

Influência da borracha de pneus inservíveis no desempenho mecânico de misturas asfálticas a quente

C. G. L. Nunes^{1*} , P. H. S. Pereira² , R. A. Melo³ ,

J. K. G. Rodrigues⁴ , L. C. F. L. Lucena⁴ 

* Autor de Contato: camilagluznunes@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.575>

Recepção: 23/12/2021 | Aceitação: 08/07/2022 | Publicação: 01/09/2022

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo otimizar a produção de misturas asfálticas a quente a partir da utilização de asfalto-borracha. Para isso, avaliou-se o desempenho mecânico de misturas asfálticas produzidas com diferentes ligantes: asfalto-borracha comercial (AB08), asfalto-borracha 10% (AB10) e 15% (AB15) de resíduos de borracha e asfalto convencional (PEN 50-70). Para a composição dessas misturas, os teores ótimos de asfalto foram definidos pela dosagem Marshall. Já para a realização dos ensaios mecânicos, foram ensaiados corpos de prova moldados com compactadores Marshall e Superpave. Pelos resultados obtidos, constatou-se que as misturas com AB08 e AB10, compactadas com o Superpave, apresentaram o melhor desempenho mecânico. Porém, o ligante AB08 já está disponível no mercado, o que facilita seu uso em obras de pavimentação.

Palavras-chave: mistura asfáltica a quente; asfalto-borracha; *Marshall*; *Superpave*.

Citar como: Nunes, C. G. L., Pereira, P. H. S., Melo, R. A., Rodrigues, J. F. K. G., Lucena, L. C. F. L. (2022), “Influência da borracha de pneus inservíveis no desempenho mecânico de misturas asfálticas a quente”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 362 – 377, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.575>

¹ Ph.D. student of the Graduate Program in Civil and Environmental Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil.

² Master's student of the Graduate Program in Civil and Environmental Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil.

³ Department of Civil Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil.

⁴ Department of Civil Engineering, Federal University of Campina Grande, Campina Grande, Brazil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, C. G. L. Nunes contribuiu com a conceituação (50%), experimentação (60%), análise (100%) e redação do rascunho original (100%). P. H. S. Pereira contribuiu para a atividade de experimentação em 40%. R. A. Melo contribuiu com a conceituação (50%), orientação (100%) e redação – revisão e edição (70%). J. F. K. G. Rodrigues contribuiu com recursos para a realização dos experimentos (50%). L. C. F. L. Lucena contribuiu com a redação – revisão e edição (30%) e recursos para a realização dos experimentos (50%).

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2023.

Influence of unserviceable tires' rubber on the mechanical performance of hot mix asphalt

ABSTRACT

This work aimed to optimize the production of hot mix asphalt (HMA) from the use of asphalt-rubber. For that, the mechanical performance of asphalt mixtures produced with different binders was evaluated: commercial asphalt-rubber (AR08), asphalt crumb rubber 10% (AR10) and 15% (AR15), and conventional asphalt (PEN 50-70). For the composition of these mixtures, the optimum asphalt contents were defined by the Marshall design. To carry out the mechanical tests, specimens molded with Marshall and Superpave compactors were tested. From the results obtained, it was verified that AR08 and AR10 asphaltic mixtures, compacted with Superpave, carried out the best mechanical performance. However, the AR08 binder is already available on the market, which facilitates its usage in paving works.

Keywords: hot mix asphalt; asphalt-rubber; Marshall; Superpave

Influencia del caucho de desecho de neumáticos en el rendimiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo optimizar la producción de mezclas asfálticas en caliente utilizando caucho asfáltico. Para ello, se evaluó el desempeño mecánico de mezclas asfálticas producidas con diferentes aglutinantes: asfalto caucho comercial (AC08), asfalto caucho 10% (AC10) y 15% (AC15) de residuos de caucho y asfalto convencional (PEN 50-70). Para la composición de estas mezclas, el contenido óptimo de asfalto fue definido por el método *Marshall*. Para la realización de las pruebas mecánicas se ensayaron probetas moldeadas con compactadores *Marshall* y *Superpave*. De los resultados obtenidos se encontró que las mezclas con AC08 y AC10, compactadas con Superpave, presentaron el mejor desempeño mecánico. Sin embargo, el ligante AC08 ya está disponible en el mercado, lo que facilita su uso en trabajos de pavimentación.

Palabras clave: mezcla asfáltica en caliente; asfalto de caucho; *Marshall*; *Superpave*

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Os pneus inservíveis correspondem aos pneus usados que não podem ser reaproveitados por meio de reformas, por apresentarem danos irrecuperáveis em sua estrutura. Esses pneus correspondem a uma das maiores e mais problemáticas fontes de resíduos, devido ao grande volume de pneus produzidos e ao longo tempo que eles levam para se decompor. Além disso, os pneus inservíveis tornam-se ameaças à saúde humana e ao meio ambiente quando são descartados de forma inadequada (Lo Presti, 2013).

No Brasil, a forte dependência do modo rodoviário para o transporte de cargas e pessoas, impulsiona o mercado de pneus e, conseqüentemente, a geração de resíduos de pneus. Essa dependência eleva os custos operacionais de transporte, acelera o aparecimento de defeitos nos pavimentos e a necessidade de obras de conservação e manutenção. Portanto, a utilização do asfalto-borracha em obras de pavimentação é uma alternativa viável, não só para proteger o meio ambiente, mas também para diminuir os custos operacionais de transporte no país.

O asfalto-borracha apresenta inúmeras vantagens em relação ao asfalto convencional, como menor índice de penetração, flexibilidade e ductilidade sob baixas temperaturas, maior resistência à deformação permanente, maior resistência ao aparecimento de trincas sob baixas temperaturas e maior resistência à fadiga (Yetkin, 2007; Palit *et al.*, 2004; Xiang *et al.*, 2009). Outras vantagens incluem maior vida útil, menores custos de conservação e manutenção, redução do envelhecimento da mistura asfáltica e redução do ruído do tráfego (Sol-Sánchez *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2008; Navarro *et al.*, 2004; Chiu *et al.* Lu, 2007; Bueno *et al.*, 2014; Ding *et al.*, 2017).

Apesar dos benefícios, o asfalto-borracha ainda não é amplamente aceito e utilizado. Isso ocorre por dois motivos. O primeiro é a falta de treinamento profissional, em termos de domínio das várias técnicas e compreensão de algumas variáveis (por exemplo, teor de borracha, dimensões das partículas de borracha, superfície da borracha e estocagem). Segundo, faltam políticas públicas locais que estimulem o uso do asfalto-borracha (Lo Presti, 2013; Picado-Santos *et al.*, 2020).

O uso do asfalto-borracha ainda é baixo, no Brasil. No país, falta mão de obra especializada (Thives, 2009) e políticas públicas que incentivem o uso desse material. Assim, um dos objetivos deste estudo foi avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas a quente (MAQ). As misturas foram produzidas com quatro tipos de ligantes: (i) asfalto-borracha comercial (AB08), (ii) asfalto-borracha 10% (AB10) e (iii) 15% (AB15) ambos produzidos em laboratório com resíduo de borracha de pneus, e (iv) asfalto convencional, ou seja, ligante asfáltico com penetração entre 50-70 (PEN 50-70), que é usual para pavimentação no Brasil. Além disso, objetivou-se também analisar a eficácia da faixa de agregados dominante (FAD), método de previsão de deformação permanente em misturas asfálticas, bem como analisar a influência do método de compactação (*Marshall* ou *Superpave*) no desempenho mecânico das misturas.

No Brasil, a especificação para a seleção granulométrica das misturas asfálticas fundamenta-se no enquadramento dos agregados em faixas granulométricas, sugeridas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Este método consiste em um procedimento de tentativa e erro, onde as proporções dos agregados componentes da mistura são ajustadas para o enquadramento nos limites dessas faixas. Portanto, este método não leva em consideração os efeitos da distribuição de agregados no comportamento mecânico das misturas asfálticas. Isso pode resultar em misturas com menor estabilidade e menor resistência à deformação permanente. Portanto, o conceito de porosidade FAD foi utilizado neste estudo para avaliar a deformação permanente de misturas asfálticas.

A FAD é um método racional para selecionar a composição granulométrica das misturas asfálticas. O método é de simples aplicação e utiliza apenas um parâmetro, a porosidade FAD, que independe do tamanho nominal máximo da mistura asfáltica. Nesse método, considera-se que misturas com porosidade superior a 50% não proporcionam boa interação entre os agregados, o que as tornam

menos resistentes à deformação permanente. Estudos anteriores mostram a eficiência da aplicação deste método para obter um design adequado de dosagem, com menor propensão a desenvolver deformação permanente (Greene *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2009). Portanto, o método FAD foi utilizado para verificar a eficiência da escolha da composição da matriz de agregados.

Neste trabalho, o teor ótimo de asfalto foi determinado usando o design *Marshall*, uma vez que este método ainda é o mais utilizado no Brasil. Posteriormente, para a realização dos ensaios mecânicos, os corpos-de-prova foram moldados com compactadores *Marshall* e *Superpave*. Em estudos anteriores com outros materiais que também utilizaram essas duas compactações, verificou-se que corpos-de-prova compactados com *Superpave* tendem a apresentar melhores resultados em ensaios mecânicos. Esses melhores resultados geralmente são atribuídos à maior eficiência da compactação por amassamento utilizada pelo *Superpave*, em relação à compactação por impacto utilizada no *Marshall* (Assis *et al.*, 2017). Assim, neste trabalho, foram comparados os resultados obtidos com as duas formas de compactação.

2. PROCEDIMENTO

2.1 Materiais

Este estudo seguiu um procedimento experimental que teve início com a coleta dos materiais: PEN 50-70, AB08, agregados graníticos e borracha triturada de pneus. Esses materiais foram doados por empresas das regiões Nordeste e Sudeste do Brasil. A borracha obtida possui densidade de 0,99 g/cm³, e foi submetida a um peneiramento preliminar para remoção de partículas grosseiras que poderiam comprometer a homogeneidade da mistura com ligante convencional. A especificação ASTM D6114/D6114M-19 recomenda que não sejam utilizadas partículas de borracha muito grosseiras. Portanto, nesta pesquisa foram utilizadas as frações mais finas, com granulometria entre 0,15 e 0,59 mm.

2.2 Produção do asfalto-borracha

Na produção do asfalto-borracha em laboratório, 10% e 15% do teor de asfalto convencional foram substituídos por borracha, então foram produzidos os ligantes AB10 e AB15. Para esses ligantes, a borracha foi adicionada ao asfalto convencional em um misturador mecânico com rotação constante de 2.000 rpm e temperatura de 170°C por uma hora. Os ligantes AB10, AB15, PEN 50-70 e AB08 foram testados para determinar suas propriedades físicas. Esses testes incluíram penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, recuperação elástica e estabilidade à estocagem. Além disso, foram realizados testes para determinar as propriedades físicas dos agregados incluindo, granulometria, absorção, densidade, abrasão Los Angeles e ataque por sulfato de sódio. Os testes foram realizados de acordo com as normas do DNIT.

2.3 Design das misturas asfálticas

2.3.1 Seleção da composição granulométrica

Para determinação da composição granulométrica dos agregados utilizou-se o método de tentativas para o enquadramento da mistura na faixa C do DNIT. A porosidade FAD também foi calculada para estimar se a granulometria escolhida forneceria uma boa capacidade de resistência à deformação permanente às misturas. Antes do cálculo da porosidade FAD, foram escolhidas as faixas de agregados que iriam compor a FAD. De acordo com o método FAD, essa escolha deve ser feita com o auxílio de um diagrama de interação. Assim, devem ser selecionados dois tipos de agregados: (i) com granulometria superior a 1,18 mm e (ii) com razão percentual de material retido entre peneiras consecutivas de 0,43 e 2,33 mm. A porosidade foi determinada por meio da Equação (1):

$$\eta_{FAD} = \frac{VIC_{ag} + VAM}{VTM - V_{ag>FAD}} \quad (1)$$

Onde η_{FAD} corresponde a porosidade DASR (%); VIC_{ag} é o volume de agregados menores que a DASR; VAM são os vazios do agregado mineral; VTM é o volume total da mistura; $V_{ag>FAD}$ é volume de agregados maiores que a FAD.

2.3.2 Definição do Teor Ótimo de Asfalto

A dosagem *Marshall* foi utilizada para determinar o teor ótimo de asfalto. Corpos de prova cilíndricos foram moldados e compactados com 75 golpes de cada lado (norma brasileira DNER ME-043/95). Três parâmetros foram selecionados para determinar o teor ótimo de asfalto: volume de vazios, densidade aparente máxima e estabilidade máxima. Quatro dosagens (ou seja, uma para cada ligante) foram realizadas no total.

Para produção da mistura asfáltica com o PEN 50-70, os agregados foram aquecidos a temperatura de 165 °C por 24 horas e misturados ao ligante a 155 °C. Para as misturas com os três tipos de asfalto-borracha, os agregados foram aquecidos a 175 °C por 24 horas e misturados aos ligantes a 165 °C. Essas temperaturas foram obtidas por meio do ensaio de viscosidade rotacional Brookfield realizado com os quatro ligantes asfálticos.

2.3.3 Ensaios Mecânicos

Para avaliar o desempenho mecânico, as misturas asfálticas foram submetidas aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), dano por umidade induzida e *Flow number* (FN). Os testes foram realizados com corpos-de-prova produzidos pelos compactadores *Marshall* e *Superpave*. Cada ensaio foi realizado três vezes para analisar a precisão dos resultados. A Tabela 1 apresenta as normas que foram seguidas para a realização dos ensaios.

Tabela 1. Normas para os ensaios mecânicos

Ensaio	Normas
Resistência à tração por compressão diametral	DNIT ME 136/2010
Módulo de resiliência	DNIT 135/2018-ME
Dano por umidade induzida	AASHTO T 283/2002
<i>Flow number</i>	NBR 16505/2016

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Propriedades Físicas

A Tabela 2 apresenta os resultados para as propriedades físicas dos agregados. Os critérios de aceitação são baseados na norma DNIT ES 031/2006 para pavimentos flexíveis.

Tabela 2. Propriedades físicas dos agregados naturais.

Propriedade	Valor do Ensaio	Limite
Abrasão Los Angeles (%)	27,53	Max. 50
Ataque por Sulfato de Sódio (%)	1	Max. 12
Absorção (%)		-
Brita 3/4"	0,51	
Brita 3/8"	0,79	
Densidade (g/cm ³)		-
Brita 3/8"	2,67	
Brita 3/4"	2,63	
Pó de Pedra	2,64	

De acordo com a Tabela 2, as propriedades físicas dos agregados graníticos atendem aos critérios das normas brasileiras. Portanto, os agregados podem ser usados para construir pavimentos flexíveis.

A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas dos ligantes. Para o PEN 50-70, as normas do DNIT foram seguidas para cada ensaio, exceto para o ensaio de viscosidade. Para este ensaio, foram seguidos os critérios estabelecidos na ASTM D4402. Para os ligantes asfalto-borracha, foram seguidas as especificações da norma DNIT ES 111/2009.

Tabela 3. Propriedades Físicas dos Ligantes Asfálticos.

Ensaio	Ligantes Asfálticos				Norma - Asfalto Convencional	Norma Asfalto- borracha
	PEN 50-70	AB10	AB15	AB08		
Penetração (10 ⁻¹ mm)	69	44	36	45	50 – 70	30-70
Ponto de Amolecimento (°C)	51	62	64	62	Min. 46	Min. 55
Viscosidade <i>Brookfield</i> 135GC-SP21 (cP)	395	2.106	3.667	2,085	Min. 274	-
Viscosidade <i>Brookfield</i> 150GC-SP21 (cP)	203	1.132	1.735	1.096	Min. 112	-
Viscosidade <i>Brookfield</i> 177GC-SP21 (cP)	79	578	819	562	57 – 285	-
Recuperação Elástica (%)	0	57	39	61	-	Min. 50
Estabilidade à estocagem (°C)	0,5	5,0	8,5	5,5	-	Max. 9

De acordo com a Tabela 3, os ligantes PEN 50-70, AB08 e AB10 atendem às normas brasileiras. Por isso, os ligantes podem ser usados na produção de misturas asfálticas a quente. O ligante AB15 não pode ser usado porque não atende aos requisitos mínimos para o ensaio de recuperação elástica. No entanto, neste estudo, o procedimento de ensaios com AB15 foi mantido para avaliar o desempenho mecânico das misturas asfálticas produzidas com este ligante.

3.2 Composição Granulométrica das misturas

A Figura 1 apresenta a composição granulométrica das misturas asfálticas. A curva granulométrica é composta por: (1) 21% de brita 3/4", (2) 30% de brita 3/8" e 49% de pó de pedra. Esta composição foi utilizada para as quatro misturas asfálticas, e foi obtida por meio de um processo de tentativas,

para que a curva granulométrica se enquadrasse nos limites da Faixa C especificados na norma DNIT ES 031/2006.

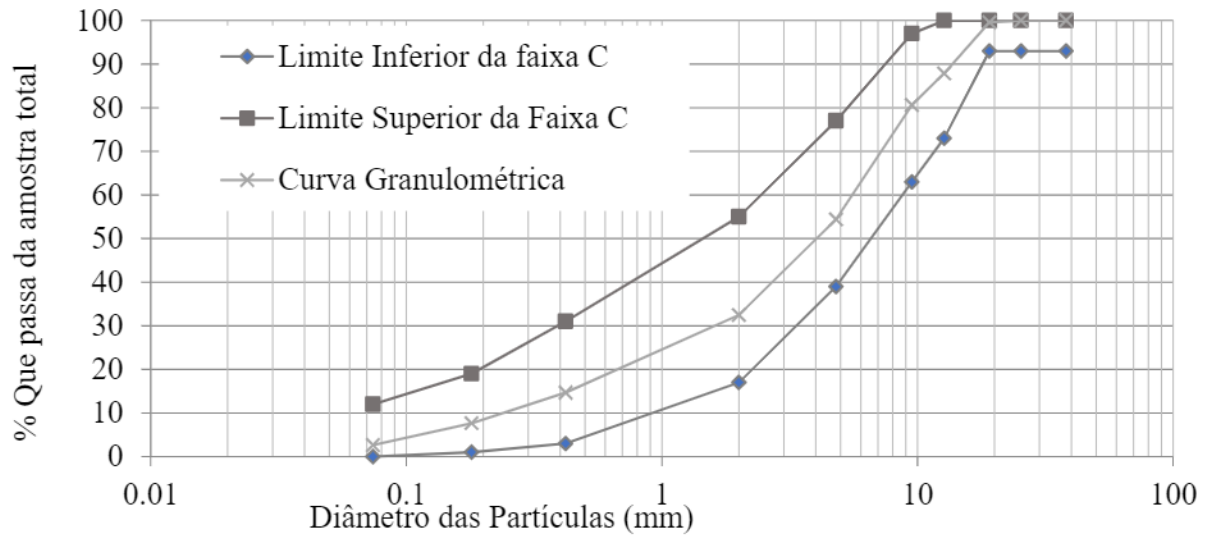


Figura 1. Curva Granulométrica das Misturas.

A composição granulométrica foi testada pelo método FAD, para prever se as misturas asfálticas teriam uma boa resistência à deformação permanente. Para aplicação do método FAD foi elaborado o diagrama de interação, apresentado na Figura 2. Esse diagrama permitiu definir quais os intervalos de agregados graúdos comporiam a FAD.

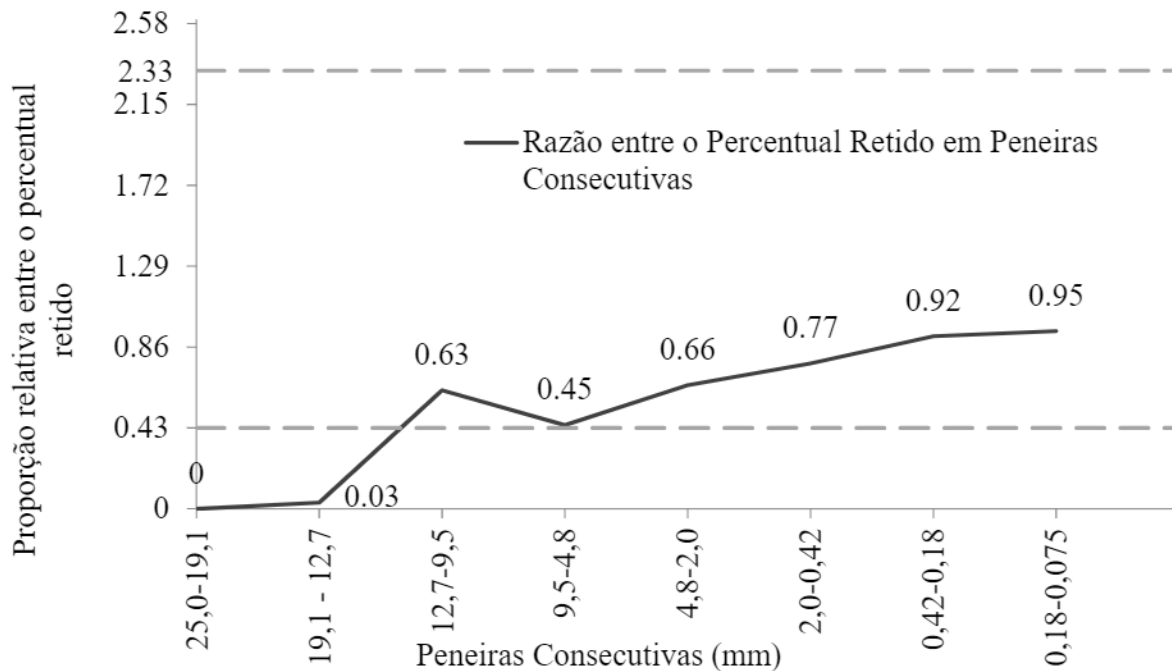


Figura 2. Diagrama de Interação entre agregados

De acordo com a Figura 2, as faixas de 12,7-9,5, 9,5-4,8 e 4,8-2,0 mm possuem agregados com granulometria superior a 1,18 mm. Além disso, a razão entre a porcentagem de material retido entre peneiras consecutivas varia de 0,43 a 2,33. A faixa 9,5-4,8 mm teve uma relação entre o percentual retido entre peneiras consecutivas muito próxima ao valor mínimo estimado para uma boa interação

entre os agregados. Portanto, essa faixa não foi considerada na seleção da FAD. Para a escolha entre as faixas 12.7-9.5 e 4.8-2.0 mm calculou-se a porosidade FAD que cada uma forneceria, por meio da Equação (1).

Para calcular o VAM na Equação (1), os valores de volume de vazios (Vv) e relação betume-vazios (RBV) foram assumidos, com base nos limites exigidos para esses parâmetros na norma DNIT ES 031/2006. De acordo com esta norma, as misturas asfálticas utilizadas em camadas de rolamento devem ter um Vv entre 3 e 5% e um RBV entre 75 e 82%. Neste trabalho, os valores médios desses limites (Vv de 4% e RBV de 79%) foram utilizados para calcular o VAM. Assim, obteve-se um valor aproximado de VAM igual a 19%.

Para a η_{FAD} , foram obtidos os seguintes resultados: 53% para a faixa de 12,7-9,5 mm e 39% para a faixa de 4,8-2,0 mm. Portanto, apenas a faixa de 4,8-2,0 mm teve uma η_{FAD} inferior a 50%, que é considerada a porosidade mínima para que as misturas que apresentam boa resistência à deformação permanente. Portanto, esse intervalo foi utilizado para compor a FAD. Como a curva granulométrica obtida pelo método do DNIT apresentou um valor de η_{FAD} inferior a 50%, a composição dos agregados não precisou ser ajustada.

3.3 Dosagem Marshall

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com a dosagem *Marshall* para os quatro tipos de ligantes.

Tabela 4. Parâmetros obtidos com a dosagem *Marshall*.

Propriedades	Ligantes Asfálticos				Norma Asfalto Convencional	Norma Asfalto Borracha
	PEN 50-70	AB10	AB15	AB08	DNIT ES 031/2006	DNIT ES 112/2009
Teor ótimo de Asfalto (%)	5,2	6,8	7,0	6,2	-	-
Estabilidade <i>Marshall</i> (kgf)	1.163	1.374	806	1.351	> 500	> 800
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,31	2,27	2,21	2,26	-	-
Vv (%)	3,86	4,99	4,87	4,92	3-5	3-5
VAM (%)	17	20	23	20	Min.16	Min.13
RBV (%)	77	74	78	75	75-82	65-78

A Tabela 4 mostra que a maioria das misturas com asfalto-borracha apresentam maior estabilidade *Marshall* que o ligante convencional. De acordo com Setyawan *et al.* (2017), a borracha proporciona melhor intertravamento e aderência entre os agregados e o ligante asfáltico, o que aumenta a estabilidade das misturas. Portanto, esperava-se que as misturas asfalto-borracha apresentassem melhores resultados. Para a mistura com o ligante AB15, também era esperado que as misturas com este ligante não apresentassem um desempenho mecânico tão bom quanto as demais misturas com asfalto-borracha, visto que ele não atendeu a todos os critérios físicos. A menor estabilidade e densidade *Marshall* da mistura AB15 estão relacionadas ao maior teor de borracha e à menor homogeneidade deste ligante. Esses fatores levaram a uma expansão volumétrica dos corpos de prova. Consequentemente, promoveram a redução da densidade e estabilidade dessa mistura.

Apesar da redução da estabilidade com o ligante AB15, observa-se na Tabela 4, que todas as misturas atenderam aos critérios das normas brasileiras em relação à dosagem *Marshall*. Após a determinação dos parâmetros volumétricos foi realizado o cálculo da porosidade FAD para cada mistura. Os resultados obtidos estão exibidos na Tabela 5.

Tabela 5. η_{FAD} após a dosagem *Marshall*.

Ligante Asfáltico	VAM (%)	η_{FAD} (%)	Critério
PEN 50-70	17	36	<50%
AB10	20	40	
AB15	23	44	
AB08	20	40	

A Tabela 5 mostra que as misturas com os ligantes AB10 e AB08 apresentaram η_{FAD} próxima ao valor estimado de 39% (antes da dosagem). As outras misturas apresentaram uma maior variação em relação a η_{FAD} estimada. Isso ocorreu devido pela maior variabilidade entre os valores de VAM obtidos após a dosagem e o VAM estimado de 19%. Apesar das diferenças, as estimativas foram aceitáveis com relação ao método FAD, pois todas as misturas apresentaram valor de η_{FAD} inferior a 50%.

3.4 Ensaios Mecânicos

3.4.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)

A Figura 3 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os métodos *Marshall* e *Superpave*.

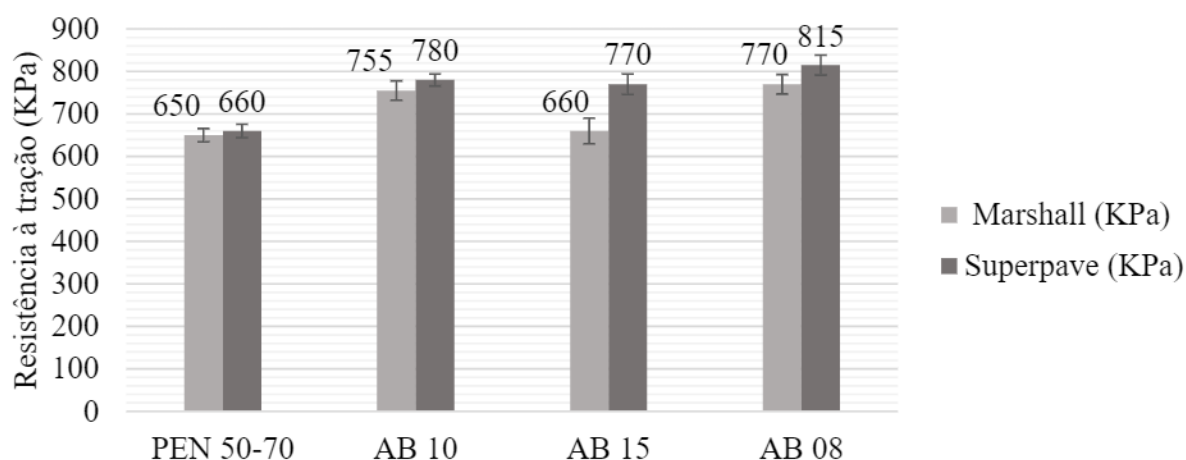


Figura 3. Resultados do ensaio de RT para cada mistura.

De acordo com a Figura 3, as misturas apresentaram maior RT quando compactadas pelo método *Superpave*. Esse resultado era esperado, já que o método *Superpave* simula melhor as condições de campo e tem menor risco de alterar a granulometria dos agregados.

A mistura com o ligante PEN 50-70 atendeu a resistência à tração mínima de 650 kPa (em conformidade com a norma DNIT ES 031/2006), tanto para o método *Marshall* quanto para o *Superpave*. Para misturas asfalto-borracha, a norma DNIT ES 112/2009 exige resistência à tração mínima de 750 kPa. Este limite foi atendido por todas as misturas, exceto pela mistura AB15 compactada pelo método *Marshall*.

Para a mistura AB15, os resultados do ensaio de resistência à tração indireta e a estabilidade *Marshall* podem ter sido influenciados pelo maior teor de borracha. O resultado do ensaio de estabilidade à estocagem, com valor próximo ao limite máximo permitido pela norma, demonstra que o maior teor de borracha leva a uma menor adesão entre a borracha e o ligante asfáltico, o que reduz a coesão e a homogeneidade da mistura (Navarro *et al.*, 2004; Navarro *et al.*, 2005; Shen *et*

al., 2009; Dantas Neto *et al.*, 2006; Navarro and Gámez, 2012), e consequentemente, resulta em valores mais baixos de RT e estabilidade (Navarro and Gámez, 2012).

3.4.2 Módulo de Resiliência (MR)

A Figura 4 apresenta os resultados do ensaio de Módulo de Resiliência para os métodos *Marshall* e *Superpave*.

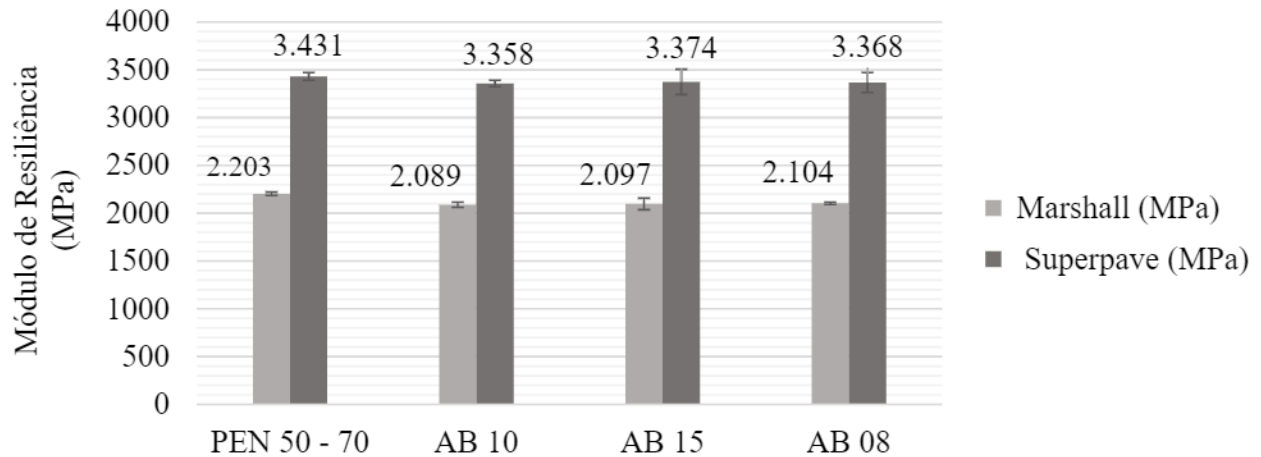


Figura 4. Resultados do ensaio de MR para cada mistura.

A Figura 4 mostra que as misturas asfalto-borracha apresentam menores valores de RM quando considerados os dois métodos. A redução do MR está relacionada à maior elasticidade das misturas asfalto-borracha. Em baixas temperaturas, essas misturas geralmente apresentam uma diminuição no módulo de resiliência em relação às misturas convencionais. Por outro lado, à medida que a temperatura aumenta, o valor do módulo tende a aumentar. Isso resulta em misturas menos quebradiças e mais flexíveis em baixas temperaturas, e com maior rigidez que as misturas convencionais em temperaturas mais elevadas (Palit *et al.*, 2004). Portanto, a redução do módulo de resiliência nas misturas com asfalto-borracha não significa que essas misturas tenham desempenho mecânico inferior em relação à mistura com PEN 50-70.

3.4.3 Dano por Umidade Induzida

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de dano por umidade induzida.

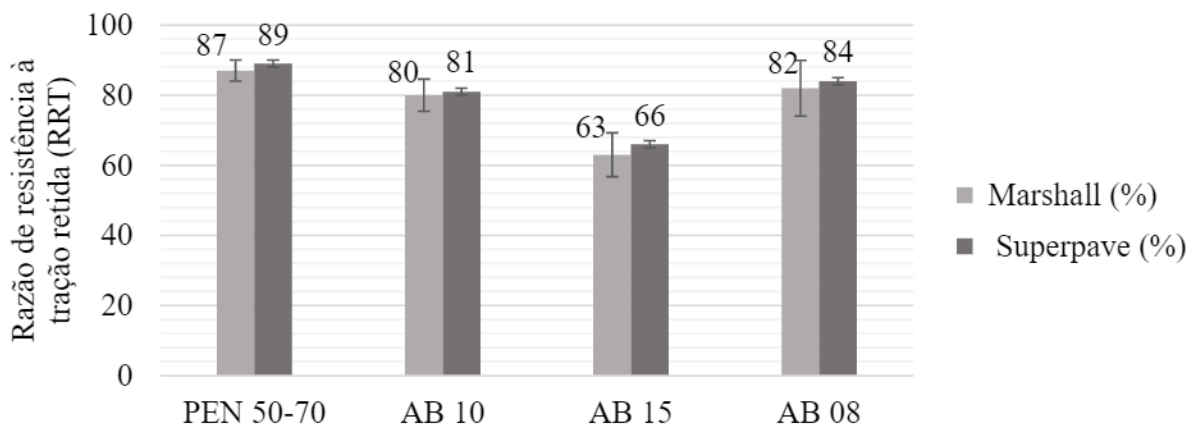


Figura 5. Resultados do ensaio de dano por umidade induzida para cada mistura.

A Figura 5 mostra que todas as misturas, com exceção da mistura AB15, atenderam ao requisito mínimo de RRT de 80%, conforme especificado na AASHTO T 283/2002. Menores valores de RRT foram obtidos para as misturas com o ligante asfalto-borracha. O *California Department of Transportation* observou que as misturas densas com o ligante asfalto-borracha são mais suscetíveis aos efeitos da umidade que as misturas convencionais. Portanto, recomenda-se o uso de aditivos melhoradores de adesividade nessas misturas (Shatnawi, 2001).

Neste estudo, foi utilizado um aditivo melhorador de adesividade em todas as misturas. As misturas AB10 e AB08 apresentaram boa resistência ao dano por umidade, embora os resultados tenham sido inferiores aos da mistura PEN 50-70. Em relação à mistura AB15, o uso do aditivo não foi suficiente para que a mistura atingisse o limite mínimo de 80% recomendado pela norma. Isso indica que essa mistura é mais suscetível ao dano por umidade.

3.4.4 Flow Number (FN)

A Figura 6 mostra os resultados do ensaio de FN para as misturas usando o método *Superpave*.

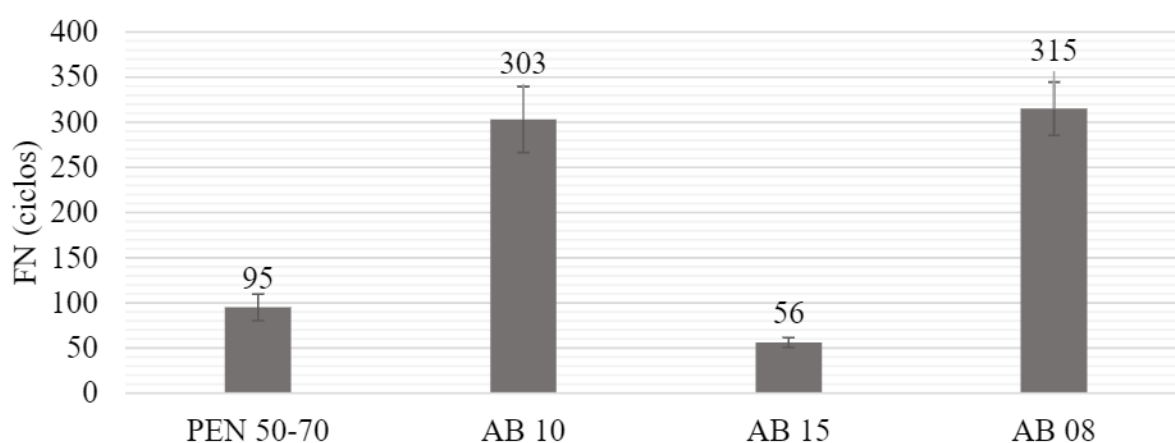


Figura 6. Resultados do ensaio de FN.

De acordo com a Figura 6, as misturas com os ligantes AB10 e AB08 apresentam melhores resultados em relação à mistura com o ligante convencional. Isso indica que essas misturas possuem uma maior resistência à deformação permanente. Os valores mais baixos para a mistura AB15 eram esperados devido aos resultados nos ensaios anteriores, que demonstraram que o maior teor de borracha e a menor homogeneidade afetaram negativamente o desempenho mecânico dessa mistura.

4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise de variância (ANOVA) é um método estatístico que permite comparações entre médias de diferentes populações. Por isso, este método foi utilizado neste estudo para comparar o desempenho das diferentes misturas em cada ensaio. Para a ANOVA, o tipo de mistura (ou tipo de ligante no caso dos ensaios físicos) foi a variável explicativa. Quatro níveis (tratamentos) foram considerados: PEN 50-70, AB08, AB10 e AB15. Além disso, assumiu-se um nível de significância de 5% para testar duas hipóteses:

H_0 : os valores das médias dos tratamentos são iguais;

H_1 : pelo menos uma das médias dos tratamentos é distinta das demais.

A hipótese nula é rejeitada se o p-valor for menor ou igual ao nível de significância. Após o teste das hipóteses, foi aplicado o teste de Tukey para determinar se os pares de tratamentos eram

significativamente diferentes ou não. Os resultados do teste de Tukey são apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8, para os ensaios físicos, mecânicos com método *Marshall* e mecânicos com método *Superpave*, respectivamente.

Tabela 6. Resultados do teste de Tukey para os ensaios físicos.

Tratamento		p-valor – comparando pares de médias (ij)				
(i)	(j)	Penetração	Ponto de Amolecimento	Viscosidade Brookfield	Recuperação Elástica	Estabilidade à Estocagem
PEN 50-70	AB08	0,00000	0,00033	0,00000	0,00000	0,00171
	AB10	0,00000	0,00033	0,00000	0,00000	0,00336
	AB15	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00006
AB08	AB10	0,91770	1,00000	0,28040	0,39200	0,93380
	AB15	0,00010	0,55530	0,00000	0,00000	0,03246
AB10	AB15	0,00018	0,55530	0,00000	0,00030	0,01464

*A diferença entre as médias é significativa no nível 0,05.

Tabela 7. Resultados do teste de Tukey para os ensaios mecânicos com o método *Marshall*

Tratamento		p-valor - comparando pares de médias (ij)		
(i)	(j)	RT	MR	Dano por Umidade Induzida
PEN 50-70	AB08	0,00114	0,03360	0,71820
	AB10	0,00272	0,01633	0,48400
	AB15	0,95610	0,02392	0,00401
AB08	AB10	0,86120	0,94980	0,97230
	AB15	0,00198	0,99430	0,01556
AB10	AB15	0,00495	0,99160	0,02776

* A diferença entre as médias é significativa no nível 0,05.

Table 8. Resultados do teste de Tukey para os ensaios mecânicos com o Método *Superpave*

Tratamento		p-valor - comparando pares de médias (ij)			
(i)	(j)	RT	MR	Dano por Umidade Induzida	FN
PEN 50-70	AB08	0,00006	0,81640	0,42600	0,00002
	AB10	0,00036	0,74480	0,12140	0,00003
	AB15	0,00066	0,85530	0,00035	0,28970
AB08	AB10	0,21800	0,99900	0,77230	0,93140
	AB15	0,09347	0,99980	0,00184	0,00000
AB10	AB15	0,92500	0,99580	0,00539	0,00000

* A diferença entre as médias é significativa no nível 0,05.

As Tabelas 6, 7 e 8 mostram que a hipótese nula foi rejeitada para todos os ensaios, exceto o Módulo de Resiliência pelo método *Superpave* (ou seja, houve diferenças significativas entre as médias dos tratamentos). Além disso, os ligantes AB08 e AB10, bem como as misturas com esses ligantes, não apresentaram valores médios significativamente diferentes (ou seja, p-valor superior a 0,05). Isso indica que não há diferenças estatisticamente significativas entre as propriedades físicas e mecânicas dos dois ligantes.

A Tabela 6 mostra que houve diferenças significativas entre o ligante convencional (PEN 50-70) e os ligantes asfalto-borracha em todos os ensaios. Isso indica que os ligantes asfalto-borracha possuem propriedades físicas diferentes em relação ao PEN 50-70, o que indica que a borracha altera as propriedades físicas das misturas. Nenhuma diferença significativa era esperada no desempenho dos ligantes AB08, AB10 e AB15, uma vez que o ligante AB15 não atendeu aos requisitos mínimos dos ensaios físicos.

Para os ensaios mecânicos pelo método *Marshall*, os resultados da Tabela 7 indicam que não houve diferenças significativas nas capacidades de resistência à tração das misturas com os ligantes PEN 50-70 e AB15. Da mesma forma, não foram encontradas diferenças entre os resultados do ensaio de dano por umidade induzida das misturas com PEN 50-70, AB08 e AB10. Portanto, pode-se dizer que a redução da RRT nas misturas com AB08 e AB10 não afetou a resistência à umidade dessas misturas. O efeito oposto foi observado no ensaio de módulo de resiliência. Neste ensaio, a redução do MR das misturas asfalto-borracha em relação à mistura PEN 50-70 pode ser considerada significativa.

A Tabela 8 indica que os resultados obtidos com o método *Superpave* não apresentam diferenças significativas no ensaio de MR. Como este método simula as condições de campo de forma mais eficiente que o método *Marshall*, acredita-se que as misturas com asfalto-borracha não apresentam grandes variações de MR em relação à mistura PEN 50-70. Nos ensaios de RT e FN, verificou-se que houve diferenças significativas entre as misturas PEN 50-70, AB08 e AB10. Assim, pode-se dizer que o aumento de RT e FN observado nas misturas AB08 e AB10, foi de fato relevante em relação aos valores apresentados pela mistura PEN 50-70. Quanto ao ensaio de dano por umidade induzida, diferenças significativas foram observadas apenas com a mistura AB15. Isso era esperado, já que essa mistura mostrou uma maior redução no ensaio de dano por umidade induzida.

5. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste estudo foi avaliar o desempenho mecânico de misturas asfalto-borracha, através de ensaios laboratoriais utilizados para a construção de pavimentos flexíveis. Nesse sentido, após a análise estatística realizada, pode-se afirmar que as misturas asfalto-borracha apresentaram melhor desempenho em relação à mistura PEN 50-70, o que torna seu uso viável. Uma maior recuperação elástica, uma menor suscetibilidade térmica, uma maior resistência à tração e a ocorrência de deformações permanentes podem ser citadas como vantagens das misturas AB08 e AB10 em relação à mistura PEN 50-70.

O ligante AB15 não pode ser utilizado em misturas asfálticas por não atender aos requisitos de recuperação elástica. No entanto, em alguns ensaios, teve um desempenho semelhante ao asfalto-convencional (PEN 50-70), e no caso do ensaio de MR semelhante também aos demais asfaltos-borracha. Portanto, acredita-se que o desempenho dessa mistura poderia ter sido satisfatório em todos os ensaios, se tivesse sido acrescentado algum agente compatibilizante ao ligante AB15, que aumentasse a sua homogeneidade.

Em todos os testes, as misturas AB10 e AB08 não apresentaram diferenças significativas. Isso significa que não foram encontradas diferenças significativas no desempenho mecânico dessas misturas, neste estudo. No entanto, o AB08 já é produzido em larga escala, o que o torna mais atrativo que o ligante AB10, produzido em laboratório para este estudo. Portanto, o uso do ligante AB08 seria mais adequado para a construção de rodovias.

Para a seleção granulométrica, o método FAD estima bom desempenho mecânico para valores de porosidade abaixo de 50%, mas essa estimativa não foi válida para a mistura AB15. No entanto, o desempenho inferior desta mistura é provavelmente devido à qualidade inferior do ligante AB15 (que em relação à escolha granulométrica). Portanto, nesta pesquisa não pode ser considerada insatisfatória a utilização do método FAD para a previsão do desempenho mecânico das misturas.

Quanto ao método de compactação, confirmou-se a tendência de estudos anteriores (Jitsangiam *et al.*, 2013; Swami *et al.*, 2004; Asi, 2007): os resultados do método *Superpave* foram melhores que os resultados do método *Marshall* em todos os ensaios. Por isso, o método *Superpave* deve ser preferido para a compactação de misturas asfálticas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, à empresa Greca Asfaltos, pela doação do asfalto-borracha, e à empresa DAFONTE Pneus, pela doação da borracha triturada de pneus. Agradecemos também aos técnicos de laboratório e colegas que ajudaram no desenvolvimento da pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2002). *AASHTO T 283 Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture induced damage*. Washington, D.C.
- Asi, I. M. (2007), *Performance evaluation of Superpave and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions*. Construction and Building Materials. 21:1732–1740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.036>.
- Assis, S. R. H., Queiroz, B. O., Araújo, C. C., Nunes, K. K. F., Melo, R. A., Lucena L. C. F. L. (2017), *Evaluation of limestone crushed dust aggregates in hot mix asphalt*. Construction and Building Materials. 148: 659-665. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.107>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 16505: Misturas asfálticas-Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida*. Rio de Janeiro.
- ASTM International. (2012). *ASTM 4402/D4402M Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotation al viscometer*.
- ASTM International. (2019). *ASTM D6114/D6114M-19 Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*.
- Bueno, M., Luong, J., Terán, F., Viñuela, U., Paje, S.E. (2014), *Macrotecture influence on vibrational mechanisms of the tyre-road noise of an asphalt rubber pavement*. International Journal of Pavement Engineering. 15:606-613. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2013.790547>.
- Chiu C., Lu, L. (2007), *A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber*. Construction and Building Materials. 21:1027–1033. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.02.005.
- Dantas Neto, S. A., Farias, M. M, Pais, J. C., Pereira, P. A. A., Sousa, J. B. (2006), *Influence of crumb rubber and digestion time on the asphalt rubber binders*. Road Materials and Pavement Design. 7:131–148. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690030>.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2009). *DNIT 112:2009-EM: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2009). *DNIT 111:2009-EM: Pavimentação flexível-Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de material*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006), *DNIT 031/2006 – ME– Método de ensaio. Pavimentos flexíveis - concreto asfáltico - especificação de serviço*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (1995). *DNER 043/1995–ME: Misturas Betuminosas a Quente. Ensaio Marshall – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2010). *DNIT 136/2010–ME: Método de Ensaio. Pavimentos flexíveis- Misturas asfálticas–Determinação da resistência à tração por*

compressão diametral. Rio de Janeiro.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2018). *DNIT135/2018–ME: Pavimentação asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.

Ding, X., Ma, T., Zhang, W., Zhang, D. (2017), *Experimental study of stable crumb rubber asphalt and asphalt mixture*. Construction and Building Materials. 157:975–981. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.164>.

Greene, J., Chun, S., Choubane, B. (2014), *Enhanced Gradation Guidelines to Improve Asphalt Mixture Performance*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2456: 3–10. <https://doi.org/10.3141/2456-01>.

Jitsangiam, P., Chindaprasirt, P., Nikraz, H. (2013), *An evaluation of the suitability of Superpave and Marshall asphalt mix designs as they relate to Thailand's climatic conditions*. Construction and Building Materials. 40:961–970. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.011>.

Kim, S., Roque, R., Birgisson, B., Guarin, A. (2009), *Porosity of the Dominant Aggregate Size Range to Evaluate Coarse Aggregate Structure of Asphalt Mixtures*. Journal of Materials in Civil Engineering. 21: 32–39. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2009\)21:1\(32\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:1(32))

Lee, S., Akisetv, C.K., Amirkhanian, S. N. (2008), *Recycling of laboratory-prepared long-term aged binders containing crumb rubber modifier*. Construction and Building Materials. 22:1906–1913. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.012>.

Lo Presti, D. (2013), *Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review*. Construction and Building Materials. 49 863-881. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>.

Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza F., Gallegos C. (2004), *Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens*. Fuel. 83:2041–2049. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.04.003>.

Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza F., Gallegos C. (2005), *Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen*. Energy & Fuels. 19:1984-1990. <https://doi.org/10.1021/ef049699a>

Navarro, F. M., Gámez, M. C. R. (2012). *Influence of Crumb Rubber on the Indirect Tensile Strength and Stiffness Modulus of Hot Bituminous Mixes*. Journal of materials in civil engineering. 24(6):715–724. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000436](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000436).

Palit, S. K., Reddy, K. S., Pandey, B. B. (2004), *Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes*. Journal of Materials in Civil Engineering, 16(1): 45–53. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2004\)16:1\(45\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2004)16:1(45)).

Picado-Santos, L.G., Capitão, S. D., Neves, J. M.C. (2020), *Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review*. Construction and Building Materials. 247:118577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118577>.

Setyawan, A., Febrianto, N., Sarwono, D. (2017), *Design and Properties of Thin Surfacing Hot Mix Asphalt Containing Crumb Rubber as Partial Aggregate Replacement*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 75: 1-6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/75/1/012016>.

Shatnawi, S. (2001), *Performance of Asphalt Rubber Mixes in California*. International Journal of Pavement Engineering. 2(1): 1-16. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430108901713>.

Shen, J., Amirkhanian, S., Xiao, F., Tang, B. (2009), *Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders*. Construction and Building Materials. 23: 304–310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.005>.

Sol-Sánchez, M., Jiménez del Barco Carrión, A., Hidalgo-Arroyo, A., Moreno-Navarro, F., Saiz, L., Rubio-Gámez, M. del C. (2020), *Viability of producing sustainable asphalt mixtures with crumb rubber bitumen at reduced temperatures*. Construction and Building Materials. 265:120154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120154>.

- Swami, B.L.; Mehta, Y.A.; Bose, S. (2004), *A Comparison of the Marshall and Superpave Design Procedure for Materials Sourced in India*. International Journal of Pavement Engineering. 5(3):163-173. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430412331309115>.
- Thives, L. P. (2009), “*Optimizing the performance of bituminous mixtures with rubber modified bitumen for pavement rehabilitation*”. Phd Thesis. University of Minho/ Federal University of Santa Catarina, p.581.
- Xiang, L., Cheng, J., Que, G. (2009), *Microstructure and performance of crumb rubber modified asphalt*. Construction and Building Materials. 23:3586–3590, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.038>.
- Yetkin, Y. (2007), *Polymer modified asphalt binders*. Construction and Building Materials. 21: 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>.