



9 A 12 DE AGOSTO DE 2022
BENTO GONÇALVES/RS
www.rapvenacor.com.br



24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

RESISTÊNCIA DE MISTURAS COM ASFALTO BORRACHA À PROPAGAÇÃO TRINCAS

*LISEANE P. THIVES*¹; *JORGE C. PAIS*²; *PAULO A. PEREIRA*³; *MANUEL M.J.C. MINHOTO*⁴ & *GLICÉRIO TRICHÊS*⁵

RESUMO

A propagação de trincas é um dos principais mecanismos de falha que afetam o desempenho de pavimentos flexíveis reabilitados. Esse defeito ocorre pela presença de trincas no revestimento antigo que se propagam para a nova camada devido às cargas de tráfego e variações de temperatura. Prever adequadamente o comportamento do tipo de reforço escolhido é essencial para que a reabilitação do pavimento alcance a vida útil de projeto. Este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência (vida) à propagação de trincas de misturas asfálticas com asfalto borracha. Em laboratório foram avaliadas três misturas com asfalto borracha e uma mistura convencional por meio do equipamento *Reflective Cracking Device* (RCD). Os resultados mostraram o efeito benéfico das misturas com asfalto borracha para retardar a propagação de trincas em pavimentos a serem reabilitados.

PALAVRAS-CHAVE: asfalto borracha, propagação de trincas, reabilitação.

ABSTRACT

Crack propagation is one of the main failure mechanisms affecting rehabilitated flexible pavements performance. This distress occurs due to crack movements of old surfaces that propagate to the new layer by traffic loads and temperature variation actions. Adequately predicting the behavior of the chosen surface type is essential for pavement rehabilitation to reach the project's lifespan. This work evaluates the crack propagation resistance of asphalt rubber mixtures. Three asphalt rubber mixtures and a conventional one were evaluated in the laboratory through the Reflective Cracking Device (RCD) device. The results showed the beneficial effect of asphalt rubber mixtures to delay crack propagation in pavements to be rehabilitated.

KEY WORDS: asphalt rubber, crack propagation, rehabilitation.

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Santa Catarina, liseane.thives@ufsc.br

² Universidade do Minho, Campus de Azurém, Guimarães, Portugal, jpais@civil.uminho.pt

³ Universidade do Minho, Campus de Azurém, Guimarães, Portugal, ppereira@civil.uminho.pt

⁴ Instituto Técnico de Bragança, Bragança, Portugal, minhoto@ipb.pt

⁵ Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Santa Catarina, glicerio.triches@ufsc.br

INTRODUÇÃO

As trincas por propagação formadas em camadas de reforço de pavimentos flexíveis reabilitados (revestimento) são resultado de movimentos horizontais e verticais nas juntas e trincas das camadas subjacentes (WILLIAMS *et al.*, 2015). A reabilitação de superfícies fissuradas por meio da aplicação de uma nova camada asfáltica sobre a camada fissurada foi uma solução comumente usada por vários órgãos rodoviários. No entanto, essa alternativa se mostrou inadequada uma vez que a nova camada apresenta falha prematura devido ao aparecimento de trincas propagadas. Desta forma, sem tratamento prévio dos defeitos da camada existente, a reabilitada não atinge a vida útil esperada de projeto (TREVINO *et al.*, 2003; GAJEWSKI; SADOWSKI, 2014).

Diversas técnicas para mitigar a propagação de trincas em reforços de pavimentos são conhecidas e adotadas, como por exemplo, (i) modificação ou tratamento da superfície existente (fresagem e substituição do revestimento, reciclagem no local; recuperação em profundidade total); (ii) reparo prévio do revestimento existente (remendos, colocação de massa fina); (iii) camada intermediária de alívio de tensão/deformação (SAM – *Stress Absorbing Membrane, Stress Absorbing Membrane Interlayer* – SAMI, geossintéticos); (iv) uso de misturas com asfaltos modificados; (v) Reforço da camada (grelhas de reforço de aço, geogrelhas) (BAEK; AL-QADI, 2006; VON QUINTUS *et al.*, 2010).

A alternativa de uso de misturas asfálticas modificadas como camada de reforço tem sido utilizada em vários países devido ao potencial dessas misturas em inibir a propagação de trincas. (MINHOTO, 2007; PAIS, 2013; GAJEWSKI; SADOWSKI, 2014). Pesquisas têm comprovado que a aplicação de misturas asfálticas modificadas, como com asfalto borracha, contribuem para o aumento da resistência à fadiga, deformação permanente, trincas térmicas, dano por umidade e retardamento da propagação de trincas (SOULIMAN; EIFERT, 2016; ASGHARZADEH *et al.*, 2018; CHENG *et al.*, 2019; KLINSKY; BARDINI; DE FARIA, 2020; ALFAYEZ; SULEIMAN; NEHDI, 2020).

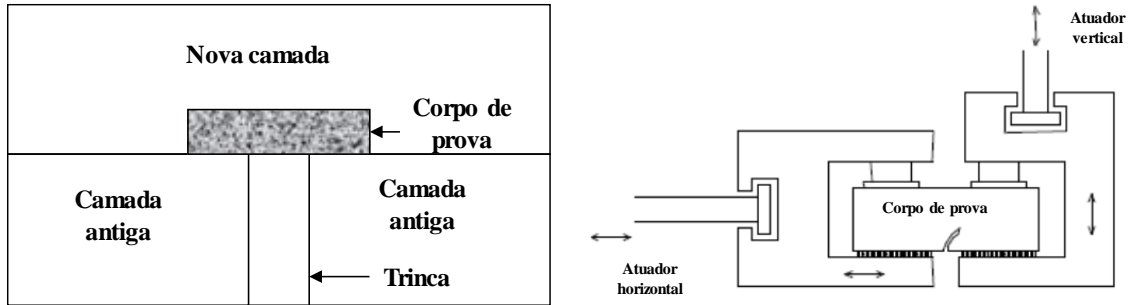
Baek e Al-Quady (2006) afirmam que o mecanismo de propagação de trincas em pavimentos flexíveis não é bem compreendido, apesar do conhecimento de várias técnicas para reduzi-lo. A medição da atividade das trincas em campo foi estudada por Pais (1999) que mostrou a evolução do deslocamento produzido pelos bordos das trincas durante a passagem de um veículo sobre o pavimento. Este deslocamento caracteriza-se por haver, em simultâneo, movimentos horizontais e verticais entre os dois bordos das trincas, tanto no sentido longitudinal como transversal. Após a reabilitação (camada de reforço), as trincas existentes continuam a apresentar movimentos relativos entre os seus bordos, de maior intensidade na direção vertical do que na direção horizontal.

A ação do tráfego associada às variações diárias de temperatura faz com que as bordas das trincas estejam submetidas a movimentos verticais e horizontais. Sousa; Shatnawi e Cox (1996) desenvolveram o dispositivo *Reflective Cracking Device* (RCD) capaz de simular essa situação em laboratório por meio da aplicação um estado de tensão bidimensional em corpos de prova.

O esquema do ensaio, representado na Figura 1(a), permite simular a zona da camada de reforço que se encontra sobre a camada antiga trincada. O dispositivo RCD, apresentado esquematicamente na Figura 1(b) permite a aplicação simultânea de esforços horizontais e verticais, conduzindo, por meio de uma trinca simulada no dispositivo, à propagação da mesma no corpo de prova testado. A Figura 2 ilustra um corpo de prova colado aos pratos inferiores do dispositivo e a trinca induzida.

O dispositivo completo (Figura 3a) é constituído por duas peças metálicas no meio das quais o corpo de prova é disposto. Inferiormente, o corpo de prova está colado aos pratos metálicos enquanto que superiormente, quatro pistões do equipamento servo-hidráulico (Figura 3b) aplicam um esforço simulando a carga aplicada pelo tráfego ao pavimento. O equipamento servo hidráulico é constituído por uma estrutura de carga, um grupo hidráulico e uma câmara climática

(temperaturas de -20 a +70°C, precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$). A estrutura de carga é composta por dois atuadores, dispostos verticalmente e horizontalmente, ligados a servo válvulas, na extremidade dos quais se encontram as células de carga. O dispositivo de propagação de trincas é fixado às extremidades dos atuadores (Figura 3b).



(a) Simulação da zona da camada de reforço

(b) Esquema do dispositivo

Figura 1. Esquema de ensaio do RCD (AUTORES, 2022).

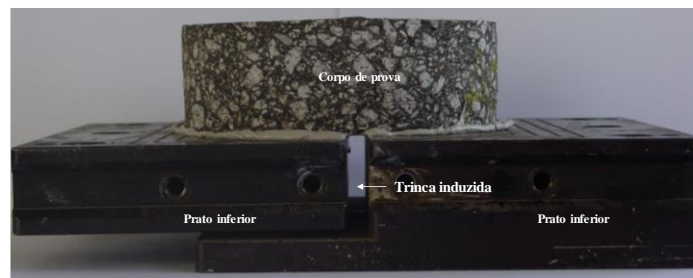
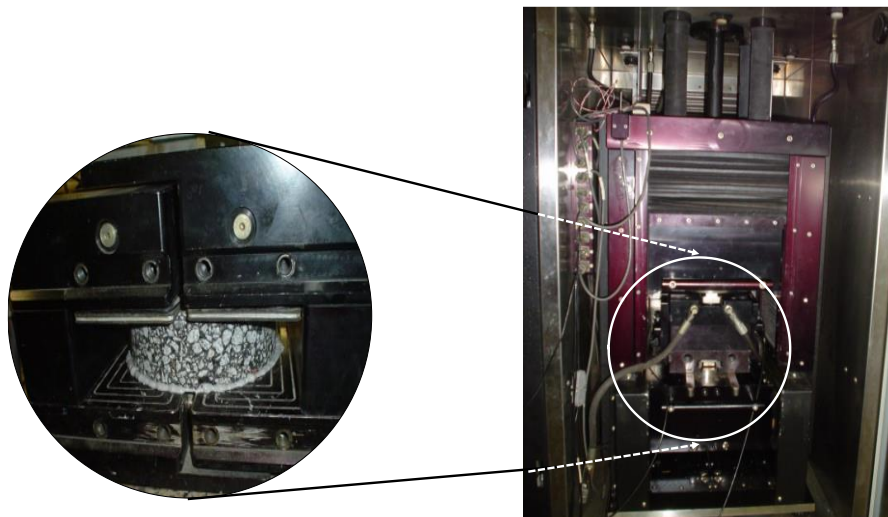


Figura 2. Corpo de prova colado aos pratos inferiores e trinca induzida (AUTORES, 2022).



(a) Dispositivo montado com o corpo de prova

(b) Equipamento servo hidráulico para o teste

Figura 3. Dispositivo e equipamento de ensaio RCD (AUTORES, 2022).

A metodologia do ensaio foi utilizada por outros autores que comprovaram a eficácia dos resultados obtidos (PAIS *et al.*, 2002; SOUSA *et al.*, 2002).

Apesar do grande esforço desenvolvido por pesquisadores para considerar a propagação de trincas no projeto de reabilitação de pavimentos, ainda há uma lacuna em relação à aplicação de metodologias e testes disponíveis. No Brasil, a avaliação de propagação de trincas em misturas asfálticas ainda carece de estudos.



9 A 12 DE AGOSTO DE 2022
BENTO GONÇALVES/RS

www.rapvenacor.com.br



Este trabalho tem como objetivo avaliar a propagação de trincas de misturas com asfalto borracha por meio de ensaios em laboratório e determinar sua resistência à propagação.

METODOLOGIA

A metodologia abrange três principais fases. Na primeira fase foram produzidas três misturas com asfalto borracha e uma mistura convencional. Após a compactação, as placas de misturas asfálticas foram serradas para a obtenção de corpos de prova (18 cm x 18 cm de base e 5 cm de espessura). Posteriormente, na segunda fase, as misturas foram testadas no equipamento RCD para avaliar a vida à propagação de trincas.

Para definição da configuração dos ensaios de propagação de trincas considerou-se o fato de que após reforço a atividade das trincas devido ao tráfego, é eminentemente vertical, e que devido à temperatura a zona do reforço sobre as trincas está sujeita a esforços horizontais de tração ou compressão. Adicionalmente, o efeito do tráfego e da temperatura na propagação de trincas se verifica em velocidades diferentes. Enquanto que o efeito do tráfego ocorre em elevadas frequências (habitualmente considerado o valor de 10 Hz), o efeito da temperatura verifica-se para uma frequência de 1 ciclo por dia, que comparativamente ao efeito da ação do tráfego pode ser considerado quase constante.

Deste modo, nos ensaios de propagação de trincas por meio do RCD, a metodologia desenvolvida por Sousa; Shatnawi e Cox (1996) considera que o efeito do tráfego, o qual aplica esforços verticais ao corpo de prova, pode ser caracterizado numa frequência de 10 Hz. Por outro lado, para o efeito da temperatura, o qual aplica esforços horizontais ao corpo de prova, há necessidade de aplicação de esforços constantes ao longo do tempo. Desta forma, a metodologia do ensaio estabelece que esforços verticais sejam aplicados através de um deslocamento enquanto que os esforços horizontais através de uma força, resultando num ensaio em deslocamento e força controlada.

A trinca é simulada por meio de uma abertura dos pratos de apoio do dispositivo de 10,0 mm, representando uma trinca em campo de aproximadamente de 2,0 mm a 3,0 mm com bordos degradados.

Na terceira fase, para cada uma das cinco misturas testadas, foram obtidos os ciclos de carga que representam a vida ou resistência à propagação de trincas.

RESULTADOS

Caracterização das Misturas Asfálticas

Foram produzidas três misturas com asfalto borracha com diferentes granulometrias e, uma mistura de referência com asfalto convencional. As misturas com asfalto borracha seguiram as especificações do *California Department of Transportation*, sendo, ARHM-GG – *Asphalt Rubber Hot Mixture Gap Graded* (CALTRANS, 2006) e, do *Asphalt Institute*, mistura AI tipo IV (AI, 1989). A mistura convencional é do tipo Concreto Asfáltico Faixa “C” de acordo com a norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006a). Os agregados graníticos usados são classificados como: (i) tipo 1, tamanho nominal de 6 mm a 12 mm; (ii) tipo 2, tamanho nominal de 4 mm a 10 mm; (iii) tipo 3, tamanho nominal inferior a 4 mm. Um filer calcário foi utilizado para atendimento às especificações granulométricas.

Um tipo de asfalto borracha usado é proveniente do sistema *terminal blend*, com 15% de borracha tipo ambiente incorporada e asfalto base CAP 50/70 (DNIT, 2006b) e produzido em distribuidora de asfalto brasileira. Em laboratório, por meio do sistema *continuous blend*, foram produzidos dois asfaltos borracha com asfalto base CAP 30/45 e 17% de borracha incorporada (ambiente e

criogênica). A mistura convencional foi confeccionada com CAP 50/70, comum no Brasil em misturas asfálticas convencionais. As misturas asfálticas foram projetadas pelo Método Marshall, cujas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características das misturas asfálticas (AUTORES, 2022).

Mistura	Asfalto base	Borracha (%)	Sistema	Especificação	Vv ³ (%)	Asfalto (%)
AIBA15	CAP 50/70	15 (A ¹)	<i>Terminal blend</i>	AI	5.0	7.0
CABC17	CAP 30/45	17 (C ²)	<i>Continuous blend</i>	Caltrans	6.0	8.0
AIBA17	CAP 30/45	17 (A ¹)	<i>Continuous blend</i>	AI	5.0	7.0
MCONV0	CAP 50/70	-	-	DNIT	4.0	5.5

¹A – Borracha tipo ambiente; ²C – Borracha tipo criogênica; ³Vv – volume de vazios.

Ensaio RCD

Para cada mistura foram ensaiados em média, seis corpos de prova. Os ensaios foram realizados à temperatura de 20°C e frequência de 10 Hz, por meio da aplicação de deslocamentos entre 0,01 e 0,05 mm e forças entre 200 N e 400 N.

A Figura 4 ilustra corpos de prova após a realização do ensaio de propagação de trincas com o RCD, sendo visível o desenvolvimento da trinca, desde a parte inferior até à parte superior do corpo de prova.

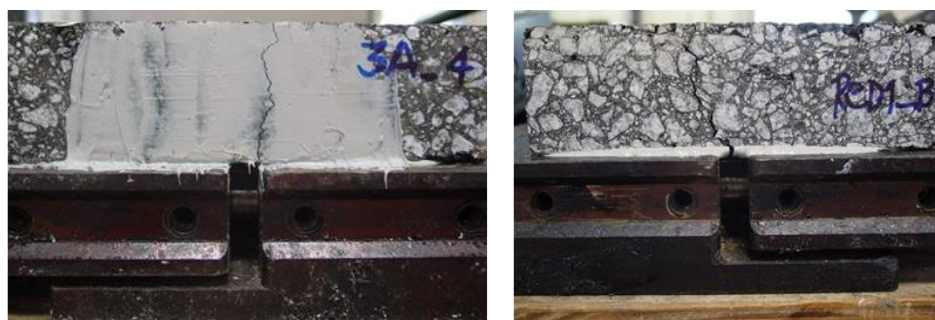


Figura 4. Corpos de prova após o ensaio RCD (AUTORES, 2022).

A análise dos resultados dos ensaios laboratoriais para obtenção da resistência à propagação de trincas (número de ciclos de carga para o qual o corpo de prova atinge a ruptura) foi realizada através da avaliação do ciclo de carga em que se desenvolve uma trinca no corpo de prova com 1,0 mm de abertura (adotado como critério de ruptura). O crescimento da abertura da trinca que se desenvolve no corpo de prova durante o ensaio RCD apresenta uma evolução, com o número de ciclos de carga, como ilustrado na Figura 5 (exemplo de um corpo de prova da mistura AIBA17).

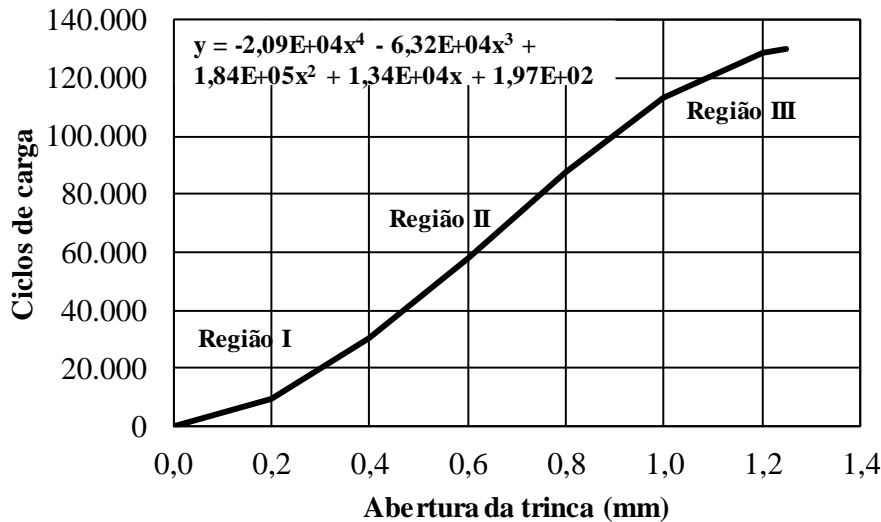


Figura 5. Evolução do crescimento da trinca em relação aos ciclos de carga no ensaio RCD (AUTORES, 2022).

Na Figura 5, observa-se a evolução da trinca em três regiões distintas de desenvolvimento: (I) início rápido da trinca (primeiro tramo da curva); (II) propagação da trinca a uma velocidade menor que a verificada para o início da trinca; (III) ruptura do corpo de prova com o crescimento rápido da trinca.

Paris e Erdogan (1963) aplicaram a abordagem da mecânica da fratura para avaliar a propagação de trincas, cujos ensaios realizados mostraram que, para um número específico de ciclos de carga corresponde a um comprimento de trinca, que podem ser representados e agrupados em uma única curva (Figura 6).

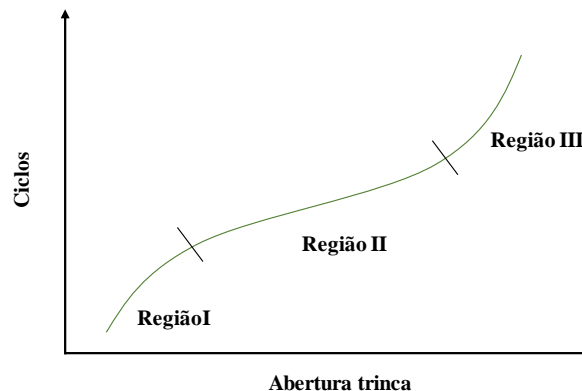


Figura 6. Ilustração das regiões observadas em ensaios de propagação de trincas (Baseado em PARIS e ERDOGAN, 1963).

Observa-se que as regiões da curva do ensaio RCD (Figura 5) são semelhantes às observadas por Paris e Erdogan (1963), mostradas na Figura 6.

Os resultados dos ensaios são expressos pela relação entre o número de ciclos de carga e abertura da trinca, utilizando-se uma aproximação polinomial de 4º grau de acordo com a Equação 1, o qual necessita de cinco coeficientes de regressão para a sua definição (a, b, c, d, e). (Na Figura 5 está representada a Equação 1, obtida para o exemplo de um corpo de prova da mistura AIBA17).

$$\text{Ciclos de carga} = a \times (af)^4 + b \times (af)^3 + c \times (af)^2 + d \times (af) + e \quad (1)$$

Em que: a_f é a abertura da trinca (mm); a , b , c , d , e , e são os parâmetros de regressão.

A partir dos valores dos parâmetros obtidos para cada corpo de prova e através da Equação (1), a vida à propagação de trincas foi calculada, admitindo-se uma abertura de trinca máxima 1,0 mm. Os resultados (média) de cada mistura são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resistência à propagação (AUTORES, 2022).

Mistura	Vida (ciclos)	Vida relativa
AIBA15	2,92E+06	122,1
CABC17	7,94E+05	33,2
AIBA17	2,07E+05	8,7
MCONV0	2,40E+04	1,0

De acordo com os resultados (Tabela 2) quanto à resistência à propagação de trincas, pode-se afirmar que as misturas asfálticas com asfalto borracha obtiveram uma vida superior à mistura convencional (MCONV0). A mistura com asfalto borracha comumente utilizada no Brasil (15% de borracha ambiente incorporada no sistema *terminal blend*) e granulometria densa, obteve a maior vida à propagação de trincas (mistura AIBA15). Relativamente, em comparação à mistura convencional, o ganho de resistência quanto à propagação de trincas pode ser até 122 vezes mais elevado. Observa-se que o asfalto base CAP 30/45, com rigidez mais elevada que o CAP 50/70 (da mistura AIBA15), apesar de contribuir para o aumento da resistência à propagação de trincas não obteve o melhor desempenho. Isto pode ser atribuído ao processo de produção do asfalto borracha foi realizada em laboratório e não em uma distribuidora, com uma tecnologia mais avançada, como a disponível no Brasil. Quanto ao tipo e granulometria, tanto a densa quanto à *gap graded* apresentaram resultados satisfatórios. Ainda, é importante destacar que estes são resultados de laboratório, os quais devem ser posteriormente validados em campo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fenômeno da propagação de trincas em reforços de pavimentos flexíveis ainda é considerado um desafio e motivo de preocupação de órgãos rodoviários e pesquisadores.

Neste trabalho, foram apresentados resultados obtidos a partir de ensaios de laboratório com o dispositivo *Reflective Cracking Device* (RCD).

O estudo propôs avaliar a resistência (vida) à propagação de trincas de misturas asfálticas com asfalto modificado com borracha.

Os resultados mostraram que o asfalto borracha produzido no Brasil se mostrou adequado para minimizar a ocorrência de trincas por propagação. A mistura asfáltica confeccionada com esse material obteve a vida à propagação de trincas mais elevada, sendo que, em termos de vida relativa, pode ser 122 vezes superior à uma mistura convencional.

O trabalho foi desenvolvido em laboratório, cujos resultados necessitam de validação em campo e outros tipos de misturas asfálticas com variação de granulometria e asfalto devem ser igualmente testados. No entanto, o tema é relevante, de modo que o desenvolvimento de metodologias de consideração da propagação de trincas em projetos de reabilitação deve ser incentivado.

A partir deste trabalho, espera-se contribuir para a disseminação do conhecimento do fenômeno da propagação de trincas à comunidade rodoviária brasileira.



9 A 12 DE AGOSTO DE 2022
BENTO GONÇALVES/RS

www.rapvenacor.com.br



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AI. The Asphalt Handbook, Manual Series n° 4 (MS-4); Asphalt Institute: Lexington, KY, USA, 1989.
- ALFAYEZ, S.A.; SULEIMAN, A.R.; NEHDI, M.L. Recycling tire rubber pavements: State of the art in asphalt. Sustainability, 12, 9076, 1–15, 2020. doi: 10.3390/su12219076.
- ASGHARZADEH, S.M.; SADEGHI, J.; PEIVAST, P.; PEDRAM, M. Fatigue properties of crumb rubber asphalt mixtures used in railways. Construction and Building Materials, 184, 248–257, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.189>.
- BAEK, J.; AL-QADI, I.L. Finite element method modeling of reflective cracking initiation and propagation: investigation of the effect of steel reinforcement interlayer on retarding reflective cracking in hot-mix asphalt overlay. Transportation Research Record, 1949, 1, 32–42, 2006. <https://doi.org/10.1177/0361198106194900104>.
- CALTRANS. Asphalt Rubber Usage Guide; State of California Department of Transportation (Caltrans), Materials Engineering and Testing Services Office of Flexible Pavement Materials, Sacramento, CA, USA, 2006.
- CHENG, X.; LIU, Y.; REN, W.; HUANG, K. Performance evaluation of asphalt rubber mixture with additives. Materials, 12, 2693, 1–14, 2019. doi:10.3390/ma12081200.
- DNIT. Norma 031/2006 – ES, Pavimentos flexíveis—Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Diretoria de Planejamento e Pesquisa/IPR: Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006a.
- DNIT. Norma 009/2006, Cimentos asfálticos de petróleo—Especificação de material. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Diretoria de Planejamento e Pesquisa/IPR: Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006b.
- GAJEWSKI, J.; SADOWSKI, Y. Sensitivity analysis of crack propagation in pavement bituminous layered structures using a hybrid system integrating artificial neural networks and finite element method. Computational Materials Science, 82, 114–117, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.09.025>.
- KLINSKY, L.M.G.; BARDINI, A.S.S.; DE FARIA, V.C. Evaluation of permanent deformation of asphalt rubber using multiple stress creep recovery tests and flow number tests. Transportes, 76–86, 2020. doi:10.14295/transportes.v28i22110.
- MINHOTO, M.J.C. Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de Pavimentos rodoviários flexíveis. Tese de doutorado. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2007.
- PAIS, J.C. Consideração da propagação de fendas no dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis. Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 1999.
- PAIS, J.C.; PEREIRA, P.A.A.; SOUSA, J.M.B.; CAPITÃO, S. Evaluation of the load associated cracking in flexible pavements. Proceedings of the 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Lisbon, Portugal, 24–26 June 2002, 2002.
- PARIS, P.C.; ERDOGAN, F. A Critical analysis of crack propagation laws. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering -T. ASME, 3, 85, 1963.
- SOULIMAN, M.; EIFERT, A. Mechanistic and economical characteristics of asphalt rubber mixtures. Advances in Civil Engineering, 1–6, 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8647801>.
- SOUSA, J.B.; SHATNAWI, S.; COX, J. An approach for investigating reflective fatigue cracking in asphalt-aggregate overlays. Proceedings of the Third International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, Maastricht, The Netherlands, 2–4 October 1996, 1996.
- SOUSA, J.B.; PAIS, J.C.; SAIM, R.; WAY, G.; STUBSTAD, R.N. Development of a mechanistic empirical based overlay design method for reflective cracking. Road Materials and Pavement Design, 6, 339–363, 2002. <https://doi.org/10.1080/14680629.2005.9690011>.
- TREVINO, M.; DOSSEY, T.; McCULLOUGH, F.B.; YILDIRIM Y. Applicability of asphalt concrete overlays on continuously reinforced concrete pavements. Report No. FHWA/TX-05/0-4398 1. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Texas Department of Transportation. Austin, Texas, USA, 2003.
- VON QUINTUS, L.H.; MALLELA, J.; LYTTON, L.R. Techniques for mitigation of reflective cracks. Proceedings of the FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City New Jersey, USA, 20–22 April 2010, Ed. U.S. Federal Aviation Administration (FAA), Washington, D.C., USA, 2010.
- WILLIAMS, C.R.; CHEN, C.; BUSS, A. reflective crack mitigation guide for flexible pavements. Report No. IHRB Project TR-641. Iowa Highway Research Board, Iowa Department of Transportation, Ames, Iowa, USA, 2015.