XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/39

Estudo da aderência na interface de mistura asfáltica reforçada com geossintéticos

Bruno Andrade de Freitas
Pesquisador, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, brunoandraderc@hotmail.com

Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena
Professor, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, luenafb@uol.com.br

Ashray Saxena
Pesquisador Assistente, University of Texas at Austin, Austin, Estados Unidos, saxena_ashray@utexas.edu

Jorge Gabriel Zornberg
Professor, University of Texas at Austin, Austin, Estados Unidos, zornberg@mail.utexas.edu

RESUMO: A adesão na interface tem um papel crítico no desempenho estrutural e durabilidade de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos. Uma ligação insuficiente entre as camadas pode levar a redução da vida útil do pavimento, particularmente sob temperaturas elevadas. Este estudo investiga a resistência ao cisalhamento na interface (ISS) de sistemas asfalto–asfalto e asfalto–geossintético–asfalto, com foco na influência da temperatura de ensaio, da taxa de aplicação da pintura de ligação e do tipo de ligante asfáltico. Três geocompostos de reforço comumente utilizados na restauração de pavimentos foram avaliados em combinação com um ligante asfáltico convencional (PG 64-22) e um ligante modificado por polímero (AC-15P), aplicados como pintura de ligação em diferentes taxas. Ensaios monotônicos de cisalhamento foram realizados utilizando o equipamento Louisiana Interlayer Shear Strength Tester (LISST) nas temperaturas de ensaio 10°C, 25°C e 40°C. Os resultados demonstram uma redução acentuada da ISS com o aumento da temperatura, confirmando a elevada sensibilidade térmica da interface. O ligante modificado por polímero apresentou desempenho ligeiramente superior ao ligante asfáltico convencional sob condições críticas de temperatura. Os resultados fornecem subsídios práticos para a construção de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos, especialmente em regiões sujeitas a variações térmicas.

PALAVRAS-CHAVE: geossintéticos; aderência na interface; resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT: Interface adhesion plays a critical role in the structural performance and durability of asphalt overlays reinforced with geosynthetics. Insufficient bonding between layers may lead to a reduction in pavement service life, particularly under elevated temperatures. This study investigates the interface shear strength (ISS) of asphalt–asphalt and asphalt–geosynthetic–asphalt systems, focusing on the influence of testing temperature, tack coat application rate, and asphalt binder type. Three geocomposite reinforcements commonly used in pavement rehabilitation were evaluated in combination with a conventional asphalt binder (PG 64-22) and a polymer-modified binder (AC-15P), applied as tack coats at different application rates. Monotonic interface shear tests were performed using the Louisiana Interlayer Shear Strength Tester (LISST) at temperatures of 10°C, 25°C, and 40°C. The results demonstrate a pronounced reduction in ISS with increasing temperature, confirming the high thermal sensitivity of the interface. The polymer-modified binder exhibited slightly better performance than the conventional asphalt binder under critical temperature conditions. The findings provide practical insights into the construction of geosynthetic-reinforced asphalt overlays, particularly in regions subjected to thermal variations.

KEYWORDS: geosynthetics; interface adhesion; shear strength.

1 INTRODUÇÃO

As crescentes demandas por tráfego têm intensificado a necessidade de estratégias na restauração de pavimentos duráveis e economicamente viáveis. Os recapeamentos asfálticos permanecem como uma das soluções mais comumente adotadas para a restauração da capacidade estrutural e da funcionalidade superficial de pavimentos deteriorados. No entanto, a eficácia dos recapeamentos asfálticos é frequentemente comprometida pelo rápido desenvolvimento de fissuração refletida, escorregamento entre camadas e descolamento prematuro, fatores que reduzem significativamente a vida útil do pavimento e aumentam os custos de manutenção.

Para enfrentar esses desafios, os geossintéticos têm sido cada vez mais incorporados aos sistemas de recapeamento asfáltico. Quando adequadamente projetados e instalados, os geossintéticos podem retardar a propagação de fissuras, melhorar a distribuição de cargas e aumentar a durabilidade do pavimento (Zornberg, 2017). Esses benefícios têm sido demonstrados em estudos de campo (Kumar *et al*. 2022) e laboratoriais (Saride e Kumar, 2019; Solatiyan *et al*. 2021; Saxena *et al*. 2025), tornando os recapeamentos reforçados com geossintéticos uma solução atrativa para projetos de reabilitação de pavimentos em todo o mundo.

Apesar de suas vantagens, a inclusão de geossintéticos introduz uma interface crítica na estrutura do pavimento. A interface entre a camada asfáltica existente, o reforço geossintético e o novo revestimento passa a constituir um potencial plano de fraqueza caso não seja alcançada uma aderência adequada (Correia *et al*. 2022). A adesão insuficiente na interface pode resultar em escorregamento horizontal, redução da integridade estrutural e aceleração dos mecanismos de deterioração do pavimento. Essas falhas tornam-se particularmente críticas em altas temperaturas de serviço, nas quais os ligantes asfálticos apresentam significativa redução de rigidez e coesão (Sufian *et al*. 2020; Sagnol *et al.* 2018).

A adesão na interface é governada por uma interação complexa de fatores, incluindo as propriedades mecânicas e físicas do geossintético, as características reológicas do ligante da pintura de ligação, a quantidade de ligante aplicada, as práticas construtivas e as condições ambientais (Silva *et al*. 2024). Entre essas variáveis, a temperatura desempenha um papel fundamental devido à natureza termo viscoelástica dos materiais asfálticos (Safavizadeh *et al*. 2020). À medida que a temperatura aumenta, o ligante se torna mais viscoso, reduzindo sua resistência à deformação por cisalhamento e enfraquecendo a ligação adesiva na interface.

Estudos experimentais anteriores (Bae *et al*. 2010; Safavizadeh *et al*. 2020) investigaram a resistência ao cisalhamento na interface por meio de diversos equipamentos laboratoriais e protocolos de ensaio. Embora esses estudos tenham fornecido contribuições relevantes, muitos se concentram em parâmetros isolados ou em faixas restritas de temperatura. Além disso, uma parcela significativa da literatura existente enfatiza a modelagem estatística em detrimento de uma interpretação prática de engenharia, o que limita a aplicabilidade direta dos resultados para o projeto e a execução de pavimentos.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo fornecer uma avaliação experimental abrangente da adesão na interface em misturas asfálticas reforçadas com geossintéticos, com ênfase particular nos efeitos da temperatura, da taxa de aplicação da pintura de ligação e do tipo de ligante sobre a resistência ao cisalhamento na interface, tanto em sistemas reforçados quanto não reforçados. Os resultados são discutidos sob uma perspectiva de engenharia, com o propósito de subsidiar um projeto mais confiável e sensível à temperatura de recapeamentos asfálticos reforçados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Agregados e mistura asfáltica

A mistura asfáltica utilizada neste estudo foi preparada de acordo com a metodologia SUPERPAVE, visando condições de tráfego médio a elevado, representativas de pavimentos urbanos e rodoviários. Como agregados graúdos, foram selecionados agregados de brita dolomítica com dimensões máximas nominais de 12,5 mm e 9,5 mm, enquanto a areia dolomítica foi empregada como agregado miúdo. A curva granulométrica dos agregados (apresentada na Figura 1) foi escolhida de modo a atender aos requisitos de uma mistura de revestimento densa (TY-D), comumente adotada pelo Departamento de Transportes do Texas (TxDOT).

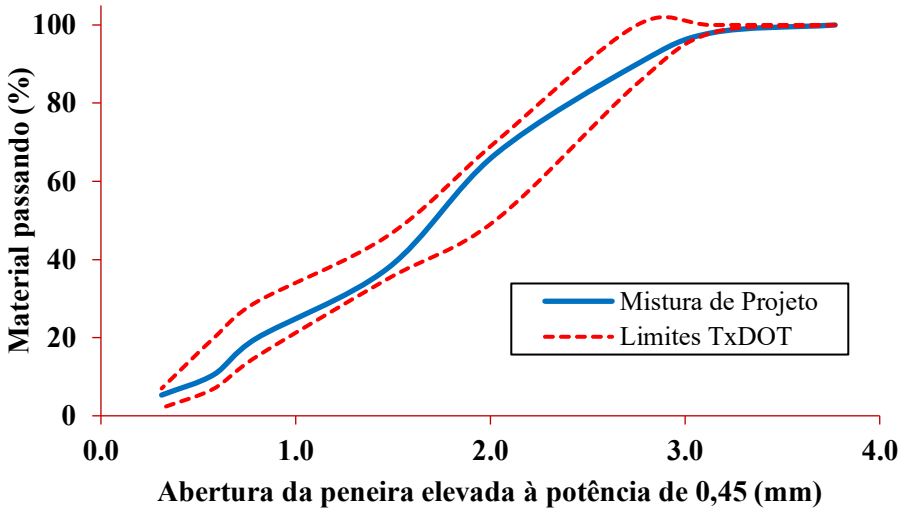


Figura 1. Composição granulométrica da mistura asfáltica.

A mistura projetada incorporou 5,2% de ligante asfáltico, em relação à massa total da mistura. Esse teor de ligante foi selecionado com o objetivo de atingir um teor de vazios de ar de aproximadamente 4% no número de giros de projeto. Antes dos ensaios de interface, a mistura foi avaliada para confirmar a integridade mecânica adequada e a resistência aos danos por umidade. A resistência à tração por compressão diametral e de dano por umidade induzida (Lottman modificado) da mistura asfáltica foram de 0,59 MPa e 81%, respectivamente, conforme determinado de acordo com as normas ASTM D6931 (2025) e ASTM D4867/D4867M-22 (2024). Esses resultados comprovaram que a mistura era adequada para a produção de corpos de prova reforçados e não reforçados, consistentes e representativos.

2.2 Ligantes para pintura de ligação

Dois ligantes asfálticos foram empregados como materiais de pintura de ligação. O primeiro foi um ligante convencional classificado por desempenho, PG 64-22, amplamente utilizado em aplicações de pavimentação asfáltica. O segundo foi um ligante asfáltico modificado por polímero, AC-15P, selecionado com o objetivo de avaliar os potenciais benefícios da modificação polimérica na aderência da interface e na sensibilidade à temperatura.

O ligante convencional representa a prática padrão adotada em muitas regiões, enquanto o ligante modificado por polímero é comumente recomendado para proporcionar desempenho superior sob altas temperaturas e condições de tráfego pesado. Ambos os ligantes foram aplicados a quente, assegurando contato direto e interação efetiva com o reforço geossintético e com as camadas asfálticas.

A seleção das taxas de aplicação da pintura de ligação foi orientada pela capacidade de retenção asfáltica dos ligantes dos geossintéticos, resumida na Tabela 1. Os valores de retenção de ligante medidos atingiram até 494 g/m², com valor médio de 432 g/m² para os ligantes avaliados. Com base nesses resultados, foi adotada uma taxa de aplicação de referência de 500 g/m², correspondente aproximadamente à capacidade máxima de retenção de ligante. Para investigar a influência da dosagem de ligante, foram selecionadas duas taxas adicionais: 350 g/m², representando cerca de 70% da capacidade máxima de retenção, e 650 g/m², correspondente a aproximadamente 130% da capacidade máxima de retenção. Esse intervalo foi escolhido para representar condições de aplicação insuficiente, ótima e excessiva de ligante na interface.

2.3 Geossintéticos

Foram investigados três reforços geocompostos especificamente desenvolvidos para aplicações em pavimentos asfálticos. Cada geocomposto consistiu em uma geogrelha acoplada a um geotêxtil não tecido ultraleve e revestida com material betuminoso, com o objetivo de melhorar a aderência e facilitar a instalação.

Embora os reforços apresentem diferenças quanto ao tipo de polímero e à rigidez, todos foram projetados para proporcionar controle de trincas e reforço estrutural em camadas de recapeamento asfáltico. A Figura 2 apresenta os geocompostos utilizados neste estudo, enquanto a Tabela 1 resume as propriedades físicas e mecânicas dos geocompostos.



Figura 2. Geossintéticos utilizados no estudo: a) GC1; b) GC2 e c) GC3.

Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas dos geocompostos avaliados.

Propriedades	GC1	GC2	GC3
Abertura da malha, mm	38 (T) X 32 (L)	39 (T) X 33 (L)	32 (T) X 29 (L)
Massa total por unidade de áreas (g/m²)	275	271	378
Espessura do elemento longitudinal (mm)	1,2	1.1	1,5
Espessura do elemento transversal (mm)	0,75	0,7	0,9
Largura do elemento longitudinal (mm)	3,8	3,6	5,4
Largura do elemento transversal (mm)	8,5	8,4	8,8
Capacidade de retenção de asfalto – PEN 50/70 (g/m²)	400	398	405
Capacidade de retenção de asfalto -AC-15P (g/m²)	455	441	494
Resistência à tração última - Transversal (kN/m) - MD/CMD*	50/50	50/50	50/50
Resistência à tração a 3% de deformação (kN/m) -MD*	≤12%	≤6%	≤3%
Deformação na resistência máxima a tração-MD*	400	733	1667

T = transversal; L = longitudinal; MD = direção de fabricação (machine direction); CMD = direção transversal à fabricação (cross-machine direction).

Os geossintéticos selecionados representam uma faixa de diferentes níveis de rigidez e mecanismos de reforço, possibilitando a avaliação do comportamento da interface sob distintas características dos materiais. Sua ampla utilização em projetos de reabilitação de pavimentos torna os resultados deste estudo relevantes para aplicações práticas.

2.4 Preparação dos corpos de prova

Corpos de prova cilíndricos de mistura asfáltica, com diâmetro nominal de 150 mm, foram preparados utilizando um compactador giratório SUPERPAVE. A camada inferior de mistura asfáltica (representando a camada asfáltica antiga ou pré-existente) foi compactada inicialmente e mantida em resfriamento à temperatura ambiente por 24 horas, a fim de garantir a estabilidade dimensional. Em seguida, o ligante de pintura de ligação foi aquecido até a temperatura adequada de aplicação e aplicado uniformemente sobre a superfície da camada inferior, de acordo com as taxas de aplicação previamente definidas.

Imediatamente após a aplicação da pintura de ligação, o reforço geossintético foi cuidadosamente posicionado sobre a superfície revestida com ligante (no caso dos corpos de prova reforçados). Esse procedimento foi adotado para minimizar a variabilidade associada ao tempo de instalação e assegurar a impregnação consistente do geossintético. Posteriormente, a camada superior de mistura asfáltica (representando o recapeamento) foi compactada sobre a interface, tanto nos corpos de prova reforçados quanto nos não reforçados, formando um corpo de prova de duas camadas, com o reforço posicionado na meia altura (no caso dos corpos de prova reforçados).

Após a compactação, todos os corpos de prova foram condicionados à temperatura ambiente por mais 24 horas. Em seguida, as dimensões dos corpos de prova foram medidas para verificar a conformidade com as tolerâncias recomendadas para os ensaios de cisalhamento na interface. A Figura 3 ilustra as etapas seguidas para a preparação dos corpos de prova.

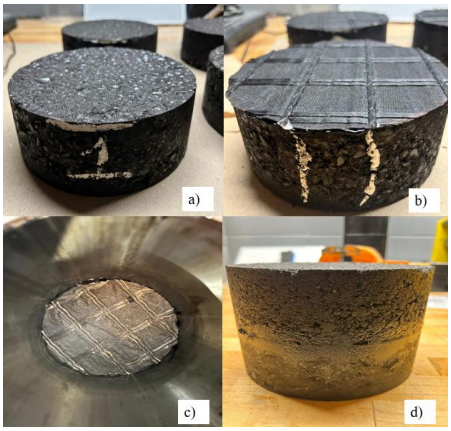


Figura 3. Preparação da interface reforçada: a) Camada inferior de mistura asfáltica compactada; b) Geossintético instalado; c) Primeira camada posicionada no molde; d) Corpo de prova pronto para ensaio.

2.5 Procedimento de ensaio de cisalhamento na interface

A resistência ao cisalhamento na interface dos corpos de prova foi avaliada utilizando o Louisiana Interlayer Shear Strength Tester (LISST), equipamento desenvolvido especificamente para a determinação da resistência ao cisalhamento entre camadas asfálticas. A Figura 4 apresenta o dispositivo de ensaio, composto pelo equipamento LISST (Figura 4a), pelo pórtico de carregamento utilizado para aplicação da força (Figura 4b) e por uma curva típica tensão cisalhante × deslocamento cisalhante obtida durante o ensaio (Figura 4c).

Os ensaios foram realizados sob controle de deslocamento, com velocidade constante de 2,54 mm/min. Durante o ensaio, a camada inferior do corpo de prova permaneceu rigidamente confinada ao dispositivo, enquanto um deslocamento horizontal foi imposto à camada superior até a ruptura da interface. A força aplicada e o deslocamento correspondente foram registrados continuamente, permitindo a obtenção da curva tensão cisalhante–deslocamento.

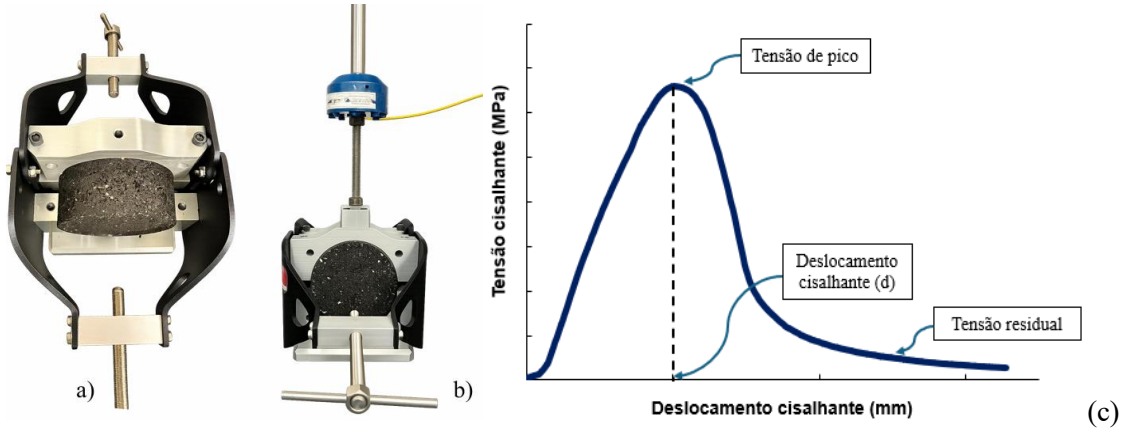


Figura 4. Dispositivo de ensaio de resistência ao cisalhamento na interface (ISS) utilizado neste estudo: a) Equipamento LISST; b) Pórtico (estrutura) de carregamento empregado e Curva típica do ensaio de cisalhamento na interface.

Os corpos de prova foram ensaiados em três temperaturas de 10°C, 25°C e 40°C representativas de condições de serviço frias, moderadas e elevadas. Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram condicionados na temperatura-alvo por, no mínimo, 24 horas, a fim de garantir a uniformidade do equilíbrio térmico em todo o corpo de prova.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Influência da temperatura na ISS

A temperatura exerceu influência significativa sobre a resistência ao cisalhamento na interface, tanto para os corpos de prova reforçados quanto não reforçados (ver Figuras 5, 6 e 7).

Na temperatura de 10 °C (Figura 5), foram observados valores elevados e consistentes de resistência ao cisalhamento na interface, refletindo uma aderência intensa entre as camadas e a elevada rigidez do ligante asfáltico. Essas condições são representativas do desempenho em períodos de inverno ou em climas frios, nos quais a ocorrência de deslizamento intercamadas é pouco provável.

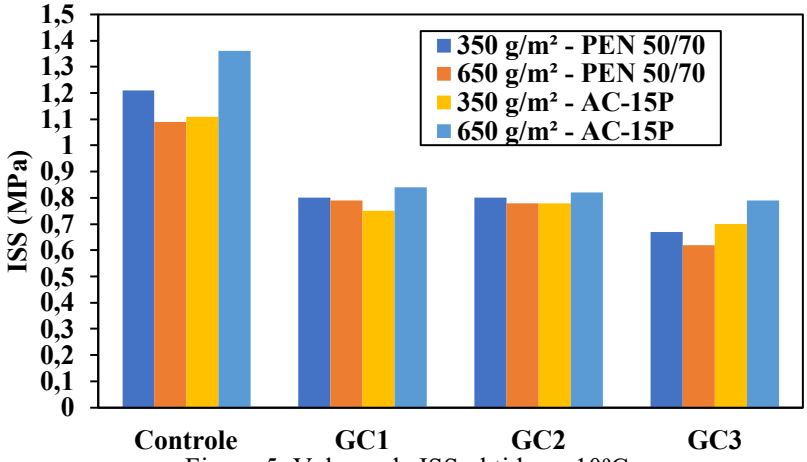


Figura 5. Valores de ISS obtidos a 10ºC.

Na temperatura de 25 °C (500 g/m²) (ver Figura 6), os valores de resistência ao cisalhamento na interface apresentaram redução significativa, porém permaneceram dentro de faixas geralmente consideradas aceitáveis para camadas asfálticas aderidas. Essa faixa de temperatura é representativa das condições típicas de serviço e evidencia a importância de uma preparação adequada da interface, de modo a assegurar aderência satisfatória entre as camadas.

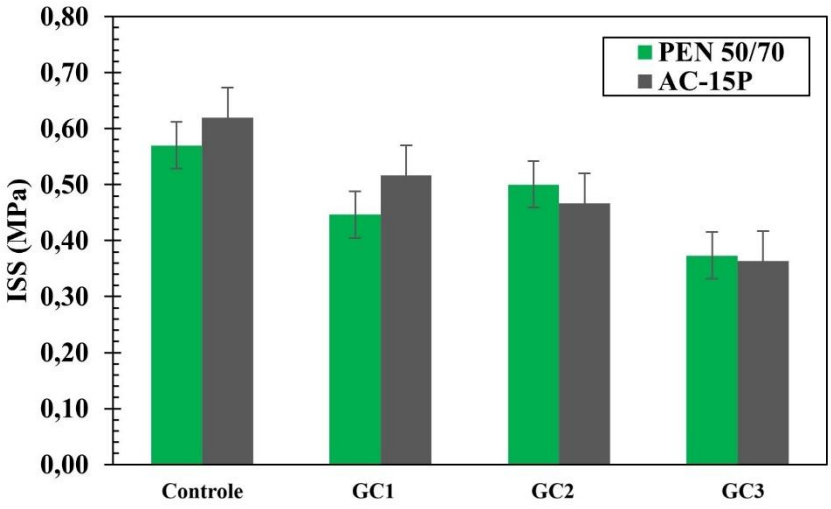


Figura 6. Valores de ISS obtidos a 25ºC.

Na temperatura de 40 °C (Figura 7), os valores de resistência ao cisalhamento na interface foram significativamente reduzidos para todas as configurações avaliadas. Nessas condições, o ligante asfáltico apresentou menor resistência à deformação por cisalhamento, aumentando a probabilidade de deslizamento entre camadas. Esse resultado é particularmente relevante para pavimentos localizados em regiões quentes e tropicais, onde as temperaturas superficiais frequentemente ultrapassam 40°C.

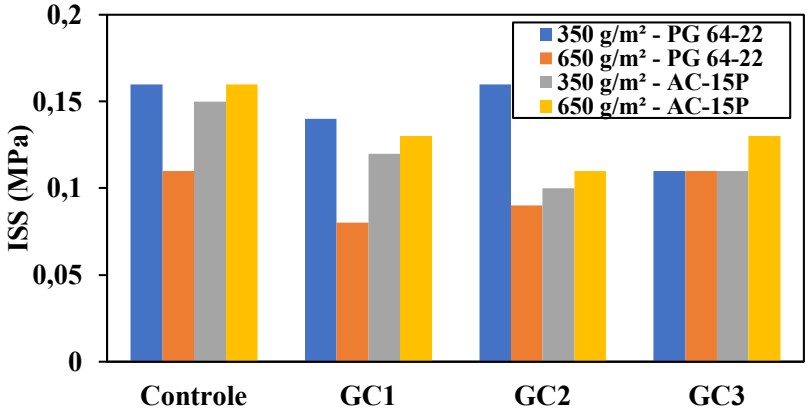


Figura 7. Valores de ISS obtidos a 40ºC.

3.2 Influência da taxa de aplicação

As Figuras 5, 6 e 7 mostraram o efeito da taxa de aplicação da pintura de ligação sobre a resistência ao cisalhamento na interface. Taxas de aplicação reduzidas estiveram associadas a aderência insuficiente, especialmente em temperaturas elevadas, em razão da cobertura incompleta e da impregnação limitada do reforço geossintético.

Com o aumento da taxa de aplicação, a resistência ao cisalhamento na interface apresentou, de modo geral, incremento até uma faixa intermediária, a partir da qual novos aumentos passaram a proporcionar benefícios limitados ou, em alguns casos, redução da resistência ao cisalhamento. O excesso de ligante pode atuar como uma camada lubrificante, favorecendo o deslizamento entre camadas sob carregamento de cisalhamento. Essas observações ressaltam a importância da seleção de uma taxa de aplicação adequada, que equilibre cobertura eficiente e desempenho mecânico na interface.

3.3 Influência do tipo de ligante empregado como pintura de ligação

O ligante modificado por polímero apresentou valores ligeiramente superiores de resistência ao cisalhamento na interface quando comparado ao ligante convencional, especialmente em temperaturas elevadas (ver Figura 7). Esse comportamento pode ser atribuído à maior elasticidade e viscosidade do ligante modificado, que contribuem para o aumento da coesão e da resistência ao escoamento sob carregamento de cisalhamento.

Embora as diferenças observadas tenham sido modestas, o ligante modificado por polímero demonstrou maior robustez ao longo da faixa de temperaturas ensaiada. Esses resultados indicam que a modificação polimérica pode fornecer margens adicionais de segurança em ambientes de alta temperatura, ainda que não elimine a necessidade de práticas construtivas adequadas.

4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a resistência ao cisalhamento na interface de misturas asfálticas reforçadas com geossintéticos sob diferentes condições de temperatura. Com base nos resultados experimentais obtidos, podem ser estabelecidas as seguintes conclusões:

1. A resistência ao cisalhamento na interface diminui significativamente com o aumento da temperatura, confirmando a elevada sensibilidade térmica das interfaces asfalto–geossintético.
2. A taxa de aplicação da pintura de ligação apresenta um comportamento não linear, sendo que taxas intermediárias tendem a proporcionar uma aderência mais estável.
3. O ligante de pintura de ligação modificado por polímero apresentou ligeiramente maior robustez em temperaturas elevadas quando comparado ao ligante convencional.
4. As interfaces reforçadas apresentaram menores valores de resistência ao cisalhamento em relação às interfaces não reforçadas, porém mantiveram desempenho aceitável em temperaturas moderadas.

5 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS PARA O PROJETO DE PAVIMENTOS

Os resultados experimentais deste estudo fornecem importantes subsídios práticos para o projeto e a construção de recapeamentos asfálticos reforçados com geossintéticos. Primeiramente, a temperatura deve ser reconhecida como um parâmetro determinante no desempenho da interface. Os projetistas devem considerar a redução potencial da resistência ao cisalhamento na interface em temperaturas elevadas, especialmente em regiões de clima quente ou com alta incidência de radiação solar.

Em segundo lugar, a taxa de aplicação da pintura de ligação deve ser selecionada com cautela, de modo a garantir aderência adequada sem favorecer o deslizamento entre camadas. Taxas intermediárias, próximas à capacidade de retenção de ligante do geossintético, tendem a apresentar o desempenho mais confiável. A aplicação em campo deve ser acompanhada por rigoroso controle de qualidade, assegurando a distribuição uniforme do ligante.

Por fim, embora os geossintéticos possam reduzir a resistência ao cisalhamento na interface em comparação com sistemas não reforçados, sua contribuição global para o desempenho do pavimento deve ser avaliada de forma holística. Benefícios como a mitigação de trincas e o aumento da vida útil podem compensar eventuais reduções na resistência de interface, desde que sejam adotadas práticas adequadas de projeto e execução.

.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bae, A.; Button, J. W.; Little, D. N. Laboratory evaluation of the effects of temperature on interface shear strength of emulsified tack coats. *Transportation Research Record*, v. 2180, n. 1, p. 102–109, 2010.

Correia, N. S.; Souza, T. R.; Silva, M. P. S.; Kumar, V. V. Investigations on interlayer shear strength characteristics of geosynthetic-reinforced asphalt overlay sections at Salvador International Airport. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 6, p. 1542–1558, 2022. DOI: 10.1080/14680629.2022.2092021.

Kumar, V. V.; Roodi, G. H.; Subramanian, S.; Zornberg, J. G. Influence of asphalt thickness on performance of geosynthetic-reinforced asphalt: full-scale field study. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 50, n. 5, p. 1052–1059, 2022.

Safavizadeh, S. A.; Cho, S. H.; Kim, Y. R. Interface shear strength and shear fatigue resistance of fibreglass grid-reinforced asphalt concrete test specimens. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 23, n. 8, p. 2531–2542, 2022. DOI: 10.1080/10298436.2020.1861447.

Sagnol, L.; Quezada, J. C.; Chazallon, C.; Stöckner, M. Effect of glass fibre grids on the bonding strength between two asphalt layers and its contact dynamics method modelling. *Road Materials and Pavement Design*, v. 20, n. 5, p. 1164–1181, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2018.1439764.

Saride, S.; Kumar, V. V. Reflection crack assessment using digital image analysis. In: *Frontiers in geotechnical engineering*. Singapore: Springer Singapore, 2019. p. 139–156.

Saxena, A.; Kumar, V. V.; Zornberg, J. G. Investigations on cracking characteristics of geosynthetic-reinforced asphalt using DIC. In: *GeoAsia 8*. Anais… 2025.

Silva, M. P. S.; Zornberg, J. G.; Correia, N. S. Predictive model for the interface bond strength of geosynthetic-reinforced asphalt layers. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 52, p. 841–854, 2024.

Solatiyan, E.; Bueche, N.; Carter, A. Laboratory evaluation of interfacial mechanical properties in geogrid-reinforced bituminous layers. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 49, n. 4, p. 895–909, 2021.

Sufian, A. A.; Swiertz, D.; Bahia, H. U.; Mohammad, L.; Akentuna, M. Factors affecting the interlayer shear strength of laboratory and field samples. *Transportation Research Record*, v. 2675, n. 4, p. 234–244, 2020.

Zornberg, J. G. Functions and applications of geosynthetics in roadways. *Procedia Engineering*, v. 189, p. 298–306, 2017.