

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)

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FUNCIONAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES DO TIPO BBDR COM UTILIZAÇÃO DE MATRIZ BETUMINOSA ALTAMENTE MODIFICADA HIMA

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Luiz Henrique Teixeira¹; Breno Salgado Barra¹; Priscilla Meurer Fagundes¹; Estéfani Clara¹; Yader Alfonso Guerrero Pérez¹ & Beatriz Fieldkircher¹

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento funcional de misturas asfálticas drenantes do tipo *Béton Bitumineux Drainant* (BBDr), com a utilização de ligante betuminoso altamente modificado denominado *Highly Modified Asphalt* (HiMA), em comparação ao 60/85 E de referência, ambos modificados pelo polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS). A metodologia francesa foi utilizada como base conceitual. Para a composição granulométrica adotou-se o método teórico, utilizando as equações de Fuller-Talbot, com ausência de frações no intervalo 4/6 mm. A campanha experimental compreendeu ensaios reológicos com as matrizes betuminosas a partir de reometria por cisalhamento dinâmico (DSR) no plano complexo, bem como avaliações das misturas asfálticas quanto à habilidade de compactação com a Prensa de Cisalhamento Giratório (PCG), resistência à ação da água pelo ensaio de Duriez a 18 °C e à deformação permanente a 60 °C, além da permeabilidade vertical e horizontal, considerando os seguintes teores de dosagem: 3,58 %, 3,90 %, 4,22 % e 4,54 %. Os resultados obtidos indicaram que o maior percentual de polímero SBS utilizado na matriz HiMA, confere melhor comportamento reológico que a matriz 60/85 E. Entretanto, no que diz respeito às propriedades funcionais, este cenário contribuiu para uma redução nas taxas de permeabilidade e na habilidade de compactação. Em contrapartida, a resistência à ação da água foi muito similar à da matriz 60/85 E. Quanto à resistência à deformação permanente, verificou-se que a temperatura de 60°C utilizada na realização destes ensaios se encontra abaixo daquelas consideradas como ponto de amolecimento de ambas as matrizes, mas permitindo concluir que a matriz HiMA possui melhores indicadores de desempenho que a 60/85 E.

PALAVRAS-CHAVE: comportamento funcional; ligante altamente modificado; reologia; mistura asfáltica drenante.

ABSTRACT

The main of this research is to evaluate the functional behavior of porous asphalt mixes so-called BBDr, with use of Highly Modified Asphalt (HiMA) binder, in comparison to the reference 60/85 E, both modified by the polymer so-called Styrene-Butadiene-Styrene (SBS). French methodology was taken as conceptive basis. With regards to aggregate gradation, it was adopted the theoretical method by using Fuller-Talbot's equations, with a gap in the sieve interval 4/6 mm. The experimental campaign comprised rheological tests with the bituminous matrixes through dynamic shear reometry (DSR) in the complex plane, as well as evaluations of the asphalt mixes related to compaction ability with Giratory Shear Press, resistance to action of water after Duriez test at 18 °C and to rutting at 60 °C, besides vertical and horizontal seepage speed, considering the following asphalt binder contents: 3.58 %, 3.90 %, 4.22 % and 4.54 %. The results obtained indicated that higher SBS percent used in the HiMA matrix provides better rheological behavior than that of 60/85 E. However, with regards to the functional properties, this scenario has contributed to decrease the seepage speed and compaction ability of the asphalt mixes. On the other hand, the resistance to action of water was very similar to that of 60/85 E bituminous matrix. Concerning to rutting resistance, it was verified that the temperature of 60 °C used throughout the tests is below the softening point of both bituminous matrixes, resulting in a close performance in this contexto, but allowing to conclude that the HiMA matrix presented better performance indicators than the 60/85 E.

KEY WORDS: functional behavior; highly modified asphalt; rheology; porous asphalt mix.

¹ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC/Joinville), e-mail: henrique@cbbasfaltos.br; breno.barra@ufsc.br; priscilla@rudnickminérios.com.br; estefani.clara@hotmail.com; yagcivil@gmail.com; beatrizfieldkircher@gmail.com.



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

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

A formulação de misturas asfálticas consiste em um processo minucioso e interdependente e, não raro, o aporte ou melhoramento de uma dada característica pode afetar sensivelmente outra vertente do comportamento do material, seja de forma benéfica ou prejudicial. A um dado limite testado e viável tecnicamente, por exemplo, tem-se que o aumento gradativo do teor de ligante betuminoso nas dosagens é benéfico para o módulo de rigidez e resistência à fadiga, devido aumentar a espessura da película que envolve as partículas granulares, mas prejudicial para a resistência à deformação permanente, pois potencializa os efeitos do fenômeno da fluência (MANUEL LPC, 2007).

Ainda, a formulação das misturas asfálticas deve ser compatibilizada com as funções que o material desempenhará no campo. Logo, o modo de concepção da curva granulométrica, que tem participação majoritária na composição do produto final, apresenta uma relação direta com as características e propriedades desejáveis pelo projetista (ANDRADE *et al.*, 2020).

O tráfego contínuo, com cargas solicitantes por eixo e projeções de crescimento cada vez maiores sobre as rodovias, exige que os pavimentos sejam mais resistentes, confortáveis e seguros. Por estas razões, as vantagens técnicas e econômicas que as misturas asfálticas oferecem, em função dos materiais utilizados em suas formulações, são aspectos decisivos no âmbito da concepção e construção dos pavimentos (BARRA *et al.*, 2021).

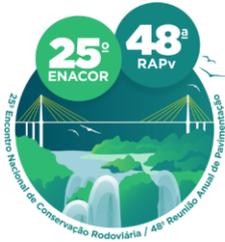
No Brasil, o projeto das estruturas dos pavimentos não prevê que a contribuição da água proveniente das precipitações pluviométricas seja percolada nas camadas superficiais de rolamento, ao contrário de países como a França e o Japão, por exemplo. Neste contexto, os revestimentos asfálticos drenantes delgados, bem como soluções ultradelgadas, com previsão de intervalos nas composições granulométricas, são utilizados para proporcionar melhoria das características funcionais, cabendo às camadas estruturais subjacentes prover a resistência às cargas solicitantes aplicadas pelo tráfego (CLARA *et al.*, 2023).

Têm-se como características funcionais a propiciação de boas condições de aplicação do material em campo, como a habilidade de compactação, bem como do conforto e da segurança propiciada ao usuário, a partir da garantia de rugosidade superficial adequada; da resistência à ação deletéria da água e à deformação permanente, e; do escoamento da água precipitada sobre a estrutura do pavimento em tempo hábil, superficialmente ou por percolação, evitando fenômenos como hidroplanagem, viscoplanagem e o efeito *spray*. Auxiliam ainda, em campo, as camadas asfálticas estruturais subjacentes no que diz respeito à proteção dos agentes intempéricos, sobretudo a radiação solar (LYU *et al.*, 2021; TEIXEIRA, 2021).

Neste contexto, o presente trabalho propõe a formulação e avaliação de misturas asfálticas drenantes do tipo BBD_r, do francês *Béton Bitumineux Drainant*, a partir do uso de ligante betuminoso altamente modificado *Highly Modified Asphalt* (HiMA), a fim de verificar as suas contribuições às características funcionais, em comparação às formulações BBD_r estudadas previamente por Fagundes (2020), produzidas com ligante betuminoso 60/85 E, compreendendo também a análise reológica no plano complexo das referidas matrizes betuminosas modificadas pelo polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), porém, em perspectivas distintas.

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE ESTRUTURAS MOLECULARES DO SBS

A estrutura molecular do copolímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) pode variar de uma cadeia linear para ramificada, também denominada radial. Ainda, a partir da estrutura molecular dos monômeros Estireno e Butadieno podem ser constituídos copolímeros SBS lineares em diblocos (SB)



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

www.rapvenacor.com.br



e triblocos (SBS), além dos radiais (MAGALHÃES, 2004).

Em geral, os copolímeros lineares SBS possuem viscosidades em temperaturas de fusão mais baixas do que os copolímeros radiais, logo, permitem temperaturas de processamento mais baixas. Entretanto, o benefício dos modificadores poliméricos depende da concentração, morfologia, peso molecular, composição química e estrutura molecular do material. Além disso, a reatividade residual do polímero é importante para melhorar a compatibilidade do modificador com o ligante. Neste contexto, a indústria de polímeros pode fornecer diferentes variações de SBS, conferindo propriedades distintas aos ligantes betuminosos (JI *et al.*, 2020).

No contexto desta pesquisa cabem alguns esclarecimentos, pois os resultados obtidos na campanha experimental confrontarão matrizes betuminosas produzidas a partir do mesmo ligante de base 50/70, porém, modificados por distintas variações de estruturas moleculares do copolímero SBS, denominadas 1101 AT e D0243. A primeira constitui o agente modificador utilizado na matriz betuminosa 60/85 E na pesquisa desenvolvida por Fagundes (2020), considerada referência para análises comparativas com a segunda utilizada na produção da matriz HiMA. As variações 1101 AT e D0243 constituem cadeias poliméricas lineares formadas por diblocos e triblocos, com menor peso molecular se comparadas às estruturas radiais. Todavia, a distribuição estrutural dos blocos é distinta, sendo aproximadamente 16,0 % de diblocos SB e 84,0 % de triblocos SBS para 1101 AT, contando ainda com uma participação praticamente desprezível de moléculas de Vinil em sua composição. Em contrapartida, a D0243 contabiliza cerca de 75,0 % de diblocos SB e 25,0 % de triblocos SBS, além do aporte significativo de moléculas de Vinil acopladas à ponta da cadeia polimérica (CHEN *et al.*, 2021).

A importância da inserção de moléculas de Vinil na cadeia polimérica da variação D0243 tange ao fato de permitir maior compatibilização com as frações apolares dos ligantes betuminosos, possibilitando a incorporação de maior percentual de diblocos em sua composição. Este procedimento é denominado de inversão de fases poliméricas (SENISE *et al.*, 2017), propiciando maior percentual de polímero incorporado na matriz HiMA (7,5 %), em comparação à Poliflex 60/85 E (4,0 %) modificada pela incorporação da variação 1101 AT.

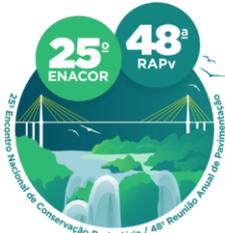
MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O material pétreo foi coletado de pedra localizada na região metropolitana da cidade de Joinville/SC, com maciço rochoso de origem gnáissica. Foram utilizadas frações granulares oriundas de mesma jazida e lote amostral caracterizado por Fagundes (2018), em que a Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios realizados.

Tabela 1. Caracterização do material pétreo (FAGUNDES, 2018).

Ensaio	Resultado	Limite Normativo	Norma (<i>apud</i> FAGUNDES, 2018)
Desgastes por Abrasão Los Angeles	17,5 %	≤ 50,0 %	DNER-ME 35/98 e DNER- EM 37/97
Durabilidade ao Sulfato de Sódio	5,3 %	≤ 12,0 %	DNER-ME 89/94 e DNER- EM 37/97
Índice de Forma (lamelaridade)	0,6	≥ 0,5	NBR 7809/2006
Adesividade ao Agregado Graúdo	Má	-	DNER-ME 78/94
Equivalente de Areia	78,0 %	-	DNER-ME 54/97
Teor de Material Pulverulento	0,4 %	≤ 1,0 %	DNER-ME 266/97 e DNER - EM 37/97



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

www.rapvenacor.com.br



Cabe esclarecer que devido à má adesividade do pó de pedra gnáissico ao ligante betuminoso, motivada pela predominância de elementos eletronegativos em sua composição mineralógica, como a sílica e o quartzo (BARRA *et al.*, 2021) houve a substituição na curva granulométrica das misturas asfálticas de parte dos 4,0 % de pó de pedra por 2,0 % de cal hidratada calcítica CH-1, na fração passante na peneira de abertura 0,075 mm.

A escolha da CH-1 e da respectiva substituição de 2,0 % ocorreram em razão da granulometria de referência utilizada em obra pública na cidade de Lille, na França (EUROVIA, 2006), ter utilizado as mesmas condições de formulação. Além disso, o forte potencial eletropositivo da cal CH-1, contribui de forma decisiva na melhoria da adesividade do conjunto granular-ligante pela formação do composto Naftanato de Cálcio, aumentando a robustez do mástique pela suspensão das partículas de finos na película de ligante que envolve os granulares, viabilizando maior resistência à desagregação das misturas (LITTLE; EPPS e SEBAALY, 2006).

Os ligantes asfálticos 60/85 E, utilizado na pesquisa de referência conduzida por Fagundes (2018) e HiMA, selecionado para este trabalho, foram fornecidos por empresa com sede em Curitiba/PR, com as seguintes características apresentadas na Tabela 2, respectivamente.

Com base nas informações da Tabela supracitada, considerando os resultados dos testes de viscosidade Brookfield, as temperaturas de usinagem e de compactação para as misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA e 60/85 E foram definidas em 167 °C e 155 °C, e 165 °C e 145 °C, respectivamente. Para os granulares foi utilizada a temperatura de 13 °C acima da usinagem, ou seja, 180 °C e 178 °C, nesta ordem, em relação aos tipos de misturas asfálticas BBDr.

Tabela 2. Caracterização das matrizes betuminosas HiMA e 60/85 E (TEIXEIRA, 2021).

Características	Unidade	Método de Ensaio (<i>apud</i> TEIXEIRA, 2021)	Resultados HiMA	Resultados 60/85 E
Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	90	65,4
Penetração, 100 g, 5 s, 25°C, 0,1 mm	0,1 mm	NBR 6576	41	40
Recuperação Elástica, 20 cm, 25 °C	%	NBR 15086	96	85
Viscosidade Brookfield (Spindle 21)	135 °C 20 rpm	NBR 15184	1775	1605
	150 °C 50 rpm		668	873
	177 °C 100 rpm		266	312

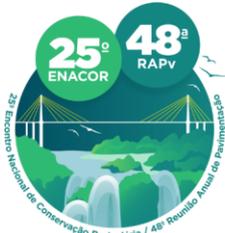
Métodos

Curva granulométrica

A curva granulométrica, apesar de ter sido baseada em solução adotada em obra pública realizada na França, conforme já mencionado, utilizando as Equações 1 e 2 de Fuller-Talbot, sofreu adaptações para que pudesse ser compatível com as aberturas de peneiras disponíveis no Brasil (Figura 1).

$$\%p = a \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (1)$$

$$n = \frac{\log(\%p_{200}) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} \quad (2)$$



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

www.rapvenacor.com.br



Onde:

%p: percentagem em peso que passa na peneira de abertura d;

a: constante, tomada igual a 100;

d: abertura da peneira, em mm;

D: tamanho máximo, abertura da peneira que passa 100%, em mm;

n: expoente de graduação da curva granulométrica, obtido pela Equação (2).

%p₂₀₀: porcentagem de material passante na peneira de nº 200;

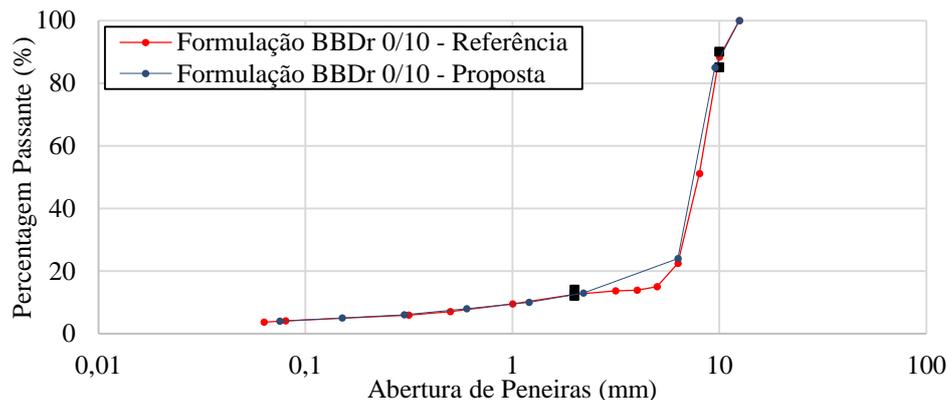


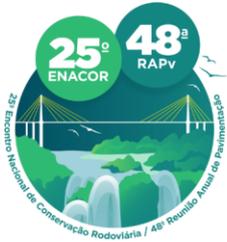
Figura 1. Curva granulométrica proposta em comparação à de referência (UNISESKY, 2018).

Observando a Figura 1, verifica-se tratar de uma formulação 0/10 mm, diâmetro máximo de 12,5 mm, %p₂₀₀ de 4,0 %, com descontinuidade no intervalo de diâmetros 4/6 mm, a fim de gerar maior quantidade de vazios com característica comunicante e, conseqüentemente, garantir a característica drenante das misturas asfálticas do tipo BBDr. Ainda, a partir da Equação 2, tem-se que o expoente de graduação 'n' para a formulação proposta é 0,63, o que se enquadra na graduação aberta, em razão de estar compreendido no intervalo $0,55 < n < 0,75$, de acordo com DNIT (2006).

Ensaio Laboratoriais

A campanha experimental iniciou com a análise reológica nos planos complexos Cole-Cole e espaço de Black das matrizes betuminosas 60/85 E e HiMA, ambas em estado virgem, a partir de reometria por cisalhamento dinâmico (DSR) (AFNOR NF EN 14770, 2012), com o intuito de correlacionar a evolução reológica da componente elástica (G') e viscosa (G'') do módulo dinâmico $|G^*|$, bem como do $|G^*|$ e do ângulo de fase (ϕ), respectivamente. Foram realizadas medições compreendendo um amplo espectro de temperaturas (-30 °C, -20 °C, -10 °C, 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C e 80 °C), em que para cada uma as frequências de 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz e 30 Hz foram testadas. Para a produção dos corpos de prova das misturas asfálticas formuladas, tem-se que os seguintes teores de ligante foram adotados, com base na pesquisa prévia de Fagundes (2018): 3,58 %, 3,90 %, 4,22 % e 4,54 %.

Ato contínuo, aplicaram-se os níveis avaliativos sequenciais e eliminatórios 1 e 2 da metodologia francesa de formulação (MANUEL LPC, 2007), compreendendo os parâmetros correspondentes à: (nível 1) habilidade de compactação com a Prensa de Compactação por cisalhamento Giratório (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), correlacionando o percentual de vazios (%V) a uma sequência de revoluções (giros) axiais do equipamento, e; resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez



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

www.rapvenacor.com.br



a 18 °C (AFNOR NF EN 12697-12, 2018), para aferir por compressão simples a resistência das formulações, comparando conjuntos de corpos de prova a seco (R) e condicionados na água por 7 dias consecutivos (r), ambos na temperatura mencionada, e; (nível 2) deformação permanente a 60 °C (AFNOR NF EN 12697-22, 2020), a partir do teste de placas compactadas em mesa pneumática. Foram consideradas para cada teor de ligante as quantidades de 3, 12 e 2 corpos de prova, respectivamente. Ainda, foram realizadas complementarmente aferições da velocidade de percolação da água (AFNOR NF EN 12697-19, 2020) sobre cada par de placas produzidas para os ensaios de resistência à deformação permanente, considerando as direções vertical e horizontal de fluxo. Cabe ressaltar que as misturas asfálticas BBDr podem ser enquadradas em uma das duas classes de desempenho previstas na referida metodologia, 1 e 2, conforme os limites normativos apresentados na Tabela 3. A Figura 2 ilustra a sequência de testes realizados durante a campanha experimental.

Tabela 3. Limites normativos considerados nos ensaios.

Ensaio	Norma	Classe da Mistura BBDr	Limites Normativos
PCG	AFNOR NF EN 12697-31 (2019)	1	$\% V_{\min} \geq 20,0 \%$ e $\% V_{\max} \leq 26,0 \%$ a 40 giros; $\% V_{\max} \geq 14,0 \%$ a 200 giros.
		2	$\% V_{\min} \geq 26,0 \%$ e $\% V_{\max} \leq 30,0 \%$ a 40 giros; $\% V_{\max} \geq 20,0 \%$ a 200 giros.
Duriez a 18 °C	AFNOR NF EN 12697-12 (2018)	1 2	$r/R \geq 0,80$
Deformação Permanente a 60 °C	AFNOR NF EN 12697-22 (2020)	1 2	$\leq 15,0 \%$ após 30.000 ciclos
Velocidade de Percolação	AFNOR NF EN 12697-19 (2020)	1	$\geq 0,8$ cm/s
		2	$\geq 1,2$ cm/s

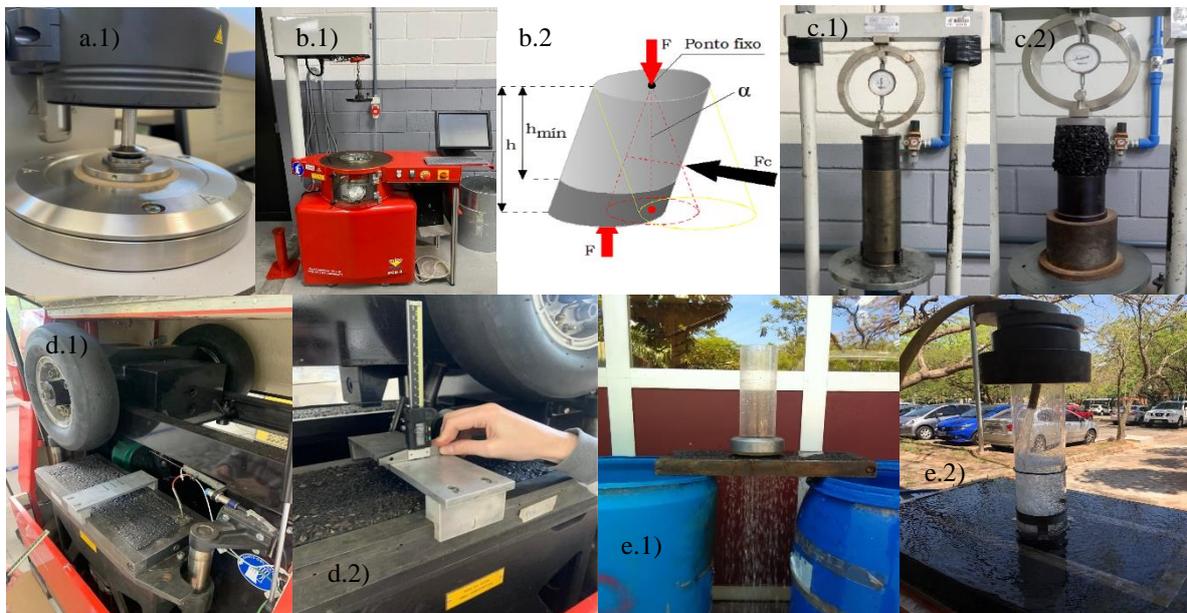
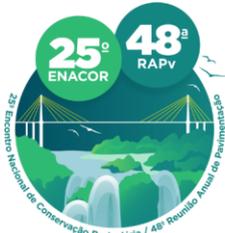


Figura 2. Sequência dos ensaios realizados na pesquisa: (a.1) DSR; (b.1 e b.2) PCG; (c.1 e c.2) Duriez a 18°C; (d.1 e d.2) deformação permanente a 60°C, e; velocidade de percolação (e.1) vertical e (e.2) horizontal.



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

www.rapvenacor.com.br



RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados deste trabalho foi comparada integralmente com os obtidos por Fagundes (2018), em razão de ser a pesquisa de referência considerada com o uso da matriz betuminosa 60/85 E, para fins de verificação do efeito da utilização da matriz HiMA em formulações de misturas asfálticas BBDr. Além disso, testou a mesma formulação de curva granulométrica, lote amostral das frações granulares e da cal CH-1 calcítica. Portanto, a única variável entre ambos os trabalhos foi apenas o tipo de ligante betuminoso, o que viabiliza a comparação direta dos resultados.

Reometria por Cisalhamento Dinâmico (DSR)

Para a compreensão dos resultados apresentados, é importante esclarecer que as colorações identificadoras nas legendas são as mesmas, a distinção se dá pelas linhas contínuas e tracejadas, correspondentes às matrizes Poliflex 60/85 E e HiMA, respectivamente.

Neste contexto, é possível verificar que a matriz HiMA é menos suscetível térmica e cineticamente que a Poliflex 60/85 E, devido apresentar maiores valores do módulo dinâmico $|G^*|$ para os mesmos ângulos de fase (ϕ) no espaço de Black (Figura 3b), considerando idênticos espectros de temperaturas e frequências de teste, indicando menores retardos na resposta da matriz HiMA às solicitações impostas. Este cenário se confirma na análise do plano Cole-Cole (Figura 3a), em que é possível observar uma tendência contínua de menores escalas dos valores correspondentes à componente viscosa (G'') do $|G^*|$ no plano complexo para a matriz HiMA, ou seja, apontando menor dissipação de energia sob a forma de calor durante a solicitação do material.

Em ambas as representações gráficas, estes cenários descritos são bem evidenciados a partir de 40 °C, e nas menores frequências de solicitação, ou seja, nas condições mais desfavoráveis de aplicação de carregamento sobre os materiais.

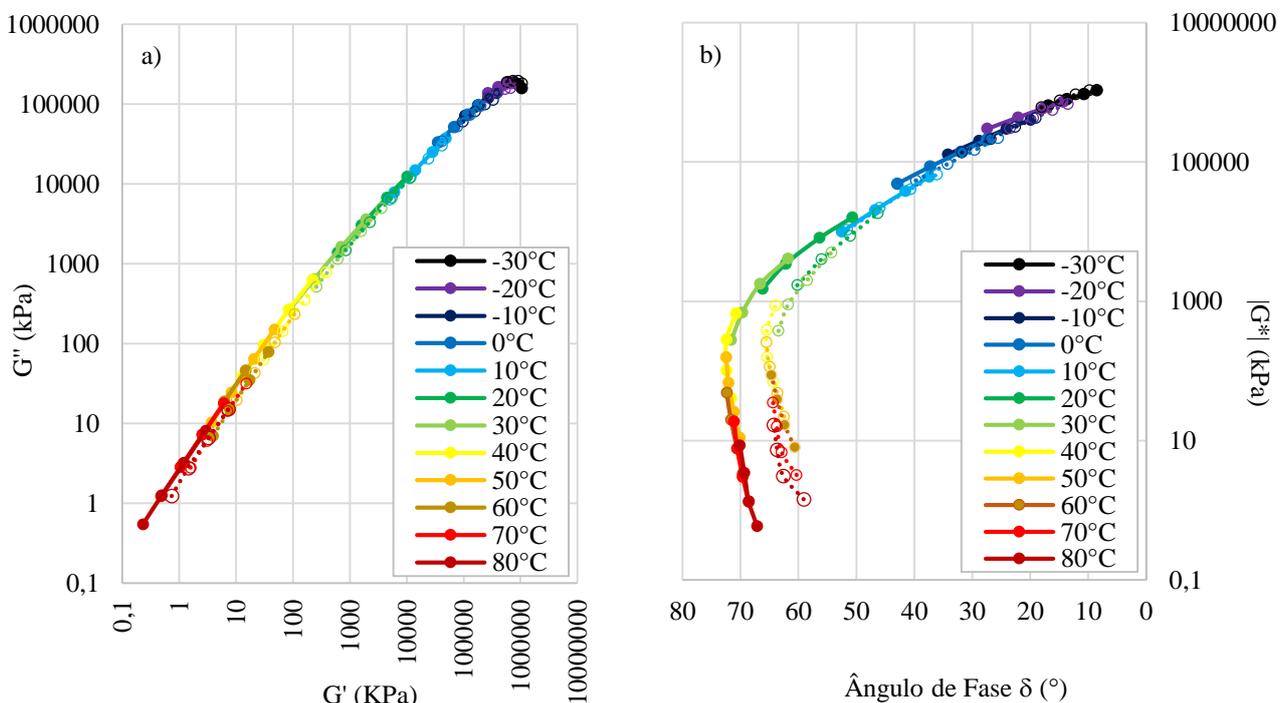


Figura 3. Representações do (a) Plano Cole-Cole e do (b) espaço de Black no plano complexo das misturas BBDr.



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

www.rapvenacor.com.br



Habilidade de Compactação na PCG

A partir dos limites normativos apresentados na Tabela 3, tem-se o enquadramento integral na classe 1 das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA. Em contrapartida, as misturas asfálticas formuladas com a matriz Poliflex 60/85 E foram plenamente enquadradas na classe 2 (Figura 4).

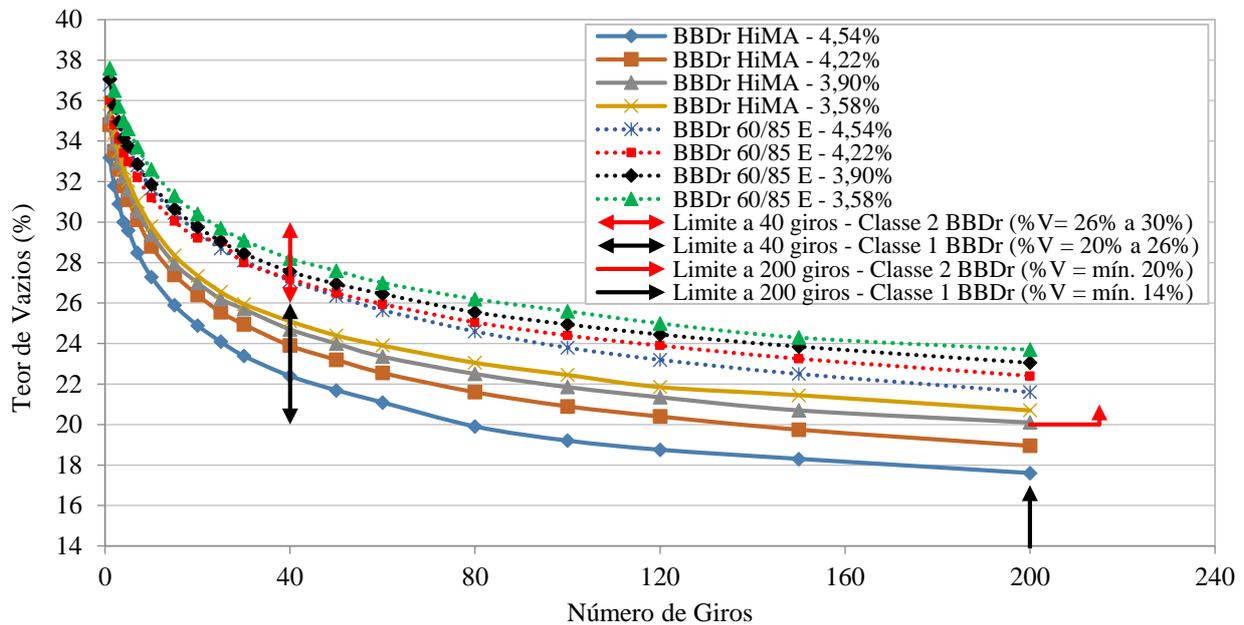


Figura 4. Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas BBDr.

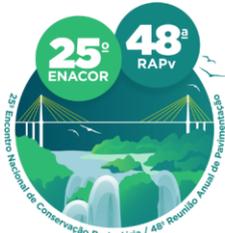
A ocorrência das reduções médias em 1,1 % e 1,2 % a 40 e 200 giros, respectivamente, em relação ao teor de vazios das misturas asfálticas formuladas com a matriz HiMA, quando comparadas à matriz 60/85 E, pode ser explicada pelas temperaturas de compactação determinadas para a execução dos testes com as misturas asfálticas, diferindo em 10 °C em favor da primeira, conforme dados apresentados na seção de materiais e métodos.

Logo, quanto maiores são as temperaturas incididas sobre um material viscoelástico, maior a fluência do ligante betuminoso, situações comprovadas pela redução da componente elástica (G') e aumento da componente viscosa (G'') no plano Cole-Cole (Figura 3a), bem como pelo aumento dos ângulos de fase (δ) no espaço de Black (Figura 3b). Estes fatores atuando em conjunto tornam as misturas asfálticas mais suscetíveis aos esforços de cisalhamento gerados durante o processo de compactação, aumentando a compacidade e reduzindo o teor de vazios.

Resistência à Ação Deletéria da Água

Todas as formulações testadas atenderam à relação mínima r/R de 0,80 estabelecida na norma AFNOR NF EN 13108-7 (2006) para misturas BBDr 0/10 mm (Tabela 3), indicando boa resistência do mástique betuminoso à ação deletéria da água.

Cabe ressaltar que esta situação é muito favorecida pela adição de 2,0% de cal hidratada calcítica CH-1 nas composições granulométricas, pois a característica majoritariamente eletropositiva da cal possibilita a formação do dipolo elétrico com a matriz betuminosa e com os granulares gnássicos



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

www.rapvenacor.com.br



eletronegativos, aumentando a interação química entre os dois materiais e, conseqüentemente, a adesão do conjunto granular-ligante e a resistência à ação deletéria da água. Ainda, ao passo em que os teores de ligante aumentam nas dosagens, ocorre a redução na formação de vazios comunicantes nos interstícios das misturas BBDr, favorecendo o alojamento da água no interior das misturas asfálticas, o que contribui para o majoramento do seu efeito deletério, notadamente a redução da resistência aos esforços mecânicos, devido à elevada tensão superficial que possui, tendendo a remover a película de ligante que envolve os granulares.

Logo, como as misturas asfálticas formuladas com as matrizes betuminosas HiMA e 60/85 E possuem a mesma composição granulométrica e os mesmos teores de ligante nas dosagens, verifica-se que o comportamento de ambas neste quesito foi praticamente idêntico (Figura 5).

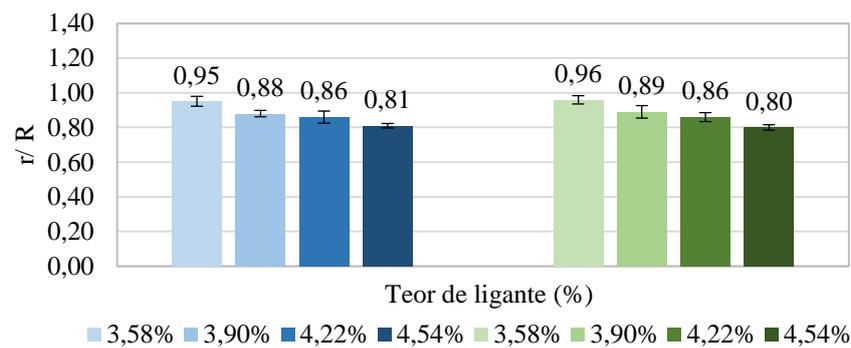


Figura 5. Resistência à ação deletéria da água r/R das misturas asfálticas BBDr: (azul) HiMA e (verde) 60/85 E.

Velocidade de Percolação

Verifica-se que todas as formulações atendem ao dobro do limite mínimo de 1,2 cm/s considerado para misturas asfálticas BBDr de classe 2, e com muita folga ao limite mínimo estabelecido para a classe 1, que é de 0,8 cm/s (Tabela 3). Logo, é possível constatar que as formulações concebidas cumprem com as características drenantes exigidas para as misturas BBDr. Neste contexto, dois cenários são verificados considerando ambas as direções de fluxo d'água: os valores de velocidade de percolação foram menores para as formulações da matriz betuminosa HiMA, quando comparadas à 60/85 E, e; as velocidades na direção vertical foram maiores que a horizontal.

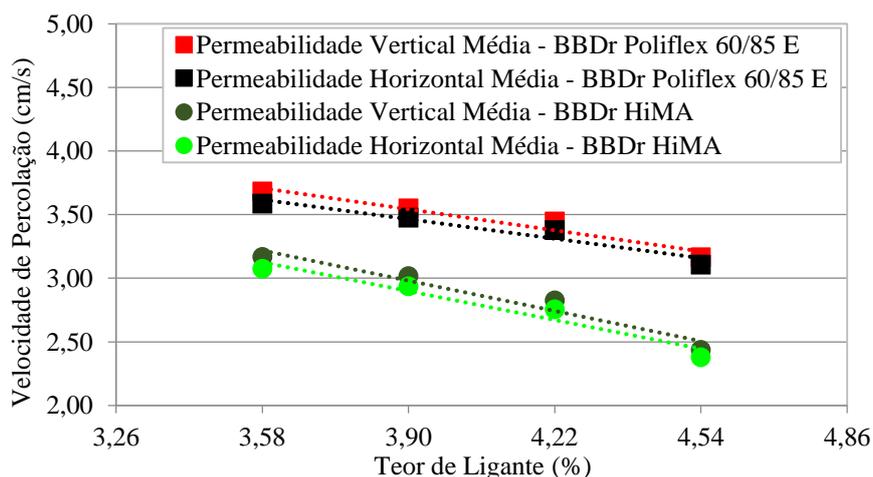


Figura 6. Velocidade de percolação das misturas asfálticas BBDr: (azul) HiMA e (verde) 60/85 E.



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

www.rapvenacor.com.br



Desta forma, para o primeiro cenário aplicam-se as mesmas considerações sobre as temperaturas de compactação utilizadas em cada matriz betuminosa, conforme já discorrido nos resultados sobre habilidade de compactação na PCG. No que diz respeito ao segundo, a ação da força gravitacional contribui sobremaneira para que maiores velocidades de fluxo sejam atingidas verticalmente no contato com a superfície da mistura asfáltica.

Resistência à Deformação Permanente

Ao comparar os resultados obtidos com as matrizes betuminosas HiMA e 60/85 E, tem-se que foram obtidos resultados muito próximos de afundamento na trilha de roda, indicados em parênteses na Figura 7 e todos bem abaixo do limite máximo especificado de 15,0 % (Tabela 3), considerando os mesmos teores de ligante, principalmente nas dosagens de 3,58 %, 3,90 % e 4,22 %.

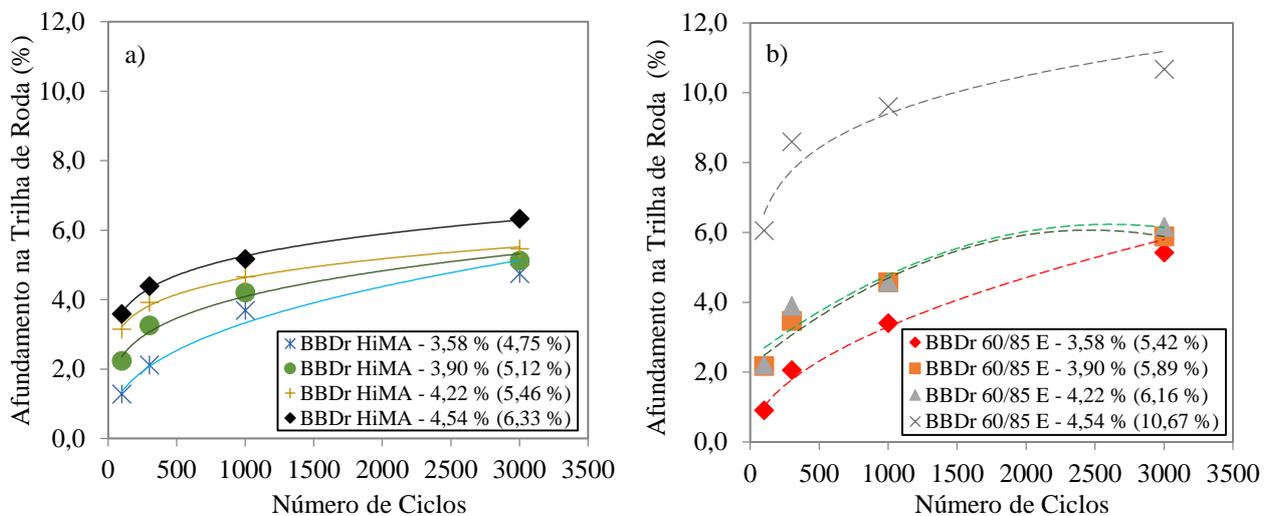
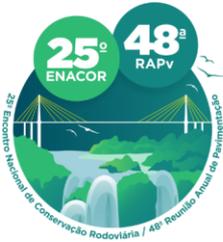


Figura 7. Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas BBDr: (a) HiMA e (b) 60/85 E.

Esta proximidade dos percentuais de afundamentos na trilha de roda para os teores de ligante entre 3,58 % e 4,22 %, é explicada em função das características dos ligantes betuminosos e das condições de execução do ensaio de deformação permanente. Neste contexto, tem-se que a metodologia francesa indica normativamente a temperatura de 60 °C para a realização do referido ensaio, enquanto os pontos de amolecimento das matrizes betuminosas 60/85 E e HiMA atingem os valores de 65,4 °C e 90 °C, aliados a uma forte recuperação elástica de 90,0 % e 96,0 %, respectivamente (Tabela 3). Logo, a suscetibilidade térmica destes materiais é pouco afetada durante os testes.

Ainda assim, verifica-se um melhor desempenho da matriz betuminosa HiMA, corroborado pelas análises do comportamento reológico efetuadas nos ensaios de DSR, pois à temperatura de 60°C apresentou menor suscetibilidade térmica e cinética à baixa frequência (1 Hz), menores retardos δ nas respostas aos esforços de cisalhamento no domínio dinâmico à elevada temperatura, além de maiores escalas de módulo de rigidez $|G^*|$.

No caso particular do teor de ligante 4,54 %, fica bem evidente o contexto reológico desfavorável à matriz 60/85 E, somado à menor viscosidade nas temperaturas superiores a 40 °C, em relação ao HiMA, conforme abordado anteriormente. Fagundes (2020) complementa que a partir da dosagem mencionada (4,54 %), as misturas asfálticas BBDr testadas parecem também atingir forte



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

www.rapvenacor.com.br



suscetibilidade mecânica, devido ao efeito de maior lubrificação do arranjo granular. Como resultado, a resistência aos esforços de cisalhamento diminui e, conseqüentemente, aumenta a deformação permanente, alcançando uma diferença não negligenciável de 4,34 % após 3000 ciclos de sollicitação, quando comparado ao mesmo teor de ligante da matriz HiMA.

CONCLUSÕES

A maior concentração polimérica da matriz betuminosa HiMA (7,5 %), em relação à 60/85 E (4,0 %), aliada aos maiores aportes tecnológicos na alteração da estrutura molecular D0243 quando comparada à 1101 AT do agente modificador SBS, respectivamente, exerce forte influência no aumento da viscosidade dinâmica do ligante betuminoso, principalmente na faixa de temperaturas de compactação das misturas asfálticas BBDr.

Como consequência, a matriz betuminosa HiMA confere menor suscetibilidade térmica e cinética no plano complexo, sobretudo no que tange à obtenção de maiores valores do módulo dinâmico $|G^*|$ e redução no tempo de resposta das formulações (φ) em relação às sollicitações impostas. Todavia, estas condições acarretam a redução do volume de vazios nos interstícios das formulações, fato observado durante a acomodação por cisalhamento das frações granulares durante os procedimentos de compactação, influenciando diretamente na maior obstrução da passagem da água e minorando a velocidade de percolação do fluxo no interior das misturas asfálticas, tanto nas direções vertical e horizontal.

Por outro lado, mesmo as formulações BBDr testadas formando uma ampla cadeia de vazios, apresentaram em geral boa resistência à ação deletéria da água, principalmente pela adição de cal hidratada calcítica CH-1 na composição do mástique betuminoso, auxiliando na formação de um dipolo elétrico de melhor atração elétrica do conjunto granular-ligante.

Quanto à resistência à deformação permanente, verificou-se que apesar da elevada temperatura de realização do ensaio (60 °C), os pontos de amolecimento de ambas as matrizes betuminosas HiMA e 60/85 E apresentaram-se superiores a este patamar e, aliados a uma forte recuperação elástica, permitiram a obtenção de formulações pouco afetadas pelo fenômeno da fluência betuminosa e, conseqüentemente com afundamentos na trilha de roda bem inferiores ao percentual máximo admitido de 15,0 %.

Portanto, com base na campanha experimental realizada, pode-se inferir que ambas as matrizes betuminosas HiMA e 60/85 E possuem viabilidade técnica para aplicação em formulações de misturas asfálticas drenantes do tipo BBDr, porém, devido às melhores características reológicas e mecânicas da matriz HiMA, tem-se que possui condições mais favoráveis de aplicação funcional em longo prazo que a 60/85 E nas estruturas de pavimento.

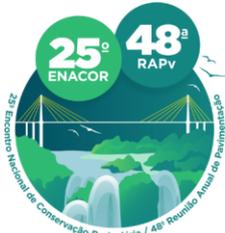
REFERÊNCIAS

AFNOR NF EN 12697-22 (2020), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 22: Essai d'orniérage. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AFNOR NF EN 12697-19 (2020), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 19: Perméabilité des éprouvettes. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AFNOR NF EN 12697-31 (2019), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 31: Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AFNOR NF EN 12697-12 (2018), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.



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

www.rapvenacor.com.br



AFNOR NF EN 14770 (2012), Bitumes et liants bitumineux: détermination du module complexe en cisaillement et de l'angle de phase – rhéométrie à cisaillement dynamique (DSR). Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

ANDRADE, V. D.; BARRA, B.; BERNUCCI, L.; MOMM, L.; GUERRERO PEREZ, Y. A.; HASTENPFLUG, D.; NIERWINSKI, H. P.; HEIDEMANN, M. (2020), Impacto da formulação de composições granulométricas nas propriedades mecânicas e funcionais de misturas asfálticas densas. *Matéria-Rio de Janeiro*, v. 25, p. e12905.

BARRA, B.; MOMM, L.; GUERRERO, Y.; MIKOWSKI, A.; CLARA, E.; NGUYEN, M-L; HUGHES, GARY B. (2021), Evaluation of technical feasibility of reusing coal ash in dense asphalt mixes by assessing mechanical performance. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 93, p. e20201662.

CHEN, M; GENG, J.; XIA, C.; HE, L.; LIU, Z. (2021), A review of phase structure of SBS modified asphalt: Affecting factors, analytical methods, phase models and improvements. *Construction and Building Materials*, Vol. 294, 123610, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123610>.

CLARA, E.; BARRA, B.; TEIXEIRA, L. H.; MIKOWSKI, A.; HUGHES, G. B.; NGUYEN, M-L (2023), Influence of polymeric molecular chain structure on the rheological-mechanical behavior of asphalt binders and porous asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, v. 369, p. 130575.

DNIT (2006), Manual de pavimentação. 3ª Edição, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR) – Publicação IPR-719, 274 p.

EUROVIA (2006), Projet d'un enrobé BBDr 0/10 porphyne lessines. Lille, France.

FAGUNDES, P. M. (2020), Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 136 p. Joinville, Santa Catarina.

JI, X.; HOU, Y.; ZOU, H.; CHEN, B.; JIANG, Y. (2020), Study of surface microscopic properties of asphalt based on atomic force microscopy. *Construction and Building Materials*, Vol. 242, 118025, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118025>.

LITTLE, D. N.; EPPS, J. A.; SEBAALY, P. E. (2006), The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt. National Lime Association, 79 p, https://www.graymont.com/sites/default/files/benefits_hydrated_lime_hot_mix_asphalt.pdf.

LYU, L; PEI, J.; HU, D.; FINI, E. H. (2021), Durability of rubberized asphalt binders containing waste cooking oil under thermal and ultraviolet aging. *Construction and Building Materials*, Vol. 299, 124282, ISSN 0950-0618, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124282>.

MAGALHÃES, S. T. Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 184 p., Rio de Janeiro, RJ.

MANUEL LPC (2007), Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 199 p. Paris, France.

SENISE, S.; CARRERA, V.; NAVARRO, F. J.; PARTAL, P. (2017), Thermomechanical and microstructural evaluation of hybrid rubberised bitumen containing a thermoplastic polymer. *Construction and Building Materials*, Vol. 157, pp. 873-884, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.126>.

TEIXEIRA, L. H. (2021), Avaliação do Comportamento Funcional de Misturas Asfálticas Drenantes do Tipo BBDr com Utilização de Matriz Betuminosa Altamente Modificada HiMA. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 176 p. Joinville, Santa Catarina.