



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURA ASFÁLTICA COMPOSTA POR PÉLETES DE ASFALTO-BORRACHA COMPARADO COM AS CLASSES DE FADIGA DO MEDINA

Ivana Gomes Maia¹; Laura M. Goretti da Motta²; Roberto Quental Coutinho³; Vinicius Peraça⁴

RESUMO

Os principais defeitos incidentes nos pavimentos asfálticos brasileiros são fadiga e deformação permanente. Para levar em conta no dimensionamento pode-se incrementar a espessura das camadas, melhorar a dosagem da mistura asfáltica, ou realizar a substituição do material asfáltico convencional por um modificado, minorando assim, as tensões e deformações que incidem na estrutura. Os péletes de asfalto-borracha, designação dada à sua comercialização de forma processada como pequenas pelotas, são materiais recentes no mercado de pavimentação que surgiram de forma a simplificar o processo de obtenção e uso de asfalto-borracha. Nesse sistema de produção, alguns produtores de péletes adicionam a borracha granulada de pneus usados e polímeros ao ligante, além de outros aditivos (fibras e fíleres minerais), antes do processo de peletização. O material resultante da peletização pode ser ensacado e estocado na forma seca à temperatura ambiente, não necessitando de aquecimento constante, reduzindo as emissões de CO². Este pélete pode ser projetado para ser misturado diretamente aos agregados, ou em determinadas composições, modificando o ligante asfáltico. O objetivo deste trabalho foi analisar a combinação de agregados provenientes da pedra Sepetiba/RJ, atendendo aos requisitos de uma mistura do tipo Gap-Graded, com uma amostra de pélete de asfalto-borracha, cedido por uma empresa produtora, para testar o produto compondo uma mistura asfáltica. Assim foram obtidas propriedades de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência a Tração (RT), de modo a comparar o desempenho da mistura com as classes de fadiga de misturas asfálticas do método MeDiNa.

PALAVRAS-CHAVE: péletes de asfalto-borracha; sustentabilidade; módulo de resiliência; fadiga; MeDiNa.

ABSTRACT

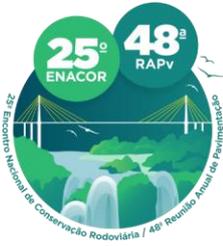
The main pathologies incident on Brazilian pavements are fatigue and permanent deformation. To avoid them, you can increase the thickness of the layers, improve the dosage of the asphalt mixture, or replace the conventional asphalt material with a modified thus reducing the tensions and deformations that affect the structure. Rubber-asphalt pellets, the name given to their commercialization in processed form as small pellets, are very recent materials in the paving market and emerged to simplify the process of obtaining and using rubber-asphalt. In this production system, some pellet producers add granulated rubber from used tires and polymers to the binder, as well as other additives (fibers and mineral fillers) before the pelletizing process. The material resulting from pelletizing can be bagged and stored dry at room temperature, not requiring constant heating, reducing CO² emissions. The pellet can be designed to be mixed directly with the aggregates, or in certain compositions, modifying the asphalt binder. The objective of this work was to analyze the combination of aggregates from the Sepetiba/RJ quarry, meeting the requirements of a Gap-Graded type mixture, with a sample of rubber-asphalt pellets, provided by the company, to test the product by composing an asphalt mixture. It was possible to establish the properties of the Resilience Modulus (MR) and Tensile Strength (RT), to compare its performance with the fatigue classes of asphalt mixtures from MeDiNa method.

KEY WORDS: rubber-asphalt pellets; sustainability; resilience module; fatigue; MeDiNa.

¹ Universidade Federal de Pernambuco, ivana.maia@ufpe.br; roberto.coutinho@ufpe.br³

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, laura@coc.ufrj.br

⁴ Future Motion Brasil, vinicius.peraca@future-motion.eu



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

A preparação de uma mistura asfáltica a quente convencional requer uma quantidade significativa de energia para aquecer e manter uma temperatura que seja suficiente para que o ligante asfáltico permaneça na condição utilizável. Numa mistura asfáltica a quente, além do ligante asfáltico ser aquecido para modificar a sua viscosidade, o agregado é secado para remover a sua umidade e aquecido antes de ser misturado com o ligante asfáltico (Bailey, 2010).

No Brasil, a partir de 1990, o Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES) e algumas universidades começaram a investigar o comportamento da borracha de pneu inservível como agente modificador do ligante asfáltico (Fontes, 2009). Leite (1999) relatou que para aumentar a resistência ao envelhecimento, à fadiga e à deformação permanente, fazem-se adições de diferentes polímeros ou de borracha moída de pneus ao cimento asfáltico de petróleo (CAP). A borracha moída de pneus é um modificador versátil e durável e os asfaltos-borracha proporcionam bom desempenho à fadiga e à deformação permanente, como mostram Leite (1999), Oda (2000), Bertollo (2002), Specht (2004), Lima (2008), Camargo (2016) e Nunes (2017), entre outros.

Os asfaltos-borracha de 4ª geração ou péletes (*Pellets* em inglês), são comercializados como pequenas pelotas visando simplificar sua aplicação. A composição dos péletes inclui borracha de pneu, polímero SBS, cal hidratada, cimento Portland, fibras, fíleres minerais e agente “peletizante” (Phoenix Industries, 2021).

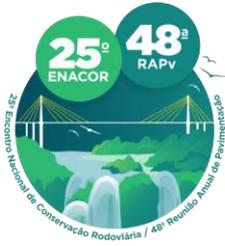
Uma das vantagens dos péletes de asfalto-borracha é a facilidade de transporte do material a temperatura ambiente, usando todos os meios de transporte possíveis. Diferente dos ligantes asfálticos tradicionais, os péletes não precisam de aquecimento durante o transporte sendo transportados como um sólido e não como um líquido. A versatilidade dessa tecnologia tem amplas implicações para a resolução de problemas como transporte para locais remotos, estabilidade de temperatura, evita eventual segregação de aglutinantes/aditivos, evita alto consumo de energia, atende a cronogramas de produção lentos, não gera materiais residuais e proporciona segurança do trabalhador (King, 2015). Os péletes podem ser empregados em misturas contínuas, adicionados ao ligante e/ou aos agregados e imediatamente aplicados, não requerendo estabilidade à estocagem.

O principal objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho de amostras de péletes de asfalto-borracha e estabelecer as suas propriedades mecânicas compondo uma mistura asfáltica. Para alcançar esta meta, foram executados ensaios de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR). Para esta mistura asfáltica foi realizada uma comparação com as quatro classes de misturas asfálticas que estão estabelecidas no novo método de dimensionamento do DNIT - MeDiNa.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Péletes de asfalto-borracha

A nova geração de asfalto-borracha (péletes) é obtida pela adição de pó de borracha de pneus em forma de péletes a um ligante asfáltico convencional. A patente US 2010/0056669 cita que os péletes são constituídos de cimento asfáltico, borracha moída de pneu (15 a 30% em peso), materiais finos provenientes da cal hidratada, rochas minerais, ceras e polímeros (Bailey, 2010). Outra patente americana da Phoenix Industries, US 8404164/2013 também trata da peletização do asfalto-borracha (Sockwell, 2013).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



De acordo com Bailey (2010) os péletes de asfalto podem ser armazenados a temperatura ambiente em sacos ou em recipientes sem haver aglomeração pegajosa, porque as pelotas asfálticas individuais são configuradas para permanecerem estáveis e unitárias. No entanto, algum grau de união pode ocorrer, desde que as pelotas mantenham alguma fluidez para serem derramadas de um saco, escavadas e manuseadas como pelotas.

Amirkhanian, Xiao e Sockwell (2015) confirmam este processo de produção informando que o filer é cal hidratada e, após a formação dos péletes, estes são revestidos para evitar coagulação.

Nesse sistema de produção, alguns produtores de péletes adicionam a borracha granulada de pneus usados e polímeros ao ligante, assim como outros aditivos (fibras e fíleres minerais), antes do processo de peletização. O material resultante da peletização pode ser ensacado e estocado na forma seca à temperatura ambiente, não necessitando aquecimento constante, reduzindo consideravelmente as emissões de CO₂, sendo considerado uma alternativa sustentável sem necessidade de tanques agitados e equipamentos adicionais.

Amirkhanian, Xiao e Sockwell (2015) e Nunes (2017) indicam que péletes podem ser utilizados com sucesso em misturas abertas, substituindo o asfalto-borracha *terminal blending* convencional.

Ensaio empregando simulador de tráfego em misturas dosadas pelo método Marshall mostraram que uma mistura para camada porosa de atrito com 2% péletes apresentou boa energia de fratura e excelente capacidade de drenagem em 160 ml/min de intensidade de chuva (Song *et al.*, 2022).

No Kuwait, várias análises foram realizadas para otimizar a dosagem da mistura asfáltica, pelo Marshall ou por compactação giratória (Al-Baghli, 2020; Alkheder, 2021). Foram construídos trechos experimentais, com diferentes seções para comparar o desempenho das misturas em pavimentos restaurados com tráfego de baixo a médio.

No âmbito nacional, a aplicação dos péletes foi executada em diversas operações de conservação feitas pela Concessionária Nova Dutra, na BR-116 e pela Concessionária Arteris, na BR-381, a partir de 2013.

Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa)

Segundo Fritzen *et al.* (2019), o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), exige a caracterização das misturas asfálticas pelo módulo de resiliência (MR) e conhecimento do comportamento da mistura em relação à fadiga, obtida pelo ensaio por compressão diametral. O modelo matemático utilizado é o apresentado na expressão a seguir, cujas constantes k1 e k2 são obtidas por regressão estatística dos resultados do ensaio de fadiga.

$$N = k_1 \epsilon t^{k_2} \quad (1)$$

Onde,

- N é a vida de fadiga em laboratório;
- ϵt é a deformação específica de tração; e
- k1 e k2 são constantes de regressão.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



Os ensaios de dano por umidade induzida (DUI) e de Flow Number (FN) também são exigidos para garantia da qualidade das misturas no aspecto de adesividade e resistência à deformação permanente, respectivamente.

Cabe destacar uma grande pesquisa que foi realizada com mais de 100 segmentos experimentais na Cidade Universitária da UFRJ, entre 2012 e 2016 denominada Projeto Fundação, realizada na COPPE/UFRJ. Dentre estes segmentos, alguns foram selecionados para contribuir com o desenvolvimento e calibração do método MeDiNa. Foi possível verificar a porcentagem de área trincada prevista que é calculada pelo MeDiNa e compará-la com a porcentagem de área trincada observada em campo. O dano pode ser definido como a razão entre a área trincada e a área total.

O Fator de Fadiga da Mistura FFM é a área abaixo da curva de fadiga (obtida a 25°C) no segmento compreendido entre 100 μ e 250 μ de deformação de tração na escala log-log, conforme ilustrado na Figura 1. O valor de 30% de área trincada foi o utilizado na calibração do programa MeDiNa.

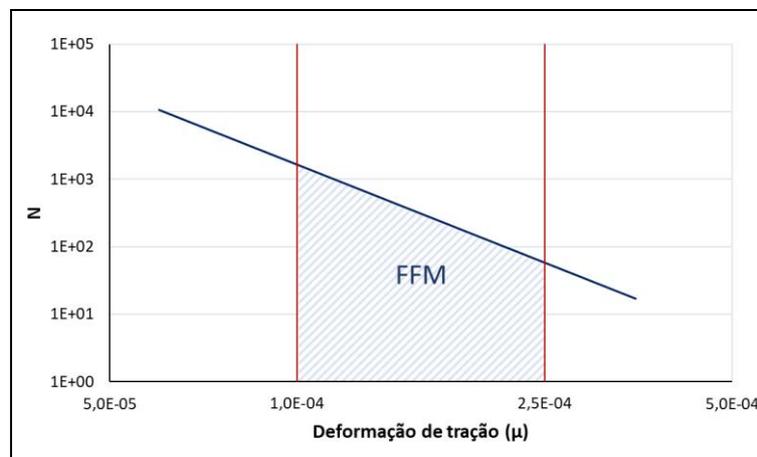
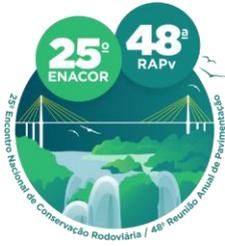


Figura 1. Fator de Fadiga da Mistura – FFM. Fonte: Fritzen *et al.* (2019).

De acordo com Fritzen *et al.* (2019) somente o fator de fadiga da mistura (FFM) não é suficiente para indicar se uma mistura asfáltica atende aos requisitos de projeto. O módulo de resiliência também atua influenciando a análise da vida de fadiga do material. As misturas de maiores módulo de resiliência trabalham com deformações de tração menores, o que poderia sugerir uma melhor resistência à fadiga. No entanto, é possível que existam misturas que, mesmo com módulos de resiliência mais baixos, e mesmo trabalhando em níveis maiores de deformação de tração, podem ter um comportamento melhor à fadiga. Ou seja, para avaliar a qualidade da mistura, é preciso correlacionar o módulo de resiliência com a curva de fadiga, de modo tal que permita verificar se irá atender ao requerido do projeto. Portanto, avaliar um dos parâmetros isoladamente não define o desempenho do pavimento.

Assim, considerando estas propriedades em conjunto (FFM e MR), as misturas asfálticas foram separadas em classes de fadiga, conforme mostra a Tabela 1. A grande maioria das misturas convencionais correntes se enquadra nas Classes 0, 1 e 2, visto que foram projetadas por métodos que não focam no desempenho das misturas à fadiga. As Classes 3 e 4 requerem um desempenho superior que é conseguido com um bom projeto de dosagem e, principalmente, com a aplicação de modificadores no ligante betuminoso (Fritzen *et al.*, 2019).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 1. Expressões das Classes de Fadiga de concreto asfáltico no software MeDiNa.

Classe Fadiga	MR (MPa)	N = k ₁ ε ^{k₂}		FFM
		K ₁	K ₂	
1	5764	5,496e ⁻¹¹	-3,253	0,84
2	6743	1,110 e ⁻¹³	-3,979	0,86
3	8000	1,000e ⁻¹²	-3,750	0,90
4	10492	1,910e ⁻⁵	-1,900	1,00

MATERIAIS E MÉTODOS

Mas

Ligantes asfálticos

Para esta pesquisa foram utilizados dois tipos de ligantes asfálticos:

- Convencional CAP 50/70, da REDUC;
- Péletes de asfalto-borracha: “*PelletPAVE-Plus*” (PPP), fornecidos pela empresa Phoenix Industries/USA, empregados em processo úmido contínuo.

Segundo o fabricante, o *PPP* é um asfalto-borracha híbrido, ou seja, contém também copolímero SBS em sua formulação e, ainda, 12% a 15% de um pó de borracha fino, para uso em misturas asfálticas densas. Os ligantes modificados utilizados na presente pesquisa foram nomeados como:

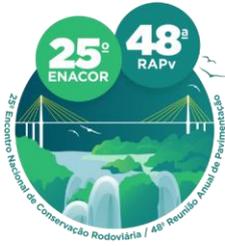
- CAP 50/70 + *PelletPAVE-Plus* com adição de 30% com relação à massa total do ligante: CAP 50/70 + 30% PPP;
- CAP 50/70 + *PelletPAVE-Plus* com adição de 25% com relação à massa total do ligante: CAP 50/70 + 25% PPP.

Agregados e Curva granulométrica

Os agregados empregados neste estudo foram procedentes da pedra Sepetiba, localizada na região metropolitana do Rio de Janeiro/RJ e disponíveis no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia a maioria das propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc. (Bernucci *et al.*, 2010).

Para esta pesquisa foi utilizada a caracterização física dos agregados minerais vistas em Fritzen (2016). Os ensaios constam na Tabela 2, considerados válidos tendo em vista que os agregados estão estocados de forma protegida no Laboratório. A curva granulométrica da mistura asfáltica respeitou os limites da faixa descontínua recomendados pela Norma DNIT 112/09 – ES e está mostrada na Tabela 3.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 2. Propriedades físicas dos agregados minerais da pedra Sepetiba que foram usados nesta pesquisa.

Propriedades	Resultados
	Agregados
Partículas chatas e alongadas	1%
Perda por abrasão Los Angeles	43,3%
Massa específica real dos agregados graúdos	2,792
Massa específica aparente dos agregados graúdos	2,669
Absorção dos agregados graúdos	0,8%
Massa específica real dos agregados miúdos	2,781
Massa específica aparente dos agregados miúdos	2,693
Absorção dos agregados miúdos	3,01%
Equivalente de areia	84%
Angularidade dos agregados miúdos – Método A	40%
Ensaio de durabilidade - sanidade	10,3%

Fonte: Adaptada de Fritzen (2016).

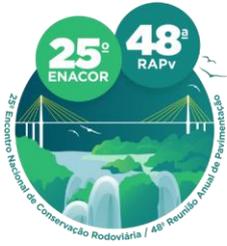
Tabela 3. Características da faixa granulométrica utilizada para as misturas asfálticas desta pesquisa.

Faixa descontínua utilizada na pesquisa - <i>Gap Graded</i>		
Abertura nominal	# (mm)	Massa Retida (g)
3/4	19	0
1/2	12,5	360
3/8	9,5	1008
4	4,75	1800
8	2,36	648
16	1,18	1512
40	0,425	576
100	0,15	576
200	0,075	288
	fundo	288
	cal	144
	total (g)	7200

Há várias gradações de agregado que têm sido usadas na produção de misturas de asfalto-borracha. Embora ligantes modificados com borracha melhorem o desempenho de misturas asfálticas em geral, verificou-se que gradações descontínuas são mais adequadas para produzir misturas de asfalto-borracha. As suas características de desempenho são significativamente melhores em comparação com misturas densas quando se utiliza asfalto-borracha (Venudharan *et al.*, 2016).

Péletes de asfalto-borracha

A Figura 2 mostra uma amostra de péletes de asfalto-borracha utilizados nesta pesquisa e a Figura 3 o misturador do tipo bater com palheta para incorporação dos péletes ao CAP 50/70. A temperatura indicada pelo fabricante para mistura é entre 165°C e 175°C. O processo consistiu em aquecer o CAP 50/70 a 170°C por pelo menos uma hora. Para a proporção de 30% de péletes,



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



1400g de CAP foram adicionados no galão e 600g de péletes. Para a proporção de 25%, os péletes foram aquecidos junto ao agregado.



Figura 2. Amostra de péletes de asfalto-borracha utilizados nesta pesquisa - *PelletPAVE-Plus (PPP)*.



Figura 3. Agitador de hélice com câmara de aquecimento para modificação do ligante com pélete.

Metodologia

Foram testadas misturas asfálticas com curva granulométrica descontínua do tipo *Gap-Graded* (DNIT 112/09 – ES), sempre com os mesmos agregados e variando o ligante, utilizando a metodologia *Superpave* de dosagem. Curvas descontínuas são indicadas na literatura para este tipo de composição com péletes.

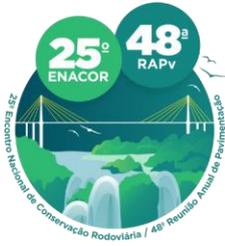
A Norma DNIT 412/19 - ME trata do método de ensaio para análise granulométrica dos agregados das misturas asfálticas. Para a composição das misturas utilizadas nesta pesquisa foi selecionada uma curva granulométrica descontínua do tipo *Gap-Graded*, que é uma faixa granulométrica especial que resulta em macrotextura superficial aberta ou rugosa, mas não em teor de vazios elevado (Bernucci *et al.*, 2010).

Segundo os requisitos de projeto volumétrico Superpave (AASHTO M 323) a curva granulométrica deve estar contida entre pontos de controle nela especificados em função do tamanho máximo nominal (TMN) do agregado e que se evitem misturas com granulometria sobre a linha de densidade máxima. Definiu-se para esta pesquisa o TMN dos agregados como 19mm.

Cada mistura de concreto asfáltico da presente pesquisa foi dosada segundo os critérios do método Superpave, considerando-se na escolha do teor de projeto de ligante, o percentual de 96% da massa específica máxima medida, Gmm, (4% de vazios de ar) a um dado número de giros de compactação (Nprojeto) em função do tráfego. Os vazios de 4% são indicados também para esta mistura descontínua que é utilizada em camada de rolamento, como foi avaliado, por exemplo, por Nunes (2017), que também analisou péletes. Os ensaios de massa específica dos materiais; viscosidade (curva temperatura x viscosidade); massa específica máxima medida (Gmm) e o cálculo da massa específica aparente da mistura asfáltica compactada (Gmb) fornecem os parâmetros volumétricos das misturas que deverão se situar dentro das faixas especificadas pela AASHTO M 323/2022.

Os passos para a dosagem foram os seguintes:

- a) Caracterização dos agregados e montagem da curva granulométrica;



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



- b) Adição dos péletes de asfalto-borracha ao ligante convencional em proporção pré-definida de 30% em relação à massa total do ligante. A faixa de temperatura de mistura foi a indicada pelo fornecedor (165°C a 175°C);
- c) Preparação das amostras para os corpos de prova de dosagem nos teores de ligante de cada tipo de modificação;
- d) As amostras das misturas não compactadas permaneceram durante duas horas em estufa na temperatura de compactação, objetivando simular o envelhecimento de curto prazo;
- e) Para definição do teor de projeto foram compactados 2 corpos de prova (cp) no teor de ligante inicial, além de mais três outros teores, conforme o intervalo de variação padrão (*Superpave*), sendo moldados 8 corpos de prova para cada mistura, pesando 1200g cada um quando executados no molde de 100mm de diâmetro e alguns outros foram moldados no cilindro de 150mm de diâmetro e peso proporcional;
- f) Definido o teor de projeto, para os cps destinados aos ensaios mecânicos fez-se uma batelada para separar duas amostras de 2500g por mistura dosada para a determinação da massa específica máxima medida (Gmm) pelo método Rice (ABNT NBR 15619/2016).

Os agregados e os ligantes foram misturados no misturador francês do Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ, sendo este pré-aquecido na temperatura de compactação. Utilizou-se o compactador giratório para a moldagem dos cps para os ensaios mecânicos (DNIT 178/2018). O número de giros de projeto adotado foi $N_{proj} = 100$ que representa um tráfego para vias de tráfego médio a pesado. Para a moldagem dos cps no teor de projeto, destinados aos ensaios mecânicos foi utilizado um molde de 100mm de diâmetro e também foram feitos cps de 150mm de diâmetro. A temperatura para mistura foi de 170°C e para a compactação entre 150 e 160°C. Dois tipos de misturas foram usados nesta pesquisa, conforme segue:

- Mistura asfáltica com granulometria descontínua, composta por CAP 50/70 + *PelletPAVE-Plus*, com adição de 30% com relação à massa total do ligante denominada 50/70 + 30% PPP;
- Mistura asfáltica, com granulometria descontínua, composta por CAP 50/70 + *PelletPAVE-Plus*, com adição de 25% com relação à massa total do ligante denominada CAP 50/70 + 25% PPP.

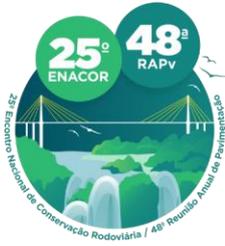
Para a produção das misturas asfálticas, o ligante asfáltico convencional (CAP 50/70) foi modificado por meio da incorporação de péletes de asfalto-borracha na proporção de 30% com relação à massa total de ligante asfáltico, mas também foram testadas misturas asfálticas aquecendo os péletes junto com os agregados na proporção de 25%, com relação à massa total do ligante conforme indicação feita pelo fornecedor dos péletes. A caracterização das misturas asfálticas para previsão do desempenho foi realizada por meio dos ensaios de Resistência à tração por compressão diametral – RT (DNIT 136/2018 – ME) e Módulo de resiliência – MR (DNIT 135/2018 – ME). A vida de fadiga foi estimada e não será apresentada, podendo ser consultada em Maia (2023).

RESULTADOS

Dados volumétricos e mecânicos das dosagens

Num primeiro momento, como indicativo, considerou-se o teor de 8,3% de ligante obtido por Nunes (2017) como tentativa de teor ótimo provável. A curva granulométrica utilizada pela autora citada também foi descontínua (Gap Graded) e manteve-se constante durante a pesquisa de Nunes.

O ligante usado corresponde a 30% de Pellet plus + Cap 50/70, modificado no laboratório de ligantes (aproximadamente 1 hora no misturador), por meio do misturador (agitador) de ligantes modificados. Os teores de ligante adotados foram de 7% a 9%, variando 0,5% entre eles. Após a compactação dos corpos de prova percebeu-se que havia uma concentração de parte dos péletes em



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



alguns pontos da superfície do corpo de prova (Figura 4), mesmo deixando a massa asfáltica por um tempo quatro vezes maior de usinagem do que de misturas convencionais ou modificadas com polímero, por exemplo.



Figura 4. Excesso de ligante na superfície de um corpo de prova com péletes.

Na Tabela 4, mostram-se os parâmetros volumétricos da dosagem com cps de 100mm de diâmetro utilizando ligante modificado por péletes. Foram realizados os Gmm de todos os teores e os Vv% ficaram muito abaixo de 4%, critério de determinação do teor ótimo para esse tipo de mistura asfáltica. Infere-se que o excesso de ligante na superfície dos cps, que ocorreu em todos os teores pode ter ocasionado uma superfície externa muito fechada, o que justificaria o volume de vazios baixo. No entanto, houve variação das características mecânicas com os teores de ligante, e teores de 7,5% e 8,0% resultaram nos maiores valores de MR e RT.

Diante dos resultados iniciais encontrados, optou-se por pesar os péletes previamente para a formulação das misturas de asfalto-borracha e adicioná-los na forma seca ao agregado durante o estágio de aquecimento da mistura seguido da quantidade requerida de ligante asfáltico. Destaca-se que mesmo nesta forma de adição, os péletes também não se dispersaram de forma adequada e uniforme por toda a massa, mesmo após o aquecimento da mistura. Também foi realizado um teste com teor de ligante de 5,5% de ligante modificado (CAP 50/70 + 30% PPP), conforme usado na dosagem. A Tabela 05 mostra os resultados obtidos e os Vv% apresentaram resultados muito elevados (aproximadamente 10%) e os agregados graúdos não ficaram totalmente cobertos pelo ligante, mesmo deixando um tempo a mais na usinagem. Isso também foi observado no teor de 7%.

Foram moldados dois cps com diâmetro de 150 mm e assim foi possível checar o Vv e, em seguida, extrair cps do centro com 10 cm de diâmetro e 6,2 cm de altura. Os resultados podem ser vistos na Tabela 06. No caso dos cps com 150 mm os Vv% ficaram mais próximos do volume de vazios alvo. Porém, os cps extraídos do centro apresentaram uma redução significativa em relação ao Vv% previsto. A Tabela 7 mostra os resultados dos dados volumétricos e mecânicos das dosagens de 25% *PelletPave-Plus* (com relação à massa total de ligante) aquecido junto com o agregado e no teor médio de 7,05% sendo essa uma segunda forma de preparação da adição de péletes à mistura. Segundo Rocha e Pacheco (2021) na adição de maior quantidade de péletes de asfalto-borracha, há diminuição da resistência à tração, porém, em níveis controlados, aumento da resistência à fadiga e à deformação permanente e melhoria da flexibilidade a baixas temperaturas, o que se verificou também na presente pesquisa.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 04. Dados volumétricos e mecânicos da dosagem de 30% de *PelletPave-Plus* 30% + CAP 50/70 (ligante modificado com incorporação de pélete de asfalto-borracha).

Nº DO CORPO DE PROVA		ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	MEA	Ensaio	MR	MR Médio	RT	RT Médio	TEOR	Gmm	Vv
Lab	Proj											
24337	1	6.18	10.01	2.531	MR/RT	9325	9500	2.08	2.13	7.5%	2.535	0.2
24338	2	6.21	10.01	2.529		10842		2.11			2.535	0.2
24339	3	6.18	10.02	2.539		8334		2.20			2.535	-0.1
24340	4	6.24	10.01	2.520		9266	9038	2.04	2.10	8.0%	2.518	-0.1
24341	5	6.25	10.01	2.517		8024		2.07			2.518	0.0
24342	6	6.24	10.01	2.518		9825	2.18	2.518	0.0			
24343	7	6.30	10.01	2.497		5641	5925	2.10	1.72	8.5%	2.497	0.0
24344	8	6.27	10.02	2.478		6208		1.91			2.497	0.8
24345	9	6.30	10.03	2.488		5926		1.16			2.497	0.4
24346	10	6.10	10.02	2.523		5587	5854	1.42	1.73	9.0%	2.475	-1.9
24347	11	6.13	10.01	2.521		5942		1.86			2.475	-1.9
24348	12	6.15	10.02	2.513		6034		1.91			2.475	-1.5
24349	13	6.24	10.00	2.523		9906	9597	2.39	2.30	7.0%	2.545	0.9
24350	14	6.34	10.01	2.508		8711		2.26			2.545	1.4
24351	15	6.37	10.01	2.505		10175	2.25	2.545	1.6			

Tabela 05. Dados volumétricos e mecânicos da dosagem de 30% de PPP + CAP 50/70 (ligante modificado com incorporação de pélete de asfalto-borracha).

Nº DO CORPO DE PROVA		ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	MEA	Ensaio	TEOR	Gmm	Vv
Lab	Proj							
24367	1	6.77	10.14	2.305	DOSAGEM	5.5%	2.610	11.7
24368	2	6.70	10.10	2.344			2.610	10.2
24369	3	6.69	10.08	2.363			2.610	9.5

Tabela 06. Dados volumétricos e mecânicos da dosagem de 30% de *PelletPave-Plus* + CAP 50/70 (ligante modificado com incorporação de pélete de asfalto-borracha) com cps de 150mm de diâmetro e amostras extraídas do centro.

Nº DO CORPO DE PROVA		ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	MEA	Ensaio	Gmm	Vv
Lab	Proj						
24365	1	10.96	15.03	2.439	TESTE	2.518	3.1
24366	2	10.89	15.03	2.448		2.518	2.8
24365	1	6.22	10.03	2.506		2.518	0.5
24366	2	6.21	10.05	2.517		2.518	0.0

Comparativo de desempenho com as classes de fadiga de misturas asfálticas do MeDiNa

No método de dimensionamento MeDiNa do DNIT foi estabelecido uma padronização dos concretos asfálticos quanto à fadiga com 4 classes, sendo a classe 1 menos resistente e a 4 mais resistente. As dosagens devem ser feitas para enquadrar a mistura em uma destas quatro classes que tiver sido utilizada no dimensionamento. Como uma estimativa inicial, a mistura asfáltica com 25% de péletes se enquadrou como Classe 2 ao se considerar o valor do MR obtido, conforme mostrado



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



na Tabela 7. Ainda é necessário se comparar todas as misturas com péletes em estruturas de pavimento para melhor aferir as diferenças de comportamento dos péletes para concluir quais se aplicariam melhor em várias situações de projeto.

Tabela 7. Dados volumétricos e mecânicos da dosagem de *PelletPave-Plus* aquecido junto com o agregado.

Nº DO CORPO DE PROVA		ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	MEA	Ensaio	MR	MR médio	RT	RT médio	Teor	Gmm	Vv alvo	Vv
Lab	Proj												
25030	1	6.35	10.01	2.465	MR/RT	6670.00		1.51			2.584	4.000	4.6
25031	2	6.46	10.01	2.446		6306.00	6455.33	0.90	1.04	7.05%	2.584	4.000	5.3
25032	3	6.37	10.01	2.459		6390.00		0.70			2.584	4.000	4.8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de asfalto borracha é uma alternativa viável para compor estruturas de pavimento asfáltico que demandem modificações do ligante convencional. A aplicação da borracha na forma de pélete facilita muitos aspectos construtivos e de fabricação do ligante modificado. É mais fácil incorporar a borracha de pneu já processada como péletes e garantir uma boa dispersão no ligante base. A operação de incorporação pode se realizar de forma mais adequada em vários arranjos o que viabiliza ampliar o uso do asfalto borracha nas obras. Toda nova tecnologia deve ser analisada inicialmente em laboratório e em seguida no campo, em escala maior. Há muitas variáveis a serem compatibilizadas que podem ser ajustadas de forma a se optar pela melhor proporção entre péletes e os vários ligantes asfálticos convencionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO M 323/2022 - Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design.

Amirkhanian, S. N.; Xiao, F.; Sockwell, K. (2015) Performance Properties of Polymer Modified Pelletized Asphalt Mixtures, Airfield and Highway Pavements.

Al-Baghli, H. (2020) Characterization and Design of a Crumb Rubber Modified Asphalt Mix Formulation - *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Urban and Civil Engineering* Vol:14, No:2, 2020.

Alkheder, S. (2021) Pavement performance enhancement using waste rubber; Green pavement design for Kuwait – *International Journal of environmental Research*.

Bailey, W.R. (2010) *Rubberized asphalt pellets* - Patent US 2010/0056669 A1.

Bernucci, L. L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2010). *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. 2ª edição. RJ.

Bertollo, S. A. M. (2002) *Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas Densas Modificadas com Borracha Reciclada de Pneus*. Tese (Doutorado Engenharia Civil) – USP. SP

Camargo, F. F. (2016) *Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt*. Tese (Doutorado Engenharia Civil). USP, SP.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



- DNIT 135/2018 ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência.
- DNIT 136/2018 ME: Pavimentação – Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral.
- DNIT 112/09 – ES - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço
- DNIT 412/19 – ME - Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento.
- DNIT 178/2018 – Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento.
- Fontes, L. P. (2009) *Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos*. Tese (Doutorado Engenharia Civil). Universidade Minho, Portugal.
- Fritzen, M. A. (2016). Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos. Tese de doutorado COPPE/UFRJ.
- Fritzen, M. A., Franco, F. A. C. P., Nascimento, L. A. H., Motta, L. M. G., Ubaldo, M. O. Classificação de misturas asfálticas quanto ao desempenho à fadiga. 9º Congresso Rodoviário Português (CRP), 2019.
- King, G. (2015). Asphalt Pellets: An Alternative Delivery System of Asphalt Products.
- Leite, L. F. M. (1999). *Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros*. Tese (Doutorado Engenharia Civil) – UFRJ, RJ.
- Lima, C. S. (2008). *Caracterização de Ligantes Asfálticos Modificados com Borracha de Pneu e Aditivos*. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – UFC. CE.
- Nunes, L. C. (2017) *Fadiga de misturas asfálticas descontínuas com asfalto-borracha de 4ª geração*. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – UNB. DF.
- Oda, S. (2000) *Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação*. Tese (Doutorado Engenharia Civil). USP. SP.
- Rocha, B. de O., & Feu Rosa Pacheco, R. (2021). Estudo do comportamento de misturas asfálticas modificadas com adição de borracha moída de pneus. *Revista Ifes Ciência* 7(1), 01-17. <https://doi.org/10.36524/ric.v7i1.934>
- Sockwell, K. (2013) US Patent 8404164 *Composition for pelletized bitumen and method for preparing the same*.
- Song, J.; Xie, J.; Wu, S.; Yang, C.; Chen, H.; Shi, Y. (2022) *Study on properties and improving mechanism of OGFC-13 asphalt mixtures modified by novel rubber pellets* - Construction and Building materials <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126799>.
- Specht, L. P. (2004) *Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). UFRGS, RS.
- Venudharan, V, Biligiri, K. P., Sousa A, J. B., WAY, G. B. (2016): Asphalt-rubber gap-graded mixture design practices: a state-of-the-art research review and future perspective, Road Materials and Pavement Design.