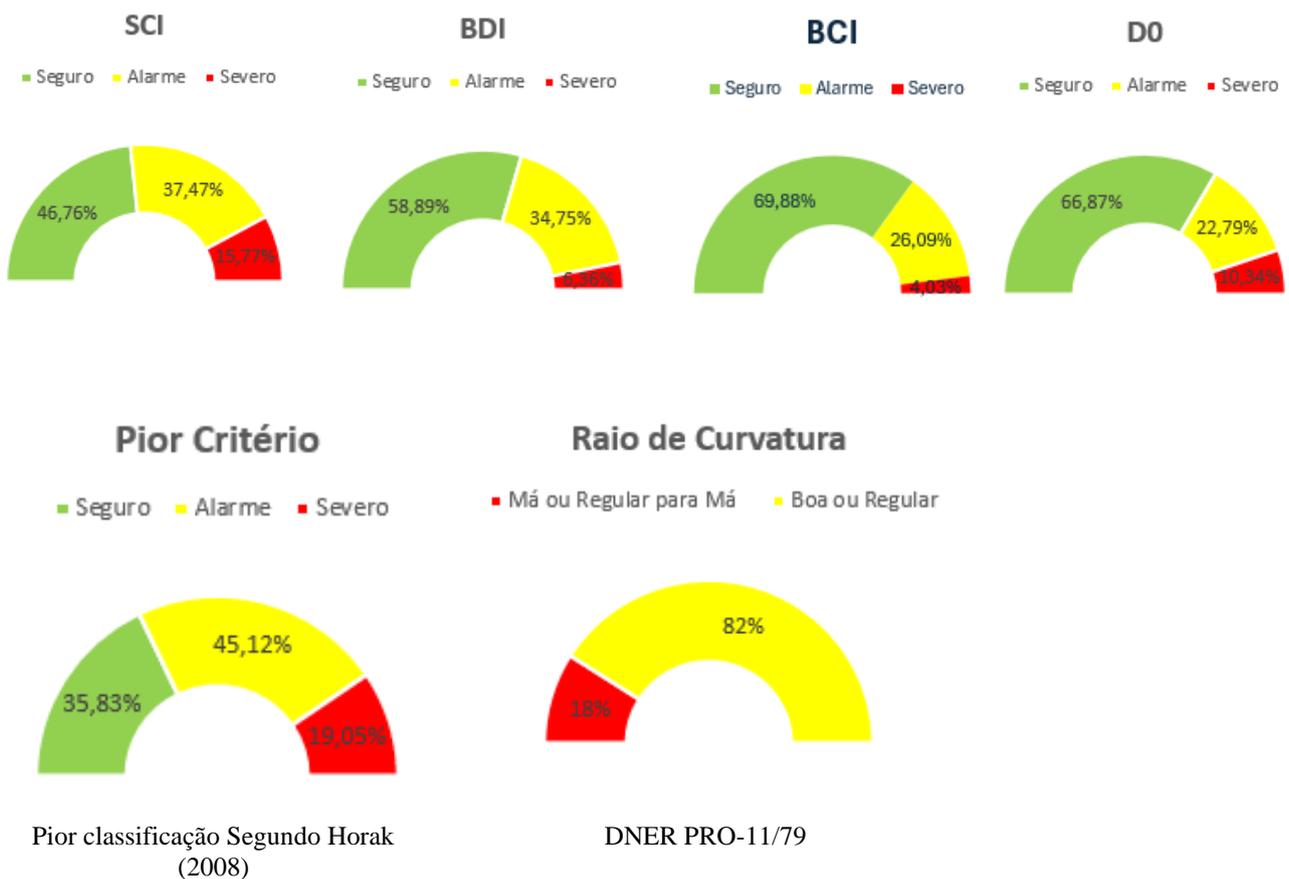


Gráfico 1 – Classificação geral da malha rodoviária federal.



Analisando as classificações, foi encontrado segundo o pior critério encontrado com Horak (2008), que cerca de 19% da malha está em condições **Severa**, 45% **Em alarme** e 36% **Seguro**.

Analisando a malha segundo a DNER PRO-11/79, foi encontrado que cerca de 18% da malha está em condições **Regular para má ou má**, próximo ao resultado encontrado com Horak (2008). Porém, foi verificado que 82% da malha não pode ser classificada somente com esse parâmetro, e que, portanto, precisaria de análises que envolvam as solicitações com o eixo padrão de 8,2t (*n*).

Ao avaliar individualmente os parâmetros, podemos tirar algumas conclusões a respeito da influência das camadas do pavimento na classificação de desempenho estrutural.

Pode-se verificar que os parâmetros **BDI** e **BCI**, que avaliam as camadas inferiores do pavimento, como a base e o subleito, respectivamente, tiveram menores percentuais com um estado **Severo** do que o índice **SCI** que avalia as camadas superiores do pavimento, como o revestimento. Enquanto o **SCI** apontou que 16% da malha está em um estado **Severo**, os parâmetros **BDI** e **BCI** apontaram apenas valores de 6% e 4%, respectivamente.

Verifica-se então que o parâmetro **SCI**, da camada superior do pavimento, é a maior responsável pela classificação do estado **Severo**, sendo responsável por 83% das classificações nesse estado. Ou seja, caso fosse desconsiderado esse parâmetro na classificação, a malha passaria a ter apenas 13% de sua malha ao invés de 19% no estado **Severo**, e subiria na avaliação de 36% para 48% da malha como **Seguro**, um aumento de 6.657,4 km.

Analisando o parâmetro **BDI**, que avalia a camada de revestimento da superfície do pavimento, nota-se uma concordância com os resultados de Índice de Condição de Superfície (ICS) que estão apresentados em outro artigo nesse congresso, onde foram encontrados para essa malha analisada, 29% da malha em condição ótima, 14% em condição boa, 28% regular, 22% ruim, e 7% péssima. Nota-se uma equivalência na avaliação péssima com os 6% encontrado como severo com o **BDI**.

Analisando o **BCI**, é possível avaliar que 70% da malha rodoviária foi classificada como **Seguro**, indicando que os problemas podem não ser das camadas inferiores do leito, ou de todo o pavimento. Nota-se que apenas 4% da malha foi classificada como **Severo** segundo esse parâmetro.

A Tabela 3 traz um resumo das classificações segundo Horak (2008) e a norma DNER PRO-11/79.

Região	Extensão analisada (km)	DNER PRO-11/79		Classificação segundo o pior critério de Horak (2008)					
		Regular para má ou má		Severo		Em alarme		Seguro	
		(km)	%	(km)	%	(km)	%	(km)	%
Norte	9556.2	4090.6	43%	3771.4	39%	4151.2	43%	1633.6	17%
Nordeste	18714.8	2465.0	13%	2430.8	13%	7449.4	40%	8834.6	47%
Centro-Oeste	8608.2	1560.2	18%	1383.6	16%	4162.4	48%	3062.2	36%



Sudeste	6744.4	781.4	12%	1385.0	21%	3297.2	49%	2062.2	31%
Sul	9669.2	741.8	8%	1180.8	12%	4983.8	52%	3504.6	36%
Total	53292.8	9639.0	18.09%	10151.6	19.0%	24044.0	45%	19097.2	35.8%

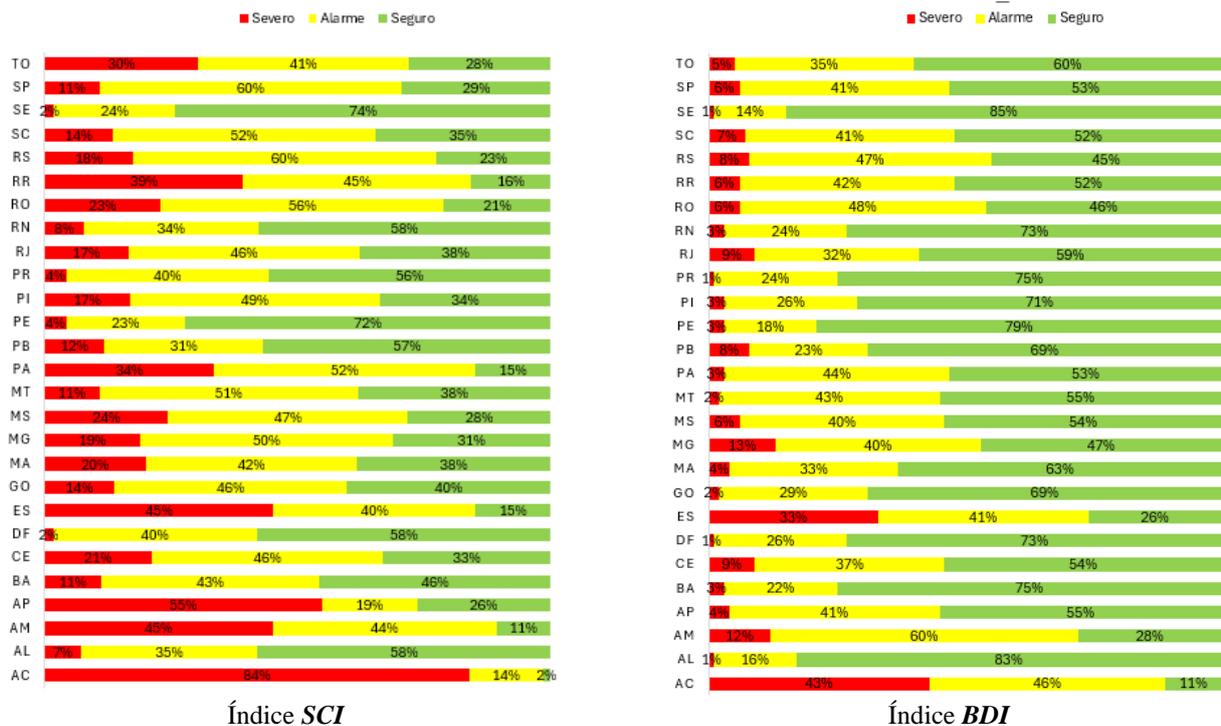
Tabela 3 – Classificação da malha segundo Horak (2008) por região.

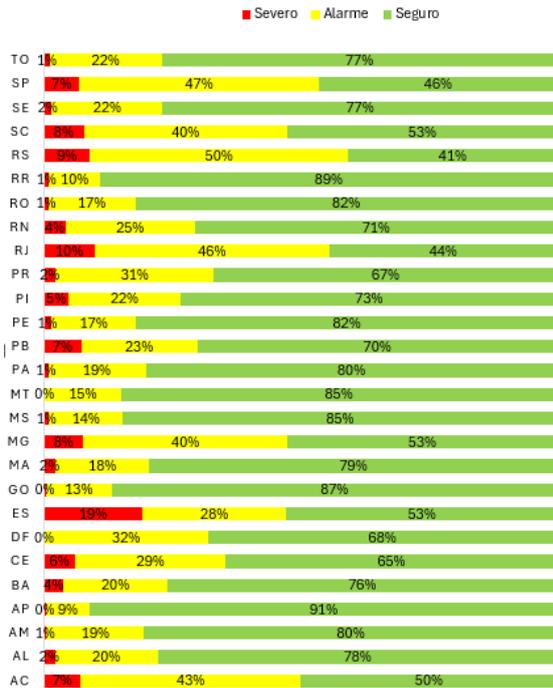
O Nordeste além de ter a maior malha, possui o maior percentual classificado como **Seguro**. Possuindo um quantitativo total de 35% da malha federal, cerca de 47% dela está classificada na melhor classificação qualitativa.

O Sul tem a menor extensão na pior classificação e é a segunda maior malha no estado **Seguro**. Cabe ressaltar que essa região tem a segunda maior malha federal do Brasil e representa 18% da malha total que foi analisada.

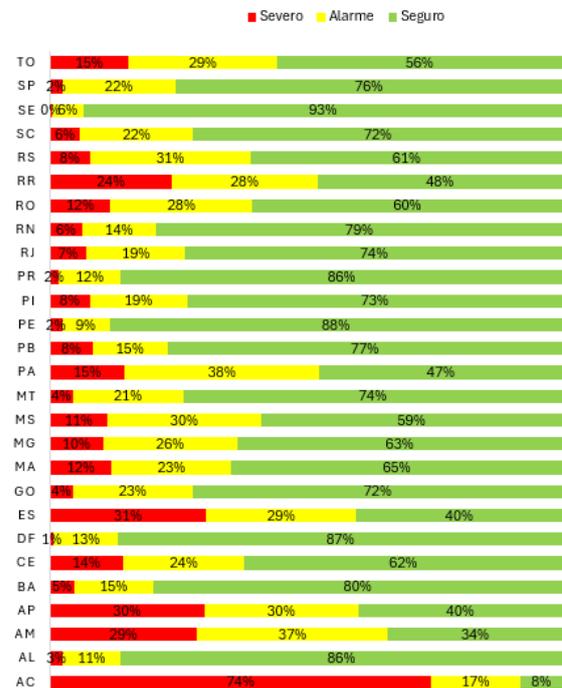
O Norte tem a maior extensão na pior classificação e a menor extensão na classificação **Segura**. Enquanto 39% e 43% de sua malha é classificada como **Severo** e **Regular para má ou má**, respectivamente, as outras regiões têm índice inferiores a 21% com Horak e 18% pela DNER PRO. Esse resultado indica uma desproporção, onde apesar do Norte possuir apenas 18% da malha total, tem quase a metade da contribuição no quantitativo total da malha nesse estado **Ruim**.

O Gráfico 2 a seguir traz um resumo das análises classificatórias por unidade federativa do Brasil.





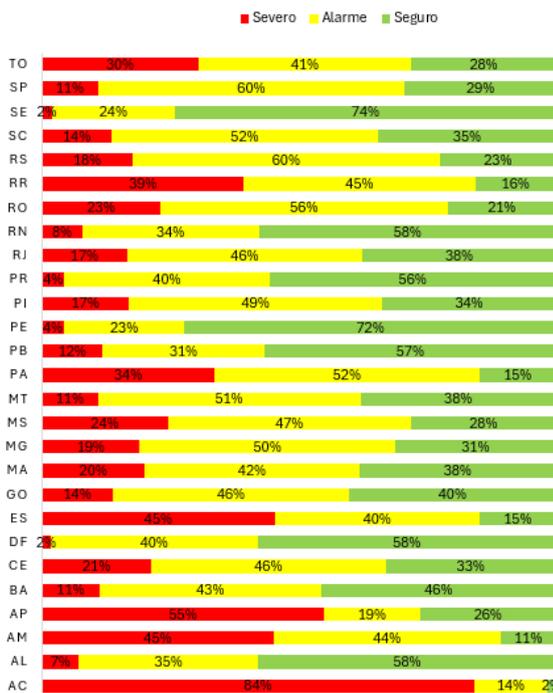
Índice BCI



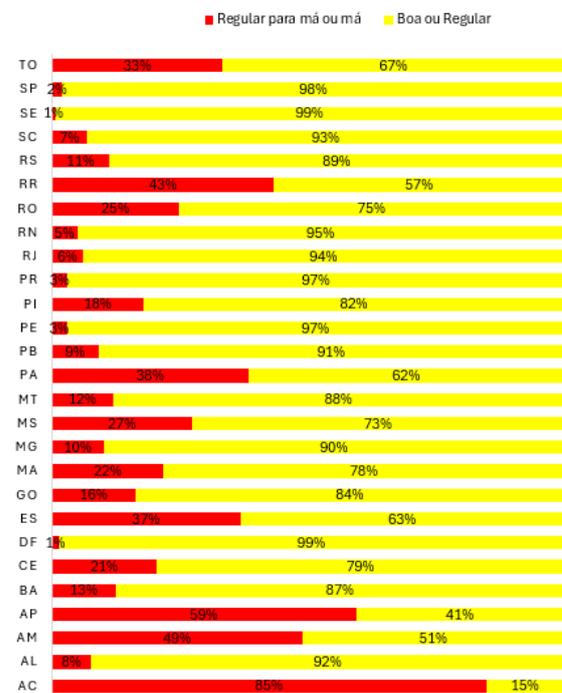
Índice D0

Gráfico 2 – Classificação das rodovias segundo os parâmetros de Horak (2008).

O Gráfico 3 traz uma análise classificatória geral segundo Horak (2008) e a DNER PRO-11/79.



Pior classificação Segundo Horak (2008)



DNER PRO-11/79

Gráfico 3 – Classificação das rodovias segundo o pior critério de Horak (2008) e segundo a DNER PRO-11/79



As classificações apresentadas a seguir mostram que os estados com as melhores classificações foram DF, SE e PE, todos possuindo menos do que 5% de sua malha na pior condição.

Enquanto isso, o estado do AC apresentou mais de 84% de sua malha federal na pior classificação. Uma análise dos parâmetros mostra que o problema está associado a várias camadas do pavimento, pois os parâmetros D_0 , SCI e BDI deram 74%, 83% e 43% na condição **Severa**, respectivamente. Esse resultado indica que a possível causa dessa condição estrutural está associada a insuficiência a mais de uma camada do pavimento.

O segundo estado com a menor classificação é o AP, tendo até 55% da malha na pior classificação. Analisando os parâmetros, vemos que D_0 , SCI e BDI deram 30%, 55% e 4% na condição **Severa**, indicando que a possível causa dessa condição estrutural está associada a rigidez global do pavimento ou as camadas mais superficiais.

Os resultados revelam ainda que a classificação dos estados brasileiros é majoritariamente **Segura**, possuindo apenas 7 estados com uma extensão percentual acima de 30% classificada como **Severo**. Além disso, revelam que os resultados do AC e AP são desproporcionais pois são os únicos dois estados que possuem um valor percentual da malha acima de 50% na pior condição.

Essa classificação com o FWD está em concordância com as análises do ICS por estado de 2020, que também revelou que os estados de AL, PE, DF estão entre as melhores classificações, enquanto AC e ES estão entre as piores classificações.

4 - CONCLUSÃO

A comparação entre os critérios propostos neste artigo evidenciou que o método proposto por Horak (2008) apresentou resultados semelhantes aos da norma DNER PRO-11/79 para a pior condição de classificação. Apesar disso, é importante destacar que a DNER PRO-11/79 não foi capaz de classificar a maioria das amostras analisadas.

Uma análise geral dos resultados com Horak mostrou que a maioria das rodovias estão classificadas como **em alarme** (45%) ou **Seguro** (36%), enquanto 19% estão classificadas como **Severo**. Com a DNER PRO-11/79, cerca de 18% da malha é classificada como **regular para má ou má**.

A análise regional revelou que o Nordeste possui o melhor desempenho classificada como **Seguro**, seguido da região do Sul, que tem a menor extensão na pior classificação com os dois métodos. Por outro lado, o Norte tem a maior extensão com a pior classificação, apresentando uma desproporção significativa em relação às outras regiões do país.

A análise por estado mostrou variações significativas entre os estados brasileiros, com DF, SE e PE apresentando as melhores classificações e AC e AP com as piores avaliações de condição estrutural. A maioria dos estados foi classificada como **Segura**, no entanto, 7 estados possuem uma extensão percentual acima de 30% classificada como **Severo**.

A análise individual dos parâmetros revelou que o estado das camadas inferiores do pavimento, como a base e o subleito, teve resultados melhores do que as camadas superiores, como o revestimento.



Com base nos resultados apresentados nesse artigo, é possível concluir que a avaliação de desempenho de pavimentos é uma tarefa complexa e que requer a análise de muitos parâmetros. Portanto, apesar dos resultados técnicos que foram apresentados, muitos outros parâmetros ainda precisariam ser considerados para se chegar a conclusões mais assertivas a respeito da avaliação de desempenho estrutural do pavimento e de sua classificação qualitativa precisa.

É importante ressaltar que a avaliação do desempenho estrutural do pavimento é um processo contínuo e que os resultados devem ser regularmente revisados e atualizados. Como grande parte da extensão da malha está classificada como **em alarme**, fica evidente a necessidade de se manter um processo constante de avaliação do desempenho estrutural do pavimento.

Sendo assim, é crucial que avaliações sejam realizadas regularmente, permitindo identificar possíveis problemas o mais cedo possível, bem como fornecer parâmetros para a implementação de medidas preventivas de manutenção.

Dessa forma, é possível garantir a segurança dos usuários das rodovias e a eficiência do transporte rodoviário como um todo.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO (1993). Guide for Pavement Structures. AASHTO, Washington, D.C., 1993

Association of Australian and New Zealand Roads. AUSTRROADS (2008). Technical Basis of the Austroads Design procedures for flexible overlays on flexible pavements. Sydney, 2008

Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. DNER-ME 024/94. (1994). Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman, Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. DNER-PRO 011/1979. (1979). Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis, Rio de Janeiro: IPR. 1979.

_____. DNER-PRO 273/1996 (1996). Determinação de deflexão utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD). Rio de Janeiro: IPR. 1996

Fabício, J.M., Gonçalves, E.A. and Fabício, 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, pp.1415-1446.

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

Horak, E., (1987). Aspects of deflection basin parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa. Tese (Philosophiae Doctor), University of Pretoria – 1987.

Horak, Emile; EMERY, Stephen. (2023). Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations. University of Pretoria. Kubu Australia Pty Ltd.