anpet
associação nacional de pesquisa e ensino em transportes
TRANSPORTES
ISSN: 2237-1346
anpet.org.br/transportes

Misturas asfálticas recicladas à quente com fresado de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos

Recycled hot asphalt mixtures with milled asphalt from geosynthetic-reinforced asphalt layers

Tiago Rodrigues Souza[1], **Natália de Souza Correia**[1]

[1]Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil

Contato: civil.souza@gmail.com, (TRS); ncorreia@ufscar.br, (NSC)

Recebido:
19 de novembro de 2024
Revisado:
11 de fevereiro de 2025
Aceito para publicação:
16 de março de 2025
Publicado:
12 de junho de 2025
Editor de Área:
Francisco Thiago Sacramento Aragão, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Palavras-chave:
Geossintéticos.
Reabilitação asfáltica.
Camadas asfálticas reforçadas.
Fresagem.
RAP.

Keywords:
Geosynthetics.
Asphalt rehabilitation.
Reinforced asphalt layers.
Milling.
RAP.

DOI: 10.58922/transportes.v33.e3061

OPEN ACCESS
CC BY

RESUMO

O uso crescente de geossintéticos, como geogrelhas e geocompostos para pavimentação em obras de reabilitação asfáltica, implica em um aumento futuro dos projetos de fresagem de camadas asfálticas contendo esses materiais. A experiência com a fresagem de pavimentos convencionais é ampla, mas ainda é limitada quando se trata de camadas asfálticas contendo intercamadas poliméricas ou de fibra de vidro. Este estudo buscou avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas com pavimento asfáltico fresado – RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) contendo fragmentos de geossintéticos (G-RAP). Para isso, um trecho experimental foi construído no Aeroporto Internacional de Salvador (Salvador, Brasil), incluindo cinco seções de teste reforçadas com geossintéticos que foram fresadas após a construção. Os resultados de campo indicaram que todas as intercamadas foram fresáveis, embora com eficiências de fresagem variáveis e subprodutos G-RAP com diferentes características físicas. Observou-se uma redução média de 18% na eficiência de fresagem nas camadas reforçadas em comparação às não reforçadas. Os resultados indicam que não há diferenças significativas entre os fresados de G-RAP e o RAP convencional, além da presença de fragmentos de geossintéticos, destacando a viabilidade de reutilizar G-RAP em aplicações semelhantes ao RAP convencional. A análise de novas misturas asfálticas produzidas com 20% de G-RAP demonstrou que a distribuição granulométrica com a presença de fragmentos geossintéticos manteve a distribuição do RAP convencional, não comprometendo o módulo de resiliência. Além disso, o G-RAP mostrou-se benéfico para propriedades mecânicas como estabilidade Marshall, fluência e resistência à tração indireta, validando sua viabilidade para uso em novas misturas recicladas de pavimentação.

ABSTRACT

The increasing use of geosynthetic interlayers, such as geogrids and geocomposites, in asphalt rehabilitation projects has led to an increase in milling operations involving asphalt layers containing these materials. While milling conventional pavement layers is well-documented, experience with milling layers reinforced with geosynthetic polymeric or fiberglass interlayers remains limited. This study aimed to evaluate the mechanical performance of asphalt mixtures containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) with geosynthetic fragments (G-RAP). An experimental section was constructed at Salvador International Airport (Salvador, Brazil), featuring five test sections reinforced with geosynthetics, which were milled after construction. Field results indicated that all interlayers could be milled, though with variable milling efficiencies and produced G-RAP byproducts with varying physical characteristics. A mean reduction of 18% in milling efficiency was observed in the reinforced layers compared to the unreinforced control section. The results indicate that there are no significant differences between the G-RAP millings and the control RAP, other than the presence of geosynthetic fragments, highlighting the feasibility of reusing G-RAP in applications similar to conventional RAP. The analysis of new asphalt mixtures with 20% G-RAP demonstrated that the presence of geosynthetic fragments maintained the particle size distribution of the control RAP, without compromising the resilience modulus. Furthermore, G-RAP proved beneficial for mechanical properties such as Marshall stability, flow tests, and indirect tensile strength, confirming its viability for use in recycled paving mixtures.

1. INTRODUÇÃO

À medida que pavimentos flexíveis atingem a fase de reabilitação, procedimentos de fresagem de camadas asfálticas se tornam uma prática comum para remover parte do pavimento existente e aplicar uma nova camada. Esse processo gera grande quantidade de resíduos asfálticos recicláveis, conhecidos como Pavimento Asfáltico Reciclado – RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*). De acordo com Lopes et al. (2024), o Brasil produziu, em média, 2,1 milhões de toneladas de RAP por ano entre 2019 e 2021, obtidos a partir de atividades de manutenção em rodovias administradas pelo DNIT e concessionadas para a iniciativa privada.

Tradicionalmente, o RAP tem sido utilizado na produção de novas misturas asfálticas e na construção de bases de pavimentos, representando uma prática sustentável e econômica. De acordo com Santos et al. (2024) o emprego de materiais fresados em misturas granulares para camadas de base em pavimentos é capaz de produzir estruturas com desempenho superior as com bases tradicionais, além de promoverem redução de custos com aquisição e transporte de agregados pétreos, preservando recursos naturais, financeiros e energéticos. Já a reciclagem em misturas a quente e morna representa atualmente cerca de 0,7% do RAP brasileiro registrado, principal destinação da maioria dos países da Europa, Japão e Estados Unidos (Lopes et al. 2024).

No entanto, com o uso crescente de geossintéticos como geogrelhas, geocompostos e mantas de pavimentação na reabilitação de pavimentos asfálticos, tem-se ampliado o número de projetos que necessitam fresar camadas que contêm esses materiais, gerando uma nova forma de RAP, o qual irá conter fragmentos geossintéticos, ou G-RAP. Portanto, estes subprodutos de fresagem contendo fragmentos de geossintéticos podem representar um novo recurso para obras de pavimentação. Além das vantagens da aplicação de reforços geossintéticos na redução da propagação de trincas e na melhoria da capacidade estrutural do pavimento (Correia e Zornberg, 2018; Canestrari et al., 2022; Kumar et al., 2023), compreender as particularidades da fresagem em camadas reforçadas com geossintéticos torna-se essencial.

A inclusão de G-RAP como material reciclado em misturas asfálticas representa, portanto, uma nova perspectiva para o setor, mas requer uma avaliação cuidadosa de seu impacto nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas com fragmentos de geossintéticos (Correia et al., 2025). Estudos sobre a fresagem de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos ainda são limitados na literatura, especialmente devido à variedade de geossintéticos disponíveis, como geogrelhas, geocompostos e geotêxteis, produzidos em fibras poliméricas, fibras de vidro ou fibras de carbono, bem como às suas diferentes propriedades físicas e mecânicas. Zaumanis et al. (2021) sugerem que o aprimoramento dos parâmetros de fresagem é crucial para integrar o fresado como novo componente em pavimentação. Portanto, a influência dos geossintéticos na fresagem e na qualidade do subproduto resultante é uma questão ainda a ser explorada.

Ainda são limitados os estudos específicos sobre a fresagem de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos. Damisch e Kirschner (1994) foram pioneiros ao estudar a fresagem de pavimentos com reforço polimérico, observando a fresabilidade desses materiais, embora com algumas interrupções no processo. Outros estudos (Tran et al., 2012; Gu, Andrews e Marienfeld, 2021; Nguyen et al., 2021) investigaram as propriedades do RAP derivado de fresagens de camadas reforçadas, mas sem uma análise detalhada do processo. Em pesquisas recentes, Saxena et al. (2023) observaram que geotêxteis não tecidos não interferem na fresagem de camadas asfálticas. Ainda assim, persistem dúvidas entre engenheiros e agências sobre o impacto dos geossintéticos na produção de fibras e na qualidade do fresado, bem como na eficiência do processo de fresagem.

O presente estudo visa aprofundar a compreensão sobre o comportamento de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos durante a fresagem e avaliar o uso do G-RAP no desempenho de mecânico de misturas asfálticas recicladas, promovendo assim uma alternativa sustentável para o setor de pavimentação. Neste contexto, o presente estudo investiga, por meio de um amplo programa experimental, o comportamento mecânico das misturas asfálticas recicladas contendo 20% de G-RAP, com foco na estabilidade Marshall, resistência à tração indireta e módulo de resiliência. O experimento foi realizado em um trecho de teste no Aeroporto Internacional de Salvador (Brasil), onde cinco seções com reforço geossintético foram fresadas e avaliadas quanto à fresabilidade e às características físicas do G-RAP.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Geossintéticos utilizados neste estudo

Os geossintéticos utilizados nesta investigação são tipos comuns de reforços utilizados em aplicações asfálticas e incluem uma geogrelha de fibra de vidro com revestimento polimérico (GS1), um geocomposto de reforço com geogrelha de fibra de vidro fixada a um tecido geotêxtil de polipropileno (PP) (GS2), geocomposto fabricado em malha de microfibra de vidro embutida em uma manta de poliéster (PET) de alta resistência (GS3), um geocomposto com geogrelha de fibra de vidro fixada a um geotêxtil não tecido ultraleve de PP (GS4) e um geocomposto com geogrelha de PET fixada a um geotêxtil não tecido ultraleve de PP (GS5). A Figura 1 apresenta os tipos de reforços geossintéticos utilizados no presente estudo. A Tabela 1 apresenta as principais características dos geossintéticos.

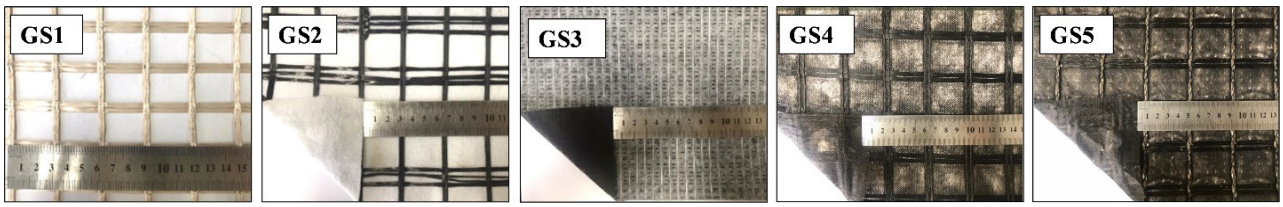


Figura 1. Geossintéticos utilizados neste estudo [adaptado de: Souza, 2024].

Tabela 1: Características dos geossintéticos de pavimentação investigados neste estudo

Propriedades	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5
Composição da geogrelha	Fibra de vidro	Fibra de vidro	Micro fibra de vidro	Fibra de vidro	Poliéster
Composição do geotêxtil não tecido	-	PP	-	PP	PP
Tamanho da abertura, mm	20x25	31x30	-	31x32	32x39
Tipo de revestimento	Polimérica	-	Polímero elastomérico	Betuminosa	Betuminosa
Massa por unidade de área (ASTM, 2018), g/m^2	412.0	382.0	145.0	326.0	272.0
Massa por unidade de área do geotêxtil (ASTM, 2018), g/m^2	-	168.4	-	27.5	45.7
Espessura (ASTM, 2019), mm	1.5	1.8	0.45	1.35	1.8
Espessura do geotêxtil (ASTM, 2019), mm	-	1.35	-	0.13	0.21
Capacidade de retenção de asfalto do geossintético (ASTM, 2022), g/m2	422.8	1553.7	432.1	421.1	395.8
Resistência à tração máxima Long/Trans (ASTM, 2020), kN/m	75/97	50/50	25/30	50/50	50/50
Deformação na resistência máxima à tração (ASTM 2020), %	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 7.0	≤ 3.0	≤ 12.0

2.2. Seções experimentais em escala real

As seções de teste em escala real foram construídas no Aeroporto Internacional de Salvador, Bahia, operado pelo Grupo Vinci. Localizado a cerca de 30 km da "Baía de Todos os Santos" em Salvador, o aeroporto atende aproximadamente 6,8 milhões de passageiros por ano, com uma média de 91 operações diárias de voo. As seções de teste foram implantadas próximas à área de estacionamento de aeronaves 3, em uma área sem tráfego de aeronaves ou veículos, o que permitiu melhor controle sobre os experimentos.

A estrutura original do pavimento consistia em uma sub-base de silte argiloso, uma base de agregado de 180 mm e uma camada asfáltica de 60 mm com agregado de tamanho nominal de 12,7 mm. A área de teste foi escolhida para evitar defeitos como trincas e buracos. As seções de teste incluíram uma seção não reforçada (controle) e cinco seções reforçadas com geossintéticos. As etapas incluíram preparação de superfície, aplicação do ligante, instalação dos geossintéticos, construção da camada asfáltica e operações de fresagem. Maiores detalhes sobre o trecho experimental podem ser encontrados nas pesquisas de Souza (2024) e Correia et al. (2025).

A estrutura original do pavimento foi submetida a um processo inicial de fresagem para simular as condições reais de um projeto de reabilitação antes da instalação dos geossintéticos e da aplicação da camada asfáltica. Essa etapa envolveu a fresagem dos 20 mm superiores da camada asfáltica pré-existente utilizando uma fresadora Wirtgen W200, deixando uma camada asfáltica restante de 40 mm de espessura, com sulcos de média profundidade de 1,2 mm.

A superfície do pavimento foi limpa e seca. Após a preparação da superfície, foi realizada a aplicação da emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida tipo 2 (RR-2C), com uma taxa média de aproximadamente 660 l/m^2 (residual). Em geral, o tipo e a taxa de aplicação de ligante dependem do produto utilizado e das práticas regionais. No presente estudo, a pesquisa focou nos aspectos de fresagem para os diferentes geossintéticos, sem considerar combinações variadas de tipos de ligante ou taxas de aplicação. Assim, todos os geossintéticos foram instalados com a mesma taxa média emulsão asfáltica aplicada.

As características da emulsão asfáltica CRS-2 compreendem viscosidade de Sybolt Furol a 50 °C (ABNT, 2007) de 182,5 s, peneiração (0,84 mm) de 0,03% em massa (ABNT, 2012) e teor de resíduo seco de 53% em massa (ABNT, 2019). A emulsão foi aplicada uniformemente por meio de um barra de pulverização a 55 °C, com o tempo de cura definido em no mínimo 30 minutos.

Após a ruptura da emulsão, os diferentes geossintéticos foram instalados manualmente pela equipe de pavimentação do aeroporto, evitando rugas e dobras. Todos os geocompostos de geogrelha foram instalados com o lado da geogrelha voltado para cima. Embora seja comum a instalação de geogrelhas de fibra de vidro em superfícies de asfalto niveladas, neste estudo, para evitar influências no processo de fresagem, todos os geossintéticos foram instalados diretamente sobre a superfície fresada, conforme as práticas do aeroporto.

Embora se reconheça que o produto GS2, devido à sua alta capacidade de retenção de asfalto (Tabela 1), possa exigir uma taxa de aplicação de emulsão de ligação maior para um desempenho de aderência de interface, a mesma taxa de emulsão foi adotada para todas as seções de teste, facilitando a comparação das operações de fresagem entre os diferentes produtos. Isso porque, adotar taxas de ligante mais altas ou diferentes poderia causar exsudação em algumas seções. Ainda, neste estudo, sobreposições não foram necessárias durante a instalação dos geossintéticos; no entanto, quando necessárias, devem ser realizadas entre 50 mm e 150 mm, conforme consulta ao fabricante.

A construção da camada asfáltica final foi realizada com a técnica de salgamento (espalhamento leve de asfalto quente da caçamba) ao longo das trilhas das rodas da pavimentadora para evitar rugas significativas causadas pelas rodas sobre os geossintéticos instalados. Este procedimento também é recomendado na pesquisa de Kumar et al. (2023). No presente estudo, não foram observados descolamentos dos geossintéticos devido a passagem das rodas dos equipamentos durante a instalação.

A camada de concreto asfáltico foi subsequentemente compactada, envolvendo a colocação de uma camada final de 60 mm de espessura composta por agregados de calcário britado (tamanho máximo nominal de 12,7 mm) e ligante tipo PG 58-16 com teor de betume de projeto em 4,66% em peso de agregado. A temperatura no momento da compactação da camada asfáltica foi aferida 120 °C. Detalhes adicionais sobre o processo de construção podem ser encontrados em Souza (2024). A Figura 2 apresenta detalhes do processo de construção das seções experimentais de teste com geossintéticos no Aeroporto Internacional de Salvador.



(a) Localização da seção teste (b) Remoção camada asfáltica antiga c) Aplicação da emulsão (d) Posicionamento dos geossintéticos

(e) Instalação dos geossintéticos (f) Compactação da camada asfáltica (g) Aspecto final da seção para fresagem

Figura 2. Construção das seções experimentais de teste [adaptado de: Souza, 2024].

2.3. Operação de fresagem das seções reforçadas com geossintéticos

Para identificar possíveis diferenças no processo de fresagem entre as diferentes seções reforçadas com geossintéticos e a seção controle (sem reforço), a velocidade de movimento da fresadora e a velocidade de rotação do tambor permaneceram inalteradas ao longo das operações de campo, a fim de minimizar a possível influência desses parâmetros nas fresagens.

A fresadora Wirtgen W1000L, comum em trabalhos de manutenção no Aeroporto, é equipada com um tambor de fresagem padrão contendo 92 pontas de corte e tem uma largura total de fresagem de 1000 mm. Nesta configuração, a fresadora pode fresar camadas de asfalto convencionais com sua velocidade máxima de 320 rpm. Como o equipamento foi fornecido pela equipe de operações do aeroporto, não foi possível modificar o número de variáveis no processo de fresagem (por exemplo, tipo de equipamento, velocidade de rotação, largura de corte e profundidade de corte) para explorar o impacto dos parâmetros de fresagem na eficiência do processo e na qualidade do G-RAP produzido.

A execução das operações de fresagem ocorreu 1 ano e 2 meses após a construção da seção teste. Este processo foi cuidadosamente planejado para garantir que a simulação se assemelhasse a um processo real de reabilitação asfáltica. Para evitar o desgaste prematuro das pontas de corte e garantir uma fresagem adequada, é comum que os equipamentos de fresagem incorporem um dispositivo de pulverização de água no tambor de fresagem. Este dispositivo também foi mencionado no estudo de Damisch e Kirschner (1994), onde os autores relataram a interrupção da pulverização de água em determinado ponto. No presente estudo, a pulverização contínua de água foi mantida ao longo de todas as operações, como é usual no campo. Uma pequena seção fora da área teste foi fresada para calibrar o dispositivo de pulverização, garantindo o resfriamento adequado sem acúmulo de água na área fresada. Testes preliminares revelaram que o volume de água era inicialmente maior do que o necessário. O teste inicial também levou à adoção de uma profundidade de fresagem de pelo menos 25 mm abaixo da posição do reforço geossintético.

De acordo com Dalla Rosa et al. (2015), as características do material triturado estão diretamente vinculadas à profundidade de corte do pavimento e à velocidade da recicladora aplicadas durante o processo de reciclagem. Portanto, no presente estudo, o processo de fresagem nas seções reforçadas com geossintéticos e na seção controle foi realizado na mesma profundidade de corte e na velocidade constante máxima do tambor. O mesmo operador de máquina executou as operações de fresagem em todas as seis seções de teste.

Antes do início do programa de campo, todas as lâminas de fresagem foram substituídas para garantir uma fresagem adequada do material asfáltico. A profundidade de corte da camada asfáltica reforçada foi definida em 90 mm, sendo 30 mm abaixo da posição do geossintético. A fresagem foi realizada longitudinalmente ao longo das seções experimentais de 10 metros. O tempo de fresagem de cada seção de teste de campo foi registrado, juntamente com as observações sobre quaisquer obstáculos encontrados durante o processo de fresagem. Tanto o G-RAP quanto o RAP convencional foram coletados por caminhões basculantes, que foram carregados por meio da correia transportadora da máquina de fresagem e armazenados em baias designadas, em uma área coberta do aeroporto.

O tempo de deslocamento da máquina para cada seção de 10 metros foi monitorado com um cronômetro, e a rotação do tambor durante o processo de fresagem foi observada para cada seção. A seção controle foi fresada primeiro, seguida pelas seções GS1, GS2, GS3, GS4 e GS5. O tempo total de fresagem registrado para cada seção, a velocidade de movimentação da fresadora e a eficiência da fresagem nas seções com geossintéticos em comparação com a seção controle indicaram diferenças no tempo de fresagem com base no tipo de geossintético.

Na seção com o produto GS1, o processo de fresagem levou 99,0 segundos, apenas um pouco mais que os 96,0 segundos da seção controle, sugerindo resistência praticamente inexistente ao processo de fresagem. No caso de GS2, o tempo de fresagem foi de 117,0 segundos, o que indica um leve aumento na resistência à fresagem, possivelmente devido à combinação de materiais na estrutura do geossintético (geotêxtil não tecido + geogrelha de fibra de vidro).

A seção GS4 apresentou 118,0 segundos, possivelmente devido à combinação de materiais na estrutura (geotêxtil não tecido + geogrelha de fibra de vidro). O geocomposto GS3, uma micro malha de fibra de vidro ultrafina, apresentou similar redução no tempo de fresagem (114,0 segundos) em comparação com os geossintéticos anteriores. O geossintético GS5 (poliéster) apresentou o maior tempo de fresagem, com 145,0 segundos, indicando maior resistência em comparação com os outros geossintéticos testados.

As observações iniciais dos processos de fresagem para os produtos de fibra de vidro (GS1, GS2, GS3 e GS4) indicaram, de maneira geral, que não houve interrupções no processo, com a fresabilidade considerada equivalente à de uma camada asfáltica controle (não reforçada). Nenhum fragmento ou

filamento de geossintético foi observado se enroscando no tambor de fresagem ao final dos processos de fresagem das diversas seções asfálticas reforçadas com fibra de vidro (GS1, GS2, GS3 e GS4).

Para a seção reforçada com GS5, geogrelha de poliéster, não foram observadas interrupções no processo de fresagem ao longo dos 10 metros, de forma semelhante aos produtos de fibra de vidro. No entanto, ao final da operação de fresagem desta seção, alguns filamentos de geogrelha foram encontrados enroscados no tambor de fresagem. Apesar disso, esses fragmentos não interromperam a continuidade do processo de fresagem ao longo da seção e puderam ser facilmente removidos do tambor. Não foi necessário cortar os fragmentos de poliéster, mas apenas desenrolá-los do tambor. Os filamentos de poliéster coletados foram esticados no local para medição do comprimento e pesagem, sendo quantificados em 4,7% em massa em relação à massa total de geossintético instalada.

A ocorrência de geogrelha enroscada no tambor de fresagem corrobora os relatos de fresagem de seções asfálticas reforçadas de Damisch e Kirschner (1994), que indicaram que a velocidade de fresagem precisava ser reduzida para desenrolar filamentos de poliéster do tambor. De maneira geral, as camadas asfálticas de 90 mm de profundidade com geossintéticos foram fresadas com sucesso, sem diferenças significativas no processo de fresagem convencional.

A Figura 3 ilustra o processo de fresagem das camadas reforçadas. Na Figura 3a, é mostrado o processo de fresagem da seção de teste, com a máquina de fresagem operando ao longo da área experimental. A Figura 3b exibe a espessura da fresagem e a posição do geossintético, destacando a profundidade do corte e o local onde o material reforçador está posicionado entre as camadas asfálticas. A Figura 3c apresenta um detalhe da ponta de corte da máquina de fresagem, evidenciando o mecanismo de corte utilizado. Por fim, na Figura 3d, o G-RAP é mostrado sendo lançado na caçamba do caminhão de coleta, ilustrando fragmentos de fibra de vidro e a etapa de recolhimento do material fresado para sua posterior análise e reutilização.

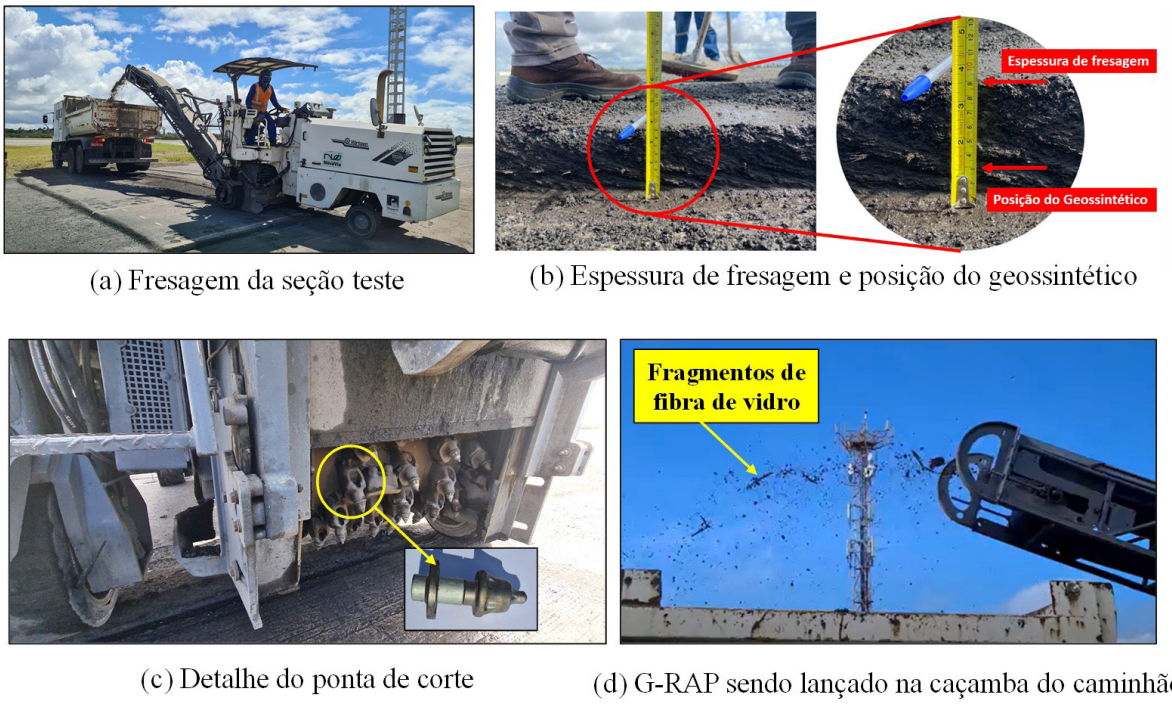


Figura 3. Processo fresagem das camadas reforçadas [adaptado de: Souza, 2024].

De modo geral, todos os tempos de fresagem das seções com geossintéticos foram mais longos que os da seção controle, com uma eficiência em média 18% mais lenta em relação ao tempo base

de fresagem. Isso indica o desenvolvimento de resistência ao processo de corte devido à presença de geossintéticos nas camadas asfálticas. Entre os produtos testados, o geossintético de poliéster teve o maior tempo de fresagem, seguido pelos que contêm geotêxteis não tecidos em sua estrutura.

É importante destacar que as eficiências registradas são referentes ao equipamento de fresagem utilizado neste estudo é limitado aos tipos de geossintéticos instalados. Embora este estudo se concentre na eficiência do processo de fresagem de camadas asfálticas com geossintéticos, deve-se reconhecer que outros geossintéticos e/ou outras características da camada asfáltica, bem como diferentes parâmetros (por exemplo, taxa e tipo de ligante, condições da superfície de fresagem, idade do pavimento, tipo da fresagem, profundidade de fresagem, etc) podem influenciar a eficiência da fresagem de revestimentos reforçados.

3. CARACTERÍSTICAS DO G-RAP

As amostras de G-RAP armazenadas no aeroporto foram avaliadas para quantificar a presença e tamanho dos fragmentos de geossintéticos nos RAP produzidos, além das características dos fresados. Como esperado, filamentos e partículas de geossintéticos foram facilmente encontrados nas amostras de G-RAP. Observou-se diferenças notáveis nos tamanhos de fibras, fragmentos de geotêxteis fresados e presença de pó de fibra de vidro nas amostras dos diferentes G-RAP.

O G-RAP1, com geogrelha de fibra de vidro, apresentou aparência semelhante ao RAP controle, porém de granulometria mais grossa, com presença visível de filamentos isolados de fibra de vidro. O G-RAP2 apresentou fresagem mais grossa, com fragmentos isolados de geotêxtil e filamentos curtos de geogrelha de fibra de vidro. O G-RAP3, produzido em uma malha de fibra de vidro, apresentou aparência semelhante a um RAP de granulometria mais grossa, com poucos fragmentos de malha de fibra de vidro.

O fresado G-RAP4, com geocomposto de geogrelha de fibra de vidro e geotêxtil não tecido ultraleve (que derrete e desaparece após a instalação), apresentou textura de fresagem mais fina, com pequenos fragmentos de fibra de vidro (similar a fibras curtas) e presença de pó de fibra de vidro. O G-RAP5, com geocomposto de poliéster e similar geotêxtil não tecido ultraleve que derrete e desaparece após a instalação, teve aparência semelhante ao RAP convencional, com granulometria mais fina, e presença de fibras de poliéster menores e menos visíveis.

Em geral, os resultados sugerem diferenças entre as amostras de G-RAP, especialmente em termos de tamanho das partículas e características dos fragmentos fresados. As análises laboratoriais adicionais mostraram que a distribuição do tamanho das partículas das amostras de G-RAP foi similar, com grãos maiores em G-RAP1 e G-RAP2.

A Figura 4 apresenta um comparativo das curvas granulométricas dos diferentes G-RAPs e do RAP. Isso corrobora com a afirmação de que os revestimentos asfálticos reforçados, ainda que com geossintéticos diferentes entre si, quando comparados aos revestimentos asfálticos convencionais, produzem fresados com similar potencial de reuso, assim como o RAP convencional. Tal como apresentado na Figura 4 que ilustra a curva granulométrica dos fresados. Isso indica que materiais fresados com geossintéticos podem ser reutilizados de maneira semelhante ao RAP convencional.

Quanto aos fragmentos de geossintéticos observados, estes variaram de tamanho dependendo do tipo de geossintético. A Figura 5 apresenta o aspecto dos fragmentos de geossintéticos observados nas amostras de G-RAP durante ensaio de granulometria (DNIT, 2019), destacando a presença de fibras na fração fina. Foi difícil quantificar os fragmentos devido à dificuldade em recuperá-los nas amostras de RAP. Em geral, a presença significativa de fibras curtas e filamentos foi visivelmente observada nas frações de partículas entre 2,0 a 10,0 mm.

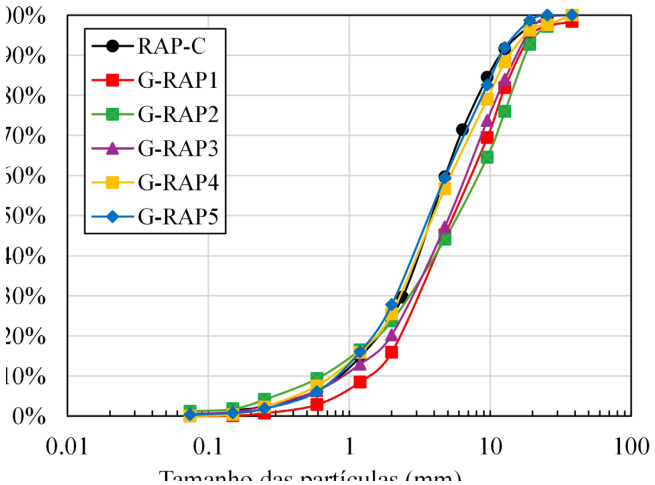


Figura 4. Curvas granulométricas dos G-RAPs e do RAP [adaptado de: Souza, 2024].

Para quantificar a massa total de fragmentos e fibras de geossintéticos esperada nos amostras de G-RAP, foi calculada a massa dos produtos geossintéticos instalados por metro quadrado, com base nos dados apresentados na Tabela 1. Esse cálculo permite determinar a fração esperada de fragmentos de geossintéticos em relação à massa da mistura asfáltica fresada. Considerando a seção experimental utilizada, com área de 1 metro quadrado e espessura de 90 mm (profundidade da fresagem) e densidade da mistura asfáltica de 2.433 kg/m^3, a massa total de G-RAP é de aproximadamente 219 kg/m^2.

Assim, a fração de fragmentos de geossintéticos nas amostras de G-RAP é de 1,88 g/kg no G-RAP1, 1,74 g/kg no G-RAP2, 0,66 g/kg no G-RAP3, 1,49 g/kg no G-RAP4 e 1,24 g/kg no G-RAP5, correspondendo a 0,19% (G-RAP1), 0,17% (G-RAP2), 0,07% (G-RAP3), 0,15% (G-RAP4) e 0,12% (G-RAP5) em relação ao peso dos agregados. Esse valor é superior à fração de fragmentos "visíveis" recuperados nas amostras. A caracterização física do G-RAP é importante para diferentes estratégias de reciclagem. Entre essas estratégias, o G-RAP pode ser considerado para a produção de misturas asfálticas recicladas.

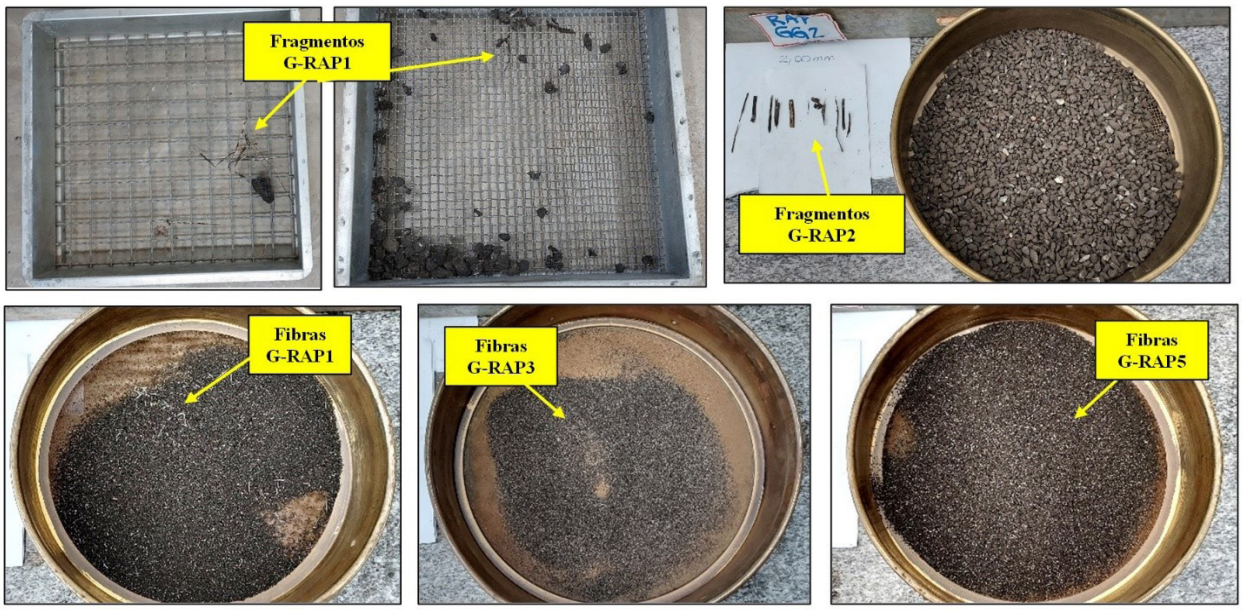


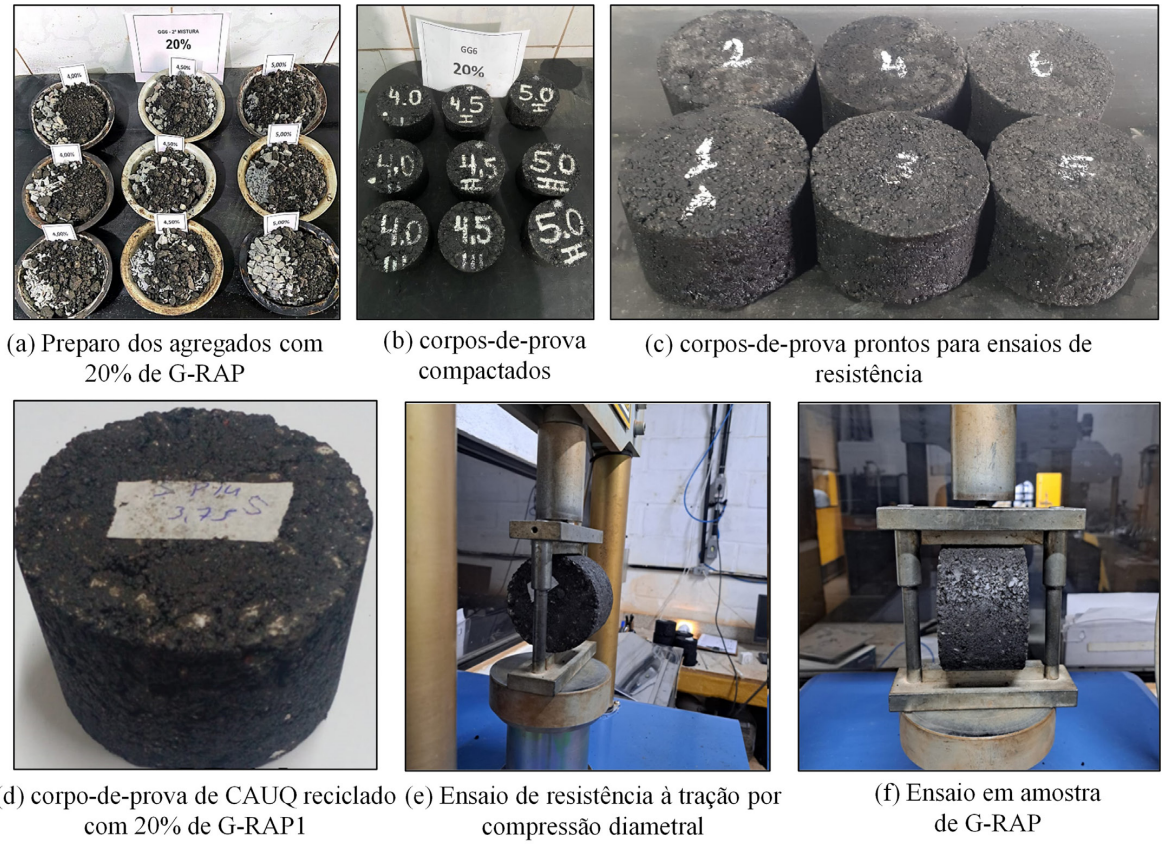
Figura 5. Aspecto de fragmentos de geossintéticos observados nas amostras de G-RAP durante ensaio de granulometria [adaptado de: Souza, 2024].

4. REUSO DO G-RAP EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Nesta etapa do estudo, foram conduzidos ensaios de resistência mecânica em misturas de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) recicladas com 20% de G-RAP, com o objetivo de avaliar a viabilidade desses fresados para a reciclagem de misturas asfálticas em larga escala. Para definir os parâmetros ótimos de cada mistura reciclada, foi aplicada a metodologia Marshall, seguindo a norma DNER-ME 043/95 (DNER, 1995).

A preparação dos corpos-de-prova considerou aspectos como granulometria, proporção entre G-RAP e material virgem britado, e compactação com 75 golpes em cada face conforme preconizado nos procedimentos da norma DNIT 178/2018 - PRO (DNIT, 2018c). Em seguida, foram realizados ensaios de módulo de resiliência, utilizando os parâmetros ótimos obtidos na dosagem Marshall, para verificar a influência dos fragmentos e fibras de geossintéticos nas propriedades mecânicas das misturas recicladas.

Além das misturas CAUQ recicladas com diferentes tipos de G-RAP, foram avaliadas misturas de CAUQ reciclado com RAP (sem fragmentos de geossintéticos) e CAUQ convencional (não reciclado) das faixas C do DNIT e DIRENGE Faixa III. A Figura 6 apresenta o procedimento de preparo e moldagem dos corpos-de-prova com G-RAP, aspectos dos corpos-de-prova e ensaio de resistência à tração diametral.



(a) Preparo dos agregados com 20% de G-RAP

(b) corpos-de-prova compactados

(c) corpos-de-prova prontos para ensaios de resistência

(d) corpo-de-prova de CAUQ reciclado com 20% de G-RAP1

(e) Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

(f) Ensaio em amostra de G-RAP

Figura 6. Amostras de CAUQ reciclado com G-RAP e ensaios de caracterização mecânica [adaptado de: Souza, 2024].

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de dosagem das misturas testadas. A análise mostra que todas as misturas CAUQ recicladas com G-RAP atenderam aos requisitos mínimos de projeto,

indicando que o reuso desses materiais geossintéticos em reciclagens em larga escala é viável, sem prejuízos ao reuso do fresado gerado.

Tabela 2: Resultado dos parâmetros Marshall dos CAUQs reciclados com G-RAP e CAUQs controle

Propriedade	20% G-RAP 1	20% G-RAP 2	20% G-RAP 3	20% G-RAP 4	20% G-RAP 5	20% RAP	Controle FX C DNIT	Controle (FX III DIRENGE)	Parâmetros de projeto
Densidade aparente (g/cm³)	2,348	2,357	2,361	2,358	2,35	2,352	2,374	2,433	-
Densidade teórica (g/cm³)	2,437	4,443	2,449	2,45	2,441	2,444	2,457	-	-
V.A.M. (%)	15,86	15,92	16,31	16,58	16,51	16,85	15,03	15,86	>15
R.B.V. (%)	76,98	77,89	77,97	77,36	77,42	77,66	77,48	75	75 a 82
Vazios (%)	3,65	3,52	3,59	3,76	3,73	3,76	3,39	3,83	3 a 5
Estabilidade (kgf)	1412	1309	1309	1285	1383	1200	1706	881	>500
Fluência (mm)	2,87	3,18	3,8	3,34	3,43	3,04	2,4	2,8	2,5 a 4,5
Tração (MPa)	1,07	1,03	1,18	1,22	1,41	1,20	0,79	0,79	>0,65
Teor de betume ótimo (%)	5,2	5,29	5,4	5,5	5,5	5,6	5,0	4,7	-

V.A.M. = Volume de Vazios nos Agregados Minerais; R.B.V. = Relação Betume-Vazios.

Observou-se uma leve redução no teor de ligante de projeto para as misturas com 20% de G-RAP, variando de 5,2% a 5,5%, em comparação ao RAP, que exigiu 5,6% de betume. Essa redução é vantajosa em termos econômicos e ambientais, pois implica menor consumo de CAP nas misturas contendo fragmentos de geossintéticos.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os resultados de valores de V.A.M., mostrando que todas as misturas de CAUQ recicladas com 20% de G-RAP atenderam ao limite mínimo de 15% de projeto. Em relação à R.B.V. projetada, com valores entre 75% e 82%, as misturas recicladas com 20% de G-RAP alcançaram, em média, 77,5%, assim como a mistura com 20% de RAP. Quanto aos vazios da amostra, com intervalo desejado entre 3% e 5%, todas as misturas com 20% de G-RAP e a mistura com 20% de RAP também atenderam aos requisitos mínimos.

Nos ensaios de estabilidade e fluência (DNIT, 2024), bem como nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (DNIT, 2018b), todas as misturas de CAUQ recicladas com 20% de G-RAP superaram as exigências mínimas de projeto. Esses resultados indicam uma contribuição positiva das fibras e fragmentos de geossintéticos para o desempenho mecânico do CAUQ, com valores que, em alguns casos, superaram a mistura de CAUQ reciclada com 20% de RAP, especialmente nos parâmetros de fluência e resistência à tração.

Conforme demonstrado na Tabela 2, todas as misturas de CAUQ recicladas com 20% de G-RAP apresentaram valores de estabilidade que superaram pelo menos o dobro do mínimo exigido em norma. Especificamente, o CAUQ com 20% de G-RAP1 alcançou 2,8 vezes o valor mínimo, o que pode estar associado à presença de fragmentos de fibra de vidro no G-RAP1. Resultados similares foram observados para o G-RAP5, que apresentou fragmentos de poliéster.

Outro parâmetro importante nos ensaios de CAUQs reciclados com G-RAP foi a resistência à tração por compressão diametral (RT), diretamente relacionada à durabilidade do pavimento. Na análise comparativa dos valores médios de RT, as misturas de CAUQ recicladas com 20% de G-RAP mostraram desempenhos semelhantes aos da amostra de RAP, conforme apresentado na Tabela 2.

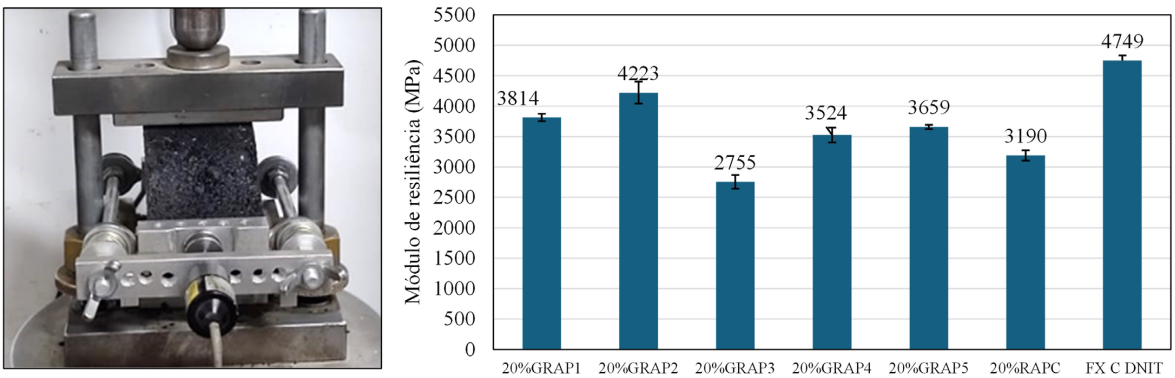
Os resultados indicam que as fibras de geossintéticos presentes no G-RAP não impactaram negativamente a RT das misturas recicladas e, em alguns casos, até superaram o desempenho do CAUQ convencional. Esses dados sugerem que os fragmentos de geossintéticos podem contribuir positivamente para o desempenho das misturas recicladas, reforçando sua viabilidade em aplicações de larga escala.

5. ANÁLISE DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA CAUQS RECICLADOS

O módulo de resiliência é uma propriedade crucial que avalia a capacidade do material de suportar esforços repetitivos, o que impacta diretamente na durabilidade do pavimento. Altos valores desse módulo sugerem uma maior resistência à deformação, o que contribui para o aumento da vida útil da infraestrutura.

Nesta pesquisa, análises de Módulo de Resiliência (MR) seguindo as especificações do DNIT (2018a) foram realizados para CAUQs Reciclado com diferentes tipos de G-RAP, com RAP (sem fragmentos de geossintéticos) e CAUQ convencional (não reciclado) da faixa C do DNIT (2021). Para cada configuração, foram ensaiados 6 corpos-de-prova.

A Figura 7 apresenta uma imagem do ensaio de MR e apresenta os resultados do módulo de resiliência das misturas asfálticas recicladas com 20% de G-RAP e CAUQ convencional (não reciclado) da faixa C do DNIT. Observa-se que todos os CAUQs reciclados apresentaram menores resultados de resiliência em comparação a amostra de CAUQ convencional. Entre os diferentes G-RAPs, os fragmentos de GS1 e GS2 e as fibras do GS4 e GS5 resultaram em misturas com MR superior ao CAUQ reciclado com 20% de RAP, indicando a influência dos fragmentos no desempenho da mistura.



(a) Ensaio de MR (b) Resultados dos ensaios de MR

Figura 7. Ensaios de módulo de resiliência [adaptado de: Souza, 2024].

A pesquisa mostrou que os G-RAPs coletados contêm fragmentos de geossintéticos de diferentes formas e tamanhos, e portanto, estes fragmentos podem alterar o comportamento mecânico das misturas asfálticas. No percentual de 20% de fresado com geossintéticos, verificou-se viabilidade para as misturas atingirem parâmetros exigidos para serem utilizadas em camadas de rolamento utilizando o método Marshall. No entanto, deve-se destacar a importância de prever adaptações necessárias em usinas de asfalto para a produção de misturas recicladas com G-RAPs.

É importante também destacar que, nesta pesquisa, nenhum agente rejuvenescedor foi utilizado na mistura reciclada, uma vez que a pesquisa concentrou-se em avaliar o impacto dos fragmentos de geossintéticos no comportamento mecânico das misturas asfálticas recicladas. Futuras pesquisas poderão explorar o efeito do uso de agentes rejuvenescedores em conjunto com amostras de G-RAP, a fim de avaliar possíveis efeitos sinérgicos na otimização do desempenho das misturas.

6. CONCLUSÕES

A presente pesquisa avaliou a viabilidade de misturas asfálticas recicladas a quente produzidas com fresado de camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos, em uma seção de campo em escala real no Aeroporto Internacional de Salvador, Bahia. Os G-RAPs coletados foram empregados na produção de misturas asfálticas recicladas, posteriormente submetidas a ensaios laboratoriais de caracterização física e mecânica. Com base nos resultados obtidos, foram alcançadas as seguintes conclusões:

- A pesquisa demonstrou que camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos podem ser fresadas com sucesso. As operações de fresagem foram realizadas integralmente com uma fresadora W1000L, mantendo constantes parâmetros como velocidade de rotação do tambor e velocidade de movimento, e a pulverização contínua de água facilitou o processo.
- O tempo de fresagem nas seções reforçadas com geossintéticos foi comparável ou levemente mais lento (em média 18%) ao da seção controle, indicando resistência adicional mínima devido às inclusões de fibras de vidro ou poliéster. Apesar do ligeiro aumento no tempo de fresagem da seção reforçada com geogrelha de poliéster devido a alguns filamentos enroscados, as operações foram consideradas aceitáveis.
- A avaliação das amostras de G-RAP revelou a presença visível de fragmentos de geossintéticos nos materiais fresados. A aparência visual e as características medidas do G-RAP foram influenciadas pelo tipo de geossintético. No entanto, a distribuição de tamanho das partículas de G-RAP foi essencialmente independente do tipo de material geossintético, permanecendo semelhante à do RAP convencional.
- Com base na massa dos produtos geossintéticos instalados, o conteúdo de fibras variou entre 0,07% e 0,19% do peso do agregado para uma profundidade de fresagem de 90 mm. Dentre as fibras visíveis nas amostras de G-RAP, uma fração significativa apresentou comprimento entre 2,0 e 10,0 mm.
- Misturas asfálticas com 20% de G-RAP apresentaram desempenho comparável às misturas com 20% de RAP nos ensaios de estabilidade Marshall, fluência e resistência à tração indireta, sendo que todas as misturas recicladas atenderam ou excederam as especificações mínimas de projeto. O teor ótimo de betume das misturas com G-RAP foi similar ao das misturas convencionais com RAP, mostrando a viabilidade do uso de G-RAP em estratégias de reciclagem.
- CAUQs reciclados com RAP e G-RAP apresentaram valores de módulo de resiliência inferiores aos do CAUQ convencional. Fragmentos de GS1 e GS2 e as fibras de GS4 e GS5 resultaram em misturas com módulo de resiliência superior ao do CAUQ reciclado com 20% de RAP, indicando a influência dos fragmentos de geossintéticos no desempenho mecânico da mistura.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

TRS: Investigação, Metodologia, Curadoria de dados; Escrita; NSC: Concepção, Supervisão, Curadoria de dados, Escrita e Revisão.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram que não há conflito de interesses.

USO DE TECNOLOGIA ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram que nenhuma ferramenta de inteligência artificial foi usada na pesquisa aqui relatada ou na preparação deste artigo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Grupo Vinci Airports, Aeroporto Internacional de Salvador, Solocap Geotecnologia, Pavitec Engenharia, Huesker Brasil e TDM Brasil. Os autores agradecem a Universidade Federal de São Carlos e o Laboratório de Geotecnia e Geossintéticos – LabGEO UFSCar.

REFERÊNCIAS

ABNT (2007) *NBR 14491: Emulsões Asfálticas – Determinação da Viscosidade Saybolt Furol*. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT (2012) *NBR 14393: Emulsões Asfálticas – Determinação da Peneiração*. Rio de Janeiro: ABNT.

ABNT (2019) *NBR 14376: Ligantes Asfálticos – Determinação do Teor do Resíduo Seco de Emulsões Asfálticas Convencionais ou Modificadas – Métodos Expeditos*. Rio de Janeiro: ABNT.

ASTM (2018) *D 5261: Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles.* West Conshohocken: ASTM International.

ASTM (2019) *D 5199: Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics.* West Conshohocken: ASTM International.

ASTM (2020) *D 6637: Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method.* West Conshohocken: ASTM International.

ASTM (2022) *D 6140: Standard Test Method to Determine Asphalt Retention of Paving Fabrics Used in Asphalt Paving for Full-Width Applications.* West Conshohocken: ASTM International.

DNER (1995) *043/95: Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall.* Brasília: DNER.

DNIT (2018a) *135/2018-ME: Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio.* Rio de Janeiro: DNIT.

DNIT (2018b) *136/2018: Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro: DNIT.

DNIT (2018c) *178/2018-PRO: Pavimentação Asfáltica – Preparação de Corpos de Prova para Ensaios Mecânicos Usando o Compactador Giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento*. Rio de Janeiro: DNIT.

DNIT (2019) *412/2019-ME: Pavimentação – Misturas Asfálticas – Análise Granulométrica de Agregados Graúdos e Miúdos e Misturas de Agregados por Peneiramento – Método de Ensaio*. Brasília: DNIT.

DNIT (2021) *033/2021-ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico Reciclado em Usina a Quente – Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro: DNIT.

DNIT (2024) *447/2024-ME: Misturas Asfálticas – Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall – Método de Ensaio*. Brasília: DNIT.

Canestrari, F.; F. Cardone; E. Gaudenzi *et al*. (2022) Interlayer bonding characterization of interfaces reinforced with geocomposites in field applications. *Geotextiles and Geomembranes*, v. *50*, n. 1, p. 154-162. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2021.09.010.

Correia, N.S. e J.G. Zornberg (2018) Strain distribution along geogrid-reinforced asphalt overlays under traffic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, v. *46*, n. 1, p. 111-120. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2017.10.002.

Correia, N.S.; T.R. Souza e J.G. Zornberg (2025) Milling of geosynthetic-reinforced asphalt layers: field operations and milling byproducts. *Geosynthetics International*, p. 1-13. No prelo. DOI: 10.1680/jgein.24.00060.

Dalla Rosa, F.; F.S. Jorge; L.A.T. Brito *et al*. (2015) Análise do comportamento mecânico de um pavimento reciclado com adição de diferentes agentes estabilizadores. *Transportes*, v. *23*, n. 2, p. 95-104. DOI: 10.14295/transportes.v23i2.880.

Damisch, A. e R. Kirschner (1994) Recycling of grid reinforced asphalt pavements. In *Proceedings of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products.* Singapore: National Library Board, p. 105-108.

Gu, F.; D. Andrews e M. Marienfeld (2021) Evaluation of bond strength, permeability & recyclability of geosynthetic products. In *Proceedings of the Geosynthetics Conference.* Gold Canyon: Industrial Fabrics Association International, p. 362.

Kumar, V.V.; G.H. Roodi; S. Subramanian *et al*. (2023) Installation of geosynthetic interlayers during overlay construction: case study of Texas State Highway 21. *Transportation Geotechnics*, v. *43*, p. 101127. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.101127.

Lopes, A.F.D.; K.V. Savasini; M.S.S. Almeida *et al*. (2024) Geração e utilização de RAP no Brasil. *Revista ENINFRA*, v. *3*, n. 3, p. 201-217. DOI: 10.70859/2764-9539.v3.n3.126.

Nguyen, M.L.; P. Hornych; X.Q. Le *et al*. (2021) Development of a rational design procedure based on fatigue characterisation and environmental evaluations of asphalt pavement reinforced with glass fibre grid. *Road Materials and Pavement Design*, v. *22*, n. sup1, p. S672-S689. DOI: 10.1080/14680629.2021.1906304.

Santos, E.F.; L.P. Specht; M. Baroni *et al*. (2024) Avaliação da adição de materiais fresados em camadas granulares para bases de pavimentos asfálticos. *Transportes*, v. *32*, n. 3, e2989. DOI: 10.58922/transportes.v32i3.2989.

Saxena, A.; V.V. Kumar; N.S. Correia *et al*. (2023) Evaluation of millability and recyclability of asphalt with paving interlayers. *Geotechnical Testing Journal*, v. *47*, n. 1, p. GTJ20230326.

Souza, T.R. (2024) *Aspectos da Fresagem em Pavimentos Reforçados com Geossintéticos e Impacto do Fresado (RAP) nas Propriedades de Misturas Asfálticas Recicladas*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP.

Tran, N.; G. Julian; A. Taylor *et al*. (2012) Effect of geosynthetic material in reclaimed asphalt pavement on performance properties of asphalt mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. *2294*, n. 1, p. 26-33. DOI: 10.3141/2294-03.

Zaumanis, M.; D. Loetscher; S. Mazor *et al*. (2021) Impact of milling machine parameters on the properties of reclaimed asphalt pavement. *Construction & Building Materials*, v. *307*, p. 125114. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125114.