

## **AValiação da Resistência à Ação da Água em Misturas Asfálticas Modificadas por Nanoargila e Polímero SBS**

**Gabriela Ceccon Carlesso**

**Glicério Trichês**

**João Victor Staub de Melo**

**Matheus Felipe Marcon**

**Liseane Padilha Thives**

**Adosindro Joaquim de Almeida**

Universidade Federal de Santa Catarina

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

### **RESUMO**

A ação da água nas misturas asfálticas é capaz de acelerar a formação de defeitos no revestimento, aumentando a necessidade de manutenções e reduzindo a segurança dos usuários das rodovias. Visando a busca por maior resistência aos efeitos negativos da umidade, sobretudo diante do possível emprego de um nanomaterial para este fim, a pesquisa avaliou a resistência à ação da água em quatro misturas asfálticas: (1) com ligante convencional (CAP 50-70); (2) com ligante modificado por nanoargila (3% NA); (3) com ligante modificado por polímero SBS (SBS 60/85E); e (4) com ligante modificado por nanoargila e SBS (3% NA + 2% SBS). A avaliação foi realizada por meio de ensaios de Lottman modificado. Como resultado, observou-se que a nanoargila e o polímero SBS podem atuar, de maneira isolada ou conjunta, como melhoradores da resistência à ação deletéria da água, sendo o melhor comportamento observado para a mistura 3% NA + 2% SBS.

### **ABSTRACT**

Water action in asphalt mixtures is able to accelerate the distresses formation on asphalt surfaces. Aiming at the search for greater resistance to the negative effects of moisture, especially considering the possibility of the nanomaterial use for this purpose, this research evaluated the resistance to water action in four asphalt mixtures: (1) with conventional asphalt binder (CAP 50-70); (2) with binder modified by nanoclay (3% NA); (3) with binder modified by SBS polymer (SBS 60/85E); and (4) with binder modified by nanoclay and SBS (3% NC + 2% SBS). The evaluation was performed from modified Lottman tests. As a result, it was observed that the nanoclay and the SBS polymer can act, either alone or in combination, as water-damaging resistance enhancers, with the best behavior observed for the 3% NA + 2% SBS mixture.

### **1. INTRODUÇÃO**

Em regiões tropicais e subtropicais úmidas, a elevada temperatura, combinada com frequentes chuvas, faz com que o revestimento asfáltico fique submetido a repetitivos ciclos de secagem e molhagem. A ação da água nas misturas asfálticas pode ser responsável pela separação ou descolamento da película de ligante asfáltico da superfície do agregado. Como resultado da possível ação negativa da presença de umidade, na prática, tem-se a perda de resistência do revestimento asfáltico, culminando, por exemplo, na aceleração dos processos de trincamento e/ou formação de trilhas de roda, na desagregação das misturas e na formação de buracos (Bernucci et al., 1999). Isto reduz, de modo considerável, a vida útil dos pavimentos rodoviários, aumentando-se a necessidade de manutenções e reduzindo a segurança dos usuários. Desta forma, torna-se mandatório que, na fase de projeto da mistura asfáltica, a adesividade entre ligante e agregado seja avaliada.

A suscetibilidade das misturas asfálticas à ação da água depende, normalmente, das propriedades dos agregados, mas também pode ser influenciada pelas propriedades dos ligantes, características das misturas, clima, tráfego, práticas construtivas e considerações do projeto do pavimento (Seebaly et al., 2007). Nesta direção, os efeitos da presença de umidade são mais intensos em rodovias sujeitas a tráfego elevado, em misturas asfálticas com elevada porcentagem de vazios e baixos teores de ligante, submetidas a processos de compactação

falhos, com sistemas de drenagem de pavimento insuficientes, e nas situações em que haja elevados teores de argila e pó aderidos à superfície dos agregados (Ceratti e Reis, 2011).

Para evitar a degradação precoce dos revestimentos devido à ação deletéria da água, costumam ser adicionados às misturas asfálticas e/ou aos ligantes produtos que contribuem para aumentar a afinidade entre agregado e ligante, como a cal hidratada e os “dopes” (Silva, 2009). Outros produtos, como o cimento Portland, as cinzas e escórias, também podem servir como melhoradores da resistência em presença de umidade (Seebaly et al., 1998). Além destes, estudos têm demonstrado que ligantes asfálticos modificados também implementam a melhoria da resistência das misturas ao efeito deletério da água. Anitelli (2007), por exemplo, constatou o aumento da resistência da mistura à ação da umidade quando do uso de ligante modificado por polímero SBS (*Styrene-Butadiene-Styrene*). O mesmo autor apresentou resultados positivos quando da adição de cal à mistura.

Em termos de modificadores dos ligantes, com a ascensão da nanotecnologia, os nanomateriais passaram a receber especial interesse da comunidade científica nos últimos anos. Diversos estudos já demonstraram as melhorias no desempenho das misturas asfálticas modificadas com nanoprodutos (Yu et al., 2009; You et al., 2011; Goh et al., 2011; Jahromi et al., 2010; Jahromi e Khodaii, 2009; Zare-Shahabadi et al., 2010; Leite et al., 2012; Cavalcanti et al., 2010), notadamente quando combinados com outros modificadores (Pamplona et al., 2012; Farias et al., 2016; Merusi et al., 2014; Galooyak et al., 2010; Golestani et al., 2012; Golestani et al., 2015). Contudo, uma grande parcela dos estudos se restringe a ensaios com apenas os ligantes.

Neste contexto, nesta pesquisa avaliou-se a possibilidade de melhorar o comportamento das misturas asfálticas diante da ação deletéria da água por meio da adição de um nanomaterial ao ligante asfáltico, estudando-se concomitantemente os efeitos da adição de um polímero. Para tanto, foi avaliada a resistência à ação da água das quatro misturas asfálticas apresentadas a seguir: (1) uma mistura de referência, produzida com ligante convencional (CAP 50-70) (Melo, 2014); (2) uma mistura com ligante modificado somente por nanoargila (3% NA), produzido em laboratório (Melo, 2014); (3) uma mistura com ligante modificado somente por polímero SBS (*Styrene-Butadiene-Styrene*) (SBS 60/85E), produzido industrialmente (Marcon, 2016); e (4) uma mistura com ligante modificado simultaneamente por nanoargila e por SBS (3% NA + 2% SBS), produzido em laboratório (Carlesso, 2017).

## 2. MATERIAIS E MÉTODO DA PESQUISA

### 2.1. Materiais

#### 2.1.1. Agregados e composição granulométrica

As misturas asfálticas foram produzidas com agregados de origem basáltica, cuja caracterização encontra-se relacionada na Tabela 1. Como é possível observar, as propriedades listadas atendem aos critérios estabelecidos pela metodologia Superpave (quando aplicáveis), mostrando que os agregados são adequados para a formulação das respectivas misturas.

Na Tabela 2 é apresentada a caracterização da cal hidratada empregada na pesquisa, que é correspondente ao tipo CH-1 dolomítica.

**Tabela 1:** Caracterização dos agregados (Melo, 2014)

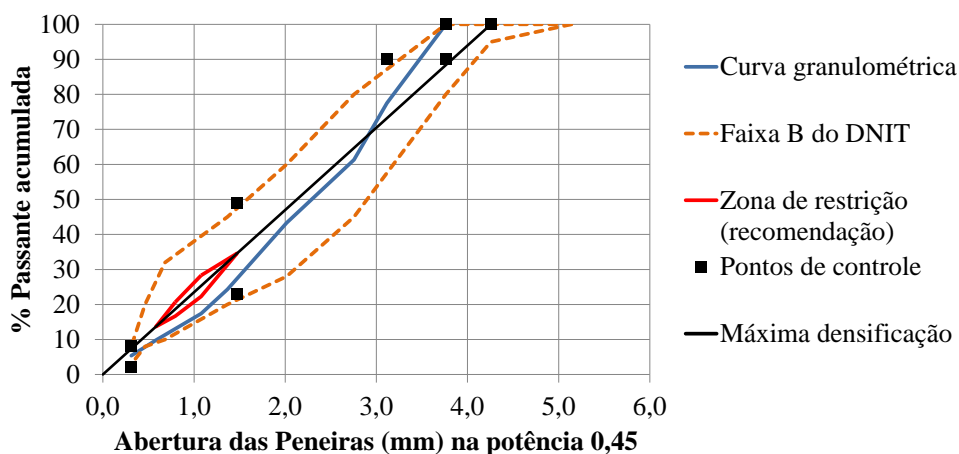
Propriedade	Norma	Resultado	Critério Superpave
Massa específica real do agregado graúdo	ASTM C 127	2,953 g/cm <sup>3</sup>	n/a
Massa específica aparente do agregado graúdo	ASTM C 127	2,880 g/cm <sup>3</sup>	n/a
Absorção do agregado graúdo	ASTM C 127	0,8%	n/a
Massa específica real do agregado miúdo	DNER-ME 084	2,974 g/cm <sup>3</sup>	n/a
Massa específica real do material pulverulento	DNER-ME 085	2,804 g/cm <sup>3</sup>	n/a
Angularidade do agregado graúdo	ASTM D 5821	100%/100%	100%/100% mín. <sup>1</sup>
Angularidade do agregado miúdo	ASTM C 1252	49,2%	45% mín.
Partículas planas e alongadas	ABNT NBR 6954	9,6%	10% máx.
Teor de argila (Equivalente de areia)	AASHTO T 176	61,2%	50% mín.
Dureza (Abrasão Los Angeles)	ASTM C 131	11,6%	35-45% máx.
Sanidade	ASTM C 88	2,1%	10-20% máx.
Materiais deletérios	AASHTO T 112	0%	0,2-10% máx.

Nota: <sup>1</sup>Ex.: 85%/80% significa que 85% dos agregados graúdos têm uma ou mais faces fraturadas e 80% têm duas ou mais faces fraturadas.

**Tabela 2:** Caracterização da cal hidratada (Melo, 2014)

Propriedade	Resultado
Perda ao fogo	18,6%
Resíduo insolúvel	1,9%
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	2,5%
Óxido de cálcio (CaO)	45,1%
Óxido de magnésio (MgO)	33,5%
Óxidos totais não voláteis (CaO + MgO)	96,5%
Óxidos totais não hidratados	27,6%
Óxidos de CaO não hidratados	0,0%
Cálcio (Ca)	32,2%
Magnésio (Mg)	20,2%
Densidade	3,0

Para a formulação das misturas asfálticas, foi adotada uma curva granulométrica correspondente à faixa B do DNIT (Figura 1), sendo composta por 43% de brita 3/4", 15,5% de pedrisco, 40% de pó de pedra e 1,5% de cal. Esta composição foi previamente definida pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/Petrobras), e teve como objetivo a obtenção de misturas com elevada resistência à deformação permanente.



**Figura 1:** Curva granulométrica da composição de agregados

Cabe ressaltar que os agregados e a composição granulométrica empregados neste estudo correspondem aos mesmos aplicados na execução dos Segmentos Monitorados do Contorno de Araranguá, BR-101 Sul, no estado de Santa Catarina, e fazem parte de um Projeto de Pesquisa coordenado pela Rede Temática de Tecnologia do Asfalto, patrocinado pela Petrobras.

### 2.1.2. Ligante asfáltico convencional

O ligante asfáltico convencional utilizado para a produção da mistura asfáltica de referência e como matriz para a modificação dos ligantes 3% NA e 3% NA + 2 % SBS corresponde a um CAP 50-70, de PG 58-22. A caracterização deste material é apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3:** Caracterização do ligante asfáltico convencional (CAP 50-70)

Propriedade	Unidade	Norma	Resultado
Penetração	0,1 mm	ASTM D 5	57
Ponto de amolecimento	°C	ASTM D 36	47,9
Índice de Susceptibilidade Térmica	-	-	-1,44
Viscosidade Brookfield			
a 135 °C ( <i>spindle</i> 21, 20 rpm)	cP	ASTM D 4402	290
a 150 °C ( <i>spindle</i> 21, 50 rpm)			150
a 175 °C ( <i>spindle</i> 21, 100 rpm)			60

### 2.1.3. Ligante asfáltico modificado por polímero SBS

A Tabela 4 apresenta a caracterização do ligante modificado por polímero SBS (60/85E).

**Tabela 4:** Caracterização do ligante asfáltico modificado por polímero SBS (SBS 60/85E)

Propriedade	Unidade	Norma	Resultado
Penetração	0,1 mm	ABNT NBR 6576	50
Ponto de amolecimento	°C	ABNT NBR 6560	73,0
Recuperação elástica	%	ABNT NBR 15086	90
Viscosidade aparente			
a 135 °C ( <i>spindle</i> 21, 20 rpm)	cP	ABNT NBR 15184	1910
a 150 °C ( <i>spindle</i> 21, 50 rpm)			640
a 175 °C ( <i>spindle</i> 21, 100 rpm)			290

### 2.1.4 Modificadores

A nanoargila organofílica empregada para a modificação do CAP 50-70 possui tamanho de partícula (seco) de 7-9  $\mu\text{m}$ , tamanho de partícula após a dispersão de  $1 \times 500 \text{ nm}$  e massa específica igual a  $1,7 \text{ g/cm}^3$ . É composta por carbono (45,50%), silício (33,42%), alumínio (16,08%), ferro (3,60%), cloro (0,80%), titânio (0,31%), potássio (0,27%) e estrôncio (0,02%). Conforme resultados de ensaios de termogravimetria, é termicamente estável em temperaturas abaixo de  $262,4^\circ\text{C}$  (Melo, 2014).

O polímero SBS utilizado como modificador possui estrutura linear, com porcentagem de poliestireno entre 30% e 32%, sendo fornecido e empregado na forma de grânulos.

## 2.2. Método da pesquisa

### 2.2.1. Etapa 1: modificação e caracterização dos ligantes modificados

A Etapa 1 consistiu na modificação do ligante convencional e posterior caracterização dos ligantes modificados. Nesta etapa, foram produzidos, em laboratório, os ligantes 3% NA (modificado por 3% de nanoargila em relação ao peso de CAP 50-70) e 3% NA + 2% SBS

(modificado por 3% de nanoargila e 2% de polímero SBS). O teor de 3% de nanoargila foi adotado a partir dos resultados de um estudo de otimização realizado previamente, no qual foi avaliada a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas produzidas com ligantes modificados por 1%, 2% e 3% de nanoargila (Melo, 2014).

No caso do ligante 3% NA + 2% SBS, a adição simultânea de 2% de SBS teve como objetivo conferir recuperação elástica ao ligante asfáltico modificado somente com 3% NA, o qual apresentava recuperação elástica menor do que 10%. Além disso, ao se adotar um teor reduzido de polímero, buscou-se aliar um aumento significativo no desempenho do ligante a um baixo incremento no custo final, baseando-se nos resultados obtidos por Pamplona et al. (2012), que estudaram a modificação com 2,5% de nanoargila e 2,5% de SBS.

A nanoargila e o polímero SBS foram incorporados ao ligante base CAP 50-70 a partir do emprego de um misturador de alto cisalhamento de laboratório, modelo L5M-A da Silverson. A modificação para se produzir o ligante 3% NA foi realizada na temperatura de 150°C, sob velocidade de cisalhamento de 5.000 rpm e período de compatibilização igual a 100 minutos. Para o ligante 3% NA + 2% SBS, adotou-se a temperatura de modificação de 180°C e o período de mistura de 180 minutos, mantendo-se a velocidade de 5.000 rpm. Estes procedimentos foram definidos com base no estudo da literatura (Yu et al., 2009; Goh et al., 2011; Zare-Shahabadi et. al, 2010; Pamplona et al., 2012; Farias et al., 2016; Merusi et al., 2014; Galooyak et al., 2010; Golestani et al., 2012; Golestani et al., 2015).

Posteriormente, os ligantes modificados foram caracterizados segundo as propriedades de penetração (ABNT NBR 6576), ponto de amolecimento (ABNT NBR 6560), recuperação elástica (ABNT NBR 15086), separação de fase (ABNT NBR 15166) e viscosidade aparente (ABNT NBR 15184).

#### 2.2.2. Etapa 2: definição dos teores de ligante de projeto das misturas asfálticas

Na Etapa 2, foram definidos os teores de ligante de projeto das misturas asfálticas, empregando-se a metodologia de dosagem Superpave, de acordo com as normas AASHTO M 323 e AASHTO R 35. Para o tamanho nominal máximo de agregado de 19 mm e para rodovia de alto volume de tráfego (onde estão inseridos os segmentos monitorados), os teores de ligante de projeto corresponderam àqueles em que foram atendidos, simultaneamente, os critérios de dosagem relacionados a seguir: (1) porcentagem de volume de vazios no  $N_{inicial}$  (9 giros,  $V_v@N_{inicial} > 11,0\%$ ); (2) porcentagem de volume de vazios no  $N_{projeto}$  (125 giros,  $V_v@N_{projeto} = 4,0\%$ ); (3) vazios do agregado mineral (VAM)  $\geq 13,0\%$ ; (4) relação betume-vazios (RBV) entre 65% e 75%; e (5) relação pó-betume entre 0,8 e 1,6.

#### 2.2.3. Etapa 3: avaliação do dano por umidade induzida

Após a definição do teor de ligante de projeto, foi avaliado o efeito da ação deletéria da água nas misturas, através da realização do ensaio de Lottman modificado (ABNT NBR 15617).

Para tanto, foram previamente moldados seis corpos de prova para cada mistura, cada qual com diâmetro de 100 mm, volume de vazios entre 6,0% e 8,0%, e teor de ligante conforme definido no estudo de dosagem. Dos seis corpos de prova de cada mistura, três permaneceram em repouso em laboratório, enquanto os outros três foram submetidos ao condicionamento conforme especificado pela citada norma. Posteriormente, os corpos de prova foram rompidos à tração indireta, na temperatura de 25°C (DNIT 136-ME).



Deste modo, foram determinadas a resistência do grupo condicionado ( $RT_1$ ) e a resistência do grupo não condicionado ( $RT_2$ ), bem como a relação entre elas. Cabe destacar que, para a aceitação da mistura, recomenda-se a obtenção de uma relação ( $RRT = RT_1/RT_2$ ) maior do que 70% (DNIT 180-ME).

### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 3.1. Caracterização dos ligantes modificados

A Tabela 5 apresenta a caracterização dos ligantes asfálticos modificados em laboratório.

**Tabela 5:** Caracterização dos ligantes asfálticos 3% NA e 3% NA + 2% SBS

Propriedade	Unidade	Norma	Ligante asfáltico	
			3% NA	3% NA + 2% SBS
Penetração	0,1 mm	ABNT NBR 6576	55	36
Ponto de amolecimento	°C	ABNT NBR 6560	50,2	56,9
Recuperação elástica	%	ABNT NBR 15086	6	49
Separação de fase (24h/48h)	°C	ABNT NBR 15166	1,0/-	0,5/0,8
Viscosidade aparente				
a 135 °C ( <i>spindle</i> 21, 20 rpm)	cP	ABNT NBR 15184	410	760
a 150 °C ( <i>spindle</i> 21, 50 rpm)			210	370
a 175 °C ( <i>spindle</i> 21, 100 rpm)			90	160

Comparando-se os resultados da Tabela 5 com a caracterização empírica do CAP 50-70 (Tabela 3) e do ligante SBS 60/85E (Tabela 4), observa-se que, conforme esperado, a modificação dos ligantes resultou na diminuição da penetração e no aumento do ponto de amolecimento. Entre os resultados, pode-se destacar a penetração relativamente baixa obtida para o ligante 3% NA + 2% SBS e o ponto de amolecimento relativamente alto do ligante SBS 60/85E, demonstrando os ganhos de rigidez do primeiro em contraste com os ganhos relacionados à sensibilidade a elevadas temperaturas do segundo. Estas características indicam a formulação de misturas asfálticas bastante resistentes à deformação permanente, cuja previsão de comportamento, sobretudo a partir da penetração, pode ser considerada adequada se levados em consideração os resultados apresentados anteriormente por Carlesso et al. (2019). Nesta direção, os autores realizaram ensaios empregando-se o simulador de tráfego LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) com as respectivas misturas, e demonstraram a resistência à deformação permanente muito superior, aos 30.000 ciclos, para a mistura 3% NA + 2% SBS (58% em relação à convencional). No entanto, é importante ressaltar que a previsão de desempenho das misturas asfálticas a partir da caracterização empírica dos ligantes modificados apresenta grandes limitações.

Quanto à propriedade de recuperação elástica, pode-se observar a obtenção de um valor mais elevado para o ligante SBS 60/85E. Tal resultado deve-se ao teor de polímero elastomérico relativamente alto incorporado ao material (em torno de 4%). Em contrapartida, a baixa recuperação elástica do ligante 3% NA relaciona-se ao fato de que a nanoargila não funciona como um produto elastomérico na modificação.

Em relação à estabilidade à estocagem, os ensaios realizados com os ligantes 3% NA e 3% NA + 2% SBS demonstraram que estes materiais não apresentam separação de fases considerável, estando os resultados abaixo do limite máximo (de 5 °C) estabelecido pela Especificação Brasileira de Asfalto-Polímero (ANP, 2010).

Além disso, cabe comentar que os resultados obtidos para a viscosidade dos ligantes modificados também se enquadram nos limites estabelecidos pela Especificação Brasileira de Asfalto-Polímero (ANP, 2010), ainda que tenham sido identificados aumentos consideráveis em comparação ao CAP 50-70 (convencional).

### 3.2. Definição dos teores de ligante de projeto das misturas asfálticas

A Tabela 6 relaciona os teores de ligante de projeto obtidos a partir da aplicação da metodologia de dosagem Superpave.

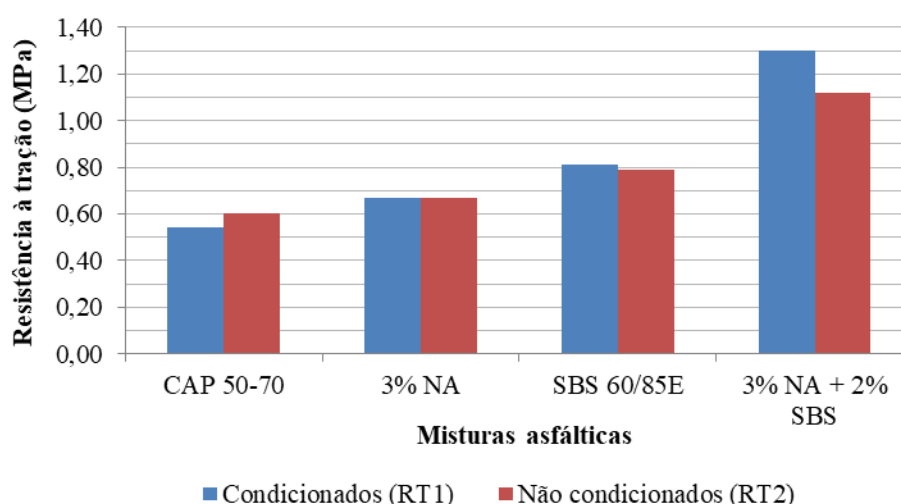
**Tabela 6:** Teores de ligante de projeto das diferentes misturas asfálticas

Ligante asfáltico	Teor de ligante de projeto (%)
CAP 50-70	4,4
3% NA	4,1
SBS 60/85E	4,5
3% NA + 2% SBS	4,3

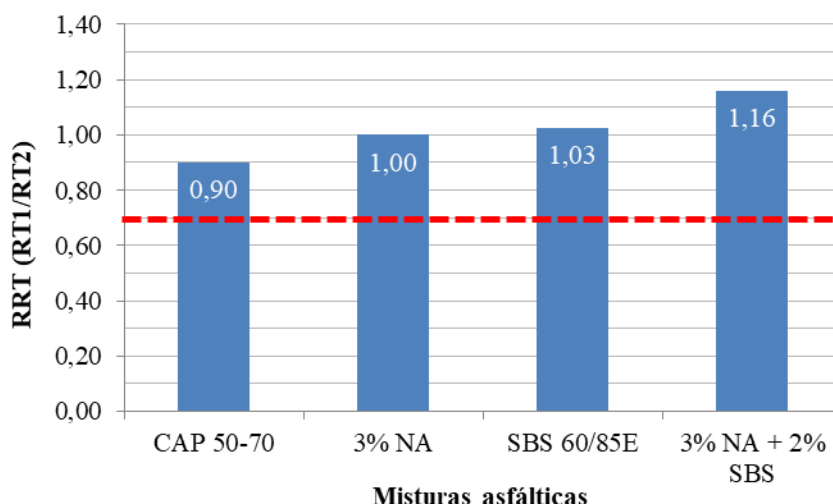
Como é possível observar na Tabela 6, a adição de nanoargila ao ligante convencional propicia uma redução no teor de ligante de projeto da mistura asfáltica. Em contrapartida, a incorporação do polímero SBS faz com que seja requerido um teor de ligante superior. Deste modo, o resultado intermediário obtido para a mistura 3% NA + 2% SBS no estudo de dosagem demonstra a combinação do efeito positivo da nanoargila, em termos de trabalhabilidade da mistura, ao efeito negativo oriundo da presença do polímero. Contudo, é possível admitir que as variações nos teores de ligante de projeto estão no interior do intervalo de  $\pm 0,3\%$  permitido, em campo, pelas especificações construtivas vigentes no Brasil.

### 3.3. Avaliação do dano por umidade induzida

As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, a resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados e a relação entre elas (RRT).



**Figura 2:** Resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados



**Figura 3:** Relação de resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados ( $RRT = RT_1/RT_2$ )

Inicialmente, da observação da Figura 2, destacam-se os valores mais elevados de resistência à tração obtidos para a mistura 3% NA + 2% SBS, tanto para os corpos de prova condicionados quanto para aqueles não condicionados. Estes resultados podem ser atribuídos à forte ligação/adesividade estabelecida entre o ligante e os agregados e, adicionalmente, à alta rigidez do referido ligante em comparação aos demais, conforme observado na caracterização empírica dos ligantes modificados.

Tratando-se da relação entre as resistências dos corpos de prova submetidos a diferentes tratamentos (RRT), conforme é possível observar na Figura 3, todas apresentaram desempenhos considerados satisfatórios em comparação com o limite estabelecido para a aceitação das misturas ( $RRT$  mínima = 70%), inclusive a mistura convencional (de referência). Neste sentido, é interessante mencionar que ambas foram produzidas com agregados de origem basáltica e possuem cal hidratada em sua composição, influenciando positivamente na ligação entre ligantes e agregados.

No contexto das diferentes misturas avaliadas, cabe ressaltar a ausência de dano por umidade induzida nas misturas modificadas por nanoargila e por SBS, indicando que estes modificadores também podem auxiliar na inibição da ação deletéria da água, atuando, inclusive, como melhoradores de comportamento na presença de umidade.

Entre os resultados de RRT obtidos para as diferentes misturas, destaca-se o desempenho superior da mistura produzida com o ligante 3% NA + 2% SBS. Neste contexto, acredita-se que a ação benéfica isolada da nanoargila e do polímero nas misturas asfálticas é combinada quando da aplicação simultânea de ambos, o que pode representar melhorias mais significativas no desempenho destas misturas, em campo, diante da alta pluviosidade de muitas regiões brasileiras.

Desta maneira, em termos de resistência à ação da água, tem-se como principal resultado o melhor comportamento da mistura 3% NA + 2% SBS, que é seguido pelo comportamento da mistura SBS 60/85E, da mistura 3% NA e da mistura convencional. Na pesquisa de Golestani et al. (2015), a mesma hierarquia foi estabelecida para os valores de RRT de misturas



análogas.

#### 4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o objetivo definido para esta pesquisa, seu desenvolvimento possibilitou a avaliação e posterior estudo comparativo da resistência à ação deletéria da água de quatro misturas asfálticas distintas: uma produzida com ligante convencional (CAP 50-70); uma com ligante modificado somente por nanoargila (3% NA); outra com ligante modificado somente por polímero SBS (SBS 60/85E); e outra com ligante modificado simultaneamente por nanoargila e por SBS (3% NA + 2% SBS).

Como resultado, a partir dos ensaios de Lottman modificado, observou-se que tanto a nanoargila quanto o polímero SBS, de modo isolado, podem ser capazes de atuar na melhoria da resistência à ação deletéria da água, inclusive inibindo os efeitos negativos da umidade identificados no caso da mistura convencional. Contudo, entre as misturas avaliadas, o melhor resultado foi observado para aquela duplamente modificada (3% NA + 2% SBS), cujos corpos de prova submetidos ao ciclo de saturação, congelamento e descongelamento, se comparados àqueles que permaneceram em repouso, chegaram a apresentar um aumento de resistência que pode ser considerado significativo. Deste modo, o emprego da mistura 3% NA + 2% SBS poderia representar grandes ganhos de desempenho em regiões de alta pluviosidade, por exemplo.

No mesmo sentido, com ênfase para o emprego da nanotecnologia na modificação de misturas asfálticas, cabe mencionar que, em estudo publicado anteriormente (Carlesso et al., 2019), os autores também demonstraram, sob outros aspectos, o comportamento satisfatório das misturas modificadas por nanoargila. Entre elas, também merece destaque a mistura modificada simultaneamente por nanoargila e SBS, sobretudo em termos de resistência à deformação permanente. Desta maneira, os resultados desta pesquisa, em conjunto com aqueles anteriormente apresentados por Carlesso et al. (2019), corroboram para a ideia de que a associação entre a ciência dos polímeros e a nanotecnologia, apesar de relativamente recente, possui elevado potencial para promover grandes avanços no desempenho de misturas asfálticas modificadas.

#### Agradecimentos

O primeiro e o quarto autores agradecem ao CNPq e a CAPES pelas bolsas de Mestrado. Os autores agradecem a Rede Temática de Tecnologia do Asfalto/Petrobras, pelos investimentos realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2013) *AASHTO M 323: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. American Association of State Highway and Transportation, Washington, DC.
- AASHTO (2012) *AASHTO R 35: Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation, Washington, DC.
- AASHTO (2012) *AASHTO T 112: Standard method of test for clay lumps and friable particles in aggregates*. American Association of State Highway and Transportation, Washington, DC.
- AASHTO (2008) *AASHTO T 176: Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soils by use of the sand equivalent test*. American Association of State Highway and Transportation, Washington, DC.
- ABNT (2016) *ABNT NBR 6560: Ligantes asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2007) *ABNT NBR 6576: Materiais asfálticos – Determinação da penetração*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

- ABNT (1989) *ABNT NBR 6954: Lastro-padrão – Determinação da forma do material*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2006) *ABNT NBR 15086: Materiais betuminosos – Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) *ABNT NBR 15166: Asfalto modificado – Ensaio de separação de fase*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) *ABNT NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2015) *ABNT NBR 15617 – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ANITELLI, A. (2013) *Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- ANP (2010) *Resolução ANP n° 32, DE 21.9.2010 DOU 22.9.2010*. Agência Nacional De Petróleo, Gás e Biocombustível, Brasília.
- ASTM (2013) *ASTM C 88: Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2012) *ASTM C 127: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2014) *ASTM C 131: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2006) *ASTM C 1252: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2013) *ASTM D 5: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2014) *ASTM D 36 – Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2013) *ASTM D 4402 – Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2013) *ASTM D 5821: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- Bernucci, L. B.; J. A. P. Ceratti; J. M. Chaves; E. Moura e A. D. Carvalho (1999) *Estudo de Adesividade no Comportamento de Misturas Asfálticas*. *Anais do 10º Congresso Ibero-Latino-americano del Asfalto*. Espanha.
- Carlesso, G. C. (2017) *Estudo do comportamento de mistura asfáltica modificada por nanoargila e polímero SBS*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Carlesso, G. C.; G. Trichês; J. V. S. Melo; M. F. Marcon; L. P. Thives e L. C. Luz (2019) *Evaluation of Rheological Behavior, Resistance to Permanent Deformation, and Resistance to Fatigue of Asphalt Mixtures Modified with Nanoclay and SBS Polymer*. *Applied Sciences*, v. 9, n. 13, p. 2697 (1-16).
- Cavalcanti, L. S. (2010) *Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Ceratti, J. A. P. e R. M. M. Reis (2011) *Manual de dosagem de concreto asfáltico*. Oficina de Textos, São Paulo.
- DNER (1995) *DNER-ME 084: Agregado miúdo – determinação da densidade real. Método de ensaio*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994) *DNER-ME 085: Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real. Método de ensaio*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNIT (2018) *DNIT-ME 136: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2018) *DNIT-ME 180: Pavimentação– Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Farias, L. G. A. T.; J. L. Leitinho; B. C. Amoni; J. B. S. Bastos; J. B. Soares; S. A. Soares e H. B. Sant’Ana

- (2016) Effects of nanoclay and nanocomposites on bitumen rheological properties. *Construction and building materials*, v. 125, p. 873-883.
- Galooyak, S. S.; B. Dabir; A. E. Nazarbeygi e A. Moeini (2010) Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. *Construction and building materials*, v. 24, n. 3, p. 300-307.
- Goh, S. W.; M. Akin; Z. You e X. Shi (2011) Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro or nano-modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 1, p. 195-200.
- Golestani, B.; F. M. Nejad e S. S. Galooyak (2012) Performance evaluation of linear and nonlinear nanocomposite modified asphalts. *Construction and building materials*, v. 35, p. 197-203.
- Golestani, B.; B. H. Nam; F. M. Nejad e S. Fallah (2015) Nanoclay application to asphalt concrete: characterization of polymer and linear nanocomposite-modified asphalt binder and mixture. *Construction and building materials*, v. 91, p. 32-38.
- Jahromi, S. G. e A. Khodaii (2009) Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 8, p. 2894-2904.
- Jahromi, S. G.; B. Andalibzade e S. Vossough (2010) Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 35, n. 1B, p. 89-103.
- Leite, L. F. M.; G. Guerra; A. Martins e M. Cravo (2012) Efeito de nanomodificadores no envelhecimento e susceptibilidade térmica de cimentos asfálticos. *Anais da 42ª Reunião Anual de Pavimentação*. Fortaleza.
- Marcon, M. F. (2016) Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Melo, J. V. S. (2014) *Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Merusi, F.; F. Giuliani; S. Filippi e G. Polacco (2014) A model combining structure and properties of 160/220 bituminous binder modified with polymer/clay nanocomposites. A rheological and morphological study. *Materials and structures*, v. 47, n. 5, p. 819-838.
- Pamplona, T. F.; B. C. Amoni; A. E. V. Alencar; A. P. D. Lima; N. M. P. S. Ricardo; J. B. Soares e S. A. Soares (2012) Asphalt binders modified by SBS and SBS/nanoclays: effect on rheological properties. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 23, n. 4, p. 639-647.
- Sebaaly, P. E.; D. Little; E. Y. Hajj e A. Bhasin (2007) Impact of Lime and Liquid Antistrip Agents on Properties of Idaho Hot-Mix Asphalt Mixture. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, v. 1998, n. 1, 65-74.
- Silva, C. A. R. (2009) *Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- You, Z.; J. Mills-Beale; J. M. Foley; S. Roy; G. M. Odegard; Q. Dai e S. W. Goh (2011) Nanoclay-modified asphalt materials preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 2, p. 1072-1078.
- Yu, J.; P. Feng; H. Zhang e S. Wu (2009) Effect of organo-montmorillonite on aging properties of asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 7, p. 2636-2640.
- Zare-Shahabadi, A.; A. Shokuhfar e S. Ebrahimi-Nejad (2010) Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 7, p. 1239-1244.

---

Gabriela Ceccon Carlesso (gabriela.carlesso@gmail.com)

Glicério Trichês (glicerio.triches@ufsc.br)

João Victor Staub de Melo (joao.victor@ufsc.br)

Matheus Felipe Marcon (matheusfmarcon@gmail.com)

Liseane Padilha Thives (liseane.thives@ufsc.br)

Adosindro Joaquim de Almeida (adosindro@gmail.com)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina

Rua João Pio Duarte Silva, s/n, Córrego Grande – Florianópolis, SC, Brasil