

# Avaliação laboratorial da condição de aderência entre base granular e concreto asfáltico

## Laboratorial evaluation of the bond condition between granular base and asphalt concrete

Renan Gustavo Scherer<sup>1</sup>, Deividi da Silva Pereira<sup>2</sup>, Luciano Pivoto Specht<sup>3</sup>, Lucas Dotto Bueno<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul – Brasil, renangscherer@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul – Brasil, dsp@ufsm.br

<sup>3</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul – Brasil, luspecht@ufsm.br

<sup>4</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul – Brasil, lucas.bueno@ufsm.br

### Recebido:

7 de dezembro de 2021

### Aceito para publicação:

7 de junho de 2022

### Publicado:

27 de outubro de 2022

### Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

### Palavras-chave:

Aderência entre camadas.  
Cisalhamento de interfaces.  
Pavimentação.

### Keywords:

Bonding between layers.  
Interface shear.  
Paving.

### RESUMO

A condição de aderência entre a base granular e o revestimento asfáltico de pavimentos é um fator que tem influência direta no cálculo de esforços, deformações e deslocamentos em seu interior, impactando, portanto, o seu dimensionamento. Este artigo tem por objetivo avaliar experimentalmente a condição de aderência entre estas camadas, por meio de ensaios que investigaram o cisalhamento da interface, verificando ainda a influência da temperatura, da tensão normal e de distintos tratamentos desta interface. Para isto, foi empregado o ensaio apresentado em Scherer *et al.* (2020), com o qual é possível avaliar a resistência ao cisalhamento na interface com a atuação de tensão normal utilizando um aparato de ensaio acoplado a uma prensa universal. Os resultados obtidos demonstraram que a temperatura, a tensão normal e o tratamento realizado na interface apresentam correlação com a resistência ao cisalhamento e o módulo de reação ao cisalhamento. Também, que os valores destes são mais elevados quando da aplicação de imprimação e pintura de ligação, em baixas temperaturas e com tensão normal elevada. Para as condições estudadas nesta pesquisa, considerando os valores de referência para o módulo de reação ao cisalhamento encontrados na literatura internacional, foi obtido o indicativo de que a condição de interface não aderida é aquela que melhor representa a possível condição de campo.

### ABSTRACT

The bond condition between the aggregate base and the asphalt concrete is a factor that has significantly influence on the calculation of stresses, strains and displacements in its interior, therefore impacting its dimensioning. This article aims to experimentally evaluate the bond condition between these layers, by means of tests that investigated the interface shear, also verifying the influence of temperature, normal stress and different treatments of this interface. For this, the test presented in Scherer *et al.* (2020) was used, with which it is possible to evaluate the shear strength at the interface with normal stress actuation using a test apparatus coupled to a universal testing machine. The results obtained demonstrated that the temperature, the normal stress, and the treatment performed at the interface are correlated with shear strength and shear reaction modulus. Also, that the values of these are higher when applying of prime coat plus tack coat, at low temperatures and with high normal stress. For the conditions studied in this research, considering the reference values for the shear reaction modulus found in the international literature, the indication that the unbonded interface condition is the one that best represents the possible field condition was obtained.

DOI:10.14295/transportes.v30i3.2725



## 1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento e a análise de pavimentos através da mecânica de pavimentos são realizados com a determinação das tensões, deformações e deslocamentos em seu interior. Os valores obtidos nesta análise são influenciados pela estrutura do pavimento, o tráfego e o clima considerados. Além destes, a condição de ligação entre as camadas constituintes dos pavimentos, com ou sem aderência entre elas, é um dos fatores que impacta nos resultados das avaliações (PETIT *et al.*, 2018).

Autores como Kruntcheva *et al.* (2005), Hariyadi *et al.* (2013), Torquato e Silva *et al.* (2015), Santos *et al.* (2017) e Rocha *et al.* (2021) demonstraram numericamente que a aderência entre as camadas dos pavimentos influencia os valores de esforços, deformações e deslocamentos, ligados ao desempenho dos pavimentos. Estes valores são significativamente impactados, em especial, pela consideração da interface entre o revestimento asfáltico e a base granular como aderida ou não durante as avaliações, conforme apresentado por Scherer *et al.* (2016).

A decisão de como a interface será tratada na análise de pavimentos não constitui, contudo, uma decisão de projeto. As técnicas construtivas empregadas em pavimentação não permitem impor como será o trabalho mecânico na interface das camadas de pavimentos, se serão construídas aderidas ou não, ou mesmo se apresentarão aderência parcial, sobretudo quando trabalha-se com misturas asfálticas sobrepostas a bases granulares. A modelagem computacional do pavimento, por outro lado, deve representar, por princípio, as condições de campo e, para tal, incluir a adequada ponderação quanto à aderência das interfaces.

Deste modo, este trabalho tem por objetivo avaliar a aderência entre a camada de revestimento asfáltico e a de base granular, condição estrutural usual dos pavimentos brasileiros. Também, verificar a influência sobre a condição de aderência da tensão normal, da temperatura e do tipo de tratamento da interface.

Usualmente considera-se que a aderência entre materiais é composta pela aderência por adesão, aderência mecânica e aderência por atrito. A aderência por adesão é aquela que vem das ligações químicas entre os materiais. A aderência mecânica está ligada a conformação superficial entre as camadas, com o preenchimento das saliências de uma camada pelo material da outra. Já a aderência por atrito se manifesta quando há o deslocamento na interface, estando relacionada aos coeficientes de atrito dos materiais. Na prática, contudo, é difícil analisar cada componente separadamente.

A avaliação da aderência tem sido realizada através de diferentes mecanismos de ruptura e equipamentos de ensaios. Já foram apresentados ensaios baseados na tração, na torção e no cisalhamento de interface, como os mencionados em Petit *et al.* (2018), alguns chegando a ser normatizados. O grupo dos ensaios baseados no cisalhamento é o que apresenta um maior número de propostas, sendo também os mais empregados. Isto ocorre, conforme Canestrari *et al.* (2013) e Raposeiras *et al.* (2013), porque os ensaios de cisalhamento são mais representativos quanto à ruptura da interface em pavimentos, sendo também aqueles com maior desenvolvimento teórico.

Em geral, os estudos realizados para a quantificação da aderência são voltados ao caso de duas camadas asfálticas. Isto faz com que a maioria dos equipamentos empregados não sejam adequados para utilização quando uma das camadas é de material granular, por tanto, não aglutinado, como bases em brita graduada simples (BGS).

Dentre os que podem ser utilizados para tal configuração de camadas, comum à boa parte dos pavimentos brasileiros, tem-se os apresentados por Torquato e Silva (2017) e por Scherer (2018).

O ensaio de Torquato e Silva (2017) utiliza um equipamento desenvolvido pelo autor que consiste de um molde com uma haste roscada e uma mola para a aplicação da tensão normal, acoplável a uma prensa UTM, onde é realizado o cisalhamento. A haste parafusada transmite o esforço normal à camada superior por meio de uma mola, permitindo o cálculo da força aplicada através da *Lei de Hooke*. Torquato e Silva *et al.* (2018) empregaram este equipamento em ensaios com tensões normais de até 100 kPa e utilizaram os resultados obtidos na proposta de um modelo constitutivo da interface. Para tensões normais mais elevadas, contudo, a utilização do equipamento é dificultada, dadas as dimensões da mola que seriam necessárias à transmissão de tensões normais superiores.

No ensaio apresentado em Scherer (2018) e em Scherer *et al.* (2020) é utilizado um conjunto de moldes especiais e um equipamento acoplável em prensas universais. Os moldes permitem o preparo de amostras com duas camadas. Elas são ensaiadas após condicionamento térmico, sendo inicialmente submetidas a uma tensão normal, mantida sobre o corpo-de-prova pelo equipamento desenvolvido. O cisalhamento é realizado na prensa, sendo coletados dados de força aplicada e deslocamento relativo da interface. Este ensaio foi escolhido para utilização nesta pesquisa, assim, maiores detalhes sobre o equipamento e os procedimentos necessários serão apresentados no item de materiais e métodos.

Os ensaios para determinação da aderência com base no cisalhamento realizam esta avaliação a partir da resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ) e/ou do módulo de reação ao cisalhamento ( $K$ ) na interface. A resistência ao cisalhamento é a maior tensão de cisalhamento atuante na interface, no momento da ruptura da amostra. O módulo de reação ao cisalhamento, obtido através do modelo de Goodman (1968), é a relação entre a resistência ao cisalhamento e o deslocamento sofrido pela interface no momento da ruptura ( $\Delta x$ ), expresso pela Equação (1) (CANESTRARI *et al.*, 2013).

$$K = \tau/\Delta x \quad (1)$$

Teoricamente, o módulo de reação ao cisalhamento ( $K$ ) pode assumir qualquer valor entre zero e infinito (positivo). Um valor de  $K$  igual a zero seria correspondente a uma tensão de cisalhamento nula, representado, portanto, a ausência de aderência. Por outro lado, um  $K$  infinito representaria a aderência plena, correspondente a um deslocamento relativo entre as camadas infinitesimal. Estudos realizados por Uzan *et al.* (1978) e Kruntcheva *et al.* (2005), contudo, demonstraram que, para qualquer valor de  $K$  maior que 100 MPa/mm, o comportamento da interface pode ser considerado como totalmente aderido. Já para valores inferiores a 0,1 MPa/mm, pode-se considerar que as camadas atuam com deslizamento total na interface.

Com o módulo de reação ao cisalhamento é possível determinar a condição de aderência entre as camadas do pavimento a partir dos resultados de ensaios laboratoriais. Para tal, pode-se empregar como critério os mencionados valores de referência indicados em Uzan *et al.* (1978) e Kruntcheva *et al.* (2005). Assim, avaliações com resultados de módulo de reação ao cisalhamento maiores que 100 MPa/mm indicam a aderência entre as camadas, enquanto resultados de  $K$  inferiores a 0,1 MPa/mm indicam a não aderência entre as camadas do pavimento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As avaliações realizadas buscaram determinar a aderência entre o revestimento asfáltico e a

base granular, considerando ainda a temperatura de ensaio, a tensão normal atuante e o tipo de tratamento de interface. Para tal, foram preparadas amostras com três tipos de tratamento de interface: revestimento moldado diretamente sobre a base (*sem tratamento*), com *imprimação* entre a base e o revestimento e com *imprimação sobre a base mais pintura de ligação sobre a imprimação*. Os dois últimos perfazem condições comumente encontradas em obras rodoviárias nacionais.

As temperaturas de ensaio, buscando englobar as condições usuais de campo na região sul do país e, ainda, aquelas em que os equipamentos laboratoriais disponíveis permitiam, foram definidas em 0°C, 25°C e 40°C.

Já as tensões normais estabelecidas foram 0,00 MPa, 0,55 MPa e 0,83 MPa. Tais pressões foram determinadas para abranger a condição hipotética de ausência de esforço normal, somados às condições de ação de um eixo padrão rodoviário adotado nos fatores de equivalência de carga (pressão de inflação de pneus de 0,55 MPa) e a condição mais usual de inflação de pneus atualmente (0,83 MPa).

Esses fatores foram combinados entre si, gerando um total de 27 combinações de tratamento, temperatura e tensão normal, sendo avaliados, no mínimo, 3 corpos-de-prova para cada caso.

Os ensaios foram realizados com o método e os equipamentos apresentados em Scherer (2018), Scherer *et al.* (2020) e Torquato e Silva *et al.* (2020). Neste ensaio, as amostras foram preparadas em um conjunto de moldes especialmente desenvolvidos para duas camadas de materiais. A ruptura fora gerada em prensa universal UTM-25 da IPC Global, com a utilização de um aparato que permite o ensaio de cisalhamento com a amostra sob a tensão normal definida. Por meio da prensa empregada, foi possível o controle da velocidade de deslocamento do atuador, permitindo a ruptura da interface com deslocamento constante. Os sensores e softwares do equipamento também possibilitaram a coleta de dados de posição do atuador e da força aplicada ao longo de toda a duração do ensaio. Já o condicionamento térmico das amostras e o controle da temperatura durante as avaliações foi realizado através da câmara térmica do equipamento.

Para o preparo das amostras foram utilizados materiais coletados na execução de um trecho experimental monitorado na ERS-509, em Santa Maria/RS. A mistura asfáltica empregada foi Asfalto Borracha (AB-8), Faixa B da norma da norma DAER/RS-ES-P 16/91 (DAER, 1998). O teor de ligante foi de 6,76% e a densidade máxima medida 2.340 kg/m<sup>3</sup> (NBR 15619:2016), com índice de vazios de projeto de 4,1%.

A granulometria da Brita Graduada Simples (BGS) coletada se enquadra na Classe A da especificação DAER/RS-ES-P 08/91 (DAER, 1998). A massa específica seca máxima do material foi de 2.260 kg/m<sup>3</sup> e a umidade ótima de compactação de 7,5% (Proctor Modificado), conforme a norma DAER/RS-EL 110/01 (DAER, 2001).

A imprimação foi realizada com Asfalto Diluído CM-30 e a pintura de ligação com Emulsão Asfáltica RR-2C. Ambos materiais foram coletados em campo e aplicados com a mesma taxa imposta ao segmento viário, de 1 l/m<sup>2</sup> para a imprimação e para a pintura de ligação diluída em 1:1 com água.

A moldagem ou compactação das amostras ensaiadas foi realizada em etapas, por impacto, através do soquete Marshall, nos moldes apresentados em Scherer *et al.* (2020). Inicialmente realizou-se a compactação da camada de base granular, considerando sua massa específica seca máxima e umidade ótima de compactação (Figura1-A). Após, a interface foi limpa para retirada

de material solto (Figura 1-B) e foram realizados os tratamentos de interface. Conforme o caso avaliado, aplicou-se a imprimação (Figura 1-C) e, se fosse o caso, sobre esta, a pintura de ligação (Figura 1-D), após a cura do asfalto diluído. Finalmente, compactou-se a segunda camada, com a mistura asfáltica, considerando a massa específica do material (Figura 1-E). Para os ensaios, os corpos-de-prova foram previamente condicionados nas temperaturas definidas.



Figura 1. Preparo das amostras

A prensa utilizada para a ruptura é uniaxial, sendo o atuador empregado para o cisalhamento da interface. Para a amostra estar sob a tensão normal definida durante a ruptura, esta foi aplicada previamente, na forma de condicionamento, com a utilização do aparato de ensaio apresentado em Scherer *et al.* (2020). Para tal, foram utilizados carregamento pré-determinados, obtidos a partir de avaliações experimentais. Isso permitiu a definição da força a ser aplicada no aparato para que a tensão atuante sobre a amostra durante a etapa de cisalhamento fosse, em média, aquela estabelecida. Maiores detalhes do procedimento são apresentados em Scherer *et al.* (2020). Ao final, as tensões normais médias obtidas e utilizadas nos ensaios foram 0,05 MPa, 0,57 MPa e 0,86 MPa, com desvio padrão, respectivamente, menor que 0,01 MPa, 0,03 MPa e 0,02 MPa.

Após a aplicação da tensão normal definida sobre o aparato (Figura 2-A) e com a amostra condicionada termicamente, passou-se para a etapa de cisalhamento. Nesta etapa o equipamento foi reposicionado e acoplado à mesa e ao atuador da prensa (Figura 2-B). O cisalhamento da interface ocorreu com o deslocamento do atuador para cima na velocidade de 50,8 mm/min, usualmente empregada em ensaios similares voltados à avaliação da aderência entre camadas aglutinadas. Ao se deslocar, o atuador leva consigo a parte do molde contendo a camada de base, enquanto a parte com o revestimento permanece fixa (Figura 2-C).

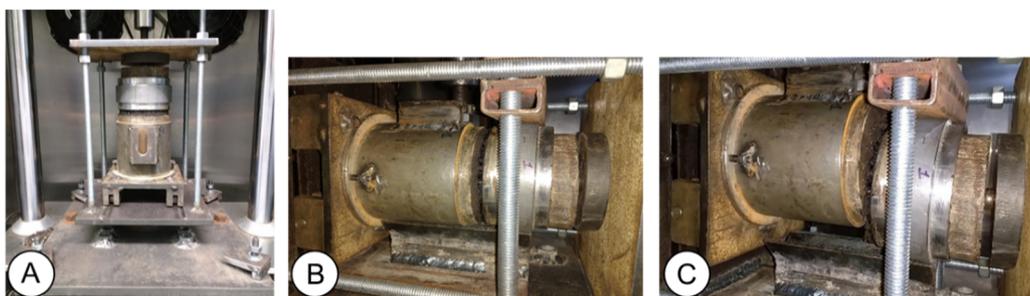


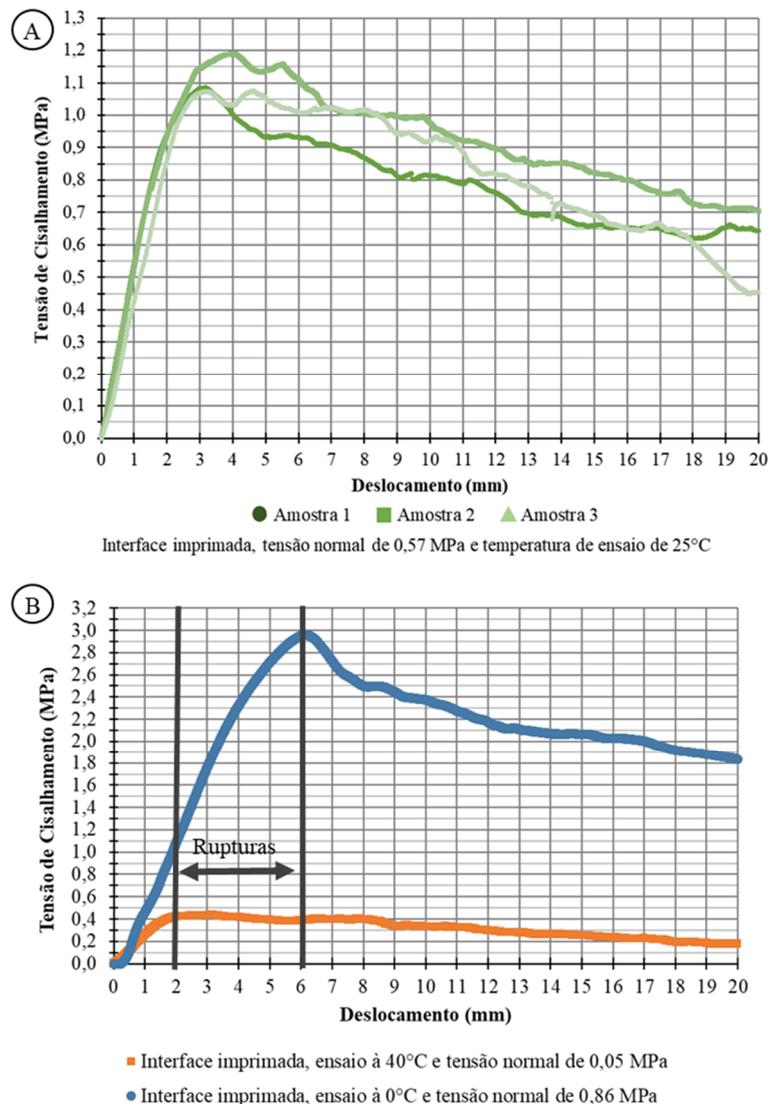
Figura 2. Etapas de ruptura da amostra

Durante a ruptura da interface, foram coletados os dados de tempo, força aplicada e deslocamento do atuador a cada 0,01 segundo de ensaio. Esses dados foram exportados e tabulados. Calculou-se a área efetivamente cisalhada para cada leitura, através do deslocamento do

atuador e do diâmetro da amostra. Com esta área e os dados de força aplicada foi determinada a tensão de cisalhamento na interface para cada 0,01 segundo, possibilitando a elaboração de curvas *tensão de cisalhamento vs. deslocamento relativo da interface*, a partir das quais foi realizada a análise de resultados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos ensaios realizados, foram obtidas curvas *tensão de cisalhamento vs. deslocamento relativo da interface* ( $\tau$  vs.  $\Delta x$ ) para cada amostra rompida. Em todos os casos avaliados, o comportamento apresentado pela interface foi similar, com a tensão de cisalhamento aumentando até um pico, em geral após um deslocamento relativo na interface de dois a seis milímetros, seguido da redução gradativa de seu valor. A Figura 3-A ilustra o comportamento típico observado, através das curvas obtidas para um ensaio realizado com a interface imprimada, à 25°C e sob uma tensão normal de 0,57 MPa. Já a Figura 3-B demonstra a faixa de deslocamento relativo na interface em que ocorreram as rupturas.



**Figura 3.** Exemplo de comportamento das curvas  $\tau$  vs.  $\Delta x$  dos ensaios realizados (A) e da variação do deslocamento relativo na interface no momento da ruptura (B)

A resistência ao cisalhamento da interface ( $\tau$ ) corresponde ao máximo da curva de tensão cisalhamento em relação ao deslocamento na interface, considerado como o ponto de ruptura da amostra. Após a ruptura da interface, não deve existir a parcela da aderência entre camadas proveniente da adesão do ligante asfáltico nem da conformação superficial. O atrito, contudo, impede a queda brusca no valor da tensão de cisalhamento, visto que mesmo após a ruptura as camadas continuam sendo deslocadas com contato entre si. Este fenômeno também pode explicar as oscilações que ocorrem durante a redução da resistência ao cisalhamento no trecho pós-ruptura das curvas.

Antes da análise dos valores obtidos, já se observa por meio da forma das curvas, como no exemplo ilustrativo da Figura 4, que a resistência ao cisalhamento é influenciada pelo comportamento viscoelástico do ligante asfáltico presente na interface. Nos ensaios realizados a 0°C, os gráficos apresentam um pico de tensão de cisalhamento mais destacado, seguido de uma queda mais acentuada nos primeiros instantes após a ruptura. Já nos ensaios à 40°C, este pico é pouco evidente. É possível inferir que se deva ao ligante asfáltico, que estaria contribuindo com a aderência principalmente em baixas temperaturas. Em temperaturas mais elevadas, estando menos viscoso, o ligante asfáltico acabaria não oferecendo uma boa adesão à interface ou poderia apresentar uma falha coesiva.

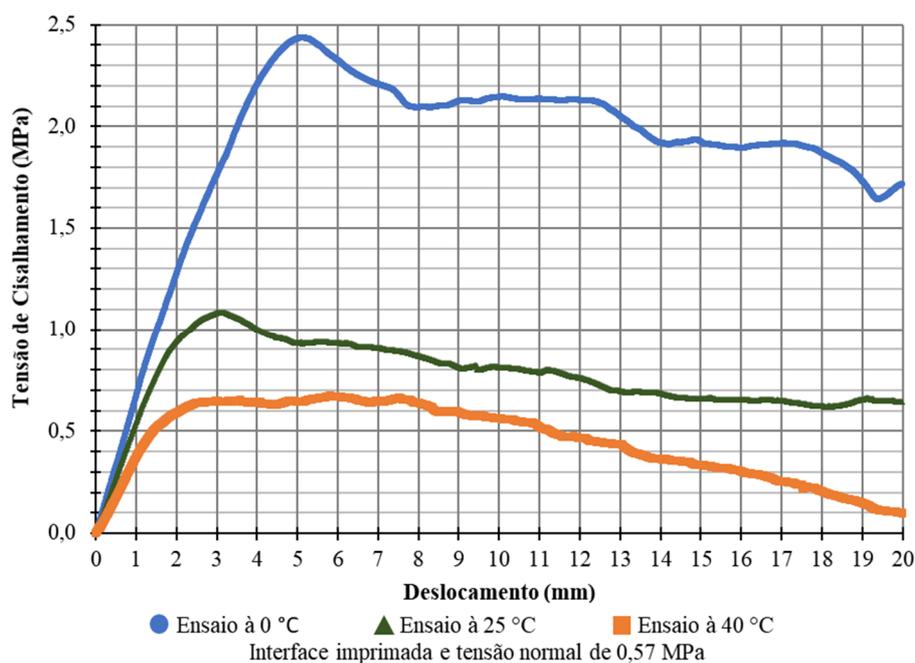


Figura 4. Variação da forma do pico das curvas  $\tau$  vs.  $\Delta x$  nas temperaturas ensaiadas

A resistência ao cisalhamento e o módulo de reação ao cisalhamento foram obtidos, para cada caso avaliado, a partir da média de três amostras. Estes resultados, junto com os respectivos desvio-padrão (DP) estão dispostos na Tabela 1. Nos ensaios cuja resistência ao cisalhamento consta como “indeterminado”, a prensa atingiu o limite de capacidade antes da ruptura. Nestes casos, o módulo de reação ao cisalhamento foi calculado a partir da inclinação inicial das curvas  $\tau$  vs.  $\Delta x$ . Os valores determinados foram utilizados para a obtenção de correlações da resistência ao cisalhamento e do módulo de reação ao cisalhamento com a temperatura e com a tensão normal, para cada tratamento de interface, apresentadas a seguir.

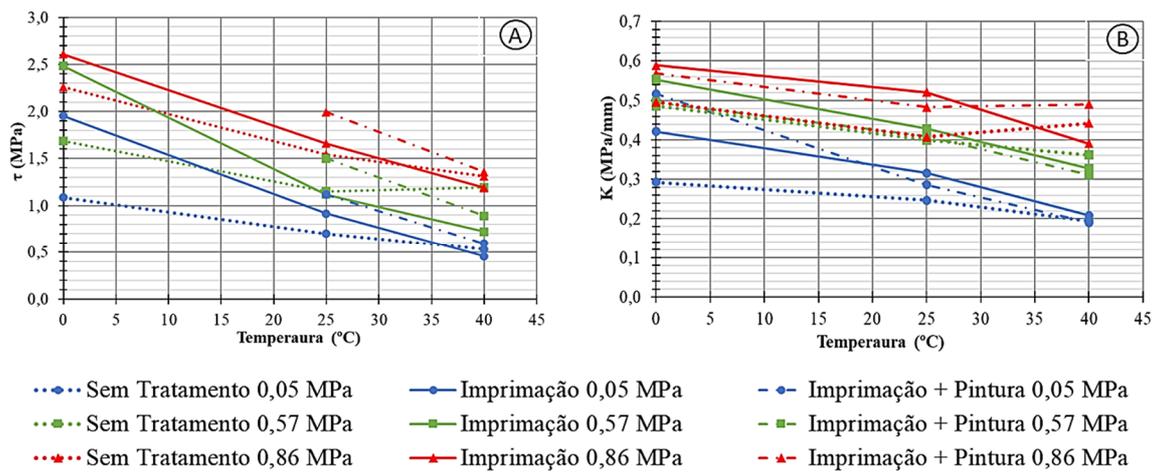
**Tabela 1** – Resultados de  $\tau$  e  $K$  obtidos nos ensaios realizados

Tratamento na interface	Temperatura - $T$ (°C)	Tensão normal - $\sigma$ (MPa)	Resistência ao cisalhamento - $\tau$ (MPa)		Módulo de reação ao cisalhamento - $K$ (MPa/mm)	
			Média	DP	Média	DP
Sem tratamento	0	0,05	1,09	0,08	0,29	0,06
Sem tratamento	0	0,57	1,69	0,10	0,49	0,07
Sem tratamento	0	0,86	2,26	0,11	0,50	0,04
Sem tratamento	25	0,05	0,70	0,01	0,25	0,04
Sem tratamento	25	0,57	1,15	0,04	0,40	0,07
Sem tratamento	25	0,86	1,54	0,09	0,41	0,11
Sem tratamento	40	0,05	0,52	0,01	0,19	0,05
Sem tratamento	40	0,57	1,20	0,13	0,36	0,02
Sem tratamento	40	0,86	1,32	0,07	0,44	0,05
Imprimação	0	0,05	1,95	0,07	0,42	0,03
Imprimação	0	0,57	2,48	0,11	0,55	0,01
Imprimação	0	0,86	2,61	0,32	0,59	0,04
Imprimação	25	0,05	0,91	0,06	0,32	0,02
Imprimação	25	0,57	1,12	0,06	0,43	0,04
Imprimação	25	0,86	1,66	0,12	0,52	0,09
Imprimação	40	0,05	0,45	0,02	0,21	0,03
Imprimação	40	0,57	0,72	0,06	0,33	0,02
Imprimação	40	0,86	1,19	0,03	0,39	0,01
Imprimação + Pintura	0	0,05	Indeterminado	-	0,52	0,01
Imprimação + Pintura	0	0,57	Indeterminado	-	0,49	0,02
Imprimação + Pintura	0	0,86	Indeterminado	-	0,57	0,01
Imprimação + Pintura	25	0,05	1,12	0,04	0,29	0,02
Imprimação + Pintura	25	0,57	1,50	0,14	0,41	0,01
Imprimação + Pintura	25	0,86	1,99	0,04	0,48	0,04
Imprimação + Pintura	40	0,05	0,60	0,06	0,19	0,02
Imprimação + Pintura	40	0,57	0,89	0,10	0,31	0,06
Imprimação + Pintura	40	0,86	1,36	0,10	0,49	0,08

Na Figura 5 é possível observar que a temperatura de ensaio ( $T$ ) influenciou os resultados de resistência ao cisalhamento (Figura 5-A) e de módulo de reação ao cisalhamento (Figura 5-B).

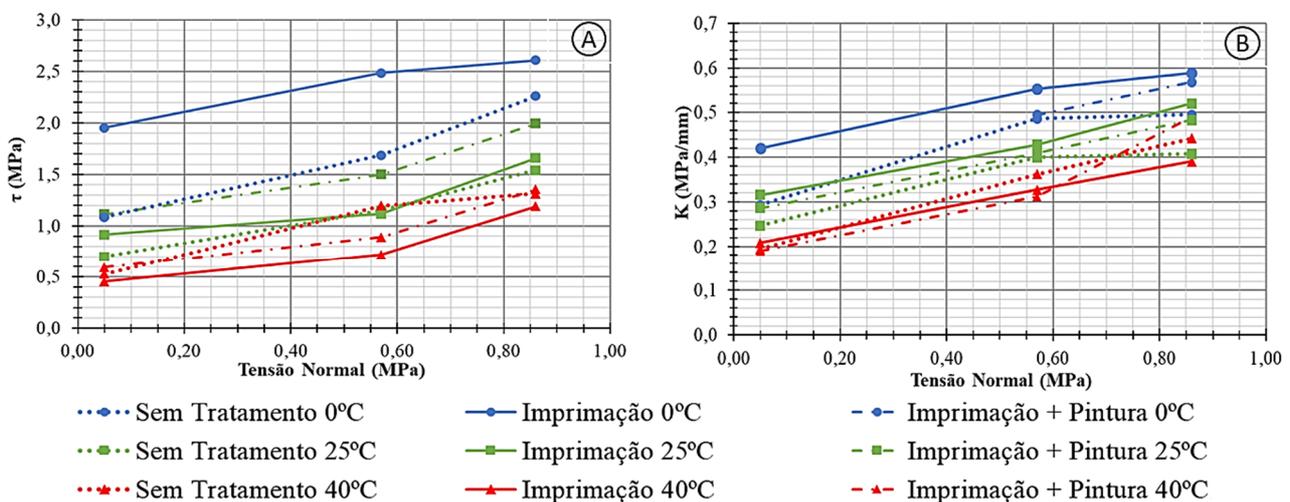
Os maiores valores de  $\tau$  e  $K$  ocorreram em baixas temperaturas e diminuíram com seu aumento. Para os ensaios à 40°C, a resistência ao cisalhamento foi em média 60,5% menor que aquela obtida à 0°C e 29,5% menor que a obtida a 25°C. Para o módulo de reação, estes valores foram respectivamente 32,8% e 15,2%. Já os ensaios realizados à 25°C obtiveram valores de resistência ao cisalhamento e de módulo de reação ao cisalhamento respectivamente 44,0% e 20,8% menores em relação aos ensaios a 0°C. Como observado anteriormente, atribui-se a influência da temperatura nos resultados aos ligantes asfálticos que compõem os tratamentos de interface e o próprio revestimento, que propiciam uma maior ligação entre as camadas em baixas temperaturas. No caso das amostras sem tratamento na interface, acredita-se que o ligante da própria mistura asfáltica atue na ligação entre as camadas, fazendo um papel similar ao do tratamento e sofrendo influência da temperatura, visto que ele é aquecido para a moldagem e a compactação, realizadas diretamente sobre a base.

Já na Figura 6 percebe-se que o aumento da tensão normal aplicada ( $\sigma$ ) leva a acréscimos da resistência ao cisalhamento e do módulo de reação ao cisalhamento, respectivamente demonstrados, para cada tratamento de interface, nas Figuras (6-A) e (6-B). Nos ensaios realizados com a aplicação de 0,86 MPa sobre os corpos-de-prova, a resistência ao cisalhamento foi em média 21,3% maior que nos ensaios realizados com 0,57 MPa e 66,9% maior comparado aos ensaios a 0,05 MPa de tensão normal. Quanto ao módulo de reação ao cisalhamento, o crescimento médio foi 17,5% e 65,9%, respectivamente, na mesma ordem. Atribui-se essas diferenças à parcela da aderência devido ao atrito, mobilizada com o início do deslocamento da interface, que é maior quando a tensão normal atuante é mais elevada.



Obs.: As linhas são exclusivamente para a melhor visualização dos dados, não representando modelos.

**Figura 5.** Resultados de resistência ao cisalhamento e de módulo de reação ao cisalhamento da interface em função da temperatura de ruptura.



Obs.: As linhas são exclusivamente para a melhor visualização dos dados, não representando modelos.

**Figura 6.** Resultados de resistência ao cisalhamento e de módulo de reação ao cisalhamento da interface em função da tensão normal aplicada

Das Figuras 5 e 6 também se constata que os tratamentos de interface realizados contribuíram para o aumento da aderência entre as camadas nos casos avaliados. A utilização de imprimação sobre a base fez com que, em média, a resistência ao cisalhamento e o módulo de reação ao cisalhamento aumentassem 14,3% e 12,8%, respectivamente, em relação aos valores obtidos em corpos-de-prova preparados sem a imposição de tratamento na interface. A aplicação conjunta de pintura de ligação sobre imprimação levou a um aumento de 24,1% para  $\tau$  e 1,2% para  $K$  em relação aos casos somente com imprimação. Já em relação aos ensaios sem tratamento, o uso combinado de imprimação e pintura de ligação propiciou um crescimento médio de 41,8% e 14,2% na resistência ao cisalhamento e no módulo de reação ao cisalhamento, respectivamente. Tais resultados demonstram que a utilização de imprimação sobre a base granular aumenta a adesão desta com o revestimento e que a utilização de pintura de ligação potencializa ainda mais tal resistência na interface.

Uma outra observação que pode ser feita é que a variação na temperatura de ensaio gerou diferenças de maior magnitude na resistência ao cisalhamento e no módulo de reação ao cisalhamento que os tratamentos da interface. Percebe-se isto, por exemplo, através observação que o emprego combinado de imprimação e pintura de ligação levou a um acréscimo médio de 41,8% na resistência ao cisalhamento ante as condições sem tratamento, enquanto ensaios à 40°C apresentaram, em geral, 60,5% menos resistência ao cisalhamento da interface que os realizados à 0°C. Cabe considerar, porém, que ainda que haja tal influência da temperatura, a faixa de variação desta à que a interface estará submetida em campo é menor que a avaliada laboratorialmente, especialmente quanto à temperatura de 0°C, dificilmente atingida no fundo do revestimento de pavimentos brasileiros.

Ao comparar os resultados com os obtidos por Torquato e Silva *et al.* (2018), que também avaliaram a aderência entre revestimento asfáltico e base granular (à 25°C com interface imprimada), percebe-se que, em ambas as pesquisas, foi constatada a influência da tensão normal sobre a resistência ao cisalhamento e o módulo de reação ao cisalhamento da interface, sendo os valores maiores obtidos com o aumento da magnitude normal aplicada. Ainda que os equipamentos empregados tenham sido distintos, o que, conforme constatado por estudos como os de Sholar *et al.* (2002) e Guimarães (2013), afeta os resultados, os valores de resistência ao cisalhamento obtidos neste trabalho para a mesma temperatura e tratamento de interface se aproximam daqueles previstos pelo modelo apresentado em Torquato e Silva *et al.* (2018). É o caso, por exemplo, quando da aplicação de 0,57 MPa de tensão normal, em que nos ensaios realizados foi obtida uma resistência ao cisalhamento média de 1,12 MPa enquanto a estimada pelo modelo dos autores é 1,16 MPa.

Além da já mencionada influência do método de ensaio nos resultados, estes também dependem do tipo de material constituinte das camadas. Como os estudos realizados para a quantificação da aderência disponíveis na literatura são voltados para o caso da ligação entre duas camadas asfálticas, na confrontação dos resultados de tais pesquisas com esta, é mais adequado observar a tendência de comportamento ao invés dos valores absolutos obtidos. De maneira geral, o decréscimo da resistência ao cisalhamento e do módulo de reação ao cisalhamento com o aumento da temperatura também é observado em pesquisas como as de Sholar *et al.* (2002), Tayebali *et al.* (2004), West *et al.* (2005) e Bae *et al.* (2010). Por outro lado, o acréscimo da aderência com o aumento da tensão normal, igualmente ao constatado no presente estudo, também se verifica em trabalhos como os de Canestrari *et al.* (2005) e West *et al.* (2005).

Realizou-se ainda a correlação dos resultados obtidos, tanto para a resistência ao cisalhamento como para o módulo de reação ao cisalhamento, com a tensão normal atuante sobre a amostra e a temperatura de ensaio, através de regressão linear múltipla. Para cada tratamento de interface, foi obtida uma equação que expressa a resistência ao cisalhamento em função da tensão normal e da temperatura e uma para o módulo de reação ao cisalhamento, considerando as mesmas variáveis. Estes resultados são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

As regressões apresentaram um bom ajuste em relação aos dados experimentais. O nível de confiança empregado em todos os casos foi de 95%. Os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), com exceção do obtido para o modelo de módulo de reação ao cisalhamento para tratamento com imprimação e pintura de ligação, ficaram acima de 0,92. Estes valores elevados do coeficiente de determinação expõem que o comportamento das variáveis consegue ser estatisticamente expressado pela regressão, com mais de 92% da variação da resistência ao cisalhamento e do módulo de reação ao cisalhamento explicados pela tensão normal e pela

temperatura. Já a parcela independente de  $\sigma$  e  $T$  está ligada à adesão dos ligantes asfálticos (asfalto diluído e emulsão asfáltica). No caso dos ensaios realizados com a moldagem do revestimento diretamente sobre a base granular, como já mencionado, acredita-se que esta adesão seja propiciada, ainda que em menor parcela, pelo próprio ligante utilizado na mistura asfáltica.

**Tabela 2 – Modelos de resistência ao cisalhamento**

Tratamento da interface	Coefficientes	valor-P	R <sup>2</sup>
Sem Tratamento	Independente	1,079	<0,01%
	Tensão normal	1,499	0,01%
	Temperatura	-0,0172	0,07%
	Equação	$\tau = 1,079 + 1,499 \cdot \sigma - 0,0172 \cdot T$	
Imprimação	Independente	1,849	0,01%
	Tensão normal	0,844	0,67%
	Temperatura	-0,0380	0,02%
	Equação	$\tau = 1,849 + 0,844 \cdot \sigma - 0,0380 \cdot T$	
Imprimação + Pintura de ligação	Independente	2,041	0,36%
	Tensão normal	0,968	0,84%
	Temperatura	-0,0393	1,10%
	Equação	$\tau = 2,041 + 0,968 \cdot \sigma - 0,0393 \cdot T$	

**Tabela 3 – Modelos de módulo de reação ao cisalhamento**

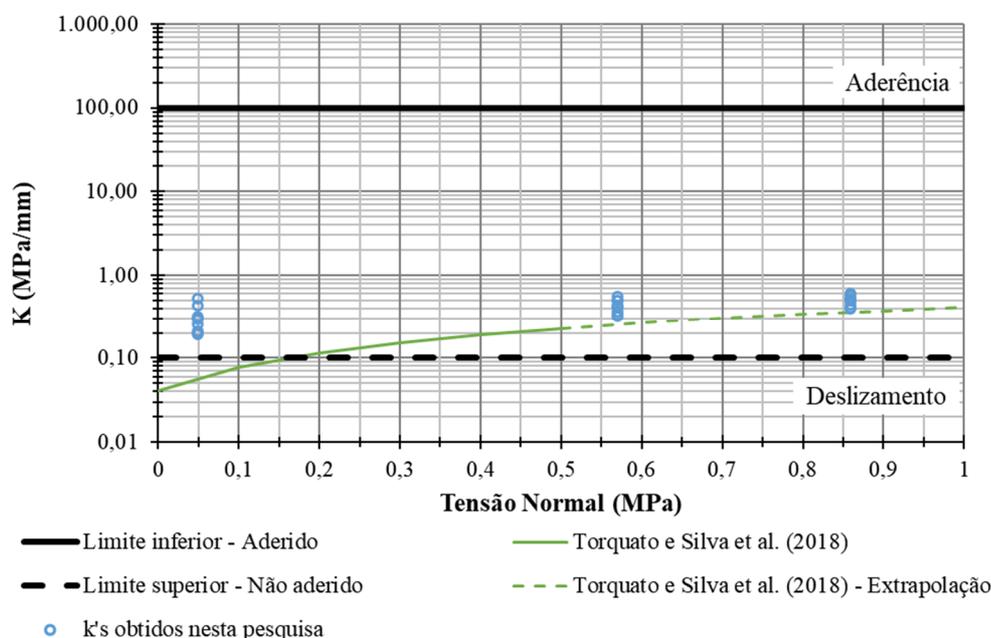
Tratamento da interface	Coefficientes	valor-P	R <sup>2</sup>
Sem Tratamento	Independente	0,293	0,002%
	Tensão normal	0,260	0,02%
	Temperatura	-0,0024	1,16%
	Equação	$K = 0,293 + 0,260 \cdot \sigma - 0,0024 \cdot T$	
Imprimação	Independente	0,416	<0,001%
	Tensão normal	0,229	0,005%
	Temperatura	-0,0052	0,003%
	Equação	$K = 0,416 + 0,229 \cdot \sigma - 0,0052 \cdot T$	
Imprimação + Pintura de ligação	Independente	0,406	0,03%
	Tensão normal	0,233	1,70%
	Temperatura	-0,0046	1,96%
	Equação	$K = 0,406 + 0,233 \cdot \sigma - 0,0046 \cdot T$	

Cada parâmetro avaliado mostrou-se significativo, tendo resultados de *valor-P* também inferiores ao nível de significância. Ainda, o uso do coeficiente de Pearson corrobora tais resultados. Para a resistência ao cisalhamento, o coeficiente da relação com a tensão normal apresentou valor de 0,41 e com a temperatura, -0,79. Já para o módulo de reação ao cisalhamento, o coeficiente da relação com a tensão normal foi de 0,69 e com a temperatura, -0,60. Conforme a classificação do coeficiente de Pearson indicada em Cohen (1988), a força da relação da temperatura com a resistência ao cisalhamento e da temperatura e da tensão normal com o módulo de reação ao cisalhamento é considerada alta, enquanto da tensão normal com a resistência ao cisalhamento é considerada média. Além disso, em ambos os casos, o coeficiente de Pearson da relação da resistência ao cisalhamento e do módulo de reação ao cisalhamento com a tensão normal é positivo, indicando um aumento de  $\tau$  e  $K$  com o aumento da tensão normal; e negativo para a relação com a temperatura, indicando a redução de  $\tau$  e  $K$  com o aumento da temperatura.

Em síntese, através das avaliações realizadas, é perceptível que o tipo de preparo da interface, a tensão normal atuante e a temperatura influenciam nos resultados de resistência ao cisalhamento e módulo de reação ao cisalhamento da interface. De maneira geral, a aplicação de tratamento entre a base granular e o revestimento asfáltico faz os valores de  $\tau$  e  $K$  aumentarem. Isto também ocorre com o aumento da tensão normal atuante. Por outro lado, o aumento da temperatura tem efeito oposto, levando à redução da resistência ao cisalhamento e do módulo de reação ao cisalhamento da interface.

É possível realizar avaliações de pavimentos com o uso do próprio módulo de reação ao cisalhamento para representar a aderência entre camadas, por exemplo, através de elementos finitos. Nesses casos, diferentes valores de  $K$  utilizados geram estimativas de dano distintas. Mais usual em softwares de análise e dimensionamento, contudo, é a utilização das condições “aderida” ou “não aderida” para a modelagem da interface. Esta também foi abordagem utilizada neste trabalho e para relacionar os resultados obtidos através dos ensaios de cisalhamento da interface realizados com a aderência entre camadas, foram utilizados os critérios obtidos em Uzan *et al.* (1978) e Kruntcheva *et al.* (2005).

Conforme já apresentado, estes autores indicam que as camadas podem ser consideradas totalmente aderidas caso o módulo de reação ao cisalhamento seja superior a 100 MPa/mm; enquanto são consideradas não aderidas caso este módulo seja inferior a 0,1 MPa/mm. A Figura 7 apresenta todos os valores de módulo de reação ao cisalhamento obtidos nesta pesquisa juntos com os limites encontrados nas referências. Também foram indicados os resultados de Torquato e Silva *et al.* (2018), a fim de comparação, pois mesmo obtidos através de outro ensaio, também se referem à interface de uma camada granular com uma camada asfáltica.



**Figura 7.** Comparação entre os valores de  $K$  obtidos e os limites de referências

Como pode ser observado, os valores provenientes dos ensaios ficaram entre 0,19 MPa/mm e 0,59 MPa/mm, estando, por tanto, na faixa intermediária. Apesar disto, encontram-se muito próximos ao limite de deslizamento, levando à conclusão de que a condição de aderência que

melhor representa o trabalho mecânico entre a base granular e o revestimento asfáltico estudado nesta pesquisa é a não aderida.

Em termos práticos, tal condição, se assumida no dimensionamento estrutural de pavimentos asfálticos, levaria a um nível maior de esforço no revestimento asfáltico, dada uma mesma condição de tráfego, impondo, portanto, a necessidade de maior robustez aos pavimentos assim dimensionados, quando da comparação com a condição aderida na interface entre o revestimento asfáltico e a base granular. Contudo, cabe lembrar que muito do desenvolvimento dos softwares de dimensionamento foram feitos no exterior, onde são bastante empregadas bases asfálticas, com as quais a aderência é importante. No caso da BGS, a aderência permitiria um trabalho aderido somente superficial, devido à ausência de aglutinante na camada, não gerando redução de esforços significativos na camada asfáltica, o que reforça a indicação de consideração da condição não aderida.

A não aderência, porém, não descarta a realização de tratamentos na interface, visto que eles possuem funções como conferir coesão superficial à base, impermeabilizar e permitir o tráfego durante as obras. Sua ausência ou demora para execução pode permitir a erosão e gerar prejuízos à irregularidade longitudinal do pavimento, conforme constatado por Pavi (2019).

Por fim, este estudo corrobora, a partir da análise laboratorial realizada, a condição assumida na nova proposta do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) de dimensionamento de pavimentos asfálticos, que adota, no MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), a condição de não aderência entre a base granular e o revestimento asfáltico. Novos estudos, contudo, sobretudo de campo e com a utilização de materiais e condições distintas daquelas assumidas no presente estudo, poderão gerar resultados distintos.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aderência entre as camadas do pavimento é um fator que influencia o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos no pavimento, gerando análises e dimensionamentos distintos, conforme sua consideração. O estudo apresentado foi realizado a fim de determinar qual condição (aderida ou não aderida) é a mais representativa do real comportamento das interfaces. Para tal, avaliou-se laboratorialmente a resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ) e o módulo de reação ao cisalhamento ( $K$ ) na interface entre uma camada asfáltica e uma base granular, relacionados com a aderência entre estas camadas. Também foi verificada a influência da temperatura de ensaio, da tensão normal atuante sobre a amostra e do tipo de preparo empregado na interface nos valores de  $\tau$  e  $K$ .

Constatou-se que os ensaios realizados em temperaturas mais elevadas tiveram resultados de resistência ao cisalhamento e módulo de reação ao cisalhamento inferiores àqueles obtidos em temperaturas mais baixas, sendo esta redução, na comparação entre 40°C e 0°C, respectivamente 60,5% e 32,8%, em média. Já o aumento da tensão normal sobre a amostra fez com que a resistência ao cisalhamento e o módulo de reação ao cisalhamento também aumentasse, respectivamente 66,9% e 65,9%, em média, na comparação dos casos com tensão normal de 0,05 MPa e de 0,86 MPa. Além disto, a aplicação de imprimação entre a base e o revestimento também levou ao aumento dos resultados de  $\tau$  e  $K$ , enquanto a utilização combinada de imprimação e pintura de ligação propiciou aumentos ainda maiores nos resultados, fazendo com que a resistência ao cisalhamento e o módulo de reação ao cisalhamento desse caso fossem

respectivamente, em média, 41,8% e 14,2% maiores que no caso sem tratamento.

Foi possível também correlacionar a resistência ao cisalhamento e o módulo de reação ao cisalhamento com a tensão normal aplicada e a temperatura de ensaio, para cada tipo de tratamento de interface empregado. Através de regressão linear múltipla foram determinadas equações que permitem uma boa modelagem dos resultados obtidos. Já na comparação dos resultados de módulo de reação ao cisalhamento com valores indicados em referências como limites para considerar a interface aderida ou não, constatou-se que estes se encontram juntos ao limite que indica o deslizamento da interface. Deste modo, para os casos avaliados nesta pesquisa, a interface entre a base granular e o revestimento asfáltico é melhor caracterizada como não aderida.

#### AGRADECIMENTOS

À CAPES pela bolsa do primeiro autor e à REDE DE TECNOLOGIA EM ASFALTO ANP/PETROBRAS pelo apoio às pesquisas do GEPPASV/UFSM.

#### REFERÊNCIAS

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) NBR 15619: *Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas*. Rio de Janeiro: ABNT, 7 p.
- Bae, A.; Mohammad, L. N.; Elseifi, J. B.; Patel, N. (2010) Effects of temperature on interface shear strength of emulsified tack coat and its relationship to rheological properties. *Transport Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2180, p. 102–109. DOI: 10.3141/2180-12
- Canestrari, F.; Ferrotti, G.; Partl, M. N.; Santagata, E. (2005) Advanced Testing and Characterization of Interlayer Shear Resistance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1929, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 69–78. DOI <https://doi.org/10.3141/1929-09>
- Canestrari, F.; G. Ferrotti; L. Xiaohu; A. Millien; M. N. Partl; C. Petit; A. Phelipot-Mardelé; H. Piber e C. Raab (2013) Mechanical Testing of Interlayer Bonding in Asphalt Pavements. In Partl, M. N.; U. B. Hussain; F. Canestrari.; C. De La Roche; H. Di Benedetto; H. Piber e D. Sybilski. *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials*, Cap. 6, RILEM, 2013. DOI 10.1007/978-94-007-5104-0\_6
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hillsdale, NJ, Erlbaum.
- DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (1998) *Especificações Gerais*, Porto Alegre.
- DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (2001) *Manual de Ensaios*. Vol II, Porto Alegre.
- Guimarães, P. A. (2013) *Estudo da Aderência Entre Camadas Asfálticas de Pavimentos*. 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Hariyadi, E. S.; Aurum, K. P.; Subagio, B. S. (2013) Theoretical Study of Bonding Condition at the Interface between Asphalt Pavement Layers. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.9. DOI: <https://doi.org/10.11175/easts.10.1590>
- Kruntcheva, M. R.; Collop, A. C.; Thom, N. H. (2005) Effect of Bond Condition on Flexible Pavement Performance. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 11. DOI [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:11\(880\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:11(880))
- Pavi, D. R. (2019) *Identificação de Fatores Construtivos que Contribuem para o Aumento da Irregularidade Longitudinal a partir do Monitoramento de Implantação e Restauração de Trechos Rodoviários*. 328 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Petit, C.; Chabot, A.; Destre, A.; Raab, C. (2018) Recommendation of rilem tc 241-mcd on interface debonding testing in pavements. *Materials and Structures* 51. no. 4, 96. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1223-y>
- Raab, C.; Partl, M. N. (2009) Interlayer bonding of binder, base and subbase layers of asphalt pavements: long-term performance. *Construction and Building Materials*. 23(8), 2926–2931. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.025>
- Raposeiras, A. C.; Castro-Fresno, D.; Vega-Zamanillo, A.; Rodríguez-Hernandez, J. (2013) Test methods and influential factors for analysis of bonding between bituminous pavement layers. *Construction and Building Materials*, Vol. 43, Jun, p. 372–381. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.011>
- Rocha, M. L. Marques, G. L. O.; Silva, R. C.; Motta, L. M. G. (2021) Influence of bonding condition between layers on overlay design of flexible pavements. *Transportes*, v. 29, n. 2, p. 1-17. DOI:10.14295/transportes.v29i2.2419
- Santos, A. G.; Assis, R. K. M.; Fernandes Jr, J. L. (2017) Influência da Condição de Interface das Camadas na Previsão de Desempenho de Pavimentos Flexíveis. *Anais XXXI ANPET*, XXX Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes ANPET, Recife, 2017.

- Scherer, R. G. (2018) *Estudo da Influência da Condição de Aderência Entre Camadas de Pavimentos Em Seu Comportamento Mecânico*. 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Scherer, R. G., Bueno, L. D., Pereira, D. S., Specht, L. P., Trindade, G. S. (2016) Influência da Aderência entre Camadas no Desempenho Esperado de Pavimentos Asfálticos. *Anais XXX ANPET, XXX Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes ANPET*. Rio de Janeiro, RJ.
- Scherer, R. G.; Pereira, D. S.; Druzian, E. L.; Faccin, C.; Specht, L. P. (2020) Ensaio de Cisalhamento de Interface com Vistas à Camadas De Pavimentos. *Transportes*, V. 28, n.5, p. 21-35. DOI 10.14295/transportes.v28i4.1878
- Sholar, G. A.; Page, G. C.; Musselman, J. A.; Upshaw, P. B.; Moseley, H. L. (2002) *Preliminary investigation of a test method to evaluate bond strength of bituminous tack coats*. Gainesville, Florida: Department of Transport, Research Report FL/DOT/SMO/02-459.
- Tayebali, A. A.; Rahman, M. S.; Kulkarni, M. B.; Xu, Q. (2004) *A mechanistic approach to evaluate contribution of prime and tack coat in composite asphalt pavements*. Raleigh, Carolina do Norte: North Carolina State University Research Report.
- Torquato e Silva, S. A. (2017) *Modelagem Mecânico-Empírica da Interface Revestimento Asfáltico-Base Granular*. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Torquato e Silva, S. A. T., Bastos, J. B. S., Soares, J. B. (2015) Influência da Aderência na Análise de Pavimentos Asfálticos. *44ª Reunião Anual de Pavimentação*. Foz do Iguaçu, PR.
- Torquato e Silva, S. A.; Scherer, R. G.; Soares, J. B.; Pereira, D. S.; Specht, L. P. (2020) A Thermal Nonlinear Approach for Mechanistic Empirical Modeling of Asphalt-Granular Base Layers Interface. *Journal of Testing and Evaluation* 48, no. 1 (January/February): 223–234. DOI <https://doi.org/10.1520/JTE20180931>
- Torquato e Silva, S. A.; Soares, J. B.; Barroso, S. H. A. (2018) Modelagem Constitutiva e Caracterização Empírica da Interface Revestimento Asfáltico-Base Granular. *Transportes*, v. 26, n. 2, p. 180-190. DOI 10.14295/transportes.v26i2.1661
- Uzan, J.; Livneh, M.; Eshed, Y. (1978) Investigation of Adhesion Properties Between Asphaltic Concrete Layers. *Proceedings of Asphalt Paving Technology*, Vol. 47, pp. 495–521.
- West, R. C.; Zhang, J.; Moore, J. (2005) *Evaluation of bond strength between pavement layers*. Auburn, Alabama: National Centre for Asphalt Technology, Report No. 05–08, 2005.