

Hierarquização de melhores ligantes a serem aplicados na imprimação betuminosa de rodovias em função de características tecnológicas e ambientais

Ranking of the best binders to be applied in the bituminous priming of roads according to technological and environmental characteristics

Fernando Dácio de Almeida¹, Suelly Helena de Araújo Barroso², Leandro Machado de Carvalho³, Paulo Cícero do Nascimento⁴, Luís Alberto Hermann do Nascimento⁵, Margareth Coutinho Cravo⁶

¹Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, daciofer@gmail.com

²Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, suelly@det.ufc.br

³Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul – Brasil, lemacarvalho@gmail.com

⁴Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul – Brasil, pcn1954@gmail.com

⁵Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello, Rio de Janeiro – Brasil, luisnascimento@petrobras.com.br

⁶Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello, Rio de Janeiro – Brasil, cravo@petrobras.com.br

Recebido:

9 de março de 2021

Aceito para publicação:

16 de novembro de 2021

Publicado:

26 de abril de 2022

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chave:

Pavimentação.

Imprimação.

Sustentabilidade.

CM-30.

Keywords:

Paving.

Primer.

Sustainability.

CM-30.

DOI:10.14295/transportes.v30i1.2576

RESUMO

A busca pela compreensão do comportamento dos ligantes menos poluentes quando comparado ao asfalto diluído de petróleo (CM-30) para serviço de imprimação motivou esta pesquisa. Assim, hierarquizou-se ligantes comerciais e alternativos aplicáveis em serviços de imprimação pelos critérios tecnológicos e ambientais. Para tanto, verificou-se os parâmetros: penetração, coesão, aderência, desgaste superficial e ambiental de bases imprimadas com solos diferentes, usando-se o CM-30 como referência e seis ligantes alternativos: G8, G14, G15, G17, G18 e uma emulsão especial para imprimação - E1. Na base arenosa, o tipo de fluido preponderou sobre os parâmetros avaliados. Já na base argilosa, variações de umidade alteraram esses parâmetros. Assim, G14 apresentou-se promissor frente ao CM-30 seguido dos ligantes G8 e G18. Entretanto, o ligante G18 se mostrou inviável pelo gasto de energia para sua aplicação, cerca de 120°. Na análise ambiental, o G8 emitiu menos voláteis que o CM-30, sendo técnica e ambientalmente mais autossustentável.

ABSTRACT

The search for understanding the behavior of less polluting binders when compared to diluted petroleum asphalt (CM-30) for the priming service motivated this research. Thus, commercial and alternative binders applicable in priming services were ranked by technological and environmental criteria. To do so, the following parameters were checked: penetration, cohesion, adherence, surface wear, and environmental parameters of bases primed with different soils, using CM-30 as reference and six alternative binders: G8, G14, G15, G17, G18, and a special emulsion for priming - E1. In the sandy base, the type of fluid predominated over the parameters evaluated. On the clayey base, variations in humidity altered these parameters. Thus, G14 showed promise against CM-30, followed by the binders G8 and G18. However, the G18 binder proved to be unfeasible due to the energy expenditure for its application, around 120°. In the environmental analysis, G8 emitted less volatiles than CM-30, being technically and environmentally more self-sustainable.



1. INTRODUÇÃO

A imprimação é a aplicação de um material asfáltico sobre a superfície de base concluída, antes da execução de um revestimento asfáltico qualquer, a fim de propiciar a ligação entre essas camadas (DNIT, 2014). Mantilla e Buttom (1994), Vasconcelos (2009), *Asphalt Institute* (AI) (2020) e *American Society for Testing and Materials - ASTM* (D8-21, 2021), atribuem à imprimação as seguintes funções: (a) endurecimento e estabilização da parte superior da base ao preencher os vazios capilares dessa camada, impermeabilizando-a; (b) promoção da coesão e adesão da base com a camada asfáltica sobrejacente e (c) proteção da camada de base às intempéries e aos efeitos do tráfego antes da execução do revestimento.

A imprimação auxilia ainda na estabilidade da mistura asfáltica durante sua execução, impedindo sua movimentação lateral. Nas bases de rodovias de baixo volume de tráfego (RBVTs), a imprimação une as partículas de poeira, além de promover a ligação entre a base e a uma nova camada, impedindo o deslizamento de pavimentos esbeltos sobrepostos. Ela também apresenta alta flexibilidade para acompanhar as deformações significativas da estrutura provenientes dos esforços horizontais de frenagem e aceleração dos veículos (Villibor *et al.*, 1989; Bernucci *et al.*, 2010).

Para que exista essa flexibilidade, é necessário que o revestimento e a base estejam bem aderidos, trabalhando de forma solidária. Assim, é necessário que a imprimação penetre na base para que a mesma desempenhe bem as suas funções. Entretanto, verifica-se que somente esse parâmetro não é suficiente, pois Villibor *et al.* (1989) e Castro (2003) apontam uma faixa de resultados satisfatórios para a penetração, onde as penetrações menores que 4,0 mm ocasionam a exsudação do ligante na base e maiores que 13,0 mm, o desprendimento da camada de rolamento, já para Rabêlo (2006) essa faixa deve ser apenas de 4,0 a 10,0 mm. Essa controvérsia sobre a faixa de penetração é fruto das diferentes condições experimentadas em cada pesquisa, tais como o tipo de material granular, umidade durante o serviço de imprimação, taxa de irrigação prévia, tipo e taxa de ligante. Assim, ter a penetração como único indicador da qualidade da imprimação é arriscado para o sucesso do serviço.

Ainda assim, não há no Brasil um ensaio normatizado que avalie a qualidade da imprimação a partir de outros parâmetros como coesão, adesão, desgaste superficial e comportamento mecânico. Na prática, a qualidade da imprimação é avaliada apenas do ponto de vista visual, onde a concentração residual de asfalto no topo da base é observada para atestar a cura da imprimação. Dessa forma, se torna importante investigar outros parâmetros além da penetração para melhor entendimento do comportamento dessa interface.

Essa interface é ocasionada pela prática da construção de pavimentos em multicamadas, exigindo que entre essas camadas exista uma ligação suficiente que permita uma melhor distribuição das tensões e deformações na estrutura do pavimento. Assim, deve funcionar como um sistema único, portanto, devidamente interligado. É importante destacar que a resposta estrutural das camadas do pavimento segundo a teoria elástico-linear de Boussinesq (1885) e Burmister (1943 e 1945) preconizam as seguintes hipóteses (Huang, 2004): (i) todas as camadas são homogêneas, isotrópicas e possuem comportamento elástico linear ao longo de sua espessura; (ii) o carregamento é uniforme e distribuído sobre carga circular e (iii) existe perfeita aderência entre as camadas, garantindo que o sistema funcionará monoliticamente.

Entretanto, sabe-se que a heterogeneidade dos materiais constituintes das camadas de um pavimento típico torna difícil a garantia de uma total aderência entre elas, mesmo em

laboratório. Mohammad *et al.* (2002) compararam o cisalhamento entre camadas para corpos de prova (CPs) monolíticos e amostras de dupla camada de misturas asfálticas unidas com diferentes taxas e tipos de pintura de ligação em laboratório. Esse autor observou que a força de resistência máxima não passou de 83% da resistência da obtida em CPs monolíticos e isso ocorreu em apenas um dos ligantes, de seis testados, à uma taxa definida como ótima ($0,09 \text{ L/m}^2$) e na temperatura de 25°C . Assim, percebe-se que a construção de pavimentos em multicamadas garante melhorias no grau de compactação das misturas, mas, por outro lado, cria zonas de fragilidade na estrutura. Acredita-se que essa zona de fragilidade ocorre também entre a camada imprimada e o revestimento.

Além disso, acredita-se que propriedades intrínsecas ao tipo de solo, como a coesão, possam contribuir para uma melhor aderência interfacial. A coesão do solo é caracterizada pelo cisalhamento desse e é dada pela força de atração entre as superfícies de suas partículas, podendo ser real ou aparente. A coesão real é resultado do efeito de agentes cimentantes, como teor de óxidos e de argilas silicatadas. Já a coesão aparente é resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo formando meniscos de água entre as partículas dos solos parcialmente saturados que tendem a aproximá-las entre si (Mullins *et al.*, 1990).

Sabe-se que o excesso de umidade altera as propriedades do solo, deixando-o suscetível à falha. Logo, verifica-se a necessidade de um agente melhorador da coesão e que o proteja da ação deletéria da água, o que pode ser fornecido pela imprimação. Assim, a imprimação tem a função de melhorar a coesão na camada de solo que é atingida pela penetração do ligante, bem como conferir à superfície da camada imprimada aderência necessária para receber a camada de rolamento, fazendo com que a estrutura suporte melhor as solicitações do tráfego.

Normalmente, a camada de base é imprimada com ligante asfáltico que impermeabiliza a sua superfície, ligando os vazios capilares e partículas minerais soltas, além de fornecer a aderência entre a base e o revestimento asfáltico (Kulkarni, 2005). A aderência inadequada entre as camadas de um pavimento encurta drasticamente sua vida útil, o que demanda certos cuidados durante a construção para que essa condição de ligação seja assegurada (Vam Dam *et al.*, 1987). Cuidados como, a limpeza da superfície, taxa de aplicação da irrigação prévia, taxa de aplicação do ligante, cura da imprimação, fechamento do tráfego durante o processo de cura e temperatura de aplicação do ligante são alguns que devem ser observados durante o serviço de imprimação.

Outra questão que deve ser observada é a crescente preocupação com o meio ambiente que permeia as atividades ligadas à pavimentação, desde sua produção até o transporte e posterior aplicação. Sabe-se que, para a aplicação do ligante asfáltico, na pavimentação se faz necessário o aquecimento. Este processo libera fumos que contêm Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) e seus derivados. Isto consiste na principal fonte de exposição humana à esses compostos, sendo a concentração de HPAs liberada dependente da composição do asfalto e da temperatura desta aplicação, pois compostos que possuem mais proporção de solvente tendem a liberar mais compostos (Pośniak, 2005; Schreiner, 2011). Os fumos de asfalto podem ser liberados no ambiente e particionados no ar nas fases gasosa e particulada. Muitos dos compostos orgânicos voláteis (VOCs) emitidos são removidos durante o processo de industrialização do asfalto. No entanto, alguns compostos residuais permanecem e são emitidos durante o armazenamento, transporte e pavimentação devido a presença de frações voláteis ainda existentes e do aquecimento necessário para as operações citadas (Boczka, 2014). Além das questões relacionadas aos ligantes asfálticos, os Asfaltos Diluídos de Petróleo (ADPs) também são

importantes em relação às emissões atmosféricas. Mesmo sendo aplicados em temperaturas menores, por conta do diluente, quantidades importantes de VOCs são liberadas pelos ADPs.

Nesse sentido são encontrados inúmeros estudos relacionados ao uso de produtos alternativos em substituição ao CM-30, ou como melhoradores das características do asfalto em relação à redução de poluentes atmosféricos (Mantilla E Buttom, 1994; Dantas Neto, 2001). Sabe-se ainda que devido à importância do emprego da imprimação betuminosa e das vantagens inerentes ao processo da pavimentação asfáltica é necessário buscar novas alternativas para que seu emprego não ocasione tantos impactos ambientais. Logo, torna-se relevante a busca por novos materiais que visem minimizar os efeitos de agressão do ADP ao meio ambiente.

Do mesmo modo, existe a necessidade de estudos que atestem o comportamento dessas novas alternativas em diferentes tipos de bases granulares com vistas a parâmetros mais significativos do que apenas a penetração. Sendo assim, o objetivo da presente pesquisa foi o de ranquear os ligantes para imprimação frente aos parâmetros de penetração, coesão, aderência, desgaste superficial e ambiental visando indicar um produto que apresente viabilidade técnica e ambiental.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental para compreender melhor a interação solo/ligante asfáltico abordou a caracterização, a classificação, os ensaios mecânicos e as análises das emissões de voláteis de ligantes diferentes. Para se investigar essa interação, foram usados 02 solos (um arenoso e outro argiloso) típicos de RBVTs do estado do Ceará e 07 ligantes para imprimação, sendo: 06 alternativos e 01 comercial (referência do tipo CM-30). Esses materiais foram avaliados em laboratório (Figura 1) por meio dos ensaios de: (i) penetração da imprimação, (ii) coesão (Almeida *et al.*, 2017), (iii) aderência (Almeida, *et al.*, 2016), (iv) desgaste superficial (Almeida, 2019) e (v) ambientais.

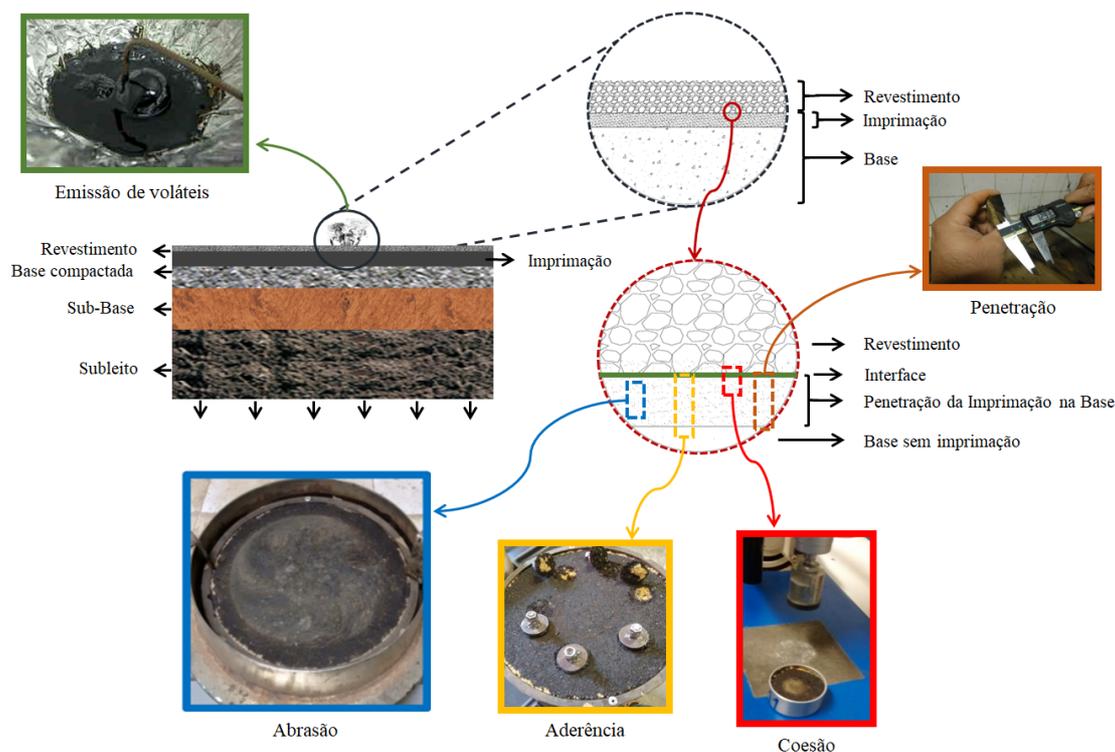


Figura 1. Resumo Esquemático dos Ensaios de Avaliação da Imprimação

Neste artigo, três produtos diferentes foram analisados de forma comparativa e utilizando o dispositivo de extração e coleta (DEC) para a volatilização dos compostos e posterior determinação por cromatografia líquida de alta eficiência com detecção por arranjo de diodos (HPLC-DAD). A temperatura de aquecimento do gás de arraste foi fixada em 60°C durante 60 minutos de ensaio (Cargnin *et al.*, 2021). Os compostos investigados foram CAP + querosene da aviação e CAP + diluente alternativo.

2.1. Caracterização dos materiais (solos e ligantes)

Foram coletados dois solos - um arenoso e outro argiloso - provenientes da Região Metropolitana de Fortaleza, onde foram realizados os ensaios de caracterização básica e ensaios mecânicos. Por sua vez, os materiais betuminosos comerciais (01 comercial de referência e 06 fluidos imprimantes) foram submetidos aos ensaios de caracterização segundo as normas vigentes constantes na norma DNIT 144/2014. O ligante comercial betuminoso foi o asfalto diluído de cura média (CM-30), nomeado com as letras LR (Ligante de Referência) e que foi escolhido por ser atualmente o material mais utilizado e o único comercialmente disponível para imprimação de bases granulares no estado do Ceará.

Foram também investigados 05 fluidos para imprimação alternativos e com potencial de substituição do CM-30 por razões ambientais. Os fluidos foram nomeados como G8, G14, G15, G17 e G18, além de uma emulsão especial para imprimação (EAI), nomeada como E1. Ratifica-se que os fluidos imprimantes investigados não estão disponíveis no Ceará, exceção feita ao fluido comercial de referência conforme explicado acima. Todos os fluidos podem ser denominados como ADPs de cura média. Onde, os mesmos foram formulados em proporções de CAP, variando de 50 a 55% e os diluentes utilizados, variando de 45 a 50%, foram compostos por destilados médios na faixa do querosene, uma corrente alternativa proveniente do refino do petróleo e um biodiluyente.

Os ensaios no ADP CM-30 e nos fluidos imprimantes alternativos foram realizados nos laboratórios dos fabricantes. Foram realizados os ensaios de viscosidade cinemática, ponto de fulgor, destilação a 225°C, 260°C e 316°C, resíduo a 360°C, água por destilação, viscosidade, solubilidade no tricloroetileno e ductibilidade no resíduo da destilação. .

2.2. Ensaio de imprimação

2.2.1. Ensaio de penetração

Para avaliação da penetração do ligante betuminoso, adotaram-se como satisfatórias as penetrações entre 4,0 e 13,0 mm (Dantas, 1959; Villibor *et al.*, 1989; Castro, 2003; Duque Neto, 2004). Todos os ligantes foram avaliados segundo uma taxa única de ligante (1,2 L/m²) e na umidade ótima menos 2% (W_{ót} - 2%), sendo essa umidade comum em obras situadas no clima semiárido e ainda atende ao mínimo aceitável segundo a norma DNIT de 2010. Com o objetivo de triar os fluidos foi utilizado o método da cápsula (Almeida *et al.*, 2014), que auxilia na seleção inicial de ligantes avaliando a penetração com gasto menor de material, e posteriormente pelo cilindro Marshall modificado (Rabêlo, 2006) para confirmar as penetrações obtidas.

2.2.2. Coesão da base imprimada

Para a avaliação da coesão superficial da base imprimada, foi realizado o ensaio de cisalhamento por torção a partir de um coesímetro (Almeida *et al.*, 2017). Entendeu-se que, por meio desse

ensaio, seria possível medir o acréscimo da coesão superficial fornecida pela aplicação do ligante betuminoso a partir da verificação da coesão em tempos de cura diferentes (24, 48 e 72 horas). Almeida observou ainda que esses tempos de cura são necessários para que a coesão seja satisfeita e que a partir de 72 horas não houve acréscimo de coesão.

2.2.3. Aderência da base imprimada

Para avaliar a aderência da camada imprimada com o revestimento e investigar a interface entre as camadas, foi realizado o ensaio de aderência (Almeida *et al.* 2016). Esse método mensurou a resistência ao cisalhamento da camada de solo imprimada, onde foi possível verificar um ganho de resistência proveniente da aplicação do ligante asfáltico na base, bem como a variação dos valores de resistência para cada tipo de ligante testado. A Figura 2a mostra os discos arrancados após o ensaio, a Figura 2b destaca o detalhe da porção da base arrancada e, finalmente, a Figura 2c apresenta a placa rompida para medição da penetração.

the state of capacity flow.



Figura 2. Ensaio de aderência por meio da resistência ao arrancamento da base imprimada

Tendo em vista a falta de valores comparativos para avaliação da aderência da camada imprimada, utilizou-se como referência o valor médio obtido do arrancamento de revestimentos de argamassas à base de cimento e areia. Nesses materiais, os valores de aderência aceitáveis são da ordem de 200 kPa segundo a NBR 13528 (2019). Mantilla e Button (1994) em relatório a *Federal Highway Administration* (FHWA) concluíram que com o uso de fluido de imprimação a resistência ao cisalhamento da interface entre revestimento asfáltico e base granular apresentaram coesões variando entre aproximadamente 100 e 300 kPa, a depender do material utilizado e dos cuidados na execução.

2.2.4. Ensaio de desgaste superficial

Os efeitos da liberação do tráfego antes da execução do revestimento, fase em que o trecho pode ser liberado para o tráfego sob a restrição de carga e velocidade dos veículos (DNIT, 2014), podem afetar a resistência superficial da imprimação. Para avaliar esse desgaste superficial, foi utilizada a metodologia de Almeida (2019) adaptada de Duque Neto (2004).

Para tanto, a metodologia utiliza o ensaio de WTAT (*Wet Track Abrasion Test*), simulando esse tráfego e a consequente perda por abrasão da superfície imprimada. Assim, as condições de carregamento, velocidades do equipamento e tipo de superfície de contato foram mantidas conforme o ensaio padronizado pela NBR 14746 (2014). Assume-se no experimento que, se a base imprimada possuir uma boa interação com o ligante e proporcionar boa resistência ao desgaste, a coesão da base estará satisfeita e o desgaste será insignificante.

2.2.5. Ensaios de emissões de compostos voláteis

A investigação de espécies voláteis ou passíveis de arraste por um fluxo de gás na matriz asfáltica pode dar informações importantes sobre potenciais problemas ambientais e a modificação da composição química do produto original. Um DEC foi desenvolvido para esse fim. De forma resumida, o equipamento é composto por um sistema de aquecimento que envolve uma serpentina, na qual circula um gás inerte (argônio) que borbulha diretamente nas amostras de CAP depois de aquecido à temperatura desejada. Isto faz com que as espécies volatilizáveis àquela temperatura se desprendam da amostra na forma de gás ou vapor. O sistema todo é estanque, de modo que não há risco de combustão pela ausência de oxigênio e também não há perdas para o meio externo dos produtos volatilizados (Cargnin *et al.*, 2021). Desta forma, as temperaturas para o arraste gasoso podem variar em faixas amplas de valores. Os produtos arrastados pelo argônio são coletados tanto em “traps” frios quanto em substratos sólidos na forma de colunas contendo adsorventes. Uma vez coletados os produtos voláteis, as suas identificações e quantificações podem ser feitas por cromatografia sem a necessidade de etapas de *cleanup* das amostras. Isto é particularmente útil quando o CAP é a matriz de interesse devido à sua alta complexidade do ponto de vista químico. Este sistema já foi utilizado com êxito na análise de HPAs em amostras de CAP (Cargnin, 2017).

O dispositivo permite a geração e a coleta de vapores a partir de amostras aquecidas em um fluxo de gás argônio ($0,12 \text{ L/min}^{-1}$) em sistema fechado e sob temperatura controlada. Os vapores foram gerados a uma temperatura de 60°C , sendo coletados em acetoneitrila (50 ml) como líquido absorvente. Após a absorção em acetoneitrila, os extratos foram injetados no sistema cromatográfico para análise. As análises cromatográficas foram realizadas em um equipamento de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) com detector ultravioleta (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA). As separações foram realizadas em uma coluna Pursuit 3PAH ($4,6 \times 100 \text{ mm}$, $3 \mu\text{m}$). A detecção foi realizada em 225 nm. As separações cromatográficas foram realizadas com eluição por gradiente com fase móvel acetoneitrila: água ultrapura (40:60 a 100:0) com volume de injeção de $20 \mu\text{L}$.

2.2.6. Ranqueamento dos ligantes

Os fluidos foram nomeados pela empresa que os produziu com a letra G seguida de uma sequência numérica ordinal, totalizando 18 formulações diferentes. Sendo que para os testes de comportamento da base imprimada apenas cinco ligantes foram classificados, quais sejam: G8, G14, G15, G17 e G18. Além disso, uma emulsão especial para imprimação intitulada E1 foi testada.

Para tanto, como os parâmetros avaliados não são independentes, ou seja, caso algum dos fluidos não obtenha um comportamento mínimo aceitável em algum dos parâmetros o fluido será reprovado. Da mesma forma, quando da aprovação, o peso atribuído a qualquer um dos parâmetros é o mesmo. Por fim, o ordenamento se dará pela aprovação ou não do fluido frente aos parâmetros avaliados.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

3.1. Solos e ligantes

Os resultados dos ensaios de granulometria, índices físicos, compactação na energia Proctor intermediária, densidade e a classificação AASHTO dos solos são apresentados na Tabela 1. Os solos possuem granulometria fina, com 99% das partículas passantes na peneira de abertura nominal igual a 2,0 mm ($N^\circ 10$).

Tabela 1 – Resultados da caracterização dos solos

	Parâmetros	Solo Arenoso	Solo Argiloso	Parâmetros	Solo Arenoso	Solo Argiloso
Granulometria	2" (%)	100	100	Densidade Real (g/cm ³)	2,667	2,589
	1" (%)	100	100	IP (%)	NP	10
	3/8" (%)	100	100	LL (%)	NL	29
	Nº 4 (%)	99	99	CBR (%) / Expansão (%)	33/0	10/0
	Nº 10 (%)	99	99	MR médio	382	N/P
	Nº 40 (%)	96	84	MEAS (g/cm ³)	1,681	1,887
	Nº 200 (%)	32	50	AASHTO	A-2-4	A-6

Obs.: Sendo: (IP) o índice de plasticidade; (LL) o limite de liquidez; (ISC) o Índice de suporte Califórnia; (MR) o módulo de resiliência; (MEAS) a massa específica aparente seca e; (AASHTO) a classificação dos solos segundo a *American Association of State Highway and Transportation Officials*.

Quanto à capacidade de suporte, verificou-se que os solos apresentaram expansão nula, ficando dentro do limite máximo de 0,5% estabelecido pela Superintendência de Obras Públicas do Estado do Ceará (SOP/CE). Os CBRs encontrados para os solos arenoso e argiloso foram de 33% e 10%, respectivamente, indicando que o solo arenoso pode ser utilizado, à luz de critérios de dimensionamento empírico, como sub-base ou como base de RBVTs. Já o solo argiloso necessita de uma estabilização que melhore sua capacidade de suporte antes de ser aplicado, conforme explicitado em Senço (2001). Ressalte-se também a necessidade de encorajar o uso dos resultados do Módulo de Resiliência (MR) para dimensionamento de pavimentos. Dado que esse parâmetro exprime melhor o comportamento dos materiais.

O ligante de referência foi cedido pela empresa e sua caracterização foi garantida pela mesma. Os nomes das empresas que cederam os outros materiais aqui testados foram resguardados por motivo de segurança de informação industrial. Para tanto, seguem alguns dados da caracterização básica dos fluidos conforme a figura 3.

Tabela 2 – Dados de caracterização básica dos fluidos

Ensaio	Especificação	CM-30	G8	G14	G15	G17	G18
Destilação, %							
Fração a 225°C	25 % máx	2,7	-	6,7	10,4	-	-
Fração a 260°C	40-70	53,3	-	48	49,4	-	-
Fração a 316°C	75-93	88	-	81,3	83,1	-	-
Resíduo a 360°C	50 % mín.	67,7	-	68,6	66,8	-	-
Viscosidade a 60°C	cSt	64,5	72,7	53,9	34,9	61,7	938,7

3.2. Ensaio de penetração da imprimação betuminosa

A Figura 3 apresenta os resultados de penetração pelo método da Cápsula, onde se observa que os ligantes E1, G15, G17 e G18 apresentaram resultados não satisfatórios quanto à penetração em pelo menos um dos solos utilizados, ficando fora da faixa limite de 4,0 até 13,0 mm admitida como aceitável (Dantas, 1959; Villibor *et al.*, 1989; Castro, 2003; Duque Neto, 2004). Observa-se também que o E1 e G18 apresentaram Coeficientes de Variação (CV) maiores que 20%, indicando falta de homogeneidade nos resultados de ambos os ligantes. Para efeito desse estudo, a análise estatística realizada seguirá a classificação do CV proposta por Pimentel-Gomes (1985) que define os seguintes intervalos: $CV\% \leq 10\%$ classificado como baixo; $10\% < CV\% \leq 20\%$ classificado como médio; $20\% < CV\% \leq 30\%$ classificado como alto; e $CV\% > 30\%$ classificado como muito alto.

No entanto, como forma de ratificar os resultados nessa fase dos testes, não se descartou qualquer resultado numérico. Salienta-se que o ligante G18 necessitou de um aquecimento a 120°C para sua aplicação. Já os demais foram aplicados a 60°C, com exceção da E1 que, por ser uma emulsão, pode ser aplicada à temperatura ambiente (25°C).

A Figura 4 mostra que os ligantes G15 e G17 apresentaram penetrações excessivas quando aplicados no solo arenoso. No caso dos ligantes E1 e G18, a penetração ficou dentro da faixa limite (4,0 a 13,0 mm). Verificou-se ainda que o CV dos resultados obtidos nesse método apresentou variações menores em relação ao método da Cápsula, ficando abaixo de 20% para todos os ligantes testados e nos dois tipos de base utilizados. Isso mostra que há uma dispersão maior nos resultados obtidos por meio do método da Cápsula quando comparados aos resultados do método Marshall modificado de avaliação da imprimação. Acredita-se que a dispersão maior no método da Cápsula deva-se ao fato do grau de compactação nesse método chegar no máximo a 95% em média.

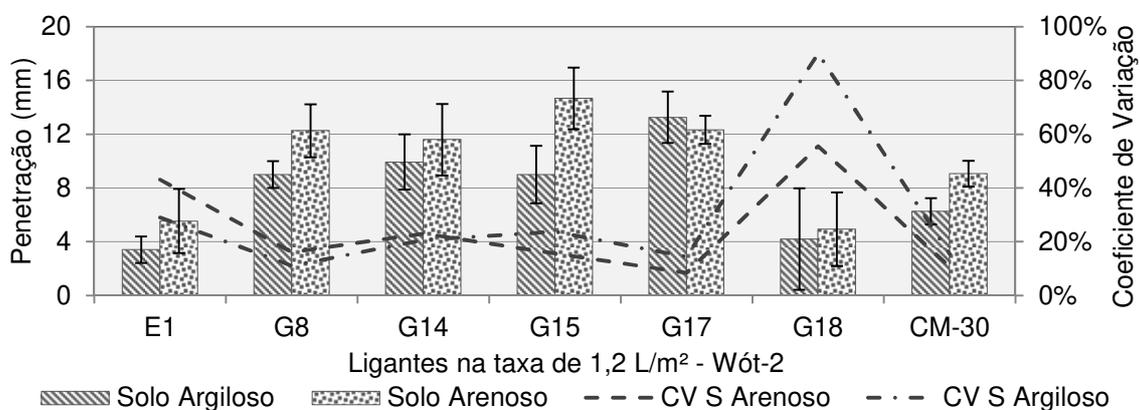


Figura 3. Resultados de penetração na cápsula dos ligantes investigados

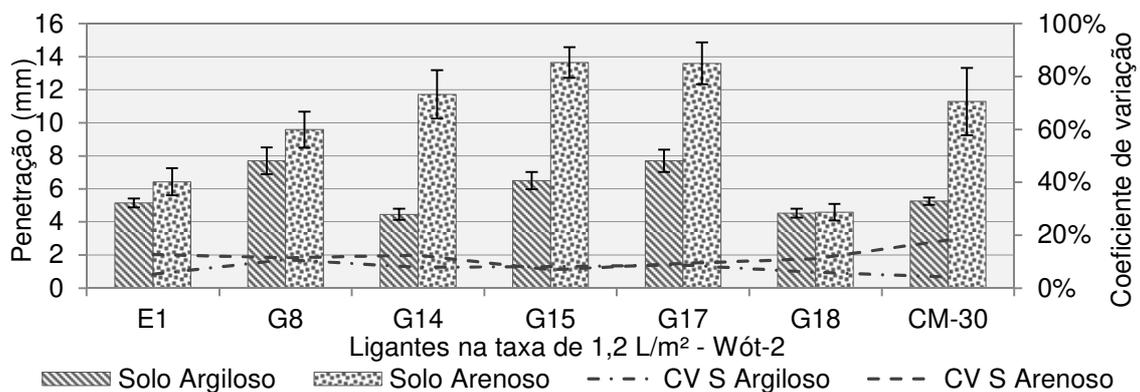
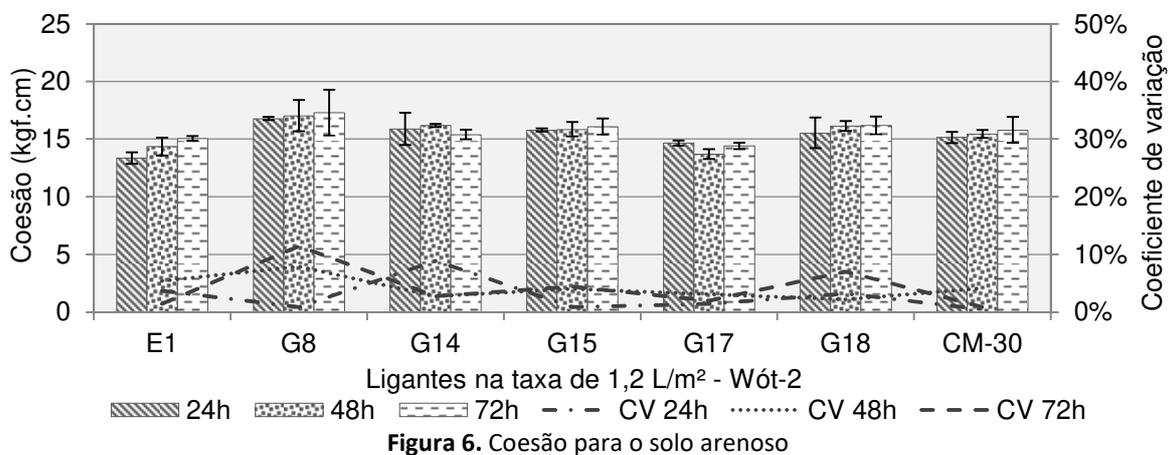
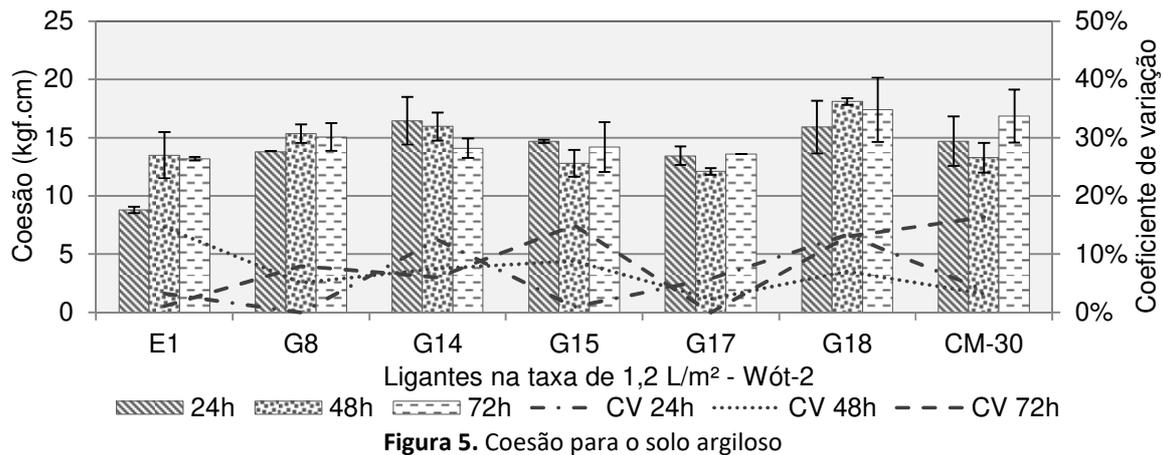


Figura 4. Resultados de penetração no Marshall dos ligantes investigados

Em face dos resultados apresentados neste item, para bases compactadas em umidades abaixo da ótima e tendo em vista as altas taxas de evaporação oriundas de um clima mais quente como o do estado do Ceará, observa-se que os ligantes obtiveram resultados adequados de penetração (pelo menos 4,0 mm) em quase todas as taxas de ligantes testadas e em um contexto geral. Na prática nenhum dos fluidos testados foi reprovado no parâmetro de penetração.

3.3. Coesão dos solos imprimados

Quanto à coesão, Almeida (2017) sugeriu, o uso do valor mínimo de 10,0 kgf.cm para aceitação quanto à coesão de solos imprimados a partir de resultados de imprimação e coesão e da experiência laboratorial. Esse valor é a metade do mínimo preconizado pela norma de medição de cura através do ensaio de coesão por molhagem (*Wet Cohesion*) da ISSA (*International Slurry Surfacing Association*) TB-139 (2017) (20,0 kgf.cm) para microrrevestimento e lamas asfálticas, tendo em vista que a imprimação não é a camada final de rolamento e que o tráfego será apenas provisório e leve. Nas Figuras 5 e 6, observou-se que os valores de coesão para todos os ligantes testados nos dois solos atenderam ao limite de 10 kgf.cm sugerido por Almeida (2017).



Nota-se também na Figura 6 que os CVs dos valores de coesão ao longo do tempo de cura foram bem reduzidos, ficando abaixo de 10% para o solo arenoso. Isto indica uniformidade maior para o material, já que se pode considerar baixo um CV menor que 10% (PIMENTEL-GOMES, 1985). Ainda segundo Pimentel Gomes (1985), CVs levemente maiores (mas ainda abaixo de 20%) podem ser considerados de variação média. Acredita-se que, em função da suscetibilidade à umidade em solos argilosos, os resultados nesse tipo de base podem sofrer maiores variações. Percebeu-se que o tempo de cura influenciou na linearidade dos resultados, mostrando que variações de coesão se devem ao efeito de uma cura insuficiente. Também foi possível mostrar o quanto esse parâmetro é importante e dependente do tipo de solo.

O ligante E1 aplicado no solo argiloso só apresentou coesão aceitável após 48 horas de aplicação, indicando que para esta EAI o tempo de cura do ligante é um pouco maior do que para ADPs, e que só a aparência não garante que a cura do ligante foi completa. Outro fato constatado é de que alguns ligantes apresentaram uma leve redução da coesão quando expostos a mais de 24 horas de cura, mas ratifica-se que mesmo assim os valores dessa redução não foram significativos a ponto de comprometer o resultado da coesão, pois todos os resultados ficaram acima do limite mínimo de 10 kgf.cm. A hipótese é de que a coesão da base imprimada pode diminuir a medida que a exposição ao tráfego aumenta e que isso pode comprometer o comportamento da interface com o revestimento.

3.4. Aderência dos solos imprimados

Quanto à aderência, a Figura 7 apresenta resultados superiores para o solo arenoso em comparação aos dados do solo argiloso. De maneira geral, a porção penetrada pelo ligante no solo argiloso influenciou no resultado de aderência, sendo tanto menor a penetração quanto menor a aderência segundo os protocolos do ensaio de arrancamento. Quanto aos ligantes G15, G17 e E1 que exibiram comportamento não esperado quanto à aderência no solo arenoso, apresentando baixos valores de arrancamento (cerca de 200 kPa). Observou-se que isso pode ser explicado pela elevada penetração dos ligantes G15 e G17 (cerca de 13,0 mm). Já para o ligante E1, a baixa penetração desse ligante na base em ambos os solos (cerca de 4,0 mm) pode ter causado menor arrancamento (cerca de 200 kPa) devido ao acúmulo do ligante, mesmo sem apresentar exsudação. Observa-se também uma penetração reduzida para ligante G18, sobretudo no solo do tipo argiloso. Isso pode ter sido preponderante para o reduzido valor de arrancamento (250 kPa) dessa base em relação ao resultado obtido com o mesmo ligante na base arenosa.

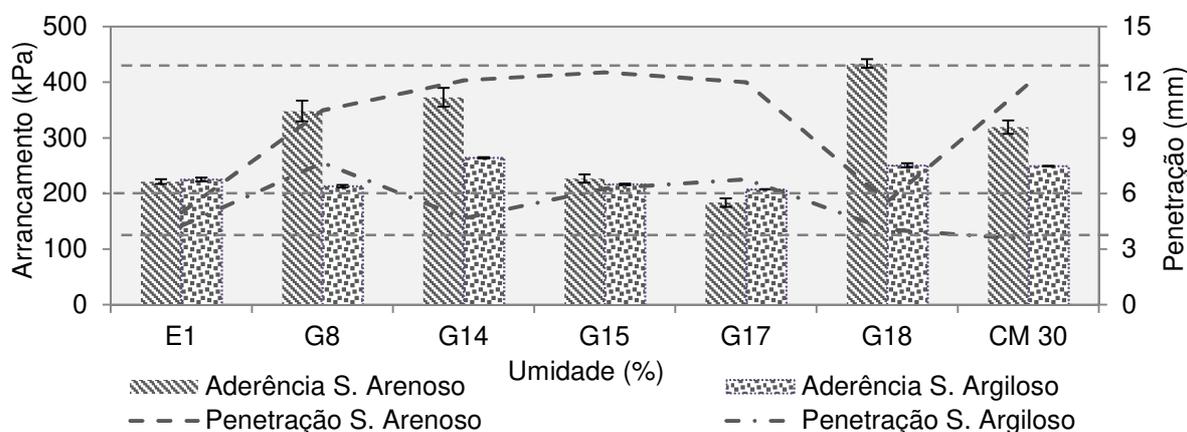


Figura 7. Arrancamento versus Penetração

Os resultados encontrados corroboram com Mantilla e Button (1994) que encontram valores entre 100 e 300 kPa nos testes de medição de resistência ao cisalhamento na interface entre base e revestimento.

3.5. Ensaio de desgaste WTAT (*Wet Track Abrasion Test*)

Segundo a Figura 8, observa-se que o desgaste obtido no ligante G17 é muito superior aos dos demais, quase 7 vezes maior do que o aceitável pela norma de desgaste por abrasão úmida ISSA TB-100 (2020) (534 g/m²). Já a E1 apresentou um alto desgaste, mas restrito ao solo argiloso,

seguido pelo G15 quando aplicado nesse mesmo solo. Os demais ligantes apresentaram um bom comportamento quanto ao desgaste (abaixo de 534 g/m^2). Percebe-se que os ligantes E1, G15 e G17 obtiveram baixas penetrações, mas dentro da faixa de 4 a 13 mm, que corroboram com seus resultados de aderência que ficaram entre os menores também, em torno de 200 kPa. Considera-se que a interação do solo e dos fluidos não levou a um acréscimo da resistência intersticial que é causada normalmente pela presença do ligante.

Assim, esses fluidos, E1, G15 e G17, não são indicados para uso em solos argilosos, de certo que a afirmação se limita ao universo da pesquisa e que talvez esses fluidos precisem de ajustes nas formulações que viabilizem seu uso em solos argilosos.

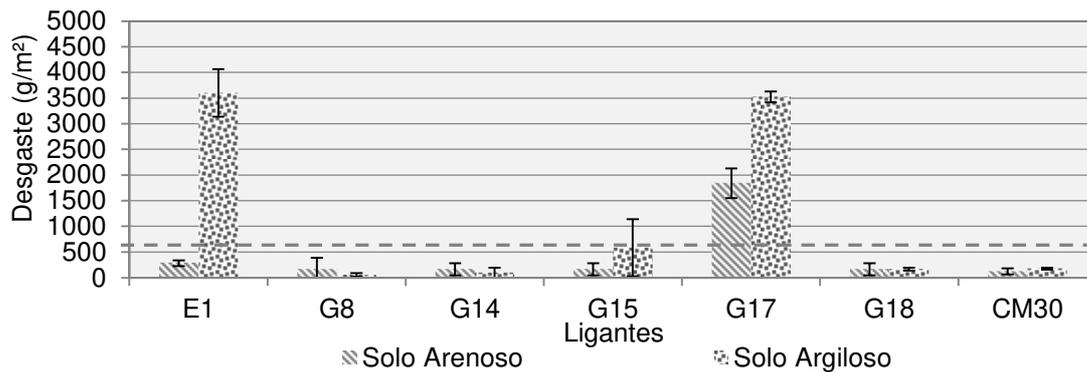


Figura 8. Desgaste WTAT

3.6. Ensaios ambientais

Os ensaios de emissões realizados no fluido de imprimação G8 (que contém diluente alternativo do refino de petróleo, menos poluente) mostraram um nível de emissão mais baixo comparativamente ao asfalto diluído (ADP CM-30). Este fato pode ser observado no perfil cromatográfico obtido após a coleta dos compostos voláteis no DEC (Figura 9). Os cromatogramas mostram perfis na separação cromatográfica dos compostos detectados em 225 nm em tempos de retenção entre 5 e 15 minutos. Nos sinais cromatográficos obtidos em torno de 10 minutos (Figura 9) observa-se uma forte redução do sinal de absorção UV no fluido de imprimação (G8) em relação ao asfalto diluído (ADP CM-30). Este resultado mostra que o fluido de imprimação possui níveis de emissão atmosférica de compostos voláteis bem inferiores aos do asfalto diluído, uma vez que as emissões foram geradas na mesma temperatura (60°C).

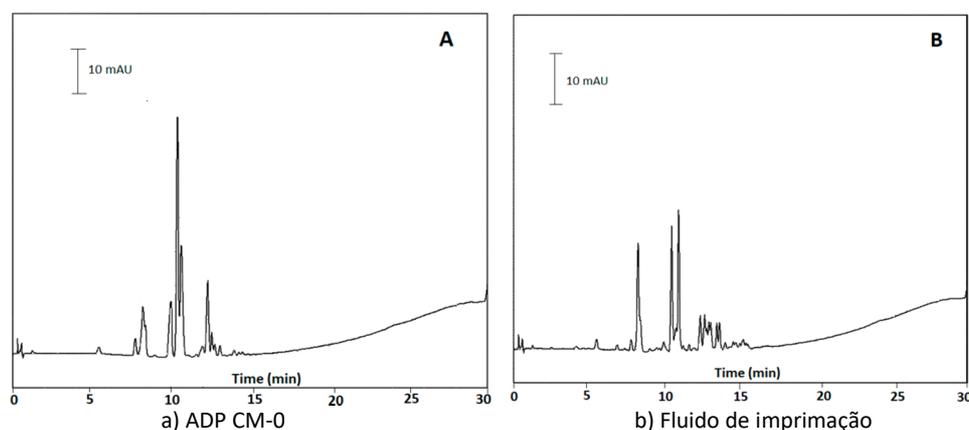


Figura 9. Cromatogramas obtidos após a coleta dos compostos voláteis no DEC

4. SÍNTESE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

4.1. Quanto aos resultados de penetração

Os ligantes E1, G15, G17 e G18 mostraram resultados não satisfatórios quanto à penetração em pelo menos um dos solos utilizados, ficando fora da faixa aceitável de penetração estabelecida na literatura (entre 4,0 e 13,0 mm). Os ligantes G15 e G17 apresentaram penetrações excessivas quando aplicados no solo arenoso. No caso dos ligantes E1 e G18 as penetrações também atenderam ao limite inferior dessa faixa se considerados os desvios. Os ligantes G8 e G14 apresentaram tendências promissoras tanto no método preliminar de seleção de ligantes (Cápsula) quanto no método Marshall, assemelhando-se ainda aos resultados obtidos pelo ligante de referência (CM-30) quanto à uniformidade dos resultados.

4.2. Quanto aos resultados de coesão

A cerca dos ligantes testados a coesão mostrou-se satisfatória (superior a 10 kgf.cm) nos dois solos utilizados. No entanto, a EAI necessita de atenção no que se refere ao tempo de cura, pois foi superior a 24 horas. Isto foi evidenciado pelo tempo que esse ligante levou para atingir a coesão mínima, cerca de 48 horas, mostrando que apenas a verificação visual para atestar a cura pode não ser um bom indicativo.

4.3. Quanto aos resultados de aderência

Foi possível verificar para o solo arenoso que os resultados foram maiores do que os vistos no solo argiloso. Isto permite inferir que, para os solos argilosos, a penetração tem grande impacto no resultado de aderência devido aos seus valores baixos. Cabe destacar que os resultados apresentados se devem ao somatório de resistência ao cisalhamento que é intrínseco do solo e do acréscimo fornecido pela imprimação. Contudo, foram observadas diferenças significativas (mais de 100%) nos valores de aderência para um mesmo solo, sinalizando que o acréscimo de resistência decorreu da contribuição atribuída pelo ligante. Com isso, os ligantes G15, G17, G18 e E1 apresentaram baixos valores de arrancamento devido às penetrações reduzidas. Isso pode ter influenciado a redução da aderência da base imprimada.

4.5. Quanto aos resultados de desgaste

O ligante G17 chama a atenção por terem sido verificados valores elevados de desgaste em ambos os solos (arenoso e argiloso), sendo quase 7 vezes maior que o aceitável pela norma ISSA TB-100/90. Já a emulsão E1 apresentou alto desgaste, mas apenas quando aplicado ao solo argiloso, seguido pelo G15, quando aplicado também nesse tipo de solo. Os demais ligantes apresentaram-se promissores quanto ao desgaste, obtido pelo ensaio de WTAT.

4.6. Quanto aos resultados dos ensaios ambientais

Os ensaios de emissão de gases voláteis mostraram que o fluido de imprimação G8 deve ser escolhido em detrimento do produto G14, uma vez que sua composição é mais sustentável e tem mais resíduo asfáltico. Isso torna o produto mais adequado quando se considera desempenho, poluição ambiental e custo. Além disso, o G8 apresentou comportamento quanto aos parâmetros técnicos avaliados e discutidos nas seções anteriores, indicando bom desempenho em serviço, e com reduções de emissões muito significativas em relação ao produto comercial

de mesma natureza (ADP CM-30), sendo promissor para uso na pavimentação, tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Elaborou-se o Quadro 1 para fins de resumo da hierarquização dos ligantes testados neste trabalho, sendo uma forma de mostrar as limitações de cada material frente aos parâmetros avaliados. Em face dos resultados experimentais, pode-se concluir que o fluido G14 apresentou um comportamento semelhante ao CM-30 seguido do G18, que também se mostrou viável para aplicação.

Entretanto, para o uso do fluido G18, a despeito da realização dos testes em bases mais argilosas e tendo em vista sua aplicação está condicionada ao aquecimento a 120°C, o custo envolvido e o perigo inerente ao serviço podem inviabilizá-lo.

O fluido G8 mostrou um comportamento próximo do CM-30, porém requer atenção quanto ao seu uso em bases argilosas, haja vista a aderência perto do limite inferior para este tipo de base (200 kPa). Os ligantes G15, G17 e E1 mostraram-se suscetíveis às variações do tipo de solo, apresentando um comportamento irregular quanto ao desgaste e à aderência. Isto sugere a necessidade de prévias verificações quanto à melhor taxa de aplicação, para atestar a compatibilidade dos materiais nas diversas condições de umidade aos quais serão empregados.

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, recomenda-se que o ligante G8 seja aplicado na construção de um trecho experimental, uma vez que o ele mostrou um comportamento promissor à luz dos testes realizados em laboratório. Isto permitirá verificar se os parâmetros medidos em um ambiente controlado se comportam de forma semelhante em campo, e pode auxiliar na tomada de decisão da escolha dos produtos a serem aplicados em serviços de imprimação betuminosa de rodovias.

Os demais ligantes (E1, G15, G17 e G18) não foram submetidos a avaliação ambiental, pois foram reprovados ainda nos parâmetros técnicos. Além desses, o G14 não apresentou redução de emissões significativas, sendo equiparável ao G8 quanto aos parâmetros técnicos, porém mais poluente.

Parâmetros	Ligantes						
	E1	G8	G14	G15	G17	G18	CM-30
Penetração	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Coesão	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
WTAT	✘	☑	☑	☑	✘	☑	☑
Aderência	☑	☑	☑	☑	✘	☑	☑
Ambiental	—	☑	—	—	—	—	☑

Comportamento:

Bom ☑ Médio ☑ Ruim ✘ Não ensaiado —

Quadro 1. Resumo da avaliação tecnológica e ambiental dos ligantes testados

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Rede de Tecnologia em Asfalto (RTA), financiada pela Petrobras, pelo apoio financeiro e ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos pelo apoio operacional dado a realização desta pesquisa (termo de convênio: N° do Jurídico 5850.0106294.17.9 do SAP4600553912).

REFERÊNCIAS

- ABNT (2019) *ABNT NBR 13528-3: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração Parte 3: Aderência superficial*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comissão de Estudo de Asfalto.
- ABNT (2014) *ABNT NBR 14746: Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica - Determinação de perda por abrasão úmida (WTAT)*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comissão de Estudo de Asfalto.
- Almeida, F. D.; S. A. R. Lima Filho; S. H. A. Barroso e J. B. S. Bastos (2014) *Desenvolvimento de um método expedito para avaliação da imprimação betuminosa de rodovias*. In: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP, 21º Encontro de Asfalto - IBP357_14.
- Almeida, F. D.; S. A. Torquato e Silva; S. H. A. Barroso, e J. B. Soares (2016) *Aplicação do Ensaio de Arrancamento por Torção para Avaliação da Aderência de Bases Imprimadas*. XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Rio de Janeiro-RJ.
- Almeida, F. D. e S. H. A. Barroso (2017) *Avaliação Da Coesão Da Imprimação Betuminosa De Rodovias*. 2017, Congresso Ibero Latinoamericano del Asfalto - 0144, Medellin, Colômbia.
- Almeida, F. D. e S. H. A. Barroso (2019) *Avaliação da penetração do ligante asfáltico e o desgaste superficial de bases imprimadas*. XXXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Balneário Camboriú-SC.
- AI (2020) *AI MS-22: Construction of Hot Mix Asphalt Institute*. Third Edition. The Asphalt Institute, Lexington - KY.
- ASTM (2005) *ASTM D92: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*.
- ASTM (2021) *ASTM D8-21: Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bernucci, L. L. B.; L. M. G. Motta; J. A. P. Ceratti e J. B. Soares (2010) *Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro-RJ: Petrobras: ABEDA.
- Boczka, G.; A. Przyjazny e M. Kamin (2014) *Chemosphere Characteristics of volatile organic compounds emission profiles from hot road bitumens*. Chemosphere v. 107, p. 23-30. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.02.070
- Cargnin, R. S.; P. C. Nascimento; L. M. Ferraz; M. M. Barrichello; L. C. Brudi; M. B. Rosa; L. M. Carvalho; D. B. Nascimento; M. C. Cravo e L. A. H. Nascimento (2017) Investigation of extraction and collection of polycyclic aromatic hydrocarbons from aqueous solutions at different temperatures. Polycyclic Aromatic Compounds. DOI: 10.1080/10406638.2017.1353529.
- Brudi, L. C.; F. R. Adolfo; P. C. Nascimento; P. Schmidt; R. S. Cargnin; D. Bohrer; L. M. Carvalho e L. A. H Nascimento, (2021) *Emissão e coleta de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos de amostras de asfalto bruto aquecido a 130 °C*. Energia e combustíveis, 34 (9), 11248-11257.
- Castro, C. A. A. (2003) *Estudo da técnica de anti-pó com emulsão de xisto em pavimentos para baixo volume de tráfego*. Tese de M. Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.
- Dantas, J. M. (1959) *Tratamentos contra o pó, imprimações, pinturas de ligação, tratamentos superficiais, macadames betuminosos*. Curso de Especialização Rodoviária. Instituto de Pesquisas Rodoviárias.
- Dantas Neto (2001) *Materiais asfálticos alternativos para uso em pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília - DF.
- DNIT (2006) *DNIT PRO-070: Condicionantes ambientais das áreas de uso de obras*. DPP/IPR, Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (2018) *DNIT ME-134: Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência*. DPP/IPR, Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (2014) *DNIT ES-144: Pavimentação - Imprimação com ligante asfáltico*. Rio de Janeiro-RJ.
- DNER (1999) *Diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários (escopos básicos/instruções de serviço)*. - Rio de Janeiro-RJ, IPR. Publ., 707.
- DNIT (1994) *DNIT ME-041: Solos - Preparação de Amostras para ensaios de caracterização - MT* - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (1994) *DNIT ME-049: Índice de Suporte Califórnia de Solos Utilizando Amostras não Trabalhadas - MT* - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (1994) *DNIT ME-051: Análise Granulométrica por Sedimentação - MT* - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (1994) *DNIT ME-080: Análise Granulométrica por Peneiramento - MT* - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (1994) *DNIT ME-082: Solos - Determinação do Limite de Plasticidade - MT* - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (1994) *DNIT ME-093: Solos - Determinação de Densidade Real - MT* - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (1994) *DNIT ME-122: Determinação do Limite de Liquidez de Solos - MT* - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (1994) *DNIT-ME-162: Solos - Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas - MT* - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (1997) *DNIT ME 363: Asfaltos diluídos tipo cura média - MT* - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (1997) *DNIT-ME ES-306: Pavimentação - Imprimação - MT* - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro-RJ.
- Duque Neto, F. S. (2004) *Proposição de Metodologia para Escolha de Solo e Dosagem de Antipó com Emulsão de Xisto*. Dissertação de M. Sc. Programa de Engenharia Civil, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.

- Huang, Y. H. (2004) *Pavement analysis and design*. 2.ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River - NJ.
- ISSA (1990) *TB-100: WTAT Wet Track Abrasion Test*, International Slurry Surfacing Association.
- ISSA (1990) *TB-139: Classify Emulsified Asphalt/Aggregate Mixture Systems by Modified Cohesion Tester Measurement of Set and Cure Characteristics*. International Slurry Surfacing Association.
- Kulkarni, M. B. (2005) *Effect of Tack and Prime Coats, and Baghouse Fines on Composite Asphalt Pavements*. Thesis (Ph.D.) - North Carolina State University. Disponível em: <<http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/3269>> Acesso em 20/02/2020.
- Mantilla, C. A. e J. W. Buttom (1994) *Prime coat method sand material store place cutback asphalt*. Research Report TTI 0-1334, Texas Transportation Institute Texas A&M University.
- Mohammad, L. N.; M. A. Raqib e B. Huang (2002) *Influence of Asphalt Tack Coat Materials on Interface Shear Strenght*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1789, pp56-65. Transportation Research Board of the National Academies, Washington - D.C.. DOI: 10.3141/1789-06.
- Mullins, C. E.; D. A. Macleod; K. H. Northcote; J. M. Tisdall e I. M. Young (1990) *Hard setting soils: Behavior, occurrence and management*. Adv. Soil Sci., 11:37-108. DOI: 10.1007 / 978-1-4612-3322-0_2.
- Pimentel Gomes, F. (1985) *Curso de Estatística Experimental*. Editora Nobel. Piracicaba. São Paulo.
- Pośniak, M. (2005) *Polycyclic aromatic hydrocarbons in the occupational environment during exposure to bitumen fumes*. Polish Journal of Environmental Studies, v. 14, n. 6, p. 809-815.
- Rabêlo, A. N. (2006) *Contribuição ao estudo da imprimação betuminosa das bases rodoviárias do estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE.
- Schreiner, C. A. (2011) *Review of mechanistic studies relevant to the potential carcinogenicity of asphalts*. Regulatory Toxicology and Pharmacology, v. 59, n. 2, p. 270-284, DOI: 10.1016/j.yrtph.2010.10.010.
- Vam Dam, T.; K. Kirchner; M. Shahin e E. W. Blackmon (1987) *Consequence of Layer Separation on Pavement Performance*, Report DOT/FAA/PM-86/48. US. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington - D.C.
- Vasconcelos, M. A. G. (2009) *Primeiro estudo da aplicação de biodiesel como material alternativo para a imprimação betuminosa de pavimentos rodoviários*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE.
- Villibor, D. F.; J. S. Nogami e G. T. P. Fabbri (1989) *Imprimadura asfáltica em bases de Solo Arenoso Fino Laterítico*. Anais da XV Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis-SC.