



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

IMPACTO ECONÔMICO NA PAVIMENTAÇÃO QUANDO DA ANÁLISE MECANÍSTICA-EMPÍRICA CONSIDERANDO MÓDULOS DE RESILIÊNCIA TEÓRICOS E OBTIDOS POR ENSAIOS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Gisandra Faria de Paula¹; Paulo Costa Fernandes²; Mateus Ribeiro Caetano³; Rafael Cerqueira Silva⁴; Vítor do Nascimento e Silva⁵; Josiene Chrystina Ribeiro Cardoso⁶; Fábio Zanchetta⁷

RESUMO

Pavimentos flexíveis são sistemas complexos formados por materiais com características intrinsecamente heterogêneas, que se comportam como meios elastoplásticos. Dada a importância de se compreender o comportamento mecânico das camadas que compõem um pavimento frente às solicitações, foi realizada uma análise econômica a partir de resultados de análises mecanística-empíricas, de uma obra de pavimentação no Distrito Federal, considerando módulos de resiliência (MR) dos materiais obtidos por ensaios laboratoriais e por faixas de valores indicados na literatura (valores teóricos). Dentre os cenários analisados, observou-se que a estrutura do pavimento poderia ser otimizada utilizando MR obtidos por ensaios. Das soluções possíveis, a espessura do revestimento asfáltico poderia ser reduzida em 1cm, ou em 2cm, se aumentasse a espessura da base em 3cm. Assim, utilizando-se os MR de laboratório, haveria uma redução no preço da obra em torno de R\$ 670 mil. Esta economia, obtida em uma única obra, sendo revertida na compra de mais equipamentos triaxiais dinâmicos e acessórios, garantiria atendimento à demanda de ensaios das frentes de obras projetadas para o DF. As análises dos pavimentos projetados dependem destes ensaios, cujos procedimentos requerem muito tempo, sendo, portanto, importante ter uma estrutura laboratorial com capacidade de produção compatível com os prazos de entrega dos projetos. Desta forma, mostrou-se que o investimento em tecnologia de ensaios promove maior conhecimento sobre o comportamento dos materiais, auxiliando nas tomadas de decisão sobre alternativas de solução para a vida útil prevista para o pavimento. Além da economia, destaca-se a viabilidade sob a perspectiva da sustentabilidade, tendo em vista redução de material e de esforços de máquinas.

PALAVRAS-CHAVE: Dimensionamento de pavimento, módulo de resiliência, ensaio triaxial.

ABSTRACT

Flexible pavements are complex systems formed by materials with intrinsically heterogeneous characteristics, which behave like elastoplastic media. Given the importance of understanding the mechanical behavior of the layers that make up a pavement in response to loads, an economic analysis was carried out based on the results of mechanistic-empirical analyzes of a paving project in the Federal District, considering resilience modules (MR) of materials obtained by laboratory tests and by ranges of values indicated in the literature (theoretical values). Among the scenarios analyzed, it was observed that the pavement structure could be optimized using MR obtained through tests. Of the possible solutions, the thickness of the asphalt coating could be reduced by 1cm, or by 2cm, if the base thickness was increased by 3cm. Thus, using laboratory MR, there would be a reduction in the price of the work of around R\$670 thousand. This savings, obtained in a single project, being reversed in the purchase of more dynamic triaxial equipment and accessories, would guarantee compliance with the demand for testing the work fronts designed for the DF. The analyzes of designed pavements depend on these tests, the procedures of which require a lot of time, and it is therefore important to have a laboratory structure with production capacity compatible with project delivery deadlines. In this way, it was shown that investment in testing technology promotes greater knowledge about the behavior of materials, helping in decision-making about alternative solutions for the expected useful life of the pavement. In addition to the economy, viability stands out from the perspective of sustainability, with a view to reducing material and machine efforts.

KEY WORDS: Pavement design, resilient modulus, triaxial tests.

^{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, gisandra.paula@der.df.gov.br; paulo.fernandes@der.df.gov.br
 3, 4, 5, 6, 7 Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, Brasil, mateusribeirocaetano@gmail.com; rafael.silva@unb.br;
vitornascimentoesilva@gmail.com; josychrystina@gmail.com; fabio.zanchetta@unb.br

INTRODUÇÃO

Uma estrutura de pavimento constitui um conjunto de camadas interdependentes, onde as forças são transmitidas através da superfície de contato entre camadas, dissipando-se à medida que se aprofundam (do revestimento até o subleito). Os esforços, por sua vez, geram deformações elásticas (resilientes) e plásticas (permanentes), cuja magnitude dependerá da resistência e deformabilidade dos materiais que compõem as camadas. Os elementos da estrutura são construídos sobre a fundação, que é o solo ou subleito da fundação (Figura 1).

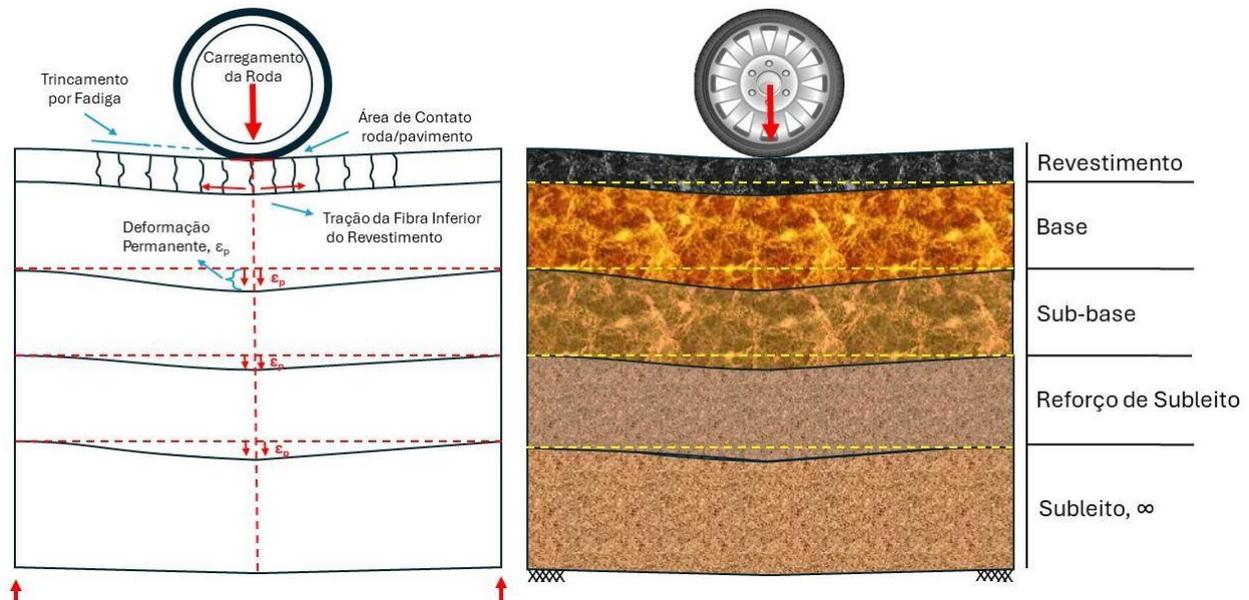


Figura 1. Estrutura de pavimento flexível.

Sendo o pavimento uma estrutura, é possível determinar o comportamento tensão *versus* deformação em função das solicitações, por meio da teoria da elasticidade aplicada aos modelos de camadas, e, assim, definir as propriedades resilientes e permanentes dos elementos ou camadas da estrutura, para garantir a serventia do pavimento durante sua vida útil. Este procedimento é denominado de análise estrutural de pavimentos, mecânica dos pavimentos ou reologia dos materiais aplicada em pavimentos.

Aliado com a evolução da frota de veículos (principalmente caminhões e ônibus) e o consequente aumento de eixos e carga por eixo, o dimensionamento pelo método DNER (1981) tornou-se inviável para a prática de projetos de pavimentos flexíveis no país, por subdimensionar estruturas de pavimento em que o número N de projeto seja muito elevado ($N > 10^7$), e os fatores de equivalência de cargas (FEC's) que sofreram, desde a implantação do método, alterações limites de peso (para maior) propostas em projetos de lei do Congresso Nacional, mas que não reproduziram os mesmos efeitos de FEC's no método (FERNANDES JÚNIOR, 1994; INOUE; FERNANDES JUNIOR, 2023).



Ademais, o método DNER (1981), de caráter puramente empírico, não considera o comportamento geotécnico de materiais constituintes de cada camada da estrutura deste sistema, frente às ações de tensões e deformações impostas pelo tráfego e os efeitos das condições ambientais e de drenagem – base da análise mecanística (PAULA; FERNANDES; SILVA, 2022).

No Brasil, desde a primeira década de 2000, a análise mecanística é considerada conjuntamente com o dimensionamento empírico vigente no país para pavimentos flexíveis (DNIT, 2006). E, em 2018, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), lançou o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), um novo método de dimensionamento, de caráter mecanístico-empírico, representando um grande avanço para a realização de projetos de pavimentação/restauração no país (IS-247).

Percebe-se, desta maneira, a preocupação do DNIT, há décadas, com as limitações do método DNER e a necessidade da aplicação de análises mecanísticas com a finalidade de prever o comportamento mecânico das estruturas de pavimento de uma forma mais racional e viável para a elaboração de projetos que resultem em um aumento da vida útil dessas estruturas em função do carregamento e resistência dos materiais a serem utilizados no projeto.

Para projetar um pavimento com considerações mecanísticas, são estudados os materiais, o tráfego e as condições ambientais e de drenagem. Por meio da aplicação de um processo de cálculo específico, são definidas as espessuras das camadas dos materiais disponíveis no local, se necessário das melhorias nas propriedades, com a expectativa de que seja resistente e tenha qualidade de rolamento aos veículos conforme previsto para o período de vida útil.

Para os materiais granulares, verifica-se o comportamento elástico, por meio de ensaios laboratoriais de módulo de resiliência (MR) e plástico, por meio de ensaios de deformação permanente (DP). Para o concreto asfáltico, são realizados ensaios de MR, curva de fadiga e *flow number* (DP). Todos estes ensaios são realizados em equipamentos triaxiais e uniaxiais de carregamento dinâmicos.

Com os resultados obtidos, é possível dimensionar a estrutura de pavimento de forma mais adequada ao seu desempenho, reduzindo a parcela de empirismo vigente quando se dimensiona o pavimento utilizando dados existentes em especificações técnicas de MR (DNIT, 2006; IP-08/2004; IP-DE- P00/001), que, por vezes, podem não refletir a realidade dos materiais disponíveis nas proximidades da obra a ser implantada.

Neste contexto da mecânica dos pavimentos e visando analisar o comportamento estrutural das camadas que compõem o pavimento a partir de dados de MR obtidos em ensaios, o presente estudo de caso apresenta uma análise comparativa de dimensionamentos de pavimento flexível, tendo como referência um projeto executado com base em MR obtidos por dados normativos e laboratoriais (ensaios triaxiais e uniaxiais de carregamento dinâmico). Outros dados, como deformação permanente (DP) dos materiais das camadas de solo e material britado, bem como fadiga e *flow number* da camada de concreto asfáltico não foram considerados.

DADOS DE PROJETO

O dimensionamento refere-se às pistas de acesso de um viaduto compreendido entre a rodovia distrital DF-003 (EPIA) e via de acesso ao Setor Noroeste (Figura 3), com 5,2 km de extensão total, pertencente ao Sistema Rodoviário do Distrito Federal (SRDF) e sob a circunscrição do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF). O número de repetições equivalentes às solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2 toneladas durante o período considerado de vida útil de projeto (10 anos) é $5,96 \times 10^7$, com taxa de crescimento anual de 4,74%.



A estrutura de pavimento do projeto é apresentada na Figura 2. Para esta estrutura, foram consideradas as premissas de projeto elencadas nas Tabelas 1 e 2.



Figura 2. Estrutura de pavimento do projeto (DER-DF, 2022).

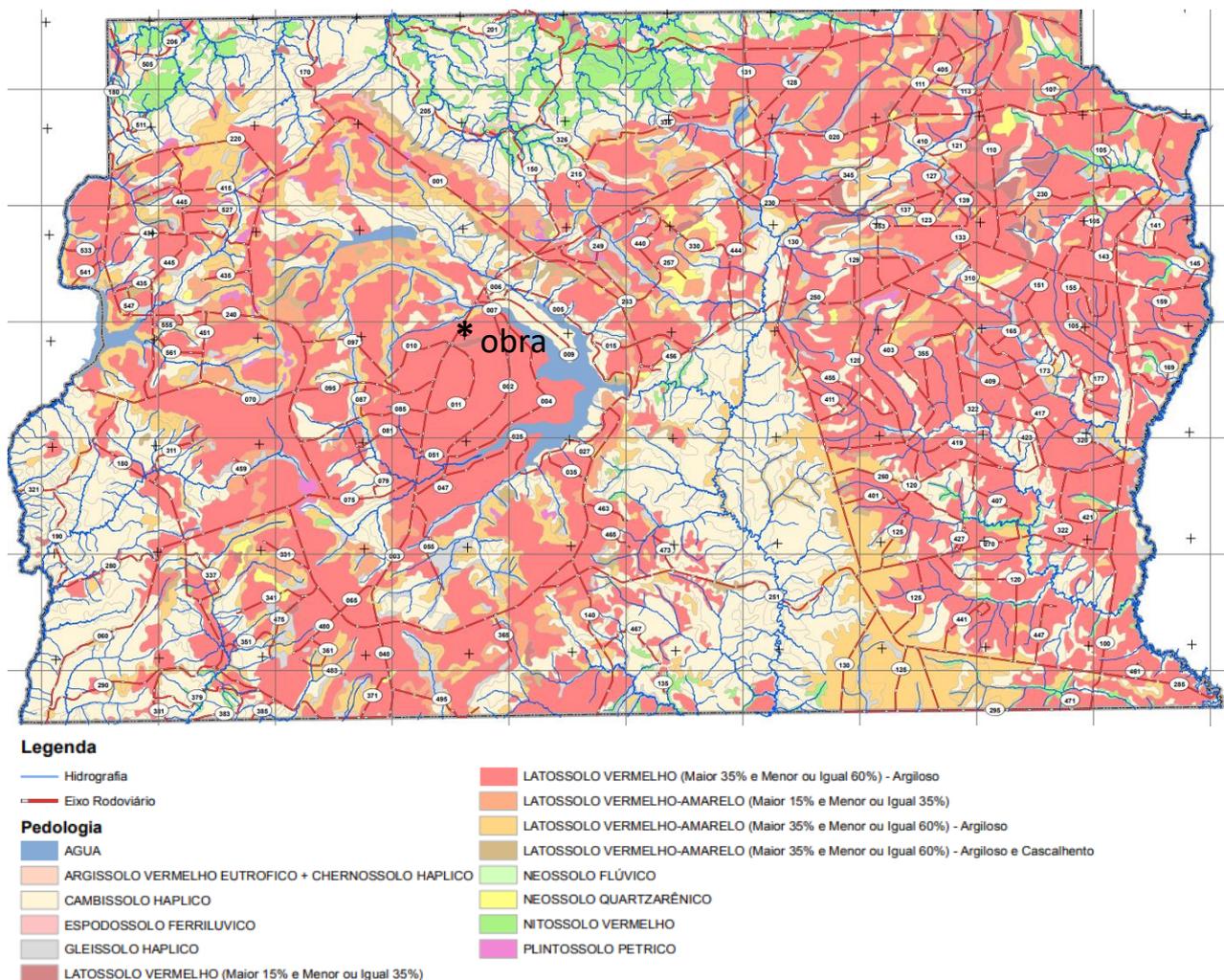


Figura 3. Localização do trecho em estudo, no mapa pedológico do DF (DER-DF, 2015).



Tabela 1. Dados gerais do carregamento imposto ao pavimento (DER-DF, 2022).

Propriedade	Magnitude
Pressão de contato pneu/pavimento	5,6 kgf/cm ²
Raio da área de contato pneu/pavimento	10,8 cm
Carga por roda	2.050 kgf
Afastamento entre pneus, por roda	28,8 cm
Ponto médio entre pneus	14,4 cm

Tabela 2. Valores usuais de Módulo de Resiliência e *Poisson* adotados (DER-DF, 2022).

Camada	Tipo	Módulo de Resiliência		Valor adotado (MPa)	<i>Poisson</i>	CBR (%)
		Norma	Estimativa (MPa)			
Revestimento ⁽¹⁾	CAUQ	IP-08/2004	3.000 < E < 5.000	5.000	0,30	
		IP-DE-P00/001	2.000 < E < 5.000			
Base ⁽²⁾	BGS	IP-08/2004	100 < EB < 500	260	0,35	100
		IP-DE-P00/001	150 < EB < 300			
Sub-base	Solo + 4% cal	IP-08/2004	$E_{REF} = 18,0 \times (CBR_{SB})^{0,64}$ $\times \sqrt{3 \times CBR_{SL} / CBR_{SB}}$	168	0,20	20
		IP-DE-P00/001	150 < EB < 300			
Subleito	Solo laterítico (LG')	IP-08/2004	$E_{SL} = 22,0 \times (CBR)^{0,8}$	65	0,40	5
		IP-DE-P00/001	25 < EB < 75			

⁽¹⁾ Adotou-se o limite superior, considerando relevante o emprego de material especial como, por exemplo, o **emprego de asfalto-polímero**, na camada de rolamento, em face da severidade das solicitações provenientes do tráfego;

⁽²⁾ Adotou-se como referência a média entre os valores intermediários da IP-08/2004 e IP-DE-P00/001.

Para a verificação do deslocamento vertical na superfície do pavimento (D_0), deformação específica horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento (ϵ_t) e deformação específica vertical de compressão no topo do subleito (ϵ_v), utilizaram-se os dados apresentados na Tabela 3 e exemplificados na Figura 4. A verificação mecanicista da estrutura de projeto foi realizada por meio do *software* Elsym5.

Tabela 3. Pontos de interesse da análise mecanística (DER-DF, 2022).

Propriedade	Parâmetro	Localização
Deslocamento vertical na superfície do pavimento (D_0)	U_z (cm)	Infinitesimal abaixo da carga (0,01 cm)
Deformação específica horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento (ϵ_t)	Maior valor entre ϵ_{xx} e ϵ_{yy}	Infinitesimal acima da interface CAUQ-base
Deformação específica vertical de compressão no topo do subleito (ϵ_v)	ϵ_{zz}	Infinitesimal abaixo da sub-base

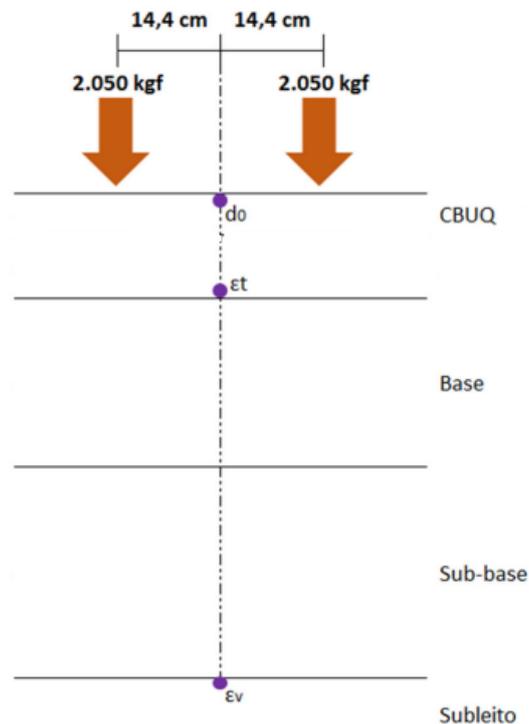


Figura 4. Exemplificação dos pontos de obtenção dos dados de interesse (DER-DF, 2022).

Os modelos adotados de deslocamento vertical (D_0), deformação específica horizontal de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t), responsável pelo trincamento do revestimento asfáltico (fadiga) e deformação específica vertical de compressão no topo do subleito (ϵ_v), responsável pelo afundamento em trilha de roda, estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Modelos adotados para verificação mecanicista (DER-DF, 2022).

Modelo	Equação	k	n	Valor admissível
DNER-PRO 011/79	$\log D_{adm} = k - n \cdot \log N$	3,01	0,174	$45,41 \times 10^{-2} \text{ mm}$
Pinto & Preussler (1980)	$N_{AASHTO}^{(1)} = k \cdot (1/\epsilon_t)^n$	$2,85 \times 10^{-7}$	3,69	$1,99 \times 10^{-4}$
Dormon & Metcalf (1965)	$N_{USACE} = k \cdot (1/\epsilon_v)^n$	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762	$2,70 \times 10^{-4}$

⁽¹⁾ N_{AASHTO} de projeto = $1,29 \times 10^7$.

ENSAIOS LABORATORIAIS

Em relação à consideração mecânica para ensaios dos materiais utilizados na estrutura de pavimento, foram realizados ensaios para determinação dos módulos de resiliência dos materiais granulares, em equipamento triaxial dinâmico de cargas repetidas, conforme normas do DNIT 134/2018-ME. Para o CAUQ, o ensaio de módulo de resiliência foi feito de acordo com a norma do DNIT 135/2018-ME, em equipamento de módulo dinâmico para misturas asfálticas, ambos existentes no DER-DF (Figura 5).

Destaca-se que os resultados obtidos para a brita graduada simples (BGS) foram extraídos do estudo de Caetano (2024), que verificou os comportamentos de MR e DP das principais jazidas comerciais de BGS existentes no DF, tendo os ensaios sido realizados no laboratório do DER-DF.



Figura 5. Equipamentos triaxiais dinâmicos do DER-DF: (a) solos e (b) misturas asfálticas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios triaxiais realizados encontram-se na Tabela 5. Com estes dados, o comportamento mecânico da estrutura em termos de rigidez foi verificado no *software* AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), que constitui a ferramenta de verificação de tensões, deformações e deslocamentos proposta pelo MeDiNa, usando a teoria de múltiplas camadas elásticas. A análise foi realizada considerando comportamento linear do MR, no qual se adotou a média de todos os módulos obtidos em cada sequência de tensões utilizada para determinação do MR (DNIT 134/2018-ME), e todas as camadas aderidas (1), tendo em vista que o *software* Elsym5, utilizado para a estrutura de projeto, realiza análises somente com esta condição.

Tabela 5. Parâmetros obtidos em ensaios para os materiais das camadas do pavimento.

Material	MCT	Módulo de Resiliência						
		Linear (MPa)			Não Linear			
		Mín	Médio	Máx	Coeficientes de Regressão			R^2
			k_1	k_2	k_3			
Subleito	LG'	223,59	224,20	224,21	335,79	0,15490	-0,03706	0,70300
Sub-base	LG'	284,72	408,00	519,19	1211,42	0,40658	-0,01944	0,96300
Base ⁽¹⁾	--	173,75	301,9	565,53	1336,563	0,369	0,239	0,98200
Revestimento ⁽²⁾	--	5.000	6.000	7.000			--	

⁽¹⁾ Caetano (2024).

⁽²⁾ CAUQ com polímero.



Ressalta-se que não foi feito um dimensionamento da estrutura no MeDiNa, mas somente a análise das tensões e deformações da estrutura do pavimento considerando as propriedades de rigidez de cada material.

Verifica-se, para a camada de subleito, que o valor de $MR_{\text{médio}}$ obtido encontra-se satisfatório, até superior se comparado com amostras de mesma pedologia (latossolo) e classificação MCT (LG') verificados em estudos realizados por Caetano (2024) e Cardoso *et al.* (2024) para solos de subleito em outras regiões do Distrito Federal, com valores de 146 MPa e 99,3 MPa, respectivamente.

Estes valores estão associados intrinsecamente às características de solo profundamente intemperizado e lixiviado, metaestável, com grande volume de vazios, baixo peso específico e com sua matriz principalmente constituída de argila.

Foram realizadas análises considerando a estrutura de projeto e com variações da espessura do revestimento (R) e da base (B), de maneira a atenderem os parâmetros máximos admissíveis de deflexão (D_{adm}) e deformações (ϵ_t , ϵ_v), conforme Tabela 6.

Tabela 6. Valores atuantes no AEMC para a estrutura dimensionada por MR de ensaios de laboratório – comportamento linear (MR médio).

Parâmetro	Valor Admissível	Valor Atuante (AEMC)		
		Projeto – R = 15 cm	R = 14 cm	R = 13 cm / B = 18 cm
D_{adm} (mm)	$45,41 \times 10^{-2}$	$39,08 \times 10^{-2}$	$37,82 \times 10^{-2}$	$38,30 \times 10^{-2}$
ϵ_t	$1,99 \times 10^{-4}$	$1,38 \times 10^{-4}$	$1,25 \times 10^{-4}$	$1,32 \times 10^{-4}$
ϵ_v	$2,70 \times 10^{-4}$	$2,70 \times 10^{-4}$	$2,66 \times 10^{-4}$	$2,65 \times 10^{-4}$

Pelos resultados apresentados, verificou-se que, ao considerar os valores de MR obtidos nos ensaios laboratoriais, foi possível reavaliar as espessuras da camada de revestimento e de base, de maneira a tornar o custo da estrutura menos oneroso, já que a camada de revestimento constitui o item mais alto em custos de aquisição e execução em uma obra. Assim, de acordo com a Tabela 7, tem-se o custo estimado para cada tipo de solução apresentada na Tabela 6.

Tabela 7. Custo estimado de cada solução de projeto a partir de MR de ensaios em laboratório.

Camada da Estrutura	Projeto R = 15 cm (DER-DF, 2022)	R = 14 cm	R = 13 cm / B = 18 cm
Concreto asfáltico (CAUQ) ⁽¹⁾	R\$ 3.695.303,12	R\$ 3.448.949,58	R\$ 3.202.596,04
Fornecimento (CAUQ)	R\$ 5.535.458,56	R\$ 5.166.427,98	R\$ 4.797.397,42
Transporte (CAUQ)	R\$ 825.206,17	R\$ 770.192,42	R\$ 715.178,68
Brita Graduada Simples (BGS)	R\$ 1.508.681,35	R\$ 1.508.681,35	R\$ 2.715.626,43
Total	R\$ 11.564.649,20	R\$ 10.894.251,33	R\$ 11.430.798,57
Diferença em relação ao Projeto R = 15 cm		- R\$ 670.397,87	- R\$ 133.850,63

⁽¹⁾ Não foram considerados os custos do serviço, fornecimento e transporte de imprimação e pintura de ligação.

Verifica-se que as soluções de projetos alternativas (R = 14 cm e R = 13 cm / B = 18 cm) conferem valores de custos inferiores aos da solução de projeto, ensejando, portanto, em economia para o custo total da obra. Esta economia de preço ofertada pela estrutura de R = 14 cm já contribui para



a aquisição de equipamentos uniaxiais e triaxiais disponíveis em território nacional, o que ensejará em ganhos futuros para a elaboração de outros de projetos de pavimentação a partir de dados mais realísticos de módulo de resiliência.

Ademais, como o N de projeto ($5,96 \times 10^7$) refere-se a um tráfego muito pesado (IP-02/2004 SP), é aconselhável analisar outros possíveis tipos de soluções para a estrutura, como a execução da camada de base em brita graduada tratada com cimento (BGTC) ou em brita graduada melhorada com cimento (BGMC), que conferem maiores ganhos de rigidez para a camada e, assim, podem proporcionar redução da espessura da camada de revestimento asfáltico.

Neste sentido de avaliar os efeitos das melhorias nos materiais, no laboratório do DER-DF, encontram-se em desenvolvimento diversos estudos, contando com a participação dos autores do presente estudo. Entre estes, citam-se estudos recentes para obtenção de parâmetros de MR em BGMC (adição de 2% de cimento) que mostraram, preliminarmente, aumento de MR para este material, na ordem de 720 MPa. Em relação à mistura de solo melhorado com cal no teor de 4%, estão sendo avaliados os desempenhos mecânico elástico (MR) e plástico (DP) desta mistura ao longo do tempo (1, 3, 30, 60, 90 e 150 dias) de solos com comportamentos laterítico (LG') e não laterítico (NS'), da mesma região do presente estudo (SILVA; CAETANO; ZANCHETTA, 2024).

Dada a importância das deformações elásticas e plásticas, a estrutura em estudo deveria ainda ser analisada pelos critérios de deformação permanente para as subcamadas granulares e, para o revestimento, a realização de análises de fadiga (curva de fadiga) e *flow number* (deformação permanente), parâmetros substanciais elencados pela mecânica dos pavimentos e que são contemplados dentro das diretrizes dadas pelo MeDiNa, bem como a avaliação da previsão de desempenho da estrutura (pelo MeDiNa, porcentagem de área trincada – 30%) e análise de confiabilidade.

CONCLUSÕES

A análise mecânica elaborada por meio de ensaios laboratoriais é um procedimento crucial para a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais utilizados em estruturas de pavimentos. A partir de ensaios uniaxiais dinâmicos e triaxiais dinâmicos em misturas asfálticas e solos, é possível obter parâmetros que refletem com maior precisão o comportamento de cada material. Estes parâmetros contribuem significativamente para o dimensionamento correto das estruturas, garantindo que as condições reais sejam consideradas no processo.

Muitas pesquisas e aplicações práticas vêm demonstrando que o uso destes equipamentos, para obtenção de parâmetros mecânicos, oferece resultados mais confiáveis do que a aplicação de valores teóricos baseados em diretrizes normativas, que por vezes não refletem a realidade geotécnica local da obra de pavimentação a ser realizada. Assim, soluções derivadas exclusivamente de teorias podem não ser as mais adequadas, especialmente quando se leva em conta o custo total do projeto e a interação entre as diferentes camadas do pavimento.

O investimento em equipamentos para ensaios laboratoriais é viável em termos econômico e ambiental, uma vez que o custo adicional é compensado pela redução no consumo de materiais e esforços, resultante de um dimensionamento mais eficiente, que utiliza valores de Módulo de Resiliência (MR) coerentes com a realidade dos materiais. Esta abordagem permite a construção de pavimentos com uso otimizado dos recursos, promovendo não só maior durabilidade, mas também maior sustentabilidade.

O estudo de caso apresentado confirmou a importância de se usar valores de MR obtidos a partir de



ensaios laboratoriais para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Uma sugestão para trabalhos futuros é investigar como a interação entre as camadas de diferentes rigidezes afeta a estrutura do pavimento e como isso pode ser otimizado para maximizar a vida útil do projeto. Nesse sentido, para compatibilizar as diferentes escalas, de campo e laboratório, também é importante que sejam feitos investimentos no monitoramento das condições funcional e estrutural dos pavimentos em operação, a partir de um Sistema de Gerenciamento de Pavimentos eficiente.

Assim, com o aumento do conhecimento dos comportamentos dos materiais, avaliados por meio de corpos de prova ensaiados em laboratório e do desempenho observado em campo, pode-se fundamentar melhor os projetos, construindo pavimentos mais resistentes, duráveis e econômicos. E, por meio de maiores investimentos em técnicas e tecnologias para realização de ensaios, sejam de laboratório e/ou campo, bem como de monitoramentos, haverá melhoria nas práticas de engenharia, refletindo em pavimentos com tempo vida de projeto mais próximo do real desempenho.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pelos conhecimentos técnicos-científicos adquiridos, à Superintendência Técnica (SUTEC) do DER-DF pelo apoio no desenvolvimento de diversas pesquisas de conclusão de curso, mestrado e doutorado e pela disponibilização dos dados de projeto e à Diretoria de Estudos Tecnológicos (DITEC), unidade da SUTEC, pela disponibilização dos laboratórios de solos e misturas asfálticas para a realização dos ensaios laboratoriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMC, Análise Elástica de Múltiplas Camadas. *Software*. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina>.
- Caetano, M. R. (2024). Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais e materiais britados de pavimentos rodoviários do Distrito Federal e do Estado de Roraima. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF, 264 p.
- Cardoso, J. C. R.; Caetano, M. R.; Paula, G. F.; Silva, R. C.; Fernandes, P. C (2024). Influência da variação de umidade pós-compactação nos módulos de resiliência de solos de subleito do Distrito Federal. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – XXI COBRAMSEG. Balneário Camboriú, SC, *(no prelo)*.
- DER-DF, Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (2015). Unidades pedológicas do Distrito Federal – Planta. Adaptado Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA). Obtido junto à Diretoria de Meio Ambiente do DER-DF (DIMAM).
- DER-DF, Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (2022). Licitações Disponível em <<https://www.der.df.gov.br/licitacoes/>>. Concorrência nº 005/2022. Acesso em 24 de abril de 2024.
- DER-SP, Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (2006). IP-DE-P00/001. Projeto de pavimentação. São Paulo, SP.
- DNER (1981). Método de projeto de pavimentos flexíveis. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2026). Publicação IPR-719. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT 134/2018-ME. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT 135/2018-ME. Pavimentação – Misturas



asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro. RJ.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2021). DNIT IS-247. Estudos para elaboração de projetos de implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa. Brasília, DF.

Fernandes Júnior, J. L. (1994). Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 244 p.

Inoue, D. K. N.; Fernandes Junior, J. L. (2023). Mechanistic-empirical assessment of axle load legal limits on Brazilian roadways. Revista Transportes. Volume 32. Número 1. DOI: 10.58922/transportes.v31i2.2888

Paula, G. F; Fernandes, P. C.; Silva, R. C. (2022). Estudo comparativo entre os métodos de dimensionamento de pavimentos: DNER e mecanístico-empírico (MEDINA) no DER/DF. 24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) / 47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV), Bento Gonçalves, RS.

PMSP, Prefeitura Municipal de São Paulo (2004). IP - 02/2004. Classificação das vias, São Paulo, SP.

PMSP, Prefeitura Municipal de São Paulo (2004). IP - 08/2004. Análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimento, São Paulo, SP.

Silva, V. N.; Caetano, M. R.; Zanchetta, F. (2024). Análise da influência da adição de cal hidratada em solos do Distrito Federal por meio dos ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente para fins de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF, *(no prelo)*.