



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

SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR DESEMPENHO CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA

Victória Nunes-Ramos¹; Luciano Pivoto Specht¹; Silvio Lisboa Schuster¹; Luiz Guilherme Rodrigues de Mello² & Luiz Heleno Albuquerque Filho²

RESUMO

As novas demandas de tráfego e clima exigem que materiais asfálticos atinjam níveis superiores de desempenho, e a vastidão da indústria no desenvolvimento de ligantes faz com que a caracterização reológica gradativamente substitua testes empíricos. Como as misturas asfálticas herdam as propriedades do ligante, uma seleção precisa promove projetos mais econômicos em termos técnicos e ambientais. Assim, este trabalho propôs uma classificação híbrida de ligantes asfálticos, considerando simultaneamente deformação permanente e fadiga, com base em um banco de dados do Grupo de Estudos em Pavimentação e Segurança Viária da Universidade Federal de Santa Maria (GEPPASV/UFSM). Os materiais foram caracterizados na condição virgem, envelhecidos à curto prazo e envelhecidos à longo prazo, e os testes envolvem caracterização convencional e reológica (no domínio viscoelástico linear e de dano). Os indicadores para definição das classes foram selecionados com base na correlação com parâmetros de misturas asfálticas (*Flow Number* para deformação permanente e Fator de Fadiga da Mistura para a fadiga, do ensaio uniaxial cíclico à tração direta). Nesse sentido, foram estipuladas 25 classes híbridas para os ligantes, com base na compliância não recuperável a 64°C do ensaio *Multiple Stress Creep Recovery* ($J_{nr3,2}$ 64°C) e no Fator de Fadiga do Ligante pelo critério de falha da máxima energia de pseudo-deformação acumulada (FFL_{19°C} máxPSE). Os limites partiram da normativa AASHTO M 332 para o J_{nr} e de Possebon (2021) para o FFL. Assim, a classificação orienta a seleção dos ligantes com base em critérios de projeto e indicadores de desempenho, permitindo identificar ligantes excelentes para os dois defeitos, intermediários, excelentes para apenas um defeito e de baixo desempenho, promovendo economia de recursos e projetos mais assertivos.

PALAVRAS-CHAVE: Ligantes asfálticos; Seleção de ligantes; Desempenho; Deformação Permanente; Fadiga.

ABSTRACT

The new demands of traffic and climate require asphalt materials to achieve higher performance levels, and the vastness of the industry in developing binders means that rheological characterization is gradually replacing empirical tests. As asphalt mixtures inherit the properties of the binder, accurate selection promotes more economical projects in technical and environmental terms. This study therefore proposed a hybrid classification of asphalt binders, considering both permanent deformation and fatigue, based on a database was created by the Paving and Road Safety Study Group at the Federal University of Santa Maria (GEPPASV/UFSM). The materials were characterized in virgin condition, short-term aged and long-term aged conditions, and tests involved conventional characterization and rheological characterization (in linear viscoelastic and damage domain). The indicators used to define the classes were selected based on their correlation with asphalt mix parameters (*Flow Number* for permanent deformation and Fatigue Factor of Mixture for fatigue, from uniaxial cyclic direct tensile test). To this end, 25 hybrid classes were stipulated for the binders, based on non-recoverable compliance at 64°C from the Multiple Stress Creep Recovery test ($J_{nr3,2}$ 64°C) and the Fatigue Factor of Binder using the maximum accumulated pseudo-deformation energy failure criterion (FFL_{19°C} maxPSE). The limits were based on AASHTO M 332 standard for J_{nr} and Possebon (2021) for FFL. Thus, the classification guides the selection of binders based on design criteria and performance indicators, making it possible to identify excellent binders for both defects, intermediate binders, excellent binders for only one defect and low performance binders, promoting resource savings and more assertive designs.

KEY WORDS: Asphalt binders; Binder selection; Performance; Permanent deformation; Fatigue.

¹ Universidade Federal de Santa Maria, victorianunesramos@gmail.com; luspecht@ufsm.br; silviolschuster@ufsm.br.

² Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, luiz.mello@dnit.gov.br; luiz.albuquerque@dnit.gov.br.



INTRODUÇÃO

A busca por pavimentos flexíveis mais duráveis visa promover aos seus usuários viagens seguras, confortáveis e econômicas, tanto em termos de manutenção veicular quanto em consumo de combustível (BERNUCCI *et al.*, 2022). Uma vez que as misturas asfálticas utilizadas no revestimento herdam as propriedades dos ligantes, a escolha desse material passa a ter influência significativa no desempenho do pavimento (PIRES *et al.*, 2022; POSSEBON *et al.*, 2021).

As variações climáticas e de tráfego tornam a seleção de ligantes asfálticos uma decisão econômica, visto que a alocação de recursos nesse material deve se adequar às condições de projeto, e porque a durabilidade da estrutura determina os períodos de conservação, manutenção e reconstrução (HASS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994; YODER; WITCZAK, 1975). Além disso, torna-se uma decisão também ambiental, já que pavimentos com menor irregularidade reduzem o consumo de combustíveis e a emissão de gases do efeito estufa (AZEVEDO; JUNIOR; ARANTES, 2021).

Os protocolos de caracterização de ligantes asfálticos evoluíram ao longo dos anos com o nível de conhecimento de engenheiros e pesquisadores, e com o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas (SPEIGHT, 2015). Nesse sentido, é válido destacar que a seleção assertiva de ligantes, com base em propriedades de desempenho, aumenta a probabilidade de sucesso do pavimento como um todo, e diminui a influência de medidas empíricas nas tomadas de decisão, que possuem pouca correlação com o desempenho de campo (ANDERSON; CHRISTENSEN; BAHIA, 1991).

A especificação Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*), desenvolvida nos Estados Unidos como parte do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) na década de 1990 (HARRIGAN; LEAHY; YOUTCHEFF, 1994), apresentou-se como um grande avanço na caracterização de ligantes, por submeter os materiais a condições mais próximas da realidade e captar seu comportamento viscoelástico. A especificação baseia-se em temperaturas críticas para trincamento térmico, fadiga e deformação permanente, a partir de dados viscoelástico lineares, além de incluir um indicador de dano por deformação permanente a partir do ensaio *Multiple Stress Creep Recovery* (compliance não recuperável – J_{nr}). No entanto, encontra-se em constante avanço, e carece de métodos para investigação da fadiga e do envelhecimento. O método de teste *Linear Amplitude Sweep* para a fadiga tem se mostrado promissor, e em conjunto com a mecânica do dano contínuo é capaz de obter indicadores robustos para esse fenômeno, como o Fator de Fadiga do Ligante.

No Brasil, apesar de diversos pesquisadores estarem voltados ao estudo reológico de ligantes asfálticos, a incorporação de medidas de desempenho em especificações é desafiadora, tendo em vista o custo elevado de equipamentos como o reômetro de cisalhamento dinâmico, e a necessidade de maior capacitação técnica para realização e interpretação dos testes. No entanto, diversas empresas como a Petrobras, concessionárias e distribuidoras, além de universidades e o Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (IPR/DNIT), já possuem infraestrutura para caracterização reológica de ligantes, tornando mais factível a adoção de propostas de classificação ou especificações por desempenho desses materiais (LEITE; MOTTA, 2019).

Além disso, é válido destacar que a deformação permanente e a fadiga são as duas principais manifestações patológicas das rodovias (PAPAGIANNAKIS; MASAD, 2008), e ocorrem simultaneamente em campo. Apesar de haver a possibilidade de que um defeito seja mais predominante na rodovia, nenhum deles pode ser negligenciado, e não existem propostas formais para classificação híbrida de ligantes para sua seleção. Assim, este trabalho propõe a classificação de ligantes asfálticos considerando, ao mesmo tempo, um indicador de deformação permanente e outro de fadiga, com o objetivo de orientar a seleção desses materiais de maneira mais racional de acordo com critérios específicos de projeto.



MATERIAIS E MÉTODOS

Planejamento da Pesquisa

A Figura 1 apresenta o planejamento da pesquisa, iniciando pela estruturação de um banco de dados, envelhecimento de ligantes asfálticos, caracterização desses materiais, correlação com indicadores de misturas e, por fim, o estabelecimento das classes híbridas de ligantes.

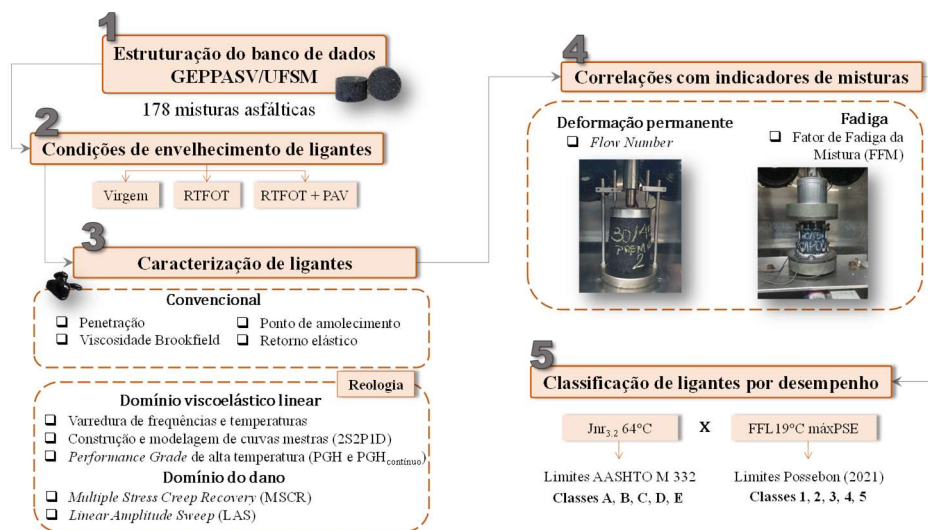


Figura 1. Planejamento da pesquisa (AUTORES, 2024)

Materiais utilizados

Esta pesquisa teve início com a estruturação de um banco de dados de misturas asfálticas a quente do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária, da Universidade Federal de Santa Maria (GEPPASV/UFSM, no Rio Grande do Sul, Brasil). Nesse momento, existem 178 misturas asfálticas catalogadas, com características distintas de agregados, ligantes asfálticos, dosagem, rigidez e danificação por deformação permanente e fadiga. O banco de dados abrange ligantes convencionais (10/20, 30/45 e 50/70), modificados por polímero (55/75, 60/85, 65/90 e HiMA) e por borracha (AMB 08), ligantes TLA e TLA Flex, e extraídos de misturas recicladas.

Caracterização convencional de ligantes asfálticos

A caracterização convencional consistiu em testes das especificações tradicionais. O ensaio de penetração foi conduzido à 25°C, pela cravação de uma agulha padronizada de 100 gramas durante 5 segundos na amostra de ligante, e o resultado obtido em décimos de milímetros (DNIT 155/2010 - ME). Por outro lado, a viscosidade foi obtida em um viscosímetro rotacional Brookfield, pela rotação de um *spindle* padronizado, nas temperaturas de 135, 150 e 177°C, de acordo com ABNT NBR 15184 (2021). O ponto de amolecimento consistiu na temperatura máxima verificada para que amostras de ligante suportassem uma esfera padronizada (DNIT 131/2010 - ME). Por fim, o retorno elástico dos materiais foi verificado no ductilômetro, pela recuperação apresentada pela amostra a 25°C após o estiramento de 20 cm (velocidade de 5 cm por minuto) e repouso de 1 hora (DNIT 130/2010 - ME).



Caracterização linear viscoelástica de ligantes asfálticos (LVE)

A reologia de ligantes (domínio LVE e de dano) foi estudada nas condições virgem, após envelhecimento de curto prazo no *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) (AASHTO T 240, 2023) e após envelhecimento de longo prazo no *Pressure Aging Vessel* (PAV) (AASHTO R 28, 2022). Os ligantes asfálticos foram submetidos a testes de varredura de frequências e temperaturas sem imposição de dano (baixas deformações) (AASHTO T 315, 2022), para obtenção de indicadores de rigidez e viscoelasticidade (módulo de cisalhamento dinâmico $|G^*|$ e ângulo de fase ϕ). As amostras foram testadas em um reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer* – DSR), modelo Anton Paar EC Twist MCR 502, em temperaturas de 5°C a 65°C e 25 valores de frequência. O Princípio de Superposição Tempo-Temperatura (PSTT) foi utilizado para construção de curvas mestras. Os valores de $|G^*|$ e ϕ também são utilizados como parâmetros de controle pela especificação Superpave, para determinar o Grau de Performance em alta temperatura (*Performance Grade* – PGH), definido como a maior temperatura em que $|G^*|/\sin\phi$ é superior a 1,0 kPa na condição virgem e 2,2 kPa após RTFOT (AASHTO M 320, 2023), com classes que variam de 6 em 6°C.

Caracterização do dano em ligantes asfálticos

Os parâmetros de danificação por deformação permanente (DP) e fadiga foram obtidos fora do domínio LVE, também no DSR. Quanto à deformação permanente, os ligantes foram testados segundo o protocolo *Multiple Stress Creep Recovery* (AASHTO T 350, 2023) após RTFOT, com tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa, utilizando a geometria de 25 mm e um *gap* de 1 mm. O teste permite calcular a compliância não recuperável (J_{nr}), sendo que valores mais baixos estão relacionados a um maior desempenho ao afundamento em campo (PIRES *et al.*, 2022). O valor total de J_{nr} em cada tensão é a média aritmética da compliância não recuperável calculada a cada 10 ciclos (1 s de tensão e 9 s de repouso). Ao final de 10 ciclos, o J_{nr} é calculado pela Equação 1. O percentual de recuperação (R%) é calculado de maneira similar, e representa a parcela recuperável da deformação em relação à tensão aplicada. Por fim, os valores de J_{nr} em 3,2 kPa são utilizados para classificação de ligantes quanto ao tráfego conforme a Tabela 1 (AASHTO M 332, 2023). Os ligantes foram classificados a 64°C, por ser o PGH necessário para a maior parte do Brasil (FACCIN *et al.*, 2021).

$$J_{nr}(\tau, N) = \frac{\varepsilon_{10}}{\tau} \quad (1)$$

Onde N varia a cada 10 ciclos, τ é a tensão aplicada e ε_{10} é o valor da deformação ajustada no final da recuperação.

Tabela 1. Classificação de tráfego para ligantes asfálticos (AASHTO M 332, 2023)	
Limites J_{nr} (kPa ⁻¹)	Classificação MSCR
$J_{nr3,2} \leq 4,5$	S – <i>Standard</i> (tráfego padrão)
$J_{nr3,2} \leq 2,0$	H – <i>Heavy</i> (tráfego pesado)
$J_{nr3,2} \leq 1,0$	V – <i>Very Heavy</i> (tráfego muito pesado)
$J_{nr3,2} \leq 0,5$	E – <i>Extreme</i> (tráfego extremamente pesado)

O comportamento à fadiga dos ligantes foi avaliado pelo teste *Linear Amplitude Sweep* (LAS) (AASHTO T 391, 2020; DNIT 439/2022 - ME), pela aplicação de cargas cíclicas em geometria de 8



mm e *gap* de 2 mm. As amostras são envelhecidas em RTFOT e RTFOT+PAV. O ensaio ocorre a 19°C, com incremento das amplitudes de deformação em rampa linear de 0,1% a 30% a 10 Hz. O dano foi calculado de acordo com a norma AASHTO T 391 (2020), e definições de falha de redução de 35% na integridade ($35\%|G^*|\sin\phi$), recomendada em AASHTO T 391 (2022) e da máxima energia de pseudo-deformação acumulada (MáxPSE), recomendada em DNIT 439/2022 – ME.

A partir da determinação da falha, a vida de fadiga N_f foi calculada para diferentes níveis de deformação. Assim, conforme proposto por Underwood (2011), o Fator de Fadiga do Ligante (FFL) foi calculado com base na área abaixo das curvas de vida de fadiga entre as deformação de 1,25% e 2,50% (Equação 2). Nesse sentido, a literatura indica que o parâmetro possui boa correlação com o desempenho de misturas asfálticas e com a área trincada de pavimentos reais (NASCIMENTO, 2015; OSMARI *et al.*, 2019), e a Tabela 2 indica limites para classificação de ligantes pelo FFL.

$$FFL = \frac{\log N_{f_{1.25\%}} + \log N_{f_{2.50\%}}}{2} * (\log 0.025 - \log 0.0125) \quad (2)$$

Onde $N_{f_{1.25\%}}$ e $N_{f_{2.50\%}}$ são os ciclos até a falha nas deformações de 1,25% e 2,50%, respectivamente.

Tabela 2. Classificação de ligantes pelo $FFL_{19^\circ C}$ (POSSEBON, 2021).

Classes	$FFL_{19^\circ C}$
1 - Pobre	$FFL < 1,22$
2 – Inferior	$1,22 < FFL < 1,31$
3 - Mediano	$1,31 < FFL < 1,48$
4 - Superior	$1,48 < FFL < 1,57$
5 - Excelente	$FFL > 1,57$

Parâmetros-alvo de dano em misturas asfálticas

Para definir os indicadores usados na criação das classes, foram testadas as correlações e com propriedades de misturas asfálticas. Para a deformação permanente, o indicador *Flow Number* (FN) foi selecionado por haver grande quantidade de dados no GEPPASV e por ser considerado um bom parâmetro para prever o afundamento em trilha de roda (ATR) nas rodovias, especialmente para ligantes convencionais 50/70 e modificados por polímero (FACCIN, 2018; PIRES *et al.*, 2022). O ensaio ocorre a 60°C, com carga cíclica de 0,1 s de carregamento e 0,9 s de repouso e intensidade de 204 kPa. O *Flow Number* corresponde à passagem da fase secundária para a fase terciária do acúmulo de deformações (AASHTO T 378, 2022).

Em relação à fadiga, o Fator de Fadiga da Mistura (FFM) foi selecionado, proveniente da interpretação do ensaio uniaxial de fadiga à tração direta pela teoria viscoelástica do dano contínuo simplificada (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage* – SVECD). O teste traciona amostras a 19°C e 10 Hz, com deformações de 150 a 350 $\mu m/m$, a depender do tipo de ligante contido na mistura (AASHTO T 400, 2023). O FFM consiste na área abaixo da curva de Wöhler simulada pelo S-VECD (equação de Nascimento, 2016) entre as deformações de 100 e 200 μm . Nesse sentido, diversas pesquisas apontam o FFM como bom indicador de fadiga em misturas asfálticas (ALMEIDA JR., 2022; BOEIRA, 2018; POSSEBON, 2021; SCHUSTER, 2018; VESTENA, 2021).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Definição do indicador de deformação permanente

Considerando o *Flow Number* como indicador-alvo, as correlações testadas partiram dos indicadores de ligantes com coeficientes lineares de Pearson (r) mais altos e estatisticamente diferentes de zero (a um nível de confiança de 95%), para fornecer um indicativo da força da correlação entre as variáveis. Neste trabalho estão apresentados apenas parâmetros reológicos com maiores coeficientes de determinação (R^2), e detalhes sobre correlações de Pearson e outros testes podem ser encontrados em Nunes-Ramos (2023). As correlações aqui apresentadas não incluem ligantes extraídos de misturas recicladas (*Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP) e rejuvenescidos.

A Figura 2 mostra as correlações de FN com $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ e $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$. A Figura 2a e Figura 2b indicam que a rigidez dos ligantes em alta temperatura não aponta tendência clara para evolução do FN. As tendências melhoram quando os tipos de ligantes são separados, mas ainda são insatisfatórias, com exceção do CAP TLA. Contudo, tratam-se de apenas 5 pontos, e 4 deles são de misturas com o mesmo ligante. O ângulo de fase em alta temperatura (Figura 2c e Figura 2d) foi mais adequado para inferir sobre a deformação permanente, mas ainda insatisfatório. Ainda assim, é possível observar tendências em asfaltos com polímero, visto que um maior comportamento viscoso (maior ϕ) em altas temperaturas tende a prejudicar o desempenho à deformação permanente da mistura final.

A Figura 3 indica que a compliância não recuperável ($J_{nr3,2}$ do MSCR) medida no PGH apresenta melhores correlações com o FN, seguindo as recomendações do Superpave, o qual entende que os materiais serão selecionados de acordo com a temperatura crítica da rodovia. Para o $J_{nr3,2}$ 64°C , as correlações ficaram prejudicadas especialmente quando os tipos de ligantes são separados, mas ainda assim apontam uma tendência de queda do FN conforme o J_{nr} cresce, ou seja, com maiores deformações irreversíveis no ensaio. Destaca-se que, apesar das correlações não serem excelentes, a utilização de um parâmetro de dano é mais adequada para seleção dos materiais asfálticos, uma vez que o objetivo não é a previsão de desempenho.

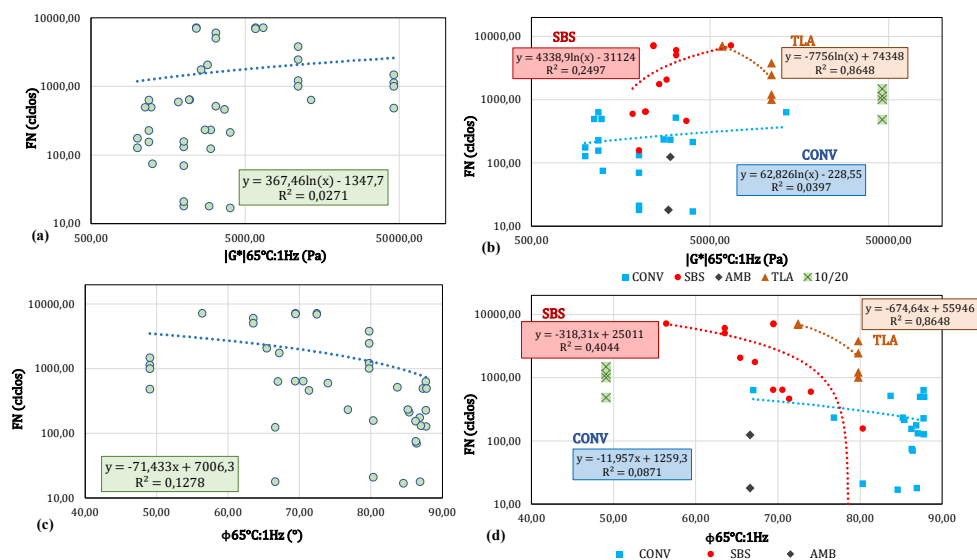


Figura 2. Correlações com o FN: PGH_{contínuo} RT (a) geral e (b) por tipo de CAP; $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ (c) geral e (d) por tipo de CAP; $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ (e) geral e (f) por tipo de CAP (AUTORES, 2024)

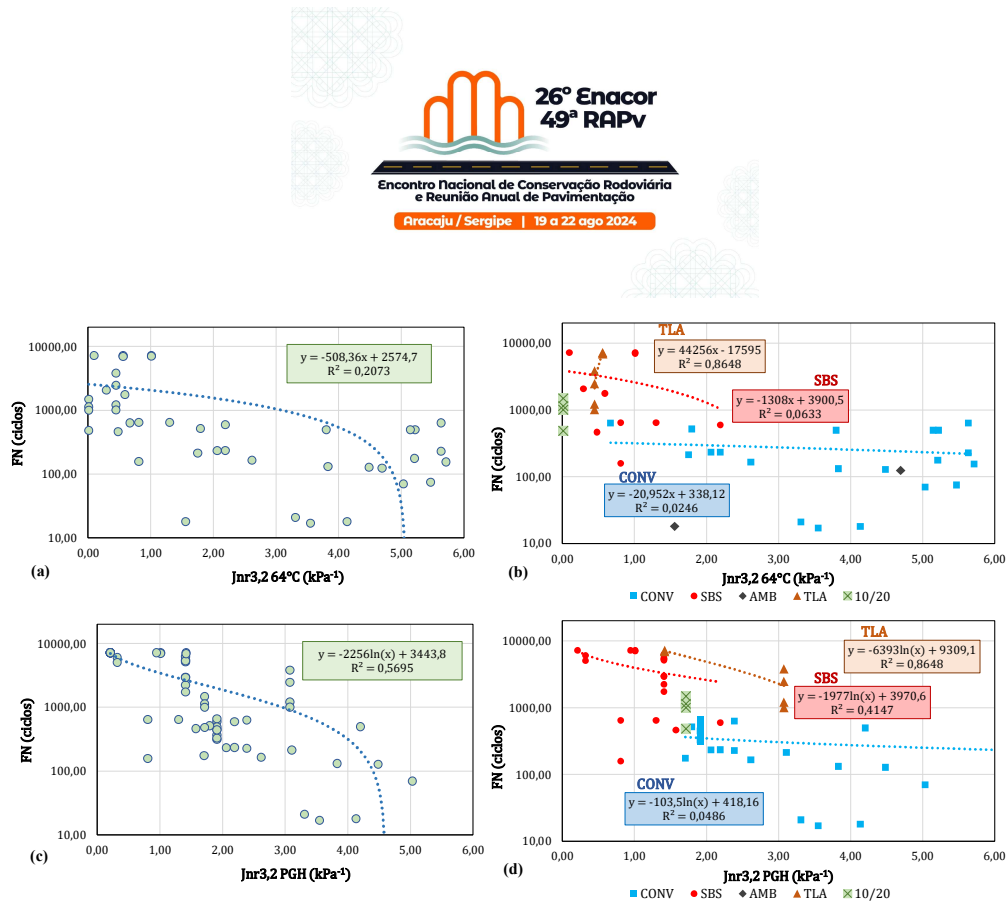


Figura 3. Correlações com o FN: J_{nr3,2} 64°C (a) geral e (b) por tipo de CAP; J_{nr3,2} PGH (c) geral e (d) por tipo de CAP (AUTORES, 2024)

Definição do indicador de fadiga

Com relação à fadiga, a Figura 4 mostra que o ciclo de falha do ensaio de LAS (Nf) é um indicador promissor para seleção de materiais, tanto para o critério de perda de 35% da integridade ($|G^*| \sin \phi$) quanto da máxima energia de pseudodeformação acumulada (máxPSE). Essa correlação parece ser mais assertiva para ligantes convencionais (Figura 4b), visto que ligantes com polímero não apresentaram tendências claras. Em geral, maiores valores de Nf tendem a promover misturas com maior FFM, indicando que o ligante desempenha papel relevante na fadiga das misturas.

No caso do Fator de Fadiga do Ligante (FFL da Figura 5), as correlações gerais foram regulares, indicando que ligantes com maior FFL formam misturas com maior desempenho à fadiga. Novamente as tendências foram mais claras para ligantes sem modificação, embora os coeficientes de determinação para asfaltos com polímero tenham melhorado com relação ao Nf. Nesse sentido, o FFL é obtido após a interpretação do ensaio pelo S-VECD, e seu cálculo se baseia em ciclos de falha simulados para um ensaio perfeito. Assim, considera-se um indicador mais adequado para seleção de ligantes asfálticos. Considerando essas tendências, o critério da norma AASHTO T 400 (2022) ($35\%|G^*| \sin \phi$) parece mais adequado na correlação com FFM, mas destaca-se que há mais dados pelo critério máxPSE, que acaba sendo afetado pela variabilidade dos valores.

Classificação geral de ligantes asfálticos

A evolução das manifestações patológicas em rodovias ocorre de maneira simultânea. Nesse sentido, foram plotados em um mesmo gráfico os valores de FFL_{19°C} máxPSE e J_{nr3,2} 64°C (Figura 6). O FFL nesse critério foi escolhido por ser amplamente estudado no meio acadêmico, possui classes definidas em estudos anteriores (POSSEBON, 2021) e é um critério mais fundamentalista (mais detalhes em Wang *et al.*, 2015), permitindo a separação mais precisa de ligantes modificados e não modificados.



Destaca-se ainda que esse critério foi adotado pela norma brasileira para o ensaio de LAS (DNIT 439/2022 - ME).

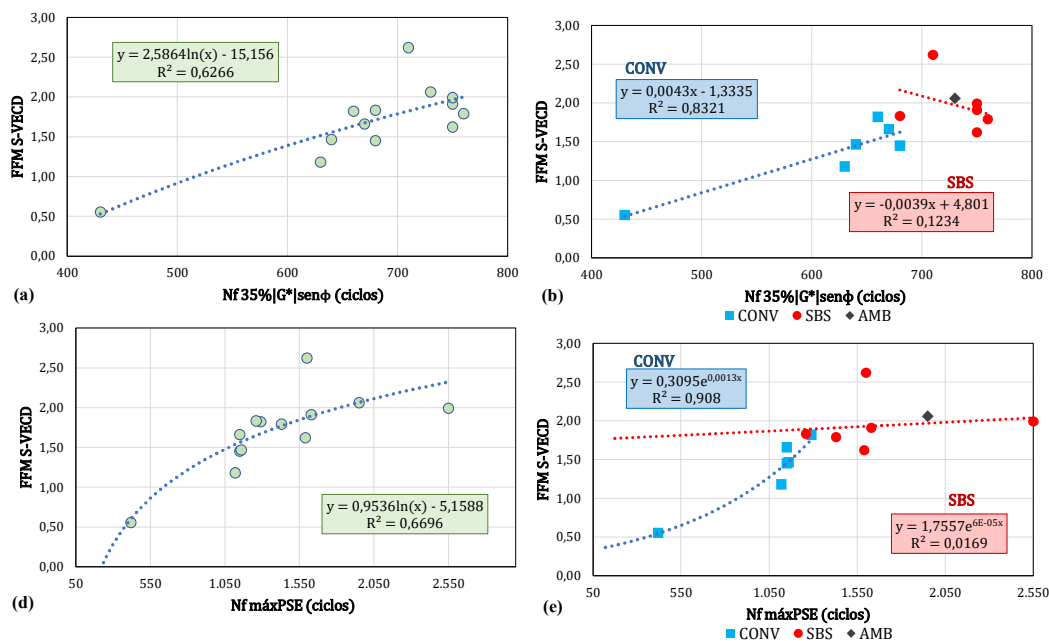


Figura 4. Correlação com FFM S-VECD: Nf 35%|G*|senφ (a) geral e (b) por tipo de ligante; e Nf máxPSE (a) geral e (b) por tipo de ligante (AUTORES, 2024)

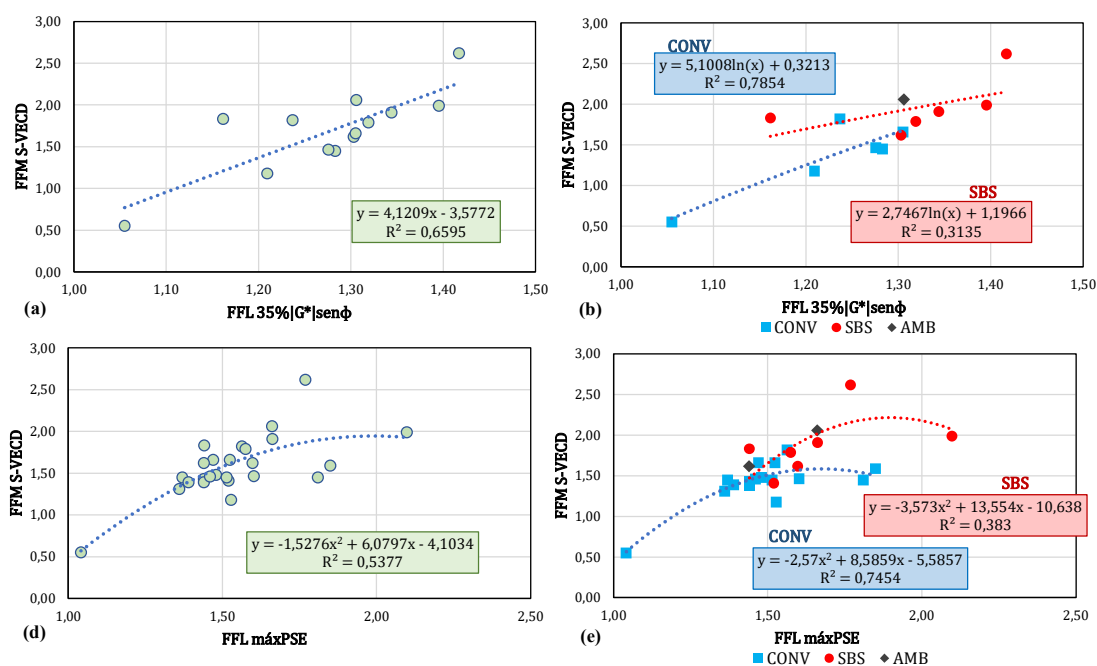


Figura 5. Correlação com FFM S-VECD: FFL 35%|G*|senφ (a) geral e (b) por tipo de ligante; e FFL máxPSE (a) geral e (b) por tipo de ligante (AUTORES, 2024)



Além disso, o J_{nr} a 64°C foi escolhido pois essa é apenas uma recomendação preliminar para seleção de materiais, e não uma garantia de desempenho. Essa temperatura também constitui o PGH necessário para a maior parte do país (FACCIN et al., 2021). Destaca-se ainda que ligantes classificados em uma temperatura seguirão a mesma ordem de ranqueamento quando caracterizados em temperaturas distintas, ou seja, o ligante de maior desempenho a 64°C seguirá sendo o de maior desempenho a 70°C , por exemplo. Os limites de J_{nr} da Figura 6 seguiram a recomendação da AASHTO M 332 (2022).

A partir da figura, observa-se que há uma tendência de que ligantes com polímero SBS sejam os mais eficazes no enfrentamento dos dois defeitos (canto superior esquerdo), mas que apenas o tipo de ligante não é suficiente para selecionar o material a ser utilizado nos projetos. De maneira análoga, embora a maior parte dos ligantes convencionais permaneçam à direita do gráfico (maiores J_{nr}) e possuam valores intermediários de FFL, há exceções que podem ser utilizadas em detrimento de ligantes com polímero, possivelmente como uma opção menos custosa, o que destaca a necessidade de execução de ensaios de desempenho para seleção de materiais asfálticos.

Os ligantes TLA, devido a elevada rigidez, são excelentes para a deformação permanente, mas nem sempre são excelentes para a fadiga, justificando seu uso, por exemplo, para rodovias com temperatura do ar elevada e/ou tráfegos muito pesados e lentos. O CAP 10/20, apesar de também possuir rigidez elevada, forneceu resultados satisfatórios para os dois defeitos considerando os ensaios de LAS e MSCR.

Com base nas observações anteriores, a Figura 7 ilustra o ábaco proposto para a seleção de ligantes asfálticos por desempenho, considerando deformação permanente e fadiga simultaneamente. A nomenclatura seguiu sequência numérica para o FFL e alfabética para J_{nr} . Portanto, as classes de fadiga variam de 1 a 5, sendo 1 a classe de maior desempenho (maior FFL) e de deformação permanente de A até E, sendo A a classe de maior desempenho (menor J_{nr}). A combinação dessas classes permite entender previamente o comportamento do ligante frente aos dois defeitos, ou seja, um ligante da classe 1A é o ligante mais adequado para a fadiga e para deformação permanente, e um ligante da classe 5E, o ligante de menor desempenho.

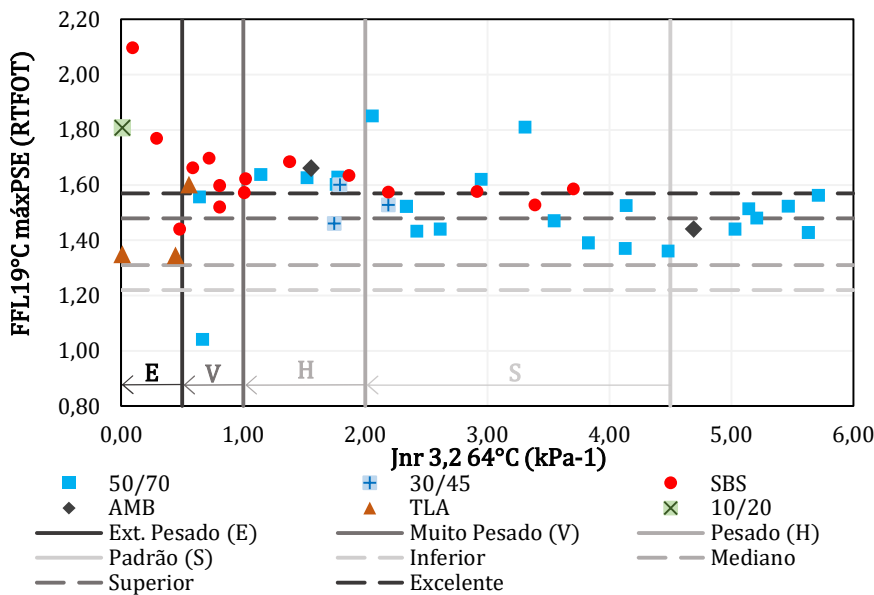


Figura 6. FFL $_{19^{\circ}\text{C}}$ máxPSE (RTFOT) vs. $J_{nr3,2}$ 64°C (AUTORES, 2024)

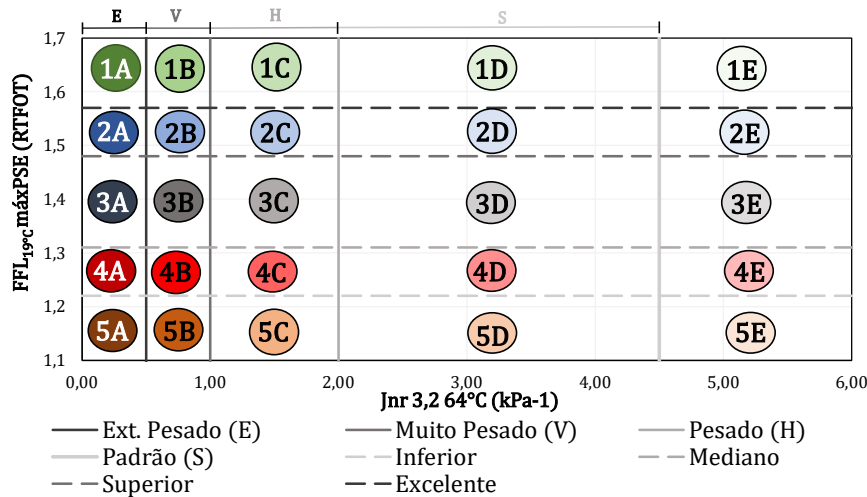


Figura 7. Classes de ligantes asfálticos por deformação permanente e fadiga (AUTORES, 2024)

A partir do ábaco, considerando premissas de projeto e condições da rodovia, o ligante asfáltico pode ser escolhido de maneira técnica e econômica. A título de exemplo, no caso de rodovias onde a fadiga possui maior probabilidade de ocorrência (temperaturas intermediárias e tráfego rápido), o ligante da classe 1D pode ser selecionado. Por outro lado, em rodovias onde a deformação permanente é o principal defeito, poderia ser utilizado um ligante 5A. A escolha, evidentemente, deverá partir de estudos de viabilidade econômica e ensaios conclusivos em misturas asfálticas. Por fim, destaca-se que a AASHTO M 332 (2022) indica um J_{nr} máximo de $4,5 \text{ kPa}^{-1}$, mas ligantes com PGH 58 podem superar o limite a 64°C . Nesses casos, para rodovias com PGH necessário mais baixo, recomenda-se que esse ligante seja caracterizado no seu PGH, antes de descartar o seu uso.

CONCLUSÕES

Este trabalho propôs uma classificação de ligantes asfálticos considerando deformação permanente e fadiga simultaneamente, para orientar a seleção desses materiais de maneira racional. Foi estruturado o banco de dados do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária da Universidade Federal de Santa Maria (GEPPASV/UFSM). A seleção dos indicadores de ligantes teve como base as correlações com parâmetros-alvo de misturas asfálticas. Para a deformação permanente, foi escolhido o parâmetro *Flow Number* do ensaio uniaxial cíclico de cargas repetidas, e para a fadiga, o Fator de Fadiga da Mistura (FFM) a partir das curvas de Wöhler simuladas pela equação de Nascimento (2016) e do ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração direta. Verificou-se que o J_{nr} do ensaio de MSCR e o Fator de Fadiga do Ligante do ensaio de LAS eram os mais adequados para selecionar ligantes asfálticos por desempenho.

A plotagem dos dados em um gráfico conjunto de fadiga e deformação permanente permitiu observar que existem ligantes excelentes para os dois defeitos, ligantes intermediários, e ligantes excelentes para apenas um defeito. Nesse cenário, fica evidente que a consideração conjunta da deformação permanente e da fadiga na escolha dos ligantes é a maneira mais assertiva de iniciar um projeto de mistura asfáltica, desde que essa escolha seja fundamentada em ensaios de desempenho. Além disso, observou-se que apenas o tipo de ligante não é suficiente na seleção de materiais. Apesar de ligantes sem modificação apresentarem desempenho inferior, existem exceções que podem ser utilizadas em detrimento de ligantes modificados, o que torna a escolha mais econômica, mas justifica a realização



de testes mais robustos de caracterização. As 25 classes propostas neste estudo não possuem objetivo de garantir o desempenho exato dos ligantes, mas orientam a seleção de materiais conforme as condições reais previstas para a rodovia. Por fim, a variedade de ligantes asfálticos contida no banco de dados evidencia que a indústria é vasta na produção desses materiais, e que a reologia vem se tornando cada vez mais indispensável na caracterização e seleção de ligantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (IPR/DNIT), pelo Termo de Execução Descentralizada nº 545/2022-00 e à ANP/Petrobras, pelo apoio financeiro à pesquisa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO M 320. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, D.C.: 2023
- AASHTO M 332. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. Washington, D. C.: 2023
- AASHTO R 28. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). Washington, D. C.: 2022.
- AASHTO T 240. Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). Washington, DC: 2023
- AASHTO T 315. Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Washington, D. C.: 2022
- AASHTO T 350. Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Washington, D. C.: 2023
- AASHTO T 378. Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Washington, D. C.: 2022
- AASHTO T 391. Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. Washington, D. C.: 2020
- AASHTO T 400. Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test. Washington, D. C.: 2023
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15184. Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro/RJ: 2021.
- ALMEIDA JR., P. O. B. De. Reciclagem de misturas 100%RAP: investigação de parâmetros para avaliação e dosagem de agentes rejuvenescedores com foco na fadiga. 2022. PhD Thesis. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2022.
- ANDERSON, D. A; CHRISTENSEN, D. W; BAHIA, H. Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 60, p. 437–475, 1991.
- AZEVEDO, P. O.; JUNIOR, E. F. N.; ARANTES, A. E.. Effects of international roughness index on vehicle emissions. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, v. 15, n. 1, p. 41–59, 2021.
- BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.



- BOEIRA, F. D. Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados. 2018. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 130/2010 - ME. Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de Ensaio. . Rio de Janeiro/RJ: 2010
- DNIT 155/2010 - ME. Material asfáltico – Determinação da penetração. Rio de Janeiro/RJ: 2010
- DNIT 131/2010 - ME. Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ: 2010
- DNIT 439/2022 - ME. Pavimentação – Ligante asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep) – Método de ensaio. Rio de Janeiro/ RJ: 2022
- FACCIN, C. Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande Do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2018.
- FACCIN, C. et al. Mapas de Grau de Desempenho (PG) de ligantes asfálticos para o Brasil. 2021, 100% Digital: 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2021. p. 933–943.
- HARRIGAN, E.; LEAHY, R.; YOUTCHEFF, J. Superpave manual of specifications, test methods and practices. SHRP-A-379. Strategic Highway Research Program, 1994
- HASS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. M. Modern pavement management. Malabar (EUA): Krieger Publishing Company, 1994.
- LEITE, L. F. M.; MOTTA, L. M. G. Evolução das especificações europeias de ligantes asfálticos baseadas em desempenho. Balneário Camboriú, SC: 2019. p. 1766–1777.
- NASCIMENTO, L. A. H. Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. 304 f. PhD dissertation. North Carolina State University, 2015.
- NASCIMENTO, L. A. H. do. Caracterização Avançada de Materiais Asfálticos: Dano por Fadiga. 2016, Curso. Universidade Federal de Santa Maria. 30 e 31 de março de 2016.
- NUNES-RAMOS, V. Proposta para seleção de ligantes e misturas asfálticas considerando deformação permanente e fadiga. 1–398 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2023.
- OSMARI, P. H. et al. Cracking resistance evaluation of asphalt binders subjected to different laboratory and field aging conditions. Road Materials and Pavement Design, v. 20, n. sup2, p. S663–S677, jul. 2019.
- PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. Pavement design and materials. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- PIRES, D. M. et al. Study of the permanent deformation of asphalt mixtures in the field: A multiscale approach. Construction and Building Materials, v. 325, n. January, p. 126763, 2022.
- POSSEBON, É. P. Advanced characterization of brazilian bitumens and mixtures. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2021.
- POSSEBON, É. P. et al. Rheological properties , 2S2P1D modelling and SHStS transformation of 12 Brazilian bitumens and mixtures. Road Materials and Pavement Design, v. 23, n. sup1, p. 68–85, 2021.
- SCHUSTER, S. L. Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.
- SPEIGHT, J. G. Asphalt Materials Science and Technology. Elsevier, 2015.
- UNDERWOOD, B. S. Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete. PhD dissertation. Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 2011.
- VESTENA, P. M. Segmentos experimentais na BR 116/RS empregando TLAflex, Hima e 55/75-E (SBS): caracterização avançada e monitoramento. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2021.
- YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. Principles of pavement design. New York (EUA): John Wiley e Sons, Inc., 1975.