XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/15

Análise Comparativa da Vida de Fadiga de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelha e Não Reforçadas

Matheus de Marco Porreca
Aluno do curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, matheus.porreca@unesp.br

Gabriel Orquizas Mattielo Pedroso
Professor do Departamento de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá - SP, Brasil, gabriel.pedroso@unesp.br

Luis Gustavo de Jesus
Aluno do curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, lg.jesus@unesp.br

Pedro Octávio Assis de Carvalho Santos Pinto
Aluno do curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, pedro.octavio@unesp.br

RESUMO: A malha rodoviária brasileira apresenta uma baixa taxa de pavimentação e elevados custos de manutenção, o que torna essencial o desenvolvimento de soluções que aumentem a durabilidade dos pavimentos. Nesse contexto, este trabalho investiga o uso de geossintéticos como camada intermediária de reforço em misturas asfálticas, avaliando seu impacto na resistência à fadiga e na reflexão de trincas. As misturas foram dosadas pelo método Marshall, determinando-se os teores ótimos de ligante, utilizando o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)- CAP 50/70, seguidas por ensaios de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR). Posteriormente, confeccionaram-se corpos de prova em formato de vigas prismáticas em duas camadas (faixa granulométrica B como binder e faixa C na camada de rolamento), com inserção de geogrelhas na interface, e submetidas a ensaios de flexotração em 3 pontos sob cargas repetidas. Os geossintéticos utilizados foram de PET, PVA e fibra de vidro. Os resultados mostraram que todas as geogrelhas aumentam a vida de fadiga das misturas comparadas às misturas sem reforço. Além disso, observou-se diferentes formatos de trincas entre as geogrelhas e o ensaio controle.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento, Asfalto, Geogrelha, Fadiga, Módulo.

ABSTRACT: The Brazilian road network has a low paving rate and high maintenance costs, which makes the development of solutions that increase pavement durability essential. In this context, this study investigates the use of geosynthetics as an intermediate reinforcement layer in asphalt mixtures, evaluating their impact on fatigue resistance and crack reflection. The mixtures were designed using the Marshall method, determining the optimum binder contents with Petroleum Asphalt Cement (CAP) - CAP 50/70, followed by tensile strength (RT) and resilient modulus (MR) tests. Subsequently, two-layer prismatic beam-shaped specimens were prepared (gradation band B as binder and band C as the wearing course), with geogrid insertion at the interface, and subjected to three-point bending fatigue tests under repeated loads. The geosynthetics used were PET, PVA, and fiberglass. The results showed that all geogrids increased the fatigue life of the mixtures compared to unreinforced mixtures. Furthermore, different crack patterns were observed between the geogrids and the control test.

KEYWORDS: Pavement, Asphalt, Geogrid, Fatigue, Modulus.

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Tribunal de Contas da União-TCU, “Em 2024, 73% dos gastos totais do Dnit foram em serviços de conservação e restauração da malha rodoviária”. Dessa forma, medidas que prolonguem sua vida útil, reduzindo, portanto, a necessidade de frequentes manutenções, são de extrema importância para favorecer o desenvolvimento da malha rodoviária nacional.

As tensões e deformações na camada asfáltica pela ação das cargas do tráfego são responsáveis pelo surgimento de danos nesta camada. Entre eles tem-se como os mais importantes de serem estudados para benefício de maior durabilidade dos pavimentos, o trincamento por fadiga e os afundamentos por deformação permanente. (BERNUCCI et al., 2008)

Diversos estudos realizados tanto em laboratório quanto em pavimentos reais demonstraram que os geossintéticos podem prolongar a vida útil por fadiga do pavimento e melhorar a resistência à formação de trincas reflexivas e ao afundamento. (RAGNI, 2020)

Nesse contexto, estudos de Correia e Zornberg (2015) demonstram que a utilização de geogrelhas como camada de reforço em misturas asfálticas promove a redução tanto das deformações elásticas quanto das permanentes, quando comparada a pavimentos sem reforço. As análises também indicam que a inclusão desse tipo de geossintético pode reduzir em até 50% as deformações de tração sob carregamento de roda, efeito associado ao enrijecimento da camada asfáltica, que restringe a movimentação lateral e favorece uma distribuição mais eficiente das tensões ao longo do pavimento.

De forma complementar, o estudo de V. V. Kumar, S. Saride e Zornberg (2021) demonstrou, por meio de ensaios de fadiga em vigas e técnicas de correlação digital de imagens (DIC), que diferentes tipos de geogrelhas - de polipropileno, poliéster e fibra de vidro - aumentam a resistência à fadiga de formas diferentes, de acordo com o tipo de material empregado, nesse estudo, a geogrelha compósita de fibra de vidro (GCC), correspondeu a uma elevação da vida de fadiga de 38 vezes em relação a misturas não reforçadas.

Diante desse cenário, este trabalho analisa três diferentes tipos de geogrelhas como camada intermediária entre camadas asfálticas – poliéster (PET), álcool polivinílico (PVA) e fibra de vidro (FV)- avaliando seu desempenho no trincamento por fadiga e na reflexão de trincas, através do ensaio de vida de fadiga em vigas prismáticas, que permitem quantificar a influencia do reforço quando submetidas a solicitações cíclicas, representando as condições de tráfego reais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos Agregados Minerais

Os agregados utilizados na mistura asfáltica foram provenientes de uma pedreira na cidade de Aparecida-SP, cuja composição mineralógica é predominantemente gnáissica. Assim, foram submetidos a caracterização quanto à granulometria e massa específica. A massa específica dos agregados graúdos foi determinada conforme a norma DNER-ME 195/97, envolvendo lavagem, secagem, imersão, pesagens nas condições seca, saturada superfície seca e imersa, permitindo o cálculo da absorção e da massa específica. Para os agregados miúdos, seguiu-se a DNER-ME 194/98, utilizando o frasco Chapman para obtenção do volume deslocado, e posterior cálculo da massa específica.

A definição da granulometria segue a DNIT 031/2024, que estabelece as faixas granulométricas. As faixas B e C foram selecionadas para este estudo, devido apresentarem características intermediárias, equilibrando resistência e trabalhabilidade. Além disso, estudos como o de Bock (2009) mostram que o uso de filler reduz o volume de vazios e o teor ótimo de ligante, sem alterar significativamente propriedades mecânicas como resistência à tração e módulo de resiliência, para isso, foi utilizado cal hidratada seca, na proporção de 1,0% da massa do corpo de prova.

2.2 Caracterização do Ligante Asfáltico

Nesse estudo, foi utilizado o ligante asfáltico CAP 50/70, selecionado devido sua ampla utilização no Brasil, suas propriedades e trabalhabilidade, proporcionando uma melhor qualidade da mistura. Sua especificação é fornecida pelo certificado de qualidade da empresa, e apresentado na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos Ligantes Asfálticos

Característica	Unidade	Especificação	Resultado
Penetração	0,1 mm	50 a 70	51
Ponto de Amolecimento	Grau C	46 min	51

Viscosidade Brookfield 135GC-SP21 20rpm	cp	274 min	313
Viscosidade Brookfield 150 GC-SP21	cp	112 min	159
Viscosidade Brookfield 177GC SP21	cp	57 a 285	61
Ductilidade a 25GC	cm	20 min	> 150
Ponto de Fulgor	Grau C	235 min	314
Densidade Relativa a 20/4 GC	N/A	Anotar	0,999

2.3 Dosagem Marshall

A dosagem Marshall foi realizada a partir da confecção dos corpos de prova seguindo a DNIT 178/2018, e ensaiados segundo a DNIT 447/2024. O procedimento iniciou-se com a separação dos agregados e filler, conforme a faixa granulométrica, adotando massas de 1200g e teores de ligante entre 4,0% a 6,0% a uma taxa de variação de 0,5%. Os materiais foram aquecidos, misturados até a completa cobertura, e despejados nos moldes cilíndricos, para serem compactados com 75 golpes por face, através do soquete de compactação manual de 4540 ± 1 g, que cai em queda livre de uma altura de 457,2 ± 1,5 mm. Posteriormente, foi registrado sua altura média, massas seca, submersa e superficie seca saturada, conforme DNIT 449/2024. Com esses dados, foi calculado seus parâmetros volumétricos como a densidade relativa máxima (Gmm), massa específica aparente da mistura (Gmb), volume de vazios (Vv), vazios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazios (RBV). Por fim, verificou-se sua conformidade dos parâmetros aos limites da DNIT 031/2024, e assim, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência a tração por compressão diametral, e módulo de resiliência.

2.4 Caracterização das Geogrelhas

Neste estudo foram empregadas três geogrelhas distintas, produzidas a partir de poliéster (PET), álcool polivinílico (PVA) e fibra de vidro (FV), materiais com diferentes propriedades mecânicas e modos de interação com a mistura asfáltica, cuja caracterização é fornecida pela empresa e está descrita na tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Caracterização das Geogrelhas

Propriedades	PET	PVA	Fibra de Vidro
Deformação em resistência à tração nominal	≤ 12 %	≤ 6 %	≤ 3 %
Resistência à tração (MD + CMD)	50 kN/m	50 kN/m	50 kN/m
Abertura da malha	4 cm	4 cm	3 cm
Resistência à tração após o teste de danos de instalação (DIN EN ISO 10722)	>90%	>90%	>90%

2.5 Corpos de Prova

As misturas asfálticas foram produzidas através da dosagem Marshall, os agregados são predominantemente de mineralogia gnáissica, o ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70. As vigas prismáticas foram produzidas em duas camadas, sendo compostas pela faixa B na camada inferior (Binder) e pela faixa C na camada superior (camada de rolamento). Na interface entre as duas camadas foi aplicada pintura asfáltica na proporção de 0,5 l/m², baseado nos estudos de CORREIA (2022), e posteriormente inseridas as geogrelhas centralizadas na forma, com uma margem de 2,00 cm. As dimensões adotadas para os corpos de prova foram definidas com base na literatura proposta por Kumar (2021), sendo utilizadas fôrmas metálicas com medidas 30x10x12cm apresentadas na Figura 1, a seguir.

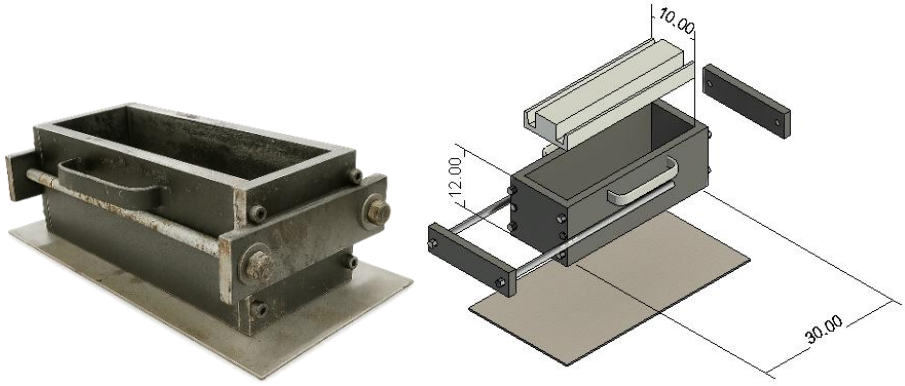


Figura 1. Esquema da forma metálica utilizada

Os corpos de prova foram produzidos com mistura manual, e compactados através da máquina universal de ensaios. Ao todo, foram produzidos 12 corpos de prova, organizados em quatro grupos de 3 unidades, onde três grupos possuiam um tipo de geogrelha e um grupo sem nenhum reforço. Após a produção dos corpos de prova, foram submetidos a ensaios de flexotração a cargas repetidas.

2.6 Ensaio de Flexotração

O ensaio de flexotração, também denominado ensaio de fadiga em três pontos, foi realizado em corpos de prova prismáticos (vigotas), conforme descrito no tópico 2.5. Inicialmente, uma das faces das vigotas foi pintada de branco, a fim de possibilitar análises futuras, através de correlação digital de imagens (DIC). Em seguida, os corpos de prova foram devidamente posicionados e centralizados na prensa de ensaio. Os ensaios foram realizados à uma temperatura de 24 °C, sob carregamento dinâmico com frequência de 2 Hz, e carregamento equivalente a 30%, 40% e 50% da carga de ruptura estática obtida nos ensaios de compressão diametral. O número de ciclos aplicados até a ruptura do corpo de prova foi considerado como o número N, representando a vida de fadiga da mistura. Após a falha, o valor de N correspondente foi devidamente registrado. O critério de ruptura foi padronizado, para assegurar que os diferentes materiais estejam associados ao mesmo nível de dano. Foi delimitado a ruptura quando o corpo de prova atingisse 200mm de deslocamento vertical no centro do vão.



Figura 2. Prensa do ensaio de fadiga em vigas sob flexão em três pontos

3 RESULTADOS

3.1 Dosagem Marshall

Entre os materiais utilizados para a execução deste trabalho, apenas foram desenvolvidos ensaios de caracterização dos agregados minerais, uma vez que seus parâmetros são fundamentais para a realização da dosagem Marshall. Além disso, as propriedades físicas e granulométricas dos agregados influenciam o comportamento e o desempenho da mistura asfáltica. Os resultados obtidos a partir desses ensaios encontram-se apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultado Ensaios de Caracterização dos Agregados

	Massa Específica (g/cm³)	Absorção (%)
Agregado Graúdo	2,641	N/A
Agregado Miúdo	2,823	1,00

Os resultados dos parâmetros da dosagem Marshall, bem como os obtidos no ensaio de resistência a tração, e módulo de resiliência, estão apresentados na tabela 4 a seguir.

Tabela 4. Resultados Dosagem Marshall

Parâmetro	Faixa B	Faixa C
Massa Específica (g/cm³)	2,420	2,374
DMT	2,50	2,48
Volume de Vazios (%)	3,98	3,74
VCB	12,12	11,90
VAM	15,51	16,41
RBV	78,23	72,91
Teor Ótimo (%)	4,74	5,18
Resistência a Tração (Mpa)	2,10	1,48
Módulo de Resiliência (Mpa)	8829	9363

3.2 Análise de Imagens

A figura 3 apresenta o registro fotográfico das diferenças na morfologia da reflexão das trincas, após submetidas ao ensaio de flexotração a cargas cíclicas, da esquerda para a direita estão os corpos de prova sem reforço, com reforço de PET, com reforço de PVA e com reforço de fibra de vidro. As distintas configurações de trincamento evidenciam os diferentes comportamentos mecânicos entre as misturas. É possível observar que o corpo de prova sem reforço, apresenta a forma típica de trincamento por fadiga, onde após a formação da primeira microfissura, as tensões se concentram próximas a região pontual de menor área efetiva, promovendo sua propagação ao longo do pavimento. Quando inserido o reforço de PET, percebe-se um comportamento diferente, devido ao PET ser um material de média ductilidade, em comparação aos outros materiais analisados, isso resulta em uma capacidade de acompanhar as deformações do asfalto, e contribuir para as redistribuições das tensões ao longo da geogrelha, proporcionando a propagação de microfissuras espalhadas, em vez de uma trinca dominante concentrada, indicando que o reforço atua reduzindo a concentração de tensões e assim retardando a propagação das trincas. O padrão observado sugere um mecanismo de dissipação de energia mais uniforme, indicando uma distribuição mais homogênea das deformações no corpo de prova, em oposição ao comportamento frágil típico do material não reforçado.

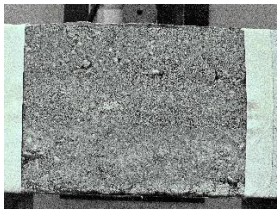
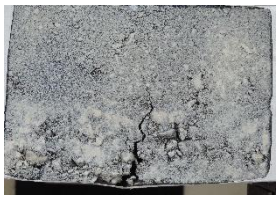
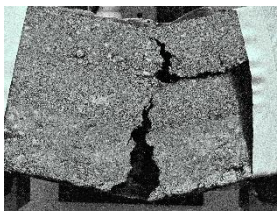
Tempo	Sem Reforço	PET	PVA	Fibra de Vidro
Inicial				
Após Trincamento				

Figura 3. Registro Fotográfico Ensaio Flexotração

O PVA, apresentou padrões de trincas semelhantes aos do PET, porém, o PVA possui uma maior ductilidade, e dessa forma maiores deformações, e melhor capacidade de alongamento, o que favorece a distribuição das tensões. Contudo, o PVA é um material hidrossolúvel, que na presença de água, altera suas propriedades mecânicas, aumentando sua ductilidade e alongamento. Quando esse alongamento é muito alto causa um efeito reverso, a geogrelha perde sua capacidade de distribuir as tensões, irrelevando o reforço. Assim, sua vulnerabilidade a água e agentes físicos limita seu desempenho em condições ambientais mais agressivas.

Por outro lado a fibra de vidro, diferentemente dos polímeros, possui um alto módulo de Young, isso é, uma maior resistência a tração, menor deformação e baixa ductilidade, resultando em um material mais rígido, e dessa forma reduzindo sua capacidade de acompanhar as deformações, promovendo altas concentrações de tensão na interface entre a geogrelha e a mistura, causando descolamento da camada e deflexão das trincas. Assim, observa-se um material mais frágil, com baixa capacidade de distribuir as tensões devido ao carregamento.

3.3 Curvas de Fadiga

Como demonstrado, os diferentes materiais de reforço empregados apresentam distintos comportamentos mecânicos, os quais influenciam diretamente o processo de fadiga das misturas asfálticas. Para complementar a análise qualitativa apresentada, a figura 4 sintetiza de forma comparativa o desempenho dos corpos de prova no ensaio de flexotração, relacionando a tensão aplicada ao número de ciclos suportados até a ruptura.

Nesse contexto, materiais mais dúcteis, como o PVA e o PET, tendem a apresentar maiores deformações, consequentemente, para que o corpo de prova atinja o deslocamento limite de 200 mm, esses materiais desenvolvem trincas menores e distribuídas, dissipando as tensões de forma mais homogênea e retardando a falha localizada. Por outro lado, materiais mais rígidos e de baixa ductilidade, como a fibra de vidro, apresentam menor capacidade de deformação. Devido sua rigidez acentuada, há uma concentração de tensões na interface entre o reforço e a mistura asfáltica, favorecendo a formação de trincas maiores para que o corpo de prova alcance o mesmo deslocamento final. Em função disso, a ruptura ocorre com menor número de ciclos, caracterizando uma vida de fadiga inferior.

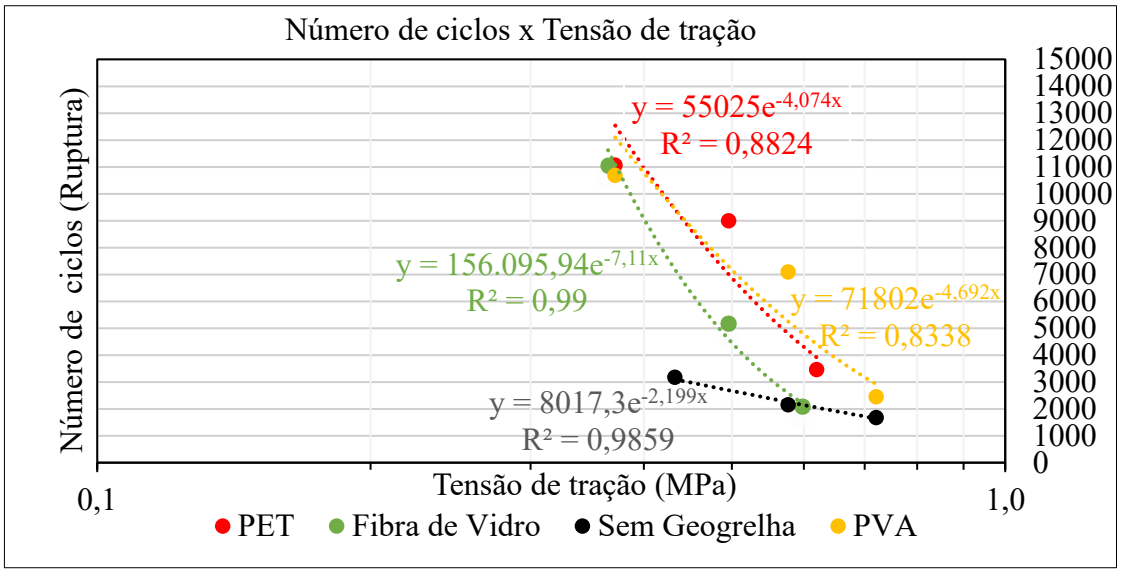


Figura 4. Resultado Ensaio Vida de Fadiga para Vigas Prismáticas Reforçadas ou Não com Geogrelha

Os resultados obtidos evidenciam suas diferenças de acordo com o tipo de geossintético empregado como reforço, a figura 4 apresenta os resultados onde é possivel observar que as geogrelhas que obtiveram melhor desempenho, isto é, maior número de ciclos sob uma tensão, antes de romperem, foram as geogrelhas de PET e PVA. A alta resistência a fadiga de ambos os materiais, pode ser atribuida à maior ductilidade, favorecendo a distribuição das tensões. O PVA, apresentou um desempenho inferior ao PET devido sua alta flexibilidade, que consequentemente sob tensões maiores, ele se deforma excessivamente, sem proporcionar resistência e assim reforço à mistura.

A fibra de vidro apresentou desempenho melhor que a mistura sem reforço, porém com menor vida de fadiga que os outros materiais estudados, isso devido a sua alta rigidez, que concentra as tensões na interface, formando trincas localizadas. A tabela abaixo apresenta o número de ciclos obtidos.

Tabela 5. Número de Ciclos-Ensaio Vida de Fadiga

Carga	Sem Geogrelha	PET	PVA	Fibra de Vidro
30%	3171	11065	10681	11040
40%	2152	9000	7088	5160
50%	1682	3457	2446	2080

A baixas tensões, as geogrelhas apresentaram desempenhos semelhantes, entretanto, à medida que o nível de tensão aumenta, seus comportamentos demonstram suas diferenças. A geogrelha de PET, apresentou melhor desempenho e número de ciclos, seguido pela geogrelha de PVA, que demonstrou-se efetiva a baixas tensões. A fibra de vidro alcançou o número de ciclos próximos à PET a baixas tensões, embora seu menor desempenho a tensões mais altas. A mistura sem reforço apresentou menor número de ciclos para ambas as tensões, demonstrando sua fragilidade, e portanto a necessidade de reforço para garantir uma maior vida de fadiga ao pavimento.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a utilização de geogrelhas de PET, PVA e fibra de vidro, como camada intermediária de reforço em misturas asfálticas, através de ensaios de flexotração a cargas cíclicas. As misturas asfálticas foram dosadas pelo método Marshall, utilizando o CAP 50/70. Os resultados demonstraram que ambas as geogrelhas melhoram significativamente a vida de fadiga da mistura, sendo que o melhor resultado obtido foi com a geogrelha de PET, em ambos os níveis de tensão. Isso devido sua melhor capacidade de distribuir as tensões ao longo do pavimento, evitando esforços concentrados que geram trincas localizadas.

Além disso, reforça-se que o controle de temperatura durante a produção e execução do ensaio é fundamental, devido ao comportamento termoviscoplástico do ligante, que altera significativamente sua rigidez e, portanto, sua vida de fadiga. Diante desse cenário, conclui-se que o uso de geossintéticos é uma técnica viável para aumentar a durabilidade dos pavimentos asfálticos, contribuindo para a redução de custos de manutenção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde, sabedoria e oportunidades, à minha família pelo apoio e incentivo, ao meu orientador, prof. Dr. Gabriel Orquizas Mattielo Pedroso, pela orientação, confiança e dedicação ao longo do trabalho, e à empresa Huesker pelo fornecimento das geogrelhas e financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2022.

Bock, A. L., Hartmann, D., Budny, J., Specht, L. P., & Ceratti, J. A. (2009). Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 14, p. 59-69, 2009.

Correia, N.S., and Zornberg, J.G. (2015). Evaluation of Strains and Unit Tension in Flexibles Pavements Using Geogrids to Reinforced the Asphaltic Layer. Proceedings of the VII Brazilian Congress on Geosynthetics, Brasilia, Brazil, 19-21 July (CD-ROM).

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). DNER-ME 194/98: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. BRASIL. Brasília, 1998. Acesso em: 10 set. 2025.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). DNER-ME 195/97: Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. BRASIL. Brasília, 1997. Acesso em: 10 set. 2025.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). DNIT 031/2024: ES – Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. BRASIL. Brasília, 2024. Acesso em: 10 set. 2025.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). DNIT 178/2018 – PRO – Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Brasília, 2018. Acesso em: 10 set. 2025.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). DNIT 447/2024 – ME – Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall – Método de ensaio. BRASIL. Brasília, 2024. Acesso em: 10 set. 2025.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). DNIT 449/2024 – PRO – Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. BRASIL. Brasília, 2024. Acesso em: 10 set. 2025.

Genaro Urquiza Júnior, G., Pena da Silva e Silva, M. e de Souza Correia, N. 2022. Aderência de interface de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos e diferentes taxas de emulsão. Transportes. 30, 1 (abr. 2022), 2632.

Kumar, V. V., Saride, S. and Zornberg, J. G. (2021). Fatigue performance of geosynthetic-reinforced asphalt layers. Geosynthetics International, 28, No. 6, 584–597. https://doi.org/10.1680/jgein.21.00013

Ragni, D., Canestrari, F., Allou, F., Petit, C., & Millien, A. (2020). Shear-torque fatigue performance of geogrid-reinforced asphalt interlayers. Sustainability.

TCU – TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO. Plano de manutenção de rodovias precisa de mais investimentos e estudos técnicos. Portal TCU – Notícias, Brasília, 06 ago. 2025. Acesso em: 10 set. 2025.