

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)

ESTUDO DA FORMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO GRAVE-BITUME

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

Lilian Rodrigues¹; Breno Salgado Barra¹; Alexandre Mikowski¹ & Rafael Cristyan Fronza¹

RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa foi realizar o estudo da formulação de misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* (GB), bem como avaliar o desempenho à deformação permanente das dosagens propostas, para fins de aplicação como camada de base e sub-base em estruturas de pavimento. A composição granulométrica utilizada como referência foi a de graduação 0/20 mm, formulada com o uso da metodologia de Füller-Talbot. As frações granulares utilizadas foram oriundas da britagem de rocha gnáissica. A matriz betuminosa proveio de ligante base 50/70, modificado com 4,0 % de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS). As misturas asfálticas foram avaliadas com base na metodologia francesa de formulação, compreendendo os seguintes teores de ligante betuminoso: 3,90%, 4,22%, 4,54%, 4,70% e 4,86%. A campanha experimental abrangeu os níveis de habilidade de compactação com a prensa de compactação por cisalhamento giratório (PCG), resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18 °C e à deformação permanente a 60 °C. De forma complementar, foram realizados ensaios de altura da mancha de areia, a fim de determinar a rugosidade superficial das misturas asfálticas. Os resultados obtidos indicaram que todas as formulações propostas atenderam aos requisitos normativos para enquadramento das formulações como misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* de classe 4 (GB 4), considerada a de melhor característica técnica pela metodologia francesa, além de possuírem rugosidade superficial invariavelmente classificada como grossa, viabilizando boa aderência interfacial com as demais camadas do pavimento. Ainda, a dosagem de 4,54 % foi a que apresentou os melhores indicadores entre os parâmetros avaliados.

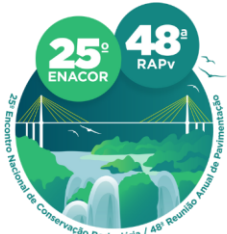
PALAVRAS-CHAVE: formulação, misturas asfálticas, grave-bitume, deformação permanente.

ABSTRACT

The main aim of this research was to carry out a formulation development of asphalt mixes so-called *Grave-Bitume* (GB), as well as to evaluate the rutting resistance performance of the proposed dosages, aiming to be applied as base and sub-base layers in asphalt pavement structures. The aggregate gradation taken as reference was 0/20 mm, which was designed by using Füller-Talbot's methodology. The aggregate particles were provided from crushed gneissic massive rock. The bituminous matrix was obtained from a neat asphalt binder 50/70, modified with 4.0% of polymer Styrene-Butadiene-Styrene (SBS). The asphalt mixes were evaluated based on the French methodology, comprising the following asphalt binder contents: 3.90%, 4.22%, 4.54%, 4.70% and 4.86%. The experimental campaign considered the levels with regards to compaction ability with use of Shear Compacting Press, resistance to action of water in Duriez test at 18 °C and to rutting at 60 °C. In addition, sand path height tests were also carried out, in order to determine the surface roughness. The results obtained indicated that all proposed formulations accomplished the standardized requirements for asphalt mixes qualified as *Grave-Bitume* from class 4 (GB 4), the best ranked by the French methodology, besides having surface roughness invariably classified as coarse, providing good interfacial adhesion to the other pavement layers. Furthermore, the dosage of 4.54 % presented the best results among the evaluated parameters.

KEY WORDS: formulation, asphalt mixes, grave-bitume, rutting.

¹ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC/Joinville), e-mail: lilian_kethelyn@hotmail.com; breno.barra@ufsc.br; alexandre.mikowski@ufsc.br; rafael.c.fronza@gmail.com



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

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

Os pavimentos rodoviários representam um importante e valioso patrimônio de um país. A gestão e manutenção da malha viária exigem estratégias cada vez mais arrojadas e criteriosas nos aspectos conceptivos e executivos dos pavimentos (GARDETE, 2006).

Neste sentido, o desenvolvimento de metodologias para a formulação de misturas asfálticas, necessita de extensos estudos conceptivos prévios com forte base científica, a fim de que se possa determinar com assertividade as propriedades dos materiais constituintes, bem como compreender o comportamento das dosagens propostas, sobretudo reológico e mecânico. Para tanto, deve-se dispor de técnicas que possuam a capacidade de testar os materiais conforme as condições mais próximas possíveis dos fenômenos observados no campo, ou seja, com estreita relação campo/laboratório, garantindo assim credibilidade aos resultados obtidos (MIKOWSKI *et al.*, 2021; BARRA *et al.*, 2016).

No que diz respeito à deformação permanente das misturas asfálticas, tem-se que é um dos defeitos com maior incidência nestes materiais, sendo caracterizada pelo afundamento longitudinal nas trilhas de roda, a partir da acumulação gradual de pequenas deformações à passagem das cargas repetidas impostas pelo tráfego, sobretudo em regime de solitação a baixa frequência, em consonância ao aumento da temperatura, condições propícias à maior fluência dos materiais betuminosos (MAHMOUD e BAHIA, 2004).

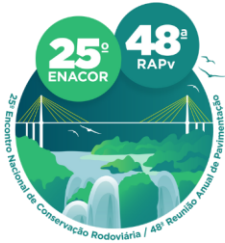
Ainda, a deformação permanente pode se desenvolver pela combinação entre a fluência e a deformação por cisalhamento da mistura asfáltica, motivadas principalmente pela característica viscoelástica linear do ligante betuminoso e por deficiência do intertravamento entre as partículas, devido à má distribuição proporcional das composições granulométricas, respectivamente, ambos os fenômenos ocorrentes no domínio dinâmico de solitação (ZHANG *et al.*, 2022; FERREIRA *et al.*, 2020; JI *et al.*, 2013).

Estas manifestações podem ocorrer em uma ou mais camadas do pavimento em que as misturas asfálticas estiverem presentes, devido às deformações resultantes da propagação das tensões na passagem do carregamento dinâmico ao longo da profundidade das estruturas de pavimento (YAO *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2021). Logo, não são restritas às camadas de rolamento, mas também ocorrem naquelas de cunho estrutural, como base e sub-base, onde são aplicadas as formulações do tipo Grave-Bitume (GB), motivação temática desta pesquisa.

No Brasil, a ocorrência de problemas associados à deformação permanente nos revestimentos asfálticos é bastante frequente, ocorrendo não raro de forma precoce em relação à vida útil de projeto prevista, comprometendo a eficiência técnica e econômica dos pavimentos em pouco tempo de serviço (DOMINGOS *et al.*, 2017; NASCIMENTO *et al.*, 2008).

A utilização de métodos mais acurados para formulação e avaliação do desempenho de misturas asfálticas apresenta-se como um fator imperativo. Neste contexto, destaca-se a metodologia francesa, a qual estuda o comportamento das misturas asfálticas, considerando situações de solitação próximas à realidade observada na prática, ou seja, compreendendo uma estreita relação campo/laboratório, variando de 0,9 a 1,3 (MANUEL LPC, 2007). Ademais, apresenta como forte característica e vantagem a versatilidade, o que permite adaptá-la ao contexto de qualquer país.

Dado o exposto, a motivação principal desta pesquisa consiste propor a concepção de formulações, bem como verificar a viabilidade técnica do uso de misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume (GB), destinadas à composição de camadas estruturais de base e sub-base em pavimentos de concreto asfáltico, com enfoque nos parâmetros de habilidade de compactação, resistência à ação deletéria da



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

www.rapvenacor.com.br



água, e sobretudo, à deformação permanente. Adicionalmente, também serão realizados ensaios de cunho funcional, como o de rugosidade superficial das misturas asfálticas produzidas.

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS MISTURAS ASFÁLTICAS GRAVE-BITUME

Desenvolvida na década de 1970, a mistura asfáltica Grave-Bitume (GB) foi a primeira técnica criada para melhorar o desempenho mecânico das camadas de apoio (base e sub-base) das redes rodoviárias destinadas a elevado nível tráfego na França, em substituição às graduações do tipo macadame. As formulações iniciais consistiam em uma curva granulométrica contínua com ligante betuminoso de penetração 30/50, conforme especificação francesa, relativamente rígido, a um baixo teor de dosagem, em torno de 4,0 % (BROSSEAUD e ST-JACQUES, 2015). No entanto, com o desenvolvimento de ligantes de alto desempenho na indústria, atualmente, tem-se especificado matrizes ou com menor penetração ou modificadas por agentes elastoméricos, como polímero ou borracha (QUINTERO, 2011).

Existem atualmente quatro classes que distinguem as formulações GB, ou seja, de 1 a 4. O enquadramento nas devidas classes depende de fatores como granulometria, teor de ligante da dosagem e, principalmente, do desempenho mecânico em cada caso, no que tange aos seguintes níveis de avaliação: (1) habilidade de compactação e resistência à ação da água; (2) deformação permanente; (3) módulo de rigidez complexo e, (4) resistência à fadiga (DIAKITÉ, 2014).

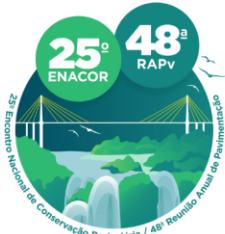
De acordo com o Manual LPC (2007), as misturas de classes 3 e 4 são as mais utilizadas para execução de estruturas de pavimento na França, enquanto as de classe 1, por serem formuladas com teores de ligante betuminoso muito baixos, atualmente, não têm sido mais recomendadas.

Em relação ao desempenho mecânico das misturas GB, devido comporem camadas com função estrutural no dimensionamento de pavimentos, devem ser testadas até o último nível (4) já mencionado. Contudo, devido à não disponibilidade de um período maior para a realização da pesquisa, a campanha experimental realizada se estendeu até o nível 2 para o momento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

As frações granulares utilizadas foram obtidas de jazida localizada na região metropolitana de Joinville/SC, situada na zona de transição do Complexo Granulítico de Santa Catarina e Granito Piraí. De acordo com Fagundes (2020), ao analisar amostras granulares da mesma origem, verificou que a macrotextura das partículas é predominantemente subangular, com textura rugosa, e com composição mineralógica compreendendo a presença de Anortita, Biotita, Albita e Quartzo, com destaque para o último, em razão da majoritária presença (acima de 50%) de Dióxido de Sílica (SiO_2), o que ratifica a sua denominação gnáissica. A Tabela 1 apresenta a caracterização das propriedades físicas deste material.



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

www.rapvenacor.com.br



Tabela 1. Caracterização do material pétreo (FAGUNDES, 2020).

Ensaio	Norma	Limites	Resultados	
			Quantitativo	Qualitativo
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/1998 e DNER-ME 037/1997	Máx. 50%	17,50 %	-
Índice de forma	ABNT NBR 7809/2006	Mín. 0,5	0,60	Bom
Resistência ao ataque químico (Durabilidade)	DNER-ME 089/1994 e DNER-ME 037/1997	Máx. 12%	5,30 %	-
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 078/1994	-	-	Má
Equivalência de areia	DNER-ME 54/1997	-	78,0 %	
Teor de material pulverulento	DNER-ME 266/1997 e DNER-ME 37/1997	Máx. 1,0%	0,40 %	-
Absorção	-	-	0,50 %	-

A partir dos resultados apresentados, tem-se que a matriz pétreo selecionada atende aos limites preconizados normativamente, sendo passíveis de utilização em misturas asfálticas. Entretanto, é importante destacar a exceção da má adesividade do granular gnáissico ao ligante betuminoso, em razão de sua composição mineralógica majoritariamente quartzosa repelir as moléculas carbônicas (C) que formam mais de 80 % da formulação do ligante (LEITE e MENEZES, 2003), pois ambos os elementos citados possuem característica eletronegativa.

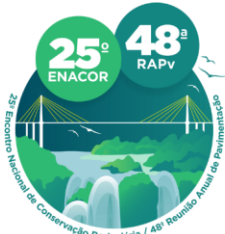
Neste contexto, cabe esclarecer, que foram utilizados 2,0 % de cal hidratada CH-1 como parte das frações granulares passantes na peneira de abertura 0,075 mm na composição das misturas asfálticas, a exemplo da dosagem aplicada na curva granulométrica de referência, que será abordada adiante. Isto se deve à natureza fortemente eletropositiva da cal pela presença de Óxido de Cálcio (CaO) \geq 90 % em sua composição (CAL CEM, 2021) compensar a má adesividade dos granulares, de origem gnáissica, ao ligante betuminoso.

Assim, a cal hidratada CH-1 desempenha a função de melhorador de adesividade, contribuindo para evitar problemas com descolamento da película de ligante betuminoso em relação à superfície das partículas granulares, fato que acarretaria o efeito de desagregação das misturas asfálticas (FAGUNDES, 2020). Ainda, tornará o mástique betuminoso mais espesso, devido ao seu caráter pozolânico e de elevada superfície específica, sendo benéfica para a resistência à deformação permanente e à fadiga (DAS e SINGH, 2017).

No que diz respeito ao ligante betuminoso, as amostras utilizadas foram fornecidas por distribuidora localizada na cidade de Curitiba/PR, a partir de uma matriz base com penetração 50/70 modificada com 4,0 % de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), denominado Poliflex 60/85 E (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização do ligante Poliflex 60/85 E (CBB Asfaltos, 2020).

Característica	Unidade	Norma	Resultado	Limites	
				Mínimo	Máximo
Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	65,4	60	-
Penetração, 100 g, 5s, 25°C, 0,1mm	0,1mm	NBR 6576	40	40	70
Recuperação Elástica, 20 cm, 25°C	%	NBR 15086	90	85	-
Viscosidade	135°C, 20 rpm		1605	-	3000
Brookfield	150°C, 50 rpm	NBR 15184	873	-	2000
(spindle 21)	177°C, 100 rpm		312	-	1000



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

www.rapvenacor.com.br



De acordo com as informações do ensaio de viscosidade Brookfield apresentadas na Tabela 2, as temperaturas de trabalho foram definidas em 165 °C para usinagem do ligante betuminoso e 145 °C para compactação das misturas asfálticas. Foi também considerada a temperatura de 178 °C para aquecimento dos granulares, ou seja, 13 °C acima da condição prevista para usinagem do ligante, atendendo ao intervalo normalmente praticado de 10 °C a 15 °C (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Métodos

Curva granulométrica

A curva granulométrica proposta para esta pesquisa utilizou como referência uma mistura asfáltica do tipo Grave-Bitume (GB) de graduação 0/20 mm, aplicada em obra pública na cidade de Dakar, no Senegal (IFSTTAR, 2012). Ainda, a partir das Equações 1 e 2 de Fuller-Talbot, a curva proposta sofreu alterações tanto nos tamanhos das aberturas de peneiras, quanto nos percentuais de distribuição fracionária, a fim de adaptar o projeto original às condições operacionais brasileiras (Figura 1).

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

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

onde:

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

a: constante igual a 100;

d: abertura de uma dada peneira, em mm;

D: diâmetro máximo, abertura da peneira em que passa 100 % das frações, em mm;

n: expoente de graduação da curva granulométrica.

%p₂₀₀: percentagem de material passante na peneira de nº 200 ou 0,075 mm.

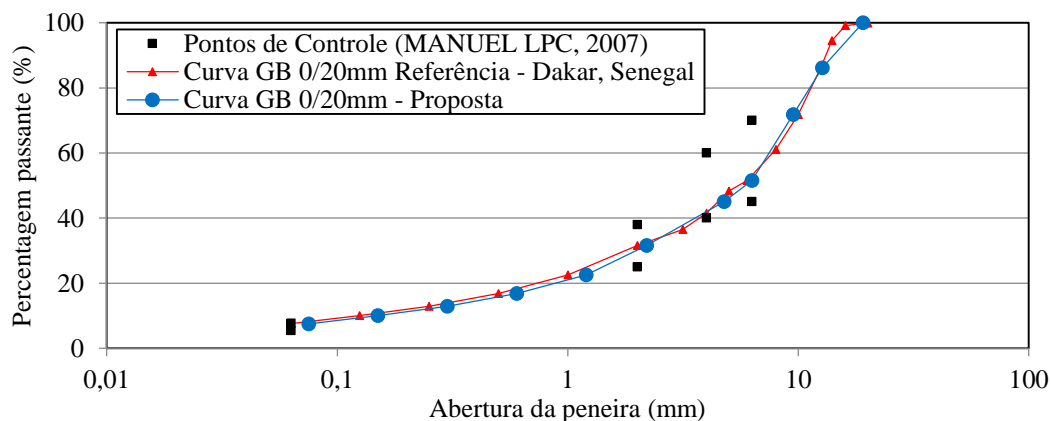
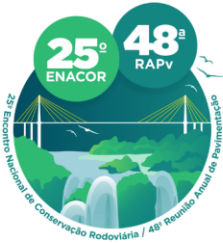


Figura 1. Curvas granulométricas de referência e proposta, em relação aos pontos de controle normativos.

Observando a Figura 1, tem-se que a formulação proposta se encontra muito próxima à curva granulométrica de referência da mistura asfáltica Grave-Bitume (GB) de graduação 0/20 mm. Ainda,



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

www.rapvenacor.com.br



a partir da Equação 2, tem-se que o expoente de graduação ‘n’ para a formulação proposta foi determinado em 0,47, confirmando a característica densa, devido enquadrar-se no intervalo $0,35 < n \leq 0,55$ (DNIT, 2006).

Ensaios laboratoriais

Foram considerados os seguintes teores de ligante betuminoso nas dosagens das misturas asfálticas durante a campanha experimental: 3,90 %, 4,22 %, 4,54 % e 4,86 %. A escolha desta faixa de valores se deve ao fato de que o projeto de referência (IFSTTAR, 2012) apresentou uma dosagem de serviço final com 4,20 %. E, como foram realizadas adaptações na curva granulométrica de referência, conforme já mencionado, bem como o tipo de ligante betuminoso utilizado também foi distinto ao originalmente utilizado, fez-se necessário avaliar variações de dosagens próximas, a fim de determinar a melhor condição de trabalho para as formulações propostas nesta pesquisa.

Em seguida, 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 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 e ordem dos ensaios descritos, as quantidades de 3, 12 e 2 corpos de prova.

Ainda, foram realizadas, complementarmente, aferições da rugosidade superficial das misturas asfálticas, sobre cada par de placas produzidas para os ensaios de resistência à deformação permanente, considerando a média de quatro medições diametrais do ensaio de mancha de areia (AFNOR NF EN 13036-1, 2010), como parâmetro para análise desta propriedade.

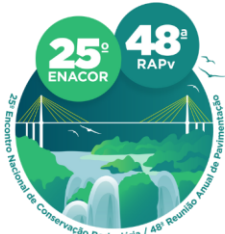
Considerando que a classe 1 das misturas GB não é mais recomendada para aplicação, conforme já mencionado, tem-se os limites normativos considerados na campanha experimental (Tabela 3).

Tabela 3. Limites normativos considerados nos ensaios.

Ensaio	Norma	Classe da Mistura GB 0/20 mm	Limites Normativos
PCG	AFNOR NF EN 12697-31 (2019)	2	$\% V_{\max} \leq 11,0 \%$ a 120 giros.
		3	$\% V_{\max} \leq 10,0 \%$ a 120 giros.
		4	$\% V_{\max} \leq 9,0 \%$ a 120 giros.
Duriez a 18 °C	AFNOR NF EN 12697-12 (2018)	2, 3 e 4	$r/R \geq 0,70$
Deformação Permanente a 60 °C	AFNOR NF EN 12697-22 (2020)	2 e 3	$\leq 10,0 \%$ após 10.000 ciclos
		4	$\leq 10,0 \%$ após 30.000 ciclos

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos durante a campanha experimental prevista para esta pesquisa, bem como as discussões técnicas correspondentes.



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

www.rapvenacor.com.br



Habilidade de Compactação na PCG

No que diz respeito à habilidade de compactação das misturas asfálticas Grave-Bitume (GB) formuladas, tem-se, que a partir dos limites normativos apresentados na Tabela 3, para a graduação 0/20 mm, foi observado o enquadramento integral na classe 4 (GB 4), devido terem apresentado em todos os casos $\%V_{m\acute{a}x} \leq 9,0\%$ a 120 giros, sendo os valores de volume de vazios aferidos em: 8,4 %, 7,3 %, 6,1 % e 5,4 % para os teores de 3,90 %, 4,22 %, 4,54 % e 4,86 %, respectivamente (Figura 2).

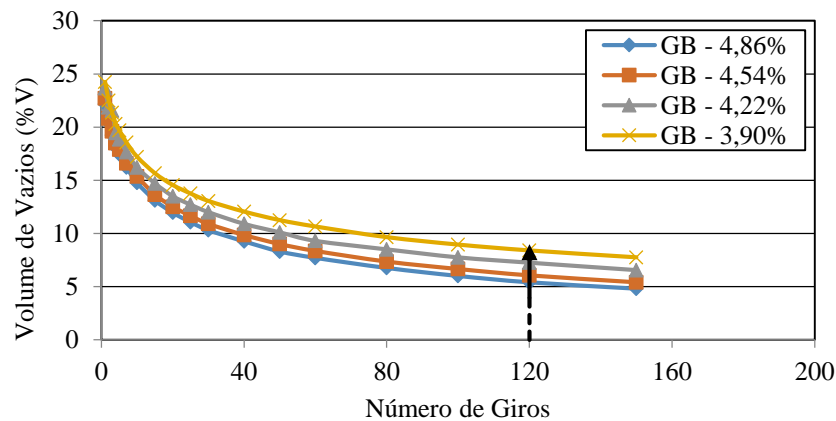


Figura 2. Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas GB 0/20 mm formuladas.

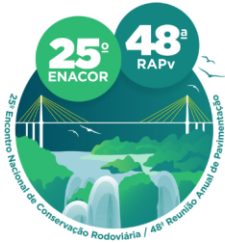
A partir da observação dos resultados apresentados, é possível atestar a existência de boa compatibilização entre o arranjo granulométrico formulado pela metodologia de Fuller-Talbot e as dosagens de ligante betuminoso selecionadas. Ainda, verifica-se que a forma e a textura dos granulares são propriedades importantes quanto à habilidade de compactação das formulações, pois a macrotextura predominantemente subangular e a superfície rugosa das partículas, contribuem para um bom intertravamento estrutural interno, acarretando em arranjos granulométricos mais estáveis mecanicamente, ou seja, menos suscetíveis às tensões cisalhantes geradas no processo de compactação.

Destaca-se, também, a influência do teor de ligante betuminoso na compacidade das misturas asfálticas, pois entre a dosagem de 4,22 % e 4,86 %, tem-se uma diferença de 3,0 % do volume de vazios. Isto é explicado pelo fato de que quanto maior a presença deste material na formulação, maior o efeito lubrificante nas interfaces de contato entre as partículas, causando perda de resistência ao cisalhamento do arranjo granulométrico, logo, maior densificação da mistura, além de um preenchimento mais efetivo dos vazios formados pela maior quantidade de ligante utilizada.

Resistência à Ação Deletéria da Água

Os valores médios obtidos nas relações r/R (Figura 3) indicam que todas as formulações propostas possuem forte resistência à ação deletéria da água, pois apresentaram resultados bem superiores ao limite mínimo exigido de 0,70 apresentado na Tabela 3.

A análise dos resultados indica, que devido à graduação densa da mistura, os vazios formados na estrutura interna do material, após o processo de compactação, não dispõem de característica comunicante, sendo dispostos majoritariamente de forma isolada no núcleo estrutural ou próximos à superfície dos corpos de prova, o que minimiza o efeito deletério da água quanto à remoção da película do ligante betuminoso que envolve os granulares.



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

www.rapvenacor.com.br



Outro fator que explica os bons indicadores obtidos, diz respeito à adição de 2,0 % de cal hidratada CH-1 calcítica na composição da curva granulométrica, em razão da natureza eletropositiva deste material, que corrobora à obtenção de boa adesividade passiva do conjunto granular-ligante betuminoso, ao espessamento da película do mástique que envolve os granulares e permite resistir à ação deletéria da água pela formação do composto Naftanato de Cálcio (LITTLE; EPPS e SEBAALY, 2006).

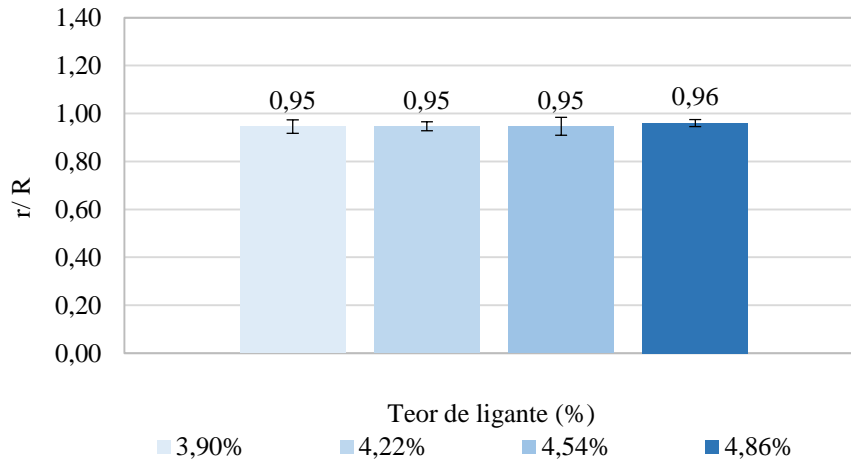


Figura 3. Resistência à ação da água das misturas asfálticas GB 0/20 mm formuladas.

Rugosidade Superficial

A macrotextura das misturas asfálticas formuladas foi determinada sobre a superfície das mesmas placas moldadas para os ensaios de deformação permanente. Em cada placa foram efetuadas 9 medições, abrangendo o centro e os bordos esquerdo e direito, tendo sido realizadas 3 medições em cada uma destas posições mencionadas (Figura 4).

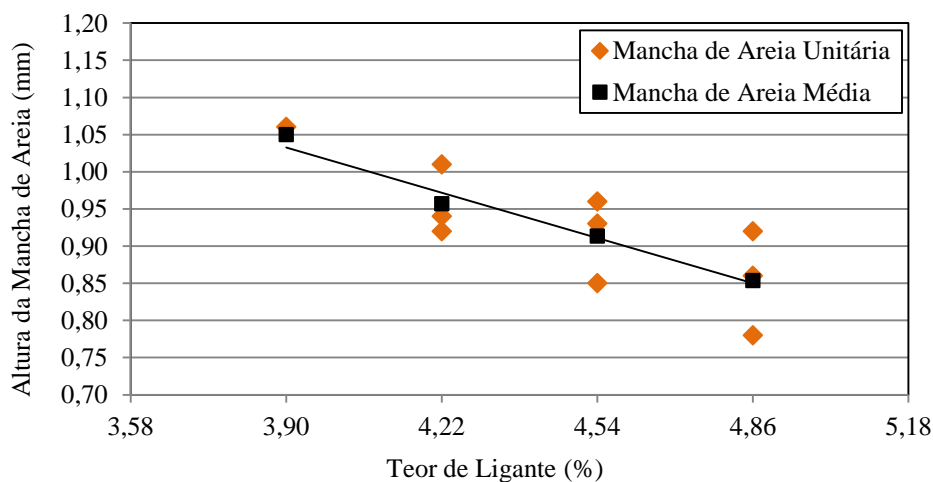
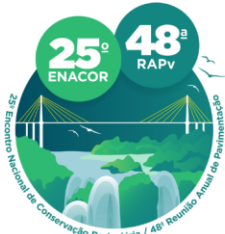


Figura 4. Altura da mancha de areia das misturas asfálticas GB 0/20 mm formuladas.

De acordo com a classificação proposta por Pasquet (1968), todas as misturas asfálticas formuladas nesta pesquisa se enquadram na textura superficial grossa, em função dos resultados obtidos terem compreendido valores entre 0,8 mm e 1,2 mm.



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

www.rapvenacor.com.br



Portanto, tem-se que o objetivo pretendido foi alcançado, que era de gerar uma rugosidade superficial das formulações propostas capazes de propiciar boa aderência com as camadas de rolamento, e mesmo entre as camadas de base e sub-base quando utilizadas na composição de estruturas betuminosas espessas, viabilizando adequada transmissão de carregamento e, evitando problemas de ausência de resistência ao cisalhamento interfacial entre as camadas.

Verifica-se também, que com o aumento do teor de ligante betuminoso, há uma diminuição da altura da mancha de areia, o que já era esperado, pois à medida em que se aumenta sua presença na formulação, diminuem-se os canais de curtos superficialmente formados pela macrotextura das misturas asfálticas, tornando a superfície cada vez mais lisa.

Resistência à Deformação Permanente

Observando os resultados obtidos (Figura 5), tem-se, que todas as formulações propostas nesta pesquisa se enquadram na classe 4 das misturas asfálticas Grave-Bitume (GB 4), pois apresentaram valores inferiores ao limite máximo de 10,0 % correspondentes ao afundamento na trilha de roda, após 30.000 ciclos à 60 °C (Tabela 3).

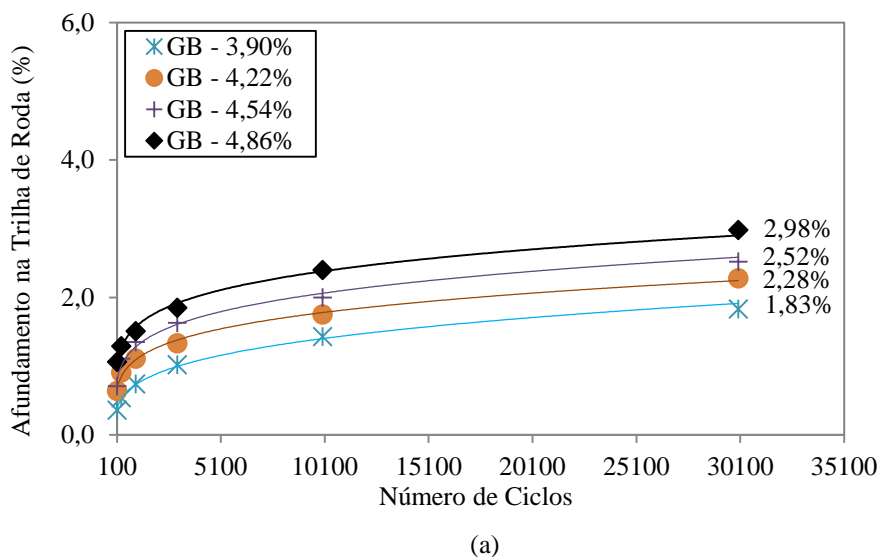
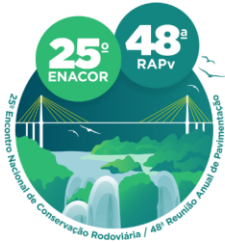


Figura 5. Visão geral do (a) afundamento na trilha de roda e, (b) do aspecto das misturas asfálticas GB 0/20 mm.

Assim como observado nos resultados referentes à habilidade de compactação com o uso da PCG, o efeito lubrificante do ligante betuminoso na interação com o arranjo granulométrico também é percebido com a diminuição da resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. O aumento gradual do percentual de dosagem diminui a efetividade do intertravamento entre as partículas, acarretando na perda progressiva do atrito interno, diminuindo a resistência ao cisalhamento das formulações, provocando o aumento dos afundamentos na trilha de roda.

Reitera-se que o ensaio é realizado de forma bem mais rigorosa que as condições observadas em campo, ou seja, a uma frequência contínua muito lenta (1 Hz) e temperatura elevada de aplicação do carregamento (60 °C). Ainda assim, todas as formulações apresentaram um excelente desempenho no que diz respeito à resistência à deformação permanente, conforme já demonstrado.

Para tanto, além de um arranjo granulométrico bem distribuído e intertravado, com boa habilidade de compactação, a qualidade do ligante betuminoso Poliflex 60/85 E contribuiu de forma decisiva aos



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

www.rapvenacor.com.br



bons resultados obtidos, pois a incorporação de 4,0 % do polímero SBS na composição da matriz base 50/70 conferiu elevada consistência no ponto de amolecimento anel e bola (65,4 °C) e forte recuperação elástica (90,0 %) (Tabela 2) ao material, tornando a mistura asfáltica muito pouco suscetível termicamente.

De acordo com BARRA *et al.* (2010), as misturas asfálticas GB a partir da classe 3 devem ser formuladas preferencialmente para aplicação em condições de solicitação adversas e intensas, como tráfego canalizado, elevada solicitação, zonas de interseção e rotatórias, por exemplo, bem como em regiões com clima relacionado a temperaturas constantemente elevadas.

Portanto, no caso das misturas asfálticas Grave-Bitume (GB), a classe 4 é a que melhor se conforma à realidade brasileira, pois as estruturas de pavimento, notadamente as camadas betuminosas, estão constantemente submetidas a severos níveis de carga por eixo e clima com temperaturas predominantemente elevadas, requerendo maior rigor em seus procedimentos conceptivos e avaliativos.

Ainda, como todas as formulações propostas de Grave-Bitume (GB) foram aprovadas na classe 4 em todos os requisitos de avaliação previstos na metodologia francesa até o nível 2, tem-se que as misturas asfálticas estão aptas a prosseguirem para os níveis 3 (módulo de rigidez complexo) e 4 (resistência à fadiga), que correspondem aos parâmetros fundamentais de formulação (MANUEL LPC, 2007), necessários ao dimensionamento das estruturas de pavimento (GUIDE TECHNIQUE, 1997).

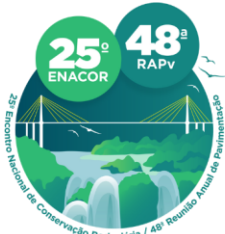
CONCLUSÕES

A metodologia de Füller-Talbot demonstrou ser bastante efetiva quanto à formação de arranjos granulométricos com graduação densa. Este aspecto aliado à utilização de granulares com macrotextura subangular e microtextura rugosa, permitiram dispor de um intertravamento adequado entre as partículas, garantindo boa estabilidade por atrito interno estrutural do arranjo granulométrico. Como consequência, verificou-se uma forte compatibilidade dos arranjos granulométricos com as dosagens de ligante betuminoso selecionadas para teste, acarretando uma habilidade de compactação apta à classe 4 de todas as misturas asfálticas testadas, ou seja, a mais nobre entre as formulações Grave-Bitume (GB 4) previstas na metodologia francesa, apresentando volume de vazios abaixo de 9,0 % após 120 giros da prensa de compactação giratória.

No que diz respeito à ação deletéria da água, todas as formulações apresentaram resultados bem acima do limite mínimo r/R de 0,70. Neste contexto, destaca-se a incorporação de 2,0 % de cal hidratada CH-1 calcítica em substituição à parte do total de finos passantes à abertura de peneira 0,075 mm. Este fator contribuiu de forma decisiva na formação de um dipolo elétrico com o ligante betuminoso, permitindo atenuar a sua eletronegatividade e gerar boa afinidade elétrica com as frações gnáissicas britadas, também com predominância eletrogenativa.

Além disso, a composição de arranjos granulométricos com graduação densa bem distribuídos, aliado a um ligante betuminoso de elevada consistência, modificado com 4,0 % da matriz polimérica SBS, resultou em uma estrutura interna com formação de vazios não comunicantes e um mástique betuminoso com uma resistente película envoltora das partículas granulares. Como consequência, as formulações testadas apresentaram perdas muito pequenas de resistência, em um máximo de 5,0 %, devido à concentração da ação da água ter ocorrido principalmente na região periférica das misturas asfálticas.

Quanto à rugosidade superficial, tem-se que todas as formulações testadas apresentaram classificação textural grossa, indicando condição apta a gerar boa aderência com as camadas superficiais de



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

www.rapvenacor.com.br



rolamento e, também entre base e sub-base, neste último caso quando aplicadas em estruturas betuminosas espessas, garantindo boa resistência ao cisalhamento nas interfaces de contato, monoliticidade e transmissão adequada do carregamento solicitante na estrutura do pavimento.

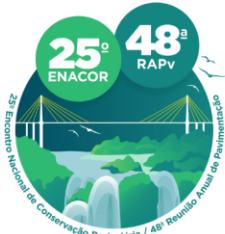
No que diz respeito à resistência à deformação permanente, todas as formulações também apresentaram resultados bem abaixo do limite máximo de 10,0 % exigido após a aplicação de 30.000 ciclos de solitação a 60 °C e frequência de 1 Hz.

Cabe esclarecer neste âmbito que, além de um arranjo granulométrico proporcionalmente bem distribuído e com forte intertravamento entre as partículas, a elevada consistência no ponto de amolecimento (65,4 °C) e recuperação elástica (90,0 %) do ligante betuminoso utilizado tornaram as formulações muito pouco termosusceptíveis. Logo, como o ensaio é realizado a 60 °C, o ligante betuminoso apresentou pouca fluência no domínio de sua componente viscosa, resultando em baixos níveis de afundamento na trilha de roda, conforme demonstrado.

Entretanto, com base na avaliação do conjunto dos resultados obtidos, recomenda-se o teor de 4,54 % entre as dosagens testadas, pois diferenciou-se dos demais por apresentar um volume de vazios que não se encontra nem próximo ao limite máximo normativo, que permita facilidade de desagregação da mistura, nem tão reduzido que represente excesso de compactabilidade do material, sobretudo ao se considerar os efeitos de densificação posteriores à liberação do pavimento ao tráfego.

REFERÊNCIAS

- AFNOR NF EN 12697-12 (2018), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Norme Européenne, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 12697-22 (2020), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 22: Essai d'orniérage. Norme Européenne, 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 Européenne, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 13036-1 (2010), Caractéristiques de surface des routes et aérodromes - Méthodes d'essai - Partie 1: mesurage de la profondeur de macrotexture de la surface d'un revêtement à l'aide d'une technique volumétrique à la tâche. Association Française de Normalisation. Paris, France.
- BARRA, B.; MOMM, L.; GUERRERO, Y.; AL-QURESHI, H. A.; MIKOWSKI, A.; MICHELS, R. (2016), Temperature implications on rheological-mechanical behavior and design of high modulus dense asphalt mix. *Construction and Building Materials*, Vol. 125, pp. 135-144, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.037>.
- BARRA, B. S.; MOMM, L.; BROSSEAUD, Y.; HORNYCH, P. (2010), Diretrizes para a Formulação e Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. *Revista Pavimentação*, v. 17, p. 38-58.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2010), *Pavimentação Asfáltica: Manual Básico para Engenheiros*. Petrobrás e ABEDA. 3ª Reimpressão, 504 p. Rio de Janeiro, RJ.
- BROSSEAUD, Y.; ST-JACQUES, M. (2015), Les Enrobés à Module Élevé: bilan de près de 30 ans d'expérience française (partie 1 de 2). *Revue Via Bitume*, Vol. 10, N° 2, pp. 8-15.
- CAL CEM (2021), *Laudo técnico de cal hidratada*. Cal Cem, Colombo/PR.
- DAS, A. K.; SINGH, D. (2017), Investigation of rutting, fracture and thermal cracking behavior of asphalt mastic containing basalt and hydrated lime fillers. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.032>.
- DIAKITÉ, I. S. (2014), *Caractérisation d'un enrobé bitumineux haute performance et évaluation de son utilisation en couche de base en remplacement d'une grave bitume*. Mémoire de maîtrise. École de Technologie Supérieure. Université du Québec, 290 p. Canadá.
- DNIT (2006), *Manual de Pavimentação*. Publicação IPR-719. 3ª Edição. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 274 p. Rio de Janeiro, Brasil.



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

www.rapvenacor.com.br



- DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L.; BERNUCCI, L. L. B. (2017), Characterization of the rutting potential of modified asphalt binders and its correlation with the mixture's rut resistance. *Construction and Building Materials*, Vol. 144, pp. 207-213, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.171>.
- 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 Engenharias e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 136 p. Joinville, SC.
- FERREIRA, J. L. S.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. (2020), A tool to design rutting resistant asphalt mixes through aggregate gradation selection. *Construction and Building Materials*, Vol. 236, 117531, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117531>.
- GARDETE, D. C. (2006), Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente. Dissertação de Mestrado submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 186 p. Coimbra, Portugal.
- GUIDE TECHNIQUE (1997), French Design Manual for Pavement Structures: Guide Technique. English Version. 1st Edition. Edited by Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) in partnership with Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA), 248 p. Paris, France.
- IFSTTAR (2012), Projèct d'une courbe granulométrique de l'enrobé Grave-Bitume (GB). Expertise Senegal Prestation 559. Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR). Dakar, Sénégal.
- JI, X.; ZHENG, N.; HOU, Y.; NIU, S. (2013), Application of asphalt mixture shear strength to evaluate pavement rutting with accelerated loading facility (ALF). *Construction and Building Materials*, Vol. 41, pp. 1-8, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.111>.
- LEITE, L. F. M.; MENEZES, S.M.C. (2003), Efeito da composição química dos ligantes na resistência ao descolamento de misturas asfálticas. In: XVII Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, CD-ROM, Rio de Janeiro, RJ.
- 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.
- MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. (2004), Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures. Wisconsin highway research program 0092-01-02. Madison, Wisconsin, EUA.
- MANUEL LPC (2007), Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST. "Formulation des enrobés". 199 p. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France.
- MIKOWSKI, A.; CASALI, R. M.; SOARES, P.; SILVA, W. B. DA; BARRA, B. S. (2021), Methodology for error propagation analysis of the complex stiffness modulus of asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, Vol. 290, 123156, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123156>.
- PASQUET, A. (1968), Campagne nationale de glissance 1967 em France. Colloque international sur la glissance et la sécuritté de la circulation sur routes moullées. 717 – 732. Berlim.
- QUINTERO, C. F. Q. (2011), Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada: formulação e comportamentomecânico. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 229 p. Florianópolis, SC.
- XU, S.; RUAN, P.; LU, Z.; LIANG, L.; HAN, B.; HONG, B. (2021), Effects of the high temperature and heavy load on the rutting resistance of cold-mix emulsified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, Vol. 298, 123831, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123831>.
- YAO, L.; LENG, Z.; JIANG, J.; NI, F.; ZHAO, Z. (2021), Nondestructive prediction of rutting resistance of in-service middle asphalt layer based on gene expression programing. *Construction and Building Materials*, Vol. 293, 123481, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123481>.
- ZHANG, X.; CHEN, E.; LI, N.; WANG, L.; SI, C.; WANG, C. (2022), Micromechanical analysis of the rutting evolution of asphalt pavement under temperature–stress coupling based on the discrete element method. *Construction and Building Materials*, Vol. 325, 126800, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126800>.