

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Tiago Rodrigues Souza

Aspectos da fresagem em pavimentos reforçados com geossintéticos e impacto do fresado (RAP) nas propriedades de misturas asfálticas recicladas

São Carlos – SP

2024

TIAGO RODRIGUES SOUZA

Aspectos da fresagem em pavimentos reforçados com geossintéticos e impacto do fresado (RAP) nas propriedades de misturas asfálticas recicladas

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Natália de Souza Correia

São Carlos – SP

2024

RESUMO

Com o crescente uso de geossintéticos na restauração de revestimentos asfálticos, como geogrelhas, geotêxteis e geocompostos de reforço, espera-se um aumento nos casos em que as camadas asfálticas que contêm geossintéticos precisarão ser fresadas. Embora haja uma experiência substancial na fresagem de revestimento asfáltico tradicionais, a presença de intercamadas poliméricas ou de fibra de vidro apresenta novos desafios a engenharia de pavimentos. Neste sentido, é essencial entender como o processo de fresagem de revestimentos reforçados difere da fresagem convencional. O fresado, conhecido como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), quando contendo geossintéticos, aqui chamado de G-RAP, apresenta características que o diferenciam do RAP convencional. Devido às informações limitadas sobre fresagem e características do RAP produzido a partir de pavimentos reforçados com geossintéticos, é fundamental explorar a fresabilidade desses pavimentos e os desafios associados à fresagem. Ainda, devem ser conduzidas pesquisas para avaliar a viabilidade de reutilizar o G-RAP na produção de misturas asfálticas recicladas. Este estudo envolveu a construção de uma pista experimental com cinco diferentes seções reforçadas com geossintéticos no Aeroporto Internacional de Salvador, Bahia. Os resultados indicaram que todos os geossintéticos foram capazes de ser fresados sem causar ineficiências nas operações de fresagem. A fresagem bem-sucedida foi alcançada operando-se na velocidade máxima de fresagem de 320 rpm, com o uso de água. Observou-se que os produtos de fibra de vidro foram fresados de maneira eficaz, enquanto o produto polimérico apresentou pequena enroscagem no tambor. Recomenda-se que a profundidade de fresagem seja de pelo menos 25 mm abaixo da posição do geossintético. Os G-RAPs foram coletados e caracterizados, mostrando diferenças físicas entre os diferentes produtos fresados e influências mecânicas positivas em novas misturas asfálticas recicladas com 20% de G-RAP, particularmente na estabilidade Marshall, na resistência à tração indireta e no módulo de resiliência. Os resultados do presente estudo comprovam que as camadas asfálticas reforçadas com geossintéticos são fresáveis, com potencial de reutilização do G-RAP em novas misturas asfálticas.

Palavras-chave: Geossintéticos, pavimentos reforçados, fresagem, RAP, reciclagem de misturas asfálticas

ABSTRACT

With the growing use of geosynthetic interlayers, such as geogrids, geotextiles and paving geocomposites in asphalt rehabilitation projects, there is an anticipated increase in cases where asphalt layers containing these interlayers need to be milled. While there is substantial experience in milling traditional asphalt layers, the presence of polymeric or fiberglass interlayers introduces new challenges to pavement engineering. As a result, understanding how the milling process for asphalt layers with geosynthetic interlayers differs from conventional asphalt milling has become increasingly important. The milled material, referred to as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) when containing geosynthetics, here nominated G-RAP, exhibits unique characteristics that differentiate it from conventional RAP. Due to the limited information on the milling processes and characteristics of RAP produced from geosynthetic-reinforced pavements, it is essential to explore the millability of these reinforced pavements and the challenges associated with milling them. Furthermore, research should be conducted to assess the feasibility of reusing G-RAP in the production of new recycled asphalt mix. This study involved constructing an experimental test track with five different geosynthetic-reinforced asphalt sections at Salvador International Airport in Brazil. The findings indicated that all geosynthetic interlayers were capable of being milled without causing inefficiencies in the milling operations. Successful milling was achieved by operating at the maximum milling speed of 320 rpm, with the use of water. Fiberglass products were observed to mill effectively, while polymeric products showed minor entanglements. It is recommended that the milling depth be at least 25 mm below the geosynthetic position within the asphalt layers. G-RAPs were collected and characterized, showing physical differences and positive mechanical influences in new HMA mixtures recycled with 20% G-RAP, particularly in Marshall stability, Indirect Tensile Strength, and Resilient Modulus Marshall stability. The results of the present study confirm that geosynthetic-reinforced asphalt layers are millable, with potential for the reuse of the generated G-RAP in new asphalt mixtures.

Keywords: Geosynthetics, reinforced pavements, milling, RAP, asphalt mixrecycling

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Dra. Kenia Repiso Campanholo por me incentivar a iniciar esta pós-graduação, me apoiar durante os últimos anos de estudo e ser compreensiva nos momentos de minha ausência familiar.

À minha orientadora, amiga e Profa Dra. Natalia de Souza Correia que me acolheu na decisão de trilhar o caminho da pesquisa científica e conseguiu, de forma majestosa, transformar um técnico em acadêmico.

Aos meus pais Senil Rodrigues Souza e Janette Aparecida de Oliveira Souza que me incentivaram desde muito cedo aos estudos.

Às empresas que patrocinaram este trabalho fornecendo materiais asfálticos, insumos e mão de obra para a construção da seção teste – Empresa Alvez Ribeiro Construtora, Empresa Paisartt Construtora e Empresa Pavitec Engenharia, bem como ao grupo VINCI.

Às empresas Huesker e TDM Brasil pelo fornecimento dos geossintéticos utilizados nesta pesquisa.

Aos meus amigos Eng. Cristiano Costa Moreira (Solocap Geotecnologia) e Eng. Marcelo Queiroz (Pavitec Engenharia) que me atenderam prontamente e não hesitaram em realizar parte importante dos ensaios tecnológicos desta pesquisa em seus laboratórios.

Aos professores Dra. Cláudia A. Pereira e Dr. José Antônio Schiavon e amigo Dr. Cassio A. T. do Carmo pelo incentivo, apoio e pelo denso aprendizado passado ao longo dos últimos anos. Aos meus amigos que participaram diretamente na construção e procedimentos realizados na seção teste destinada a esta pesquisa, por vezes colocando a “mão na massa” nos trabalhos – Daniela Cafezeiro, Eng. Danilo Ramalho, Eng. João Sewaibricker e Eng. Gil Eduardo Guimarães.

À Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e Laboratórios LABGEO e LMC e ao Grupo de Estudos em Geotecnia e Geossintéticos da UFSCar (GEGEOS).

Aos colaboradores e trabalhadores da frente de construção e pesquisa, ajudantes gerais, ancineiros, operadores, motoristas, encarregados e técnicos. Pessoas por vezes anônimas, mas que constroem a infraestrutura básica de nosso país.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Croqui com dimensões da seção teste construída por Damisch e Kirschner (1994): a) planta da seção teste; b) corte transversal da seção teste. Fonte: elaborado pelo autor (2024).	22
Figura 2.2 - Fresadora Wirtgen SF100 equivalente a utilizada nos estudos de Damisch e Kirschner (1994). Fonte: https://www.lectura-specs.com	23
Figura 2.3 - Distribuição de comprimentos de filamentos presentes no G-RAP Amostra 3.	23
Figura 2.4 - Resultado da estabilidade e percentual de CAP das misturas recicladas com geossintéticos. Fonte: Modificado de Damisch e Kirschner (1994).	24
Figura 2.5 – Fresadora Wirtgen W500 utilizada nos estudos conduzidos pela Huesker em 2004: a) seção de teste. b) Perfil Fresadora Wirtgen W500. Fonte: Huesker (2008).	25
Figura 2.6 - Filamentos de geossintéticos presentes no G-RAP oriundo da fresagem.	26
Figura 2.7 - Detalhes da construção da seção teste: a) instalação da geogrelha para reforço do pavimento;	27
Figura 2.8 - Processo de fresagem: a) Fresagem da camada superficial incluindo o reforço; b) Detalhe do tambor de fresagem após o procedimento da fase 2. Fonte: Huesker (2008).	28
Figura 2.9 - Resultados de estabilidade e fluência em misturas recicladas com geossintéticos, conduzidos pela Huesker. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	28
Figura 2.10 - Seções teste construídos com geossintéticos Huesker para realização de fresagem.	29
Figura 2.11 - Fresadora Wirtgen W500 utilizada no processo de fresagem. Fonte: Huesker (2022).	30
Figura 2.12 - Comparativo entre a) RAP controle e b) RAP com fragmentos de geocomposto.	30
Figura 2.13 - Execução da pista teste. Fonte: Tran et al. (2012).	31
Figura 2.14 - Detalhes das dimensões e espessura de fresagem da seção teste.	32
Figura 2.15 - Comparação do teor de CAP presente nas misturas de RAP com e sem fragmentos de geossintéticos de Tran et al. (2012). Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	32
Figura 2.16 - Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de Hamburg wheel-tracking test. ...	33

Figura 2.17 - Resultados do <i>Hamburg wheel-tracking test</i> . Fonte: Modificado de Tran et al. (2012).	34
Figura 2.18 - Aspectos do material fresado com fragmentos de geossintéticos de fibra de vidro: a) RAP controle e b) G-RAP. Fonte: Gu et al. (2021).	34
Figura 2.19 - Resultados do Hamburg wheel-tracking test. Fonte: Modificado de Gu et al. (2021).	35
Figura 2.20 – Resultados de resistência à tração (RT) das amostras de G-RAP de Gu et al. (2021).	36
Figura 2.21 - Perfil do pavimento existente e localização do reforço. Fonte: Adaptado de Saxena et al. (2023).	37
Figura 2.22 - Etapas de fresagem para coleta do RAP e G-RAP: (a) fresagem no campo b) espessura de fresagem e detalhe do geotêxtil. Fonte: Adaptado de Saxena et al. (2023).	37
Figura 2.23 - Fresadoras Wirtgem modelo W200: (a) Estudos de Saxena et al (2023); b) modelo típico Wirtgem W200. Fontes: Elaborado pelo autor (2024).	38
Figura 2.24 – Distribuição granulométrica de RAP e G-RAP. Fonte: Adaptado de Saxena et al 2023.	38
Figura 2.25 – Resultado dos ensaios de Densidade e teor de betume em RAP e G-RAP realizados por Saxena et al. (2023). Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	39
Figura 3.1 - Localização da Pista de Rolamento A interditada devido a patologias no pavimento.	42
Figura 3.2 - Equipamento de fresagem: a) Fresadora Caterpillar modelo PM102; b) Fresadora realizando o trabalho de fresagem no local deteriorado pelas patologias. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	43
Figura 3.3 - Registro fotográfico do momento da revitalização TWY – A no Aeroporto de Salvador: a) fragmentos de geossintéticos soltos; b) filamentos de poliéster enroscado no tambor de fresagem.	44
Figura 3.4 - Local deteriorado da PPD 10/28. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	44
Figura 3.5 - Fresagem pista de pouso e decolagem PPD - 10/28: a) tambor de fresagem com geossintéticos enroscado; b) limpeza do tambor; c) filamentos de geossintéticos removidos da fresadora; d) momento da remoção por demolição. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	45

Figura 3.6 - Localização da seção teste nas proximidades do pátio 3 do Aeroporto de Salvador. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).....	48
Figura 3.7 - Geossintéticos utilizados neste estudo: (a) geogrelha de fibra de vidro com revestimento polimérico (GG1); (b) geocomposto de fibra de vidro (GG2); (c) Paving mat de fibra de vidro (GG3); (d) geocomposto de fibra de vidro com geotêxtil não tecido ultraleve (GG4); geocomposto de poliéster com geotêxtil não tecido ultraleve (GG5). Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	49
Figura 3.8 - Dimensões das seções reforçadas e da seção controle. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	51
Figura 3.9 - Processo de fresagem da área da seção teste: com a utilização da Fresadora Wirtgem W200; Fonte: Elaborado pelo autor (2024).....	51
Figura 3.10 - Aspecto do pavimento após a fresagem. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	52
Figura 3.11 - Controle de taxa de emulsão: a) bandejas coletoras utilizadas no processo de aplicação da emulsão; b) bandejas coletoras de emulsão em utilização. Fonte: Elaborado pelo autor (2024)	53
Figura 3.12 - Temperatura da emulsão asfáltica na aplicação. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	53
Figura 3.13 - Sinalização e alocação dos diferentes geossintéticos na seção teste.	54
Figura 3.14 - Processo de instalação dos geossintéticos. a) Processo de instalação da GG1; b) finalização da instalação da GG1; c) Geossintéticos em processo de instalação; d) aspecto dos 5 diferentes geossintéticos após a instalação. Elaborado pelo autor (2024).....	55
Figura 3.15 - Faixas granulométricas superior, inferior e resultado da mistura aplicada no presente estudo. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	56
Figura 3.16 - Controle de qualidade no processo de aplicação da camada de revestimento: a) caminhão lonado antes do processo de aplicação; b) controle de temperatura. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	57
Figura 3.17 - Pista teste em processo de execução: a) Aplicação da mistura asfáltica; b) Compactação da mistura asfáltica. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).....	57
Figura 3.18 - Aspecto final da seção teste para estudo da fresagem: (a) marcação das linhas (b) layout final das áreas de fresagem. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).....	58

Figura 3.19 - Média dos resultados de resistência ao cisalhamento de interface realizados em amostras extraída da seção experimental. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	59
Figura 3.20 - Detalhes da fresadora W100: a) Aspectos do tambor de fresagem; b) Detalhe entre ponta de corte nova e desgasta; c) processo de substituição das pontas de corte; d) detalhe da nova ponta de corte. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	60
Figura 3.21 - Testes prévios para calibração do aspensor de água antes do processo de fresagem.....	61
Figura 3.22 - Área teste de fresagem: a) área de pré-fresagem; b) fresagem após o teste	62
Figura 3.23 - Espessura de fresagem executada e posição do geossintético durante a pesquisa.	63
Figura 3.24 - Estocagem dos RAP-C e G-RAPs no Aeroporto: a) Processo de descarga; b) Vista da cobertura do estoque; c) Vista superior das pilhas de RAP; d) amostras cobertas para impedir ação das intemperes. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	64
Figura 3.25 - Ensaio de peneiramento realizado para a determinação da granulometria nos G-RAPs e RAP-C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).....	66
Figura 3.26 - Fragmento de geossintético fresado com presença de material britado. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	67
Figura 3.27 - Curva granulométrica da mistura composta por 20% de RAP controle e 80% de agregado virgem, enquadrada na Faixa C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024)	69
Figura 3.28 - Curva granulométrica da mistura composta por 20% de G-RAP1 e 80% de agregado virgem, enquadrada na Faixa C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	70
Figura 3.29 - Preparação dos corpos-de-prova em testes iniciais com RAP e o aspecto de um dos corpos- de prova moldados com adição de G-RAP. Fonte elaborado pelo autor (2024).	71
Figura 3.30 - Aspecto do corpo-de-prova moldado com adição de G-RAP. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	73
Figura 3.31 - Determinação do teor ótimo de CAP através dos resultados de VAM. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	73
Figura 3.32- Parâmetros estipulados para validação da mistura asfáltica reciclada à quente com adição de G-RAP. Fonte: Adaptada da DNIT 031/2006.	74

Figura 3.33 - Moldagem dos corpos-de-prova em laboratório: a) misturador automático de CAUQ; b) soquete automático e c) corpo-de-prova moldado ensaio. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	75
Figura 3.34 - Corpo-de-prova de mistura reciclada com G-RAP instalado no equipamento de medição do módulo de resiliência. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	76
Figura 4.1 - Aspectos da fresagem da seção teste 1: a) seção teste após a fresagem e b) tambor de fresagem após, sem geossintético GG1. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	77
Figura 4.2 - G-RAP1 sendo lançado na caçamba do caminhão de coleta. Elaborado pelo autor (2024).	78
Figura 4.3 - Aspectos da fresagem da seção teste 2: a) seção teste após a fresagem e b) tambor de fresagem após, sem geossintético GG2. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	78
Figura 4.4 - Aspectos da fresagem da seção teste 3: a) seção teste após a fresagem e b) tambor de fresagem após, sem geossintético GG3. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	79
Figura 4.5 - Aspectos da fresagem da seção teste 4: a) seção teste após a fresagem e b) tambor de fresagem após, sem geossintético GG4. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	79
Figura 4.6 - Aspectos da fresagem da seção teste 5: a) seção teste após a fresagem e b) tambor de fresagem após, com fragmentos de geogrelha de poliéster GG5. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	80
Figura 4.7 - Filamentos de geogrelha de poliéster enroscados no tambor de fresagem. ...	81
Figura 4.8 – Filamentos de geogrelha de poliéster GG5 após fresagem: a) material coletado; b) medição do maior filamento de geossintético; c) detalhe da medida. Fonte Elaborado pelo autor (2024).	82
Figura 4.9 - Diferença na eficiência de fresagem entre os diferentes pavimentos reforçados durante o processo de fresagem. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	85
Figura 4.10 - Aspectos do G-RAP1 e G-RAP2. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	86
Figura 4.11 - Aspectos do G-RAP3 e G-RAP4. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	86
Figura 4.12 - Aspectos do G-RAP5. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	87
Figura 4.13 - Aspectos dos diferentes G-RAPs e comparativo com RAP controle, obtidos nesta pesquisa. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	87

Figura 4.14 - Fragmentos de geotêxtil nos G-RAPs: a) Geotêxtil não tecido em amostra de Saxena et al. (2023) e b) G-RAP 3 oriundos desta pesquisa. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	88
Figura 4.15 - Curva granulométrica dos G-RAPs e do RAP-C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	90
Figura 4.16 - Aspectos dos agregados nos G-RAPs e RAP-C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	90
Figura 4.17 - Proporções de diferentes G-RAPS coletados nas peneiras. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	92
Figura 4.18 - Fragmentos de geossintéticos coletados no G-RAP 1. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	94
Figura 4.19 - Fragmentos de geossintéticos coletados no G-RAP2. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	94
Figura 4.20 - Fragmentos de geossintéticos coletados G-RAP 3. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	95
Figura 4.21 - Fragmentos de geossintéticos coletados G-RAP 4: a) Fibras entre 15 cm e 1 cm; b) Pedacos de fibras e geotêxtis; c) Fibras de até 25 cm e pedacos de geotêxtis. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	96
Figura 4.22 - Fragmentos de geossintéticos coletados no G-RAP 5: a) Fibras coletadas em campo; b) fibras curtas coletadas em laboratório. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	96
Figura 4.23 - Ensaio de extração de teor de betume das amostras de G-RAPs e RAP-C.	97
Figura 4.24 - Teor de CAP nas amostras de G-RAP e RAP-C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	98
Figura 4.25 - Exemplo do laudo de resultados de dosagem Marshall da mistura CAUQ com 20% de G-RAP1. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	99
Figura 4.26 - Resultado dos parâmetros Marshall dos CAUQs reciclados com G-RAP e CAUQs controle: (a) V.A.M.; (b) R.B.V.; (c) Volume de vazios; (d) Estabilidade Marshall; (e) Fluência; (f) Resistência à tração. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	101
Figura 4.27 - Comparativo da média da estabilidade Marshall entre os CAUQs reciclados com 20% de G-RAP, 20% de RAP-C e CAUQs controles. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	102

Figura 4.28 – Resultados de Estabilidade Marshall: (a) teor de fibras teórico de geossintéticos nos CAUQs reciclados com G-RAP; (b) capacidade de fragmentação dos geossintéticos.....	103
Figura 4.29 - Resultado médios dos parâmetros Marshall dos CAUQs reciclados com G-RAP e comparativo com CAUQs controle. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	104
Figura 4.30 - Resultados de Resistência à tração diametral: (a) teor de fibras teórico de geossintéticos nos CAUQs reciclados com G-RAP; (b) capacidade de fragmentação dos geossintéticos. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	105
Figura 4.31 - Resultados de módulo de resiliência obtido para a mistura asfáltica reciclada com 20% de G-RAP1. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).....	106
Figura 4.32 - Resultados de Módulos de resiliência dos CAUQs reciclados com 20% de G-RAP e mínimo estipulado para o projeto. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	107
Figura 4.33 - Média dos módulos de resiliência dos CAUQs reciclados com G-RAP e o percentual do resultado obtido frente ao mínimo estipulado para o projeto. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).	107
Figura 4.34 - Módulos de resiliência dos CAUQs reciclados com G-RAPs frente ao teor de fibras teórico presente nas amostras. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).....	108

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Lista dos principais artigos sobre fresagem com geossintéticos.	21
Tabela 3.1 - Características dos geossintéticos utilizados neste estudo.	50
Tabela 3.2 - Faixas granulométricas superior e inferior da mistura asfáltica CAUQ da seção teste.	56
Tabela 3.3 - Massa de amostra para análise granulométrica.	66
Tabela 4.1 – Resultados do estudo da fresabilidade de geossintéticos desta pesquisa.	81
Tabela 4.2 - Percentual de fragmentos de geossintéticos enroscado no tambor de fresagem.	83
Tabela 4.3 - Resultado de velocidade e eficiência da fresagem de pavimentos reforçados e da seção controle.	83
Tabela 4.4 - Caracterização granulométrica dos 5 diferentes G-RAPs e RAP controle. ..	89
Tabela 4.5 - Teor de fibras presente nas amostras de G-RAP abaixo de 12,7 mm.	93
Tabela 4.6 - Resultado dos parâmetros Marshall dos CAUQs reciclados com G-RAP e CAUQs controle.	100

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivo Geral	18
1.2	Objetivos Específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Fresagem de pavimentos asfálticos e reciclagem de misturas asfálticas.....	19
2.2	Fresagem de pavimentos asfálticos reforçados com geossintéticos.....	20
2.3	Estudo de Damisch e Kirschner (1994).....	21
2.4	Technical Reports.....	25
2.4.1	Estudo 1 - “Milling and recycling HaTelit®-reinforced asphalt”	25
2.4.2	Estudo 2 – Investigação das características da fresagem de pavimentos reforçados com HaTelit e Reciclagem do material fresado.....	27
2.4.3	Estudo 3 - Avaliação visual do comportamento de fresagem de Geossintéticos em pavimentos reforçados.....	29
2.5	Estudo de Tran et al. (2012).....	31
2.6	Estudo de Gu et al. (2021).....	34
2.7	Estudo de Saxena et al. (2023).....	36
2.8	Considerações finais.....	40
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	42
3.1	Estudos de Caso no Aeroporto Internacional de Salvador	42
3.2	Construção da pista experimental.....	47
3.2.1	Planejamento da seção teste no Aeroporto internacional de Salvador	47
3.2.2	Geossintéticos	48
3.2.3	Preparação da seção teste.....	50
3.2.4	Aplicação do ligante asfáltico e instalação dos reforços geossintéticos	52

3.2.5	Aplicação da camada de revestimento asfáltico	55
3.3	A seção teste e o estudo da aderência de interface de Souza e Correia (2022).....	58
3.4	Fresagem da seção teste	59
3.4.1	Teste e calibração do equipamento de fresagem.....	60
3.4.2	Processo de fresagem.....	61
3.4.3	Métodos de verificação da fresabilidade dos pavimentos reforçados.....	62
3.4.4	Coleta dos materiais fresados RAP-C e G-RAPs	63
3.5	Ensaio laboratoriais de caracterização física e mecânica dos G-RAPs	64
3.5.1	Análise granulométrica	65
3.5.2	Teor de fibras presentes nas amostras de G-RAP.....	67
3.5.3	Determinação do teor de betume nas amostras de G-RAP.....	68
3.6	Projeto de misturas asfálticas recicladas	68
3.7	Determinação do módulo de resiliência de CAUQs reciclados com G-RAPs.....	74
4	RESULTADOS	77
4.1	Fresagem de Pavimentos Reforçados com Geossintéticos.....	77
4.1.1	Aspectos da fresagem das seções reforçadas	77
4.1.2	Eficiência do processo de fresagem.....	83
4.2	Características físicas dos G-RAPs e RAP-C.....	85
4.2.1	Aspectos visuais dos G-RAPs.....	85
4.2.2	Análise granulométrica dos G-RAPs.....	88
4.2.3	Teor de fibras presente nos G-RAPs.....	92
4.2.4	Teor de betume presente nas amostras de G-RAP.....	97
4.3	Propriedades mecânicas de CAUQs reciclados com G-RAPs	98
4.3.1	Determinação das características ótimas de CAUQs reciclados com G-RAPs	99

4.3.1 Módulo de resiliência para CAUQs reciclados com 20% de G-RAPs e CAUQs controle 106

5	CONCLUSÕES.....	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
6	ANEXOS	118
6.1	G-RAP 1 - Dosagem Marshall	119
6.2	G-RAP1 - Determinação módulo de resiliência.....	120
6.3	G-RAP 2 - Dosagem Marshall	121
6.4	G-RAP 2 - Determinação módulo de resiliência.....	122
6.5	G-RAP 3 - Dosagem Marshall	123
6.6	G-RAP 3 - Determinação módulo de resiliência.....	124
6.7	G-RAP 4 - Dosagem Marshall	125
6.8	G-RAP 4 - Determinação módulo de resiliência.....	126
6.9	G-RAP 5 - Dosagem Marshall	127
6.10	G-RAP 5 - Determinação módulo de resiliência.....	128
6.11	RAP-C - Dosagem Marshall.....	129
6.12	RAP-C - Determinação módulo de resiliência.....	130

1 INTRODUÇÃO

A adoção de práticas sustentáveis para prolongar a vida útil de pavimentos de aeroportos e rodovias inclui a incorporação de reforços geossintéticos, tais como: geotêxteis, geogrelhas e geocompostos nas camadas asfálticas para minimizar trincas reflexivas. Quando utilizados entre camadas do revestimento asfáltico, os geossintéticos têm como função manter a integridade do revestimento asfáltico estrutural reduzindo a energia de propagação de trincas (Khodaii, 2008; Saride e Kumar, 2019). Além disso, os geotêxteis e geocompostos podem desempenhar outras funções como evitar a degradação causada pela entrada de água nestas fissuras (Shukla e Yin, 2004). Há ainda estudos mostrando que pavimentos reforçados com geogrelhas e geocompostos de reforço são capazes de reduzir deformações plásticas e deflexões superficiais do revestimento asfáltico, reduzindo também as tensões nas camadas inferiores com consequente aumento da vida útil do pavimento (Correia e Zornberg, 2016; Kumar et al., 2022).

Contudo, por mais estruturado e duradouro que seja, o pavimento asfáltico atingirá o término de sua vida útil, tornando necessária uma revitalização ou reconstrução. Neste novo ciclo, é comum a utilização do processo de fresagem à frio para proporcionar eficiência na remoção da camada de revestimento deteriorada. Além disso, esse processo gera um material comumente conhecido como fresado ou do inglês RAP - *Reclaimed Asphalt Pavement*, que possui características granulométricas e propriedades capazes de serem reaproveitadas e incorporadas em novas misturas asfálticas. Reconhecendo a importância de normatizar e otimizar essa prática, o DNIT (2021) publicou recentemente a 033/2021 – ES, que especifica o serviço para reciclagem de pavimentos asfálticos em usinagem à quente com a utilização de RAP, reforçando assim a relevância do reaproveitamento sustentável desse material no setor de infraestrutura rodoviária. Assim, diante de expectativa de aumento da reciclagem de pavimentos asfálticos e da crescente demanda de restauração de pavimentos com geossintéticos, um novo desafio surgirá nos próximos anos quanto à fresagem dos pavimentos reforçados e reciclagem de misturas asfálticas com fragmentos de geossintéticos.

Aspectos da fresagem e da geração do material reciclado RAP proveniente de pavimentos reforçados são ainda muito pouco abordados na literatura. Recentemente, debates sobre o quão “fresáveis/usináveis” são os geossintéticos tornaram-se uma preocupação latente nas comunidades

da pavimentação asfáltica e na fabricação de novos geossintéticos. No entanto, a literatura existente sobre esse tópico é muito limitada e agravada pela variedade de produtos e materiais disponíveis para reforço na pavimentação. Podem ser citados, por exemplo, geossintéticos de diferentes resistências e rigidezes à tração, diferentes aberturas de malha, presença de geotêxteis ultrafinos ou espessos em geocompostos específicos para revestimentos asfálticos, geossintéticos poliméricos, de fibra vidro, fibra de carbono ou fibra de basalto, bem como geossintéticos pré-impregnados com material betuminoso ou adesivados, os quais prometem um incremento de aderência entre as camadas betuminosas na instalação. Assim, além dos benefícios já conhecidos da incorporação de geossintéticos em pavimentos, o RAP gerado com fragmentos de geossintéticos aparece como um material reciclável potencialmente novo, ainda pouco explorado e com propriedades que não são completamente conhecidas.

RAPs oriundos da fresagem de pavimentos reforçados com geossintéticos, aqui chamados de G-RAP, terão em sua composição fragmentos de geossintéticos (fibras) que podem gerar características singulares às novas misturas asfálticas, e que tem grande potencial de reutilização como fresado em misturas para subbase ou base de pavimentos e lastro de ferrovias. Neste sentido, programas experimentais precisam ser elaborados para avaliar as características e o comportamento dos G-RAPs coletados. Damisch e Kirschner (1994), pioneiros neste estudo, construíram uma pista de teste em escala real, a qual foi reforçada com geossintético de poliéster, e a submetem ao processo de fresagem. Apesar de relatarem perturbações no processo de fresagem com paradas do equipamento, concluíram que o pavimento reforçado foi fresável e que os G-RAPs oriundos deste processo poderiam ser reutilizados. Pesquisas de Tran et al. (2012), Gu et al. (2021) e Saxena et al. (2023) abordam algumas propriedades dos G-RAPs originados de fresados com geossintéticos, embora esses estudo não explorem o processo de fresagem e o grau de fresabilidade dos geossintéticos investigados, bem como não investigaram diferentes tipos de geossintéticos e diferentes propriedades dos G-RAPs. Assim, diante da pouca informação sobre os aspectos da fresagem e das características e propriedades dos RAPs obtidos durante em processos de fresagem de pavimentos reforçados com geossintéticos, questões como a capacidade de pavimentos reforçados serem fresáveis/usináveis devem ser pesquisadas. Além disso, o potencial de reutilização dos G-RAPs na reciclagem de novos materiais para a pavimentação também deve ser investigado para que se possa compreender os desafios do processo de fresagem e do potencial de reutilização dos G-RAPs.

Esta pesquisa aborda aspectos da fresagem de cinco diferentes seções de pavimentos com revestimento asfáltico reforçado com geossintéticos, construídas em uma pista experimental de proporções reais de obra, no Aeroporto Internacional de Salvador, na Bahia. Como complemento, o estudo aborda ainda as principais características e propriedades dos G-RAPs obtidos das seções reforçadas, tornando este o primeiro grande estudo experimental realizado sobre fresagem de revestimentos asfálticos com geossintéticos e propriedades de G-RAPs no Brasil.

1.1 Objetivo Geral

A pesquisa busca abordar, por meio de um programa experimental de campo e de ensaios de laboratório, aspectos específicos relacionados à eficiência de fresagem de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos e as propriedades dos materiais resultantes dos G-RAPs, bem como o impacto nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas.

1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos para a realização desta pesquisa tem-se:

- a) Realizar um levantamento bibliográfico sobre casos de obras que reportam fresagem com geossintéticos, bem como casos reais ocorridos no Brasil.
- b) Realizar, em campo, a fresagem de geossintéticos inseridos em camadas de revestimento asfáltico, simulando um processo completo de revitalização de pavimento asfáltico em proporções reais de obra, no Aeroporto Internacional de Salvador, na Bahia.
- c) Analisar a capacidade de fresagem de diferentes seções reforçadas, observando as diferenças na eficiência de fresagem em relação a uma seção controle, bem como aspectos observados no processo de fresagem dos diferentes geossintéticos;
- d) Avaliar a granulometria, o percentual de betume e o teor de fragmentos/fibras de geossintéticos presentes nos G-RAPs coletados, por meio de ensaios laboratoriais.
- e) Analisar o impacto nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas à quente (CAUQ) compostas com 20% de G-RAP, comparados com misturas com 20% de RAP controle, bem como CAUQs convencionais (sem presença de RAP).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fresagem de pavimentos asfálticos e reciclagem de misturas asfálticas

A fresagem de pavimentos asfálticos teve início na década de 1970, nos Estados Unidos e Europa, como alternativa ao processo de remoção por escarificação e remoção por demolição mecanizada. Antes da universalização do processo de fresagem, os pavimentos demolidos em placa eram submetidos ao processo de britagem para serem fragmentados em dimensões compatíveis para reutilização em processos de reciclagem. Estudos e artigos literários mostram que com o advento das fresadoras, o processo de remoção das camadas asfálticas deterioradas se tornou mais ágil por entregar o produto para reciclagem praticamente pronto, sem a necessidade de um beneficiamento do material como acontecia no processo de britagem (Wood, 1979; Bomfim, 2011). Durante este processo, é gerado o material fresado conhecido como RAP - *Reclaimed Asphalt Pavement*.

Por ser um tipo de agregado com grande potencial de reciclagem, o RAP é considerado um material nobre. Alavancado pelas recentes políticas ambientais, nacionais e internacionais, e pelo cenário de aquecimento global que busca por processos sustentáveis, este material vem ganhando cada vez mais notoriedade por proporcionar a redução de impactos ambientais significativos ao meio ambiente quando reutilizado em processos de reciclagem. Neste contexto, o RAP é capaz de proporcionar a diminuição no consumo de insumos pétreos e asfálticos virgem, além da redução no volume de aterros não reutilizáveis (DNIT 2021; NAPA 2020). Estudos conduzidos por Suzuki (2019) mostram que a reutilização de RAP na produção de um novo CAUQ reduz a necessidade de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) virgem, pois parte do betume presente no material é incorporado no processo de produção do novo material. O RAP têm sido extensivamente utilizado na construção de bases e camadas superficiais de estradas devido à sua capacidade de oferecer vantagens econômicas e ambientais, podendo ser utilizado na construção e estabilização de bases na pavimentação, funcionando como um agente estabilizador, reduzindo o consumo de materiais pétreos virgens e de energia (Singh et al., 2020; Thenoux et al., 2007).

O percentual permitido de RAP em misturas asfálticas usinadas à quente, em agências regulamentadoras, significa que é uma quantidade segura e otimizada a ser utilizada em misturas recicladas (Sharma et al. 2022). Cerca de 60% dos Departamentos de transporte estaduais nos

Estados Unidos usam entre 11% a 20% de RAP (por peso de ligante), enquanto 23% dos Departamentos de transporte utilizam de 21% a 30% de RAP (Martin et al., 2019). No Reino Unido, Estados Unidos e Japão, o teor médio permitido de RAP na camada de CAUQ é, em geral, de cerca de 10%, 20% e 40% por peso de ligante (Antunes et al., 2019). No entanto, o percentual de RAP amplamente adotado na prática é apenas de 15% a 25% (Tavakol, 2016). A proporção de RAP em uma nova mistura asfáltica dependerá das propriedades do RAP a ser utilizado e da caracterização e controle de qualidade relacionados à nova mistura reciclada.

As propriedades do RAP são ainda influenciadas por uma variedade de fatores, tais como profundidade de fresagem, velocidade de deslocamento da máquina de fresagem, velocidade de rotação do tambor, disposição das ferramentas de fresagem, tipo de máquina de fresagem, tipo de ferramenta de fresagem, resistência do agregado, tipo e idade do pavimento, bem como condições ambientais (West, 2015). De acordo com Zaumanis et al. (2021), estudar e melhorar os parâmetros de fresagem como meio de preparar um novo material constituinte é justificado, uma vez que a fresagem é uma parte integral da produção de asfalto, podendo potencialmente ser otimizada para gerar RAPs com propriedades ainda mais adequadas para reutilização na produção de misturas asfálticas de qualidade.

2.2 Fresagem de pavimentos asfálticos reforçados com geossintéticos

A reciclagem das camadas asfálticas pré-existentes tem se tornado uma prática sustentável amplamente reconhecida e aceita nas agências regulamentadoras de transporte. No entanto, um novo desafio pode surgir nos próximos anos com relação à reciclagem de misturas com fragmentos de geossintéticos, proveniente da fresagem de pavimentos asfálticos que foram reforçados com geossintéticos. Somado a isso, tem-se os desafios quanto à fresabilidade dos geossintéticos nas camadas asfálticas, principalmente diante da grande variabilidade de produtos atualmente existentes no mercado.

Este tema é ainda muito pouco explorado na literatura, principalmente pela quantidade e idade dos pavimentos reforçados com geossintéticos existentes no mundo. A Tabela 2.1 apresenta estudos que foram encontrados na literatura sobre a fresagem de pavimentos reforçados, bem como sobre a reutilização de G-RAPs como material reciclável de pavimentação. Verifica-se que os primeiros estudos sobre fresagem datam do início da década de 90, na Alemanha, seguidos por

investigações que apresentam o potencial de reciclagem do fresado com geossintéticos em novas misturas asfálticas ou uso em misturas para camada de base de pavimentos. É possível notar que, nas últimas décadas, foram publicados apenas 7 estudos aderentes ao tema, dos quais 3 foram publicados após 2020.

Tabela 2.1 - Lista dos principais artigos sobre fresagem com geossintéticos.

Autores	Ano	Título
A. Damisch; R. Kirschner	1994	<i>Recycling of Grid Reinforced Asphalt Pavements</i>
Huesker Technical Report	2004	<i>Investigation of the milling characteristics and recyclability of HaTelit®-reinforced roads“ in conjunction with “Mischwerk Schwelm”</i>
Huesker Technical Report	2008	<i>Investigations into the milling characteristics of HaTelit®-reinforced roads and recycling of the millings (RWTH Aachen)</i>
Nam H. Tran; Grant Julian; Adam J. Taylor; Richard Willis; Daniel Hunt.	2012	<i>Effect of Geosynthetic Material in Reclaimed Asphalt Pavement on Performance Properties of Asphalt Mixtures</i>
Fan Gu; David Andrews; Mark Marienfield.	2021	<i>Evaluation of Bond, Permeability, and Recyclability of Geosynthetic Products</i>
Technical Report ISAC - Institut Fur StraBenwesen	2022	<i>Visual evaluation of the milling behavior of asphalt reinforcement grids</i>
Ashray Saxena; Natalia S. Correia; V. Vinay Kumar; Jorge G. Zornberg	2023	<i>Evaluation of Geosynthetic-reinforced Asphalt Milling Characteristics and Suitability as Pavement Base Course</i>

2.3 Estudo de Damisch e Kirschner (1994)

A pesquisa conduzida por Damisch e Kirschner (1994) pode ser considerada pioneira no estudo sobre fresagem de pavimentos reforçados com geossintéticos e reutilização de G-RAPs em processos de reciclagem. No verão germânico de 1988, os autores construíram uma seção teste em escala real com dimensões de 3,0 m de largura e 35,0 m de comprimento, sendo que os 5 primeiros metros não continham reforço, e o restante do pavimento (30 metros seguintes) foi reforçado com geossintético. A Figura 2.1 apresenta um croqui com dimensões da seção teste construída por Damisch e Kirschner (1994) um. A estrutura do pavimento reforçado com geocomposto de poliéster foi construída sobre uma camada betuminosa pré-existente e era composta por uma camada de Binder de 5,5 cm de espessura em média, coberta por uma nova capa de 5,6 cm de

espessura. O geocomposto utilizado na época consistia em uma geogrelha de poliéster costurada a um geotêxtil não tecido, cuja resistência à tração máxima nominal era de 50 kN. Este estudo foi publicado em 1994, na 5ª Conferência internacional de Geotêxteis, Geomembranas e produtos correlatos, em Singapura.

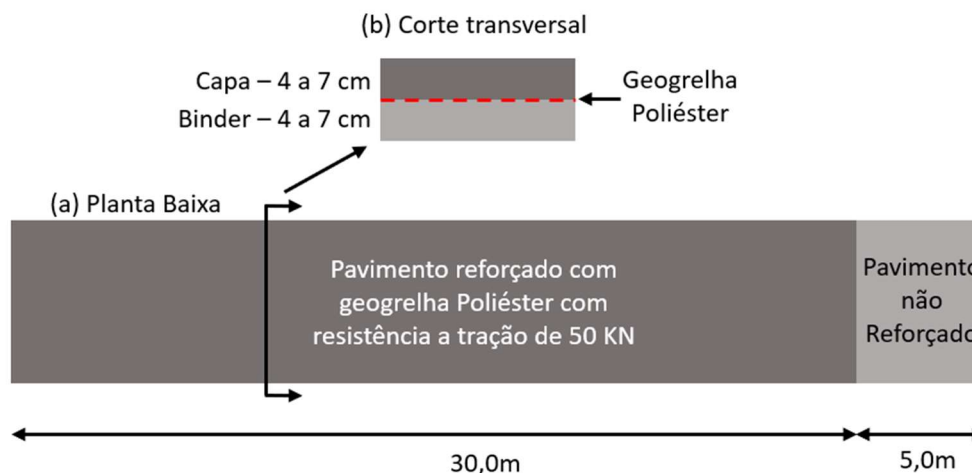


Figura 2.1 - Croqui com dimensões da seção teste construída por Damisch e Kirschner (1994): a) planta da seção teste; b) corte transversal da seção teste. Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Após a construção, no ano de 1992, a seção teste passou pelo processo de fresagem, executado pelo equipamento Wirtgem SF 1000, representado na Figura 2.2. A espessura de fresagem foi de 7,0 cm de profundidade. A fresagem ocorreu em 3 estágios, os quais geraram 3 diferentes G-RAPs. O primeiro estágio de fresagem ocorreu nos 5 primeiros metros de pavimento não reforçado, com o esguicho de água nos dentes de fresagem aberto. Os autores relatam não ter tido qualquer perturbação nesta etapa. Já no segundo estágio, parte da seção foi fresada também com água e no terceiro estágio, a água do equipamento de fresagem foi desligada propositalmente pois, de acordo com os autores, isso tornou a fresagem a um nível aceitável. Os autores relatam que na fresagem das etapas 2 e 3, houve uma nítida dificuldade em fresar o pavimento reforçado com geossintético, sendo necessária a redução na velocidade de fresagem, além de 3 paradas do equipamento para desenroscar parte da geogrelha de poliéster enroscada/enrolada no tambor de fresagem.



Figura 2.2 - Fresadora Wirtgen SF100 equivalente a utilizada nos estudos de Damisch e Kirschner (1994).
Fonte: <https://www.lectura-specs.com>.

Ainda na pesquisa de Damisch e Kirschner (1994), os diferentes RAPs foram coletados e levados para um laboratório para a condução de análises de caracterização físicas e ensaios de reciclabilidade e comportamento mecânico dos G-RAPs. Os materiais coletados foram organizados em 3 amostras: Amostra 1 – RAP controle, Amostra 2 – G-RAP úmido e, Amostra 3 – G-RAP seco. A Figura 2.3 apresenta um gráfico de distribuição dos filamentos de geossintéticos presentes no RAP.

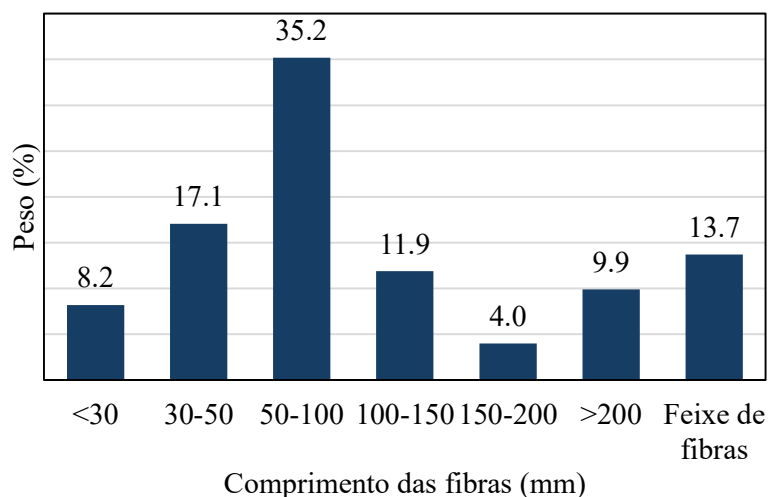


Figura 2.3 - Distribuição de comprimentos de filamentos presentes no G-RAP Amostra 3.
Fonte: Modificado de Damisch e Kirschner (1994).

Inicialmente, observou-se que cerca de 15% dos fragmentos do geossintéticos presentes no G-RAP da Amostra 3 continham nós/soldas da geogrelha e 85% apresentaram fios de poliéster sem nós. Os comprimentos de filamentos de geossintéticos foram da ordem de 8 mm a 300 mm. Foi observado um percentual de CAP presente no RAP da amostra 1, não reforçada, ligeiramente inferior aos das demais amostras de G-RAPs. Os autores concluíram que isso se deve ao fato de que a capa era mais fina/delgada frente aos pavimentos reforçados.

Para compor os estudos em termos capacidade de reciclagem dos fresados RAP e G-RAPs em produzir novas misturas asfálticas, os autores utilizaram como base um traço asfáltico convencional “*classe C*” para realizar a moldagem de 3 corpos-de-provas para cada tipo de RAP, em uma mistura com proporções de 10%, 20% ou 30% de RAP e material virgem. A Figura 2.4 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de estabilidade Marshall realizados pelos autores. Na Figura 2.4, verifica-se que, em geral, as amostras que continham fragmentos de geossintéticos (Amostra 2 e Amostra 3) apresentaram aumento nos resultados da estabilidade Marshall em relação a Amostra 1 (RAP controle), ou seja, houve um aumento na resistência à deformação permanente (fluência) com os G-RAPs. Por fim, Damisch e Kirschner (1994) concluem que pavimentos reforçados tem a capacidade de serem usináveis/fresáveis e que o RAP e G-RAP advindo deste processo poderiam ser utilizados para compor um novo CAUQ em processos de reciclagem, desde que a proporção não exceda 30% de RAP e 70% de material britado virgem.

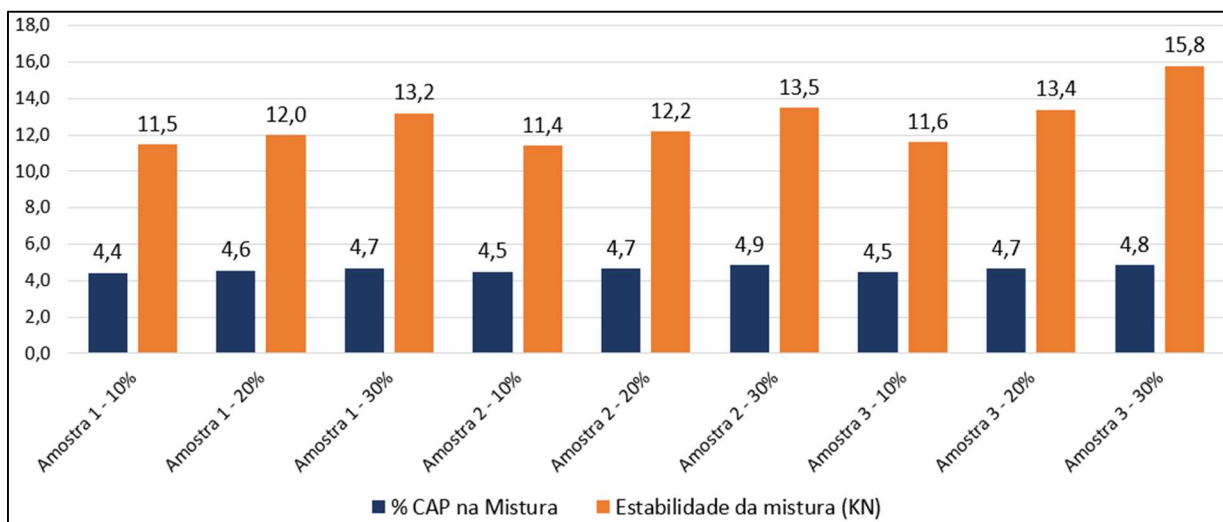


Figura 2.4 - Resultado da estabilidade e percentual de CAP das misturas recicladas com geossintéticos.
Fonte: Modificado de Damisch e Kirschner (1994).

2.4 Technical Reports

Para acompanhar os avanços relacionado à engenharia de pavimentação, principalmente no que se refere a pavimentos reforçados, a empresa HUESKER, entre os anos 2004 e 2022, conduziu pelo menos 3 estudos relacionados à fresagem de pavimentos reforçados e a reutilização de G-RAPs como material reutilizável/reciclável.

2.4.1 Estudo 1 - “Milling and recycling HaTelit®-reinforced asphalt”

Em maio de 2004, estudos conduzidos pela empresa Huesker, em parceria com a empresa fornecedora de material asfáltico e serviços de aplicação, a *Mischwerk Schwelm*, foram realizados para avaliar a fresabilidade do Geocomposto de poliéster e a capacidade de reutilização do material fresado oriundo deste procedimento. Para tal, uma camada de 0,6 kg/m² de emulsão betuminosa (U70K) foi aplicada sobre uma camada de revestimento asfáltico existente e o reforço de poliéster foi instalado. A pista teste de pavimento reforçado tinha dimensões de 60 m de comprimento e largura de 4 m. O reforço foi então coberto por uma camada asfáltica com espessura de 40 mm, conforme as normas técnicas aplicáveis. Após 6 semanas, a seção foi então fresada por um equipamento Wirtgen W500, conforme mostra a Figura 2.5 com capacidade de fresagem de 50,0 cm de largura. A espessura da fresagem foi de 5,0 cm do topo da camada reforçada, ou seja, 1,0 cm abaixo da altura de instalação do geocomposto.

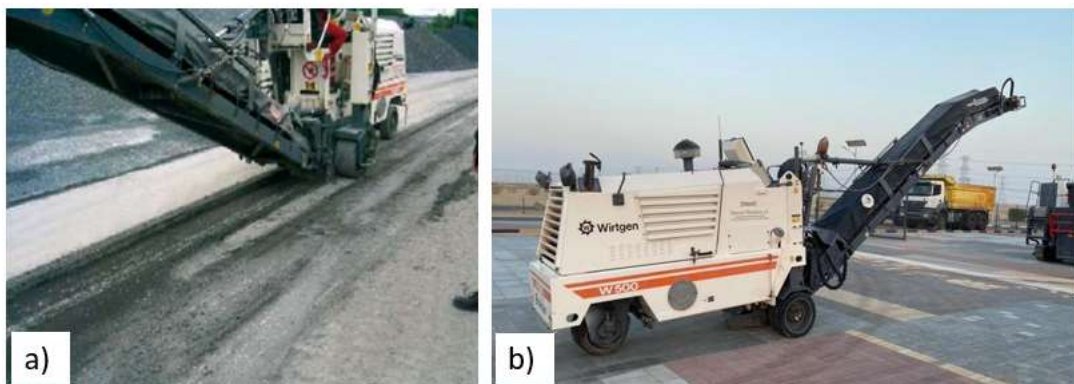


Figura 2.5 – Fresadora Wirtgen W500 utilizada nos estudos conduzidos pela Huesker em 2004: a) seção de teste. b) Perfil Fresadora Wirtgen W500. Fonte: Huesker (2008).

De acordo com os autores, não foi identificada qualquer perturbação significativa durante o processo de fresagem e não foram observadas formações de ondas nem deslizamentos do reforço no asfalto. O operador da máquina estimou que sua fresadora estava operando em cerca de 80% de sua capacidade normal. Os autores relataram apenas a presença de pequenos filamentos de fibra de poliéster no tambor de fresagem, porém, estes não causaram improdutividade ao processo. O material fresado, aqui denominado G-RAP, foi coletado e posteriormente triturado para a investigação da capacidade de reciclagem. Conforme apresentado na Figura 2.6, foi identificada a presença de pequenos filamentos de geossintéticos presentes no material fresado.



Figura 2.6 - Filamentos de geossintéticos presentes no G-RAP oriundo da fresagem.
Fonte: Huesker (2008).

Por fim, o RAP e o G-RAP coletados durante o processo de fresagem foram utilizados para compor uma nova mistura betuminosa CAUQ. A proporção utilizada foi de 30% de RAP ou G-RAP e 70% de material britado virgem. Os autores não detalham os ensaios realizados, mas apenas descrevem que não foram observados efeitos prejudiciais no processo e que, quando comparados, os materiais reciclados com RAP e G-RAP mostram diferenças não significativas. Neste estudo, os autores concluem que os pavimentos reforçados são fresáveis, mesmo com a utilização de um equipamento de pequeno porte, e que na utilização em equipamentos mais potentes, comumente utilizados em obras de grande escala, os efeitos do reforço seriam nulos.

2.4.2 Estudo 2 – Investigação das características da fresagem de pavimentos reforçados com HaTelit e Reciclagem do material fresado

Para a realização deste estudo, uma seção teste com dimensões de 26,0 m de comprimento e 1,0 m de largura foi construída na RWTH Aachen University, localizada em Aachen, na região oeste da Alemanha. A estrutura da seção teste pavimentada continha uma cama asfáltica de 60 mm e uma camada asfáltica superficial de 40 mm. Entre essas camadas, um reforço com geocomposto HaTelit foi instalado para compor o pavimento reforçado, como pode ser observado na Figura 2.7. Foi utilizada uma máquina pavimentadora montada em trilhos, com uma régua compactadora de alto desempenho. A superfície recebeu a compactação final por um rolo vibratório tandem. Os procedimentos adotados de construção foram orientados pelo manual alemão de construção e manutenção de estradas RStO 01. A pista teste foi então fresada para a verificação da fresabilidade do geossintético e para coleta e ensaios dos RAPs e G-RAPs.

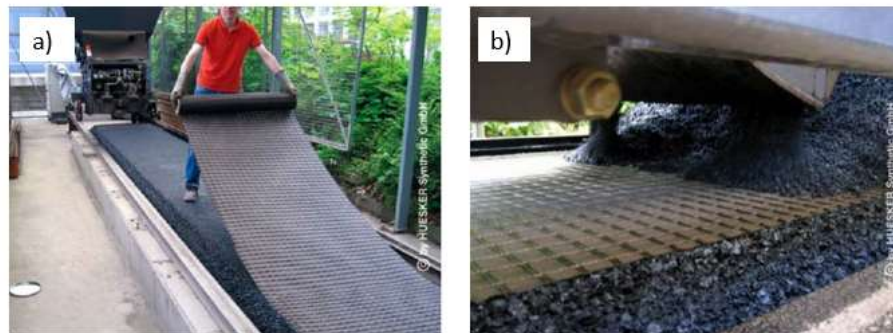


Figura 2.7 - Detalhes da construção da seção teste: a) instalação da geogrelha para reforço do pavimento; b) aplicação da camada superficial. Fonte: Huesker (2008).

Os ensaios relacionados à capacidade de fresagem foram divididos em 2 etapas, sendo a primeira com a fresagem da camada superficial em apenas alguns milímetros acima do reforço, em um comprimento total de 1,0 m. A proposta foi verificar se neste procedimento haveria desprendimento do reforço geossintético devido a tração exercida pelo equipamento de fresagem. Os autores relatam não haver qualquer perturbação da estrutura na primeira etapa de fresagem, não sendo identificado descolamento do reforço ou do restante da camada asfáltica que o recobria a geogrelha. A segunda etapa consistiu na fresagem do restante da pista teste, a uma profundidade de 50 mm para garantir a remoção total da camada asfáltica juntamente com o reforço. Na segunda

etapa de remoção da camada reforçada, os autores relatam não ter havido perturbação no processo e que poucas fibras de poliéster enroscaram no tambor de fresagem, conforme apresentado na Figura 2.8.



Figura 2.8 - Processo de fresagem: a) Fresagem da camada superficial incluindo o reforço; b) Detalhe do tambor de fresagem após o procedimento da fase 2. Fonte: Huesker (2008).

Na fase de ensaios laboratoriais, os autores descrevem que utilizaram o G-RAP a uma proporção de 30% na mistura com 70% de material granular virgem para compor uma nova mistura de CAUQ. Como controle, os autores realizaram o mesmo traço asfáltico, porém com 30% de RAP convencional na mistura. Os corpos-de-prova foram então moldados e submetidos ao ensaio de estabilidade e fluência de Marshall. Detalhes quanto ao ligante e agregados que compuseram a produção do CAUQ reciclado foram controlados para que houvesse um comparativo adequado entre o traço com RAP e o traço com G-RAP na mistura. Os resultados dos ensaios são apresentados na Figura 2.9.

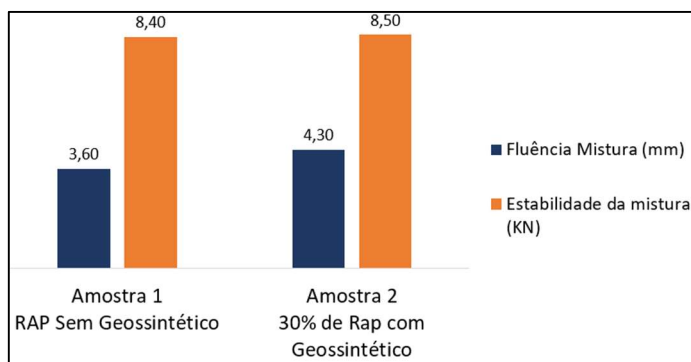


Figura 2.9 - Resultados de estabilidade e fluência em misturas recicladas com geossintéticos, conduzidos pela Huesker. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

De acordo com os resultados, os autores concluem que não houve diferença significativa na fluência e estabilidade entre o CAUQ reciclado com o RAP e o CAUQ reciclado com fragmentos de geossintéticos em sua mistura. Os autores concluem que pavimentos asfálticos reforçados são fresáveis e que os materiais G-RAPs oriundos deste processo podem ser reutilizados na reciclagem de outros materiais pois suas características físicas pouco diferem do RAP sem geossintéticos.

2.4.3 Estudo 3 - Avaliação visual do comportamento de fresagem de Geossintéticos em pavimentos reforçados

De acordo com um Test report Nr. 2100991-2, realizado em 2022 pela equipe de pesquisadores da RWTH Aachen University, em conjunto com a ISAC Institute, foi estudada a capacidade de fresagem do geossintético G100 (seção 1), C 40/17 (seção 2) and C+ (seção 3). Para realizar tais ensaios, uma pista teste, em escala real, com dimensões não descritas pelos autores foi executada. O perfil do pavimento era composto por uma camada asfáltica com espessuras de 10,0 cm de CAUQ, seguida da instalação dos reforços para o experimento e uma camada superficial de 4,0 cm de CAUQ compondo o revestimento asfáltico. A Figura 2.10 apresenta a construção da pista teste em questão.



Figura 2.10 - Seções teste construídos com geossintéticos Huesker para realização de fresagem.
Fonte: Test report 2100991 (2022).

Na etapa de fresagem, os autores relatam que apenas os pavimentos reforçados com a amostra G100 (seção 1) e C 40/17 (seção 2) passaram pelo processo de fresagem com espessura suficiente para atingir o reforço. O equipamento utilizado foi uma fresadora Wirtgem W500 conforme apresentado na Figura 2.11. Os autores relatam que os geossintéticos não pareceram influenciar no processo de fresagem e que era visível a fragmentação dos geossintéticos no RAP recolhido durante o trabalho.



Figura 2.11 - Fresadora Wirtgem W500 utilizada no processo de fresagem. Fonte: Huesker (2022).

Neste estudo, os autores não realizaram ensaios laboratoriais de resistência mecânica de misturas de CAUQ reciclado, mas apenas foi realizada uma caracterização visual dos agregados. Neste ensaio, os autores relatam que ambos os materiais, G-RAP e RAP sem geossintéticos parecem iguais visualmente. A Figura 2.12 apresenta o comparativo dos agregados com e sem fragmentos de geossintéticos.

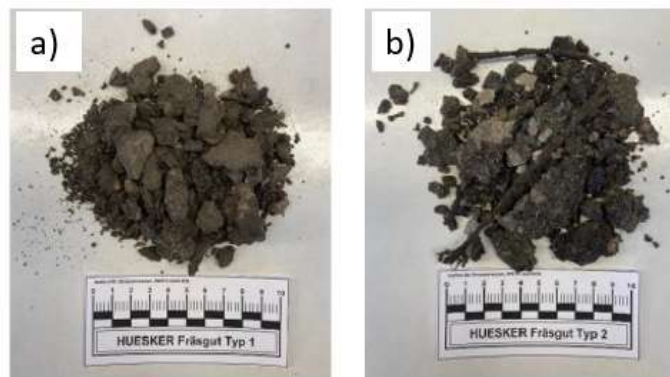


Figura 2.12 - Comparativo entre a) RAP controle e b) RAP com fragmentos de geocomposto. Fonte: Test report 2100991 (2022).

No G-RAP, é possível visualizar a presença de longas fibras. Por fim, os autores concluíram que todos os tipos de reforço de asfalto puderam ser removidos pela fresadora sem problemas e que não houve diferença significativa no processo de fresagem dos pavimentos reforçados das seções 1 a 3. Além disso, foi constatado que o material fresado era quase idêntico para todas as seções, sendo visíveis fibras individuais no material fresado.

2.5 Estudo de Tran et al. (2012)

Tran et al. (2012) realizaram estudos relacionados à capacidade dos agregados de G-RAPs de serem reutilizados em processos de reciclagem na composição de novos CAUQs. Assim como em Damisch e Kirschner (1994), os autores construíram uma seção teste em escala real com aproximadamente 12,0 m de comprimento e 3,6 m de largura. O geossintético utilizado para reforço do pavimento foi um geocomposto que consiste em uma malha de fibra de vidro com pré-impregnação de pintura elastomérica. A aplicação do geossintético foi realizada sobre uma camada de 5,0 cm de CAUQ com diâmetro máximo do agregado de 9,5 mm, realizado após a aplicação de ligante tipo CAP e recoberto por uma nova camada de CAUQ de 5,0 cm. A Figura 2.13 apresenta a seção teste experimental para o estudo de Tran et al. (2012).



Figura 2.13 - Execução da pista teste. Fonte: Tran et al. (2012).

Após a cura, os autores realizaram a fresagem e coletaram o RAP controle e o G-RAP com fragmentos de geossintéticos em sua mistura. Para a coleta do RAP controle os autores realizaram a fresagem superficial da seção teste, a uma espessura de 3,5 cm, sendo suficiente para não atingir

o reforço. Após este processo, uma nova fresagem de 3,5 cm foi realizada removendo inteiramente o pavimento reforçado, compondo assim os agregados de G-RAP. Diferente de outros estudos, nesta etapa, os autores não relatam dificuldades ou indiferença no processo de fresagem do pavimento reforçado. Também não foi relatado o modelo do equipamento de fresagem utilizado neste processo. A Figura 2.14 mostra detalhes das dimensões da seção e das espessuras de fresagem realizadas pelos autores.

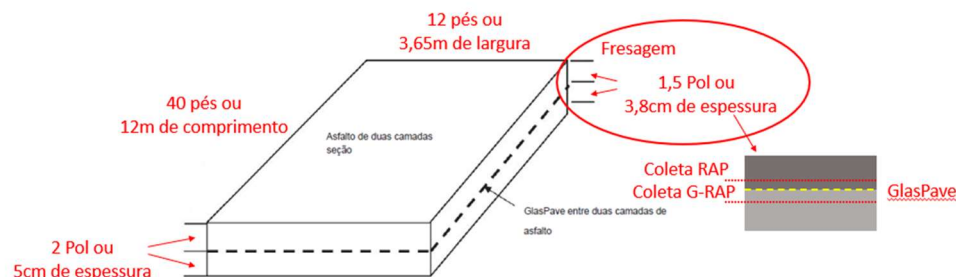


Figura 2.14 - Detalhes das dimensões e espessura de fresagem da seção teste.
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os materiais RAP e G-RAP coletados no processo de fresagem foram então submetidos a ensaios de caracterização quanto a granulometria e teor de ligante da mistura. Os resultados mostraram que as granulometrias dos materiais eram praticamente iguais não havendo diferenças significativas entre si. Quanto aos teores de CAP dos diferentes materiais presentes nas misturas apresentaram diferenças significativas justificado pelos autores pela camada ligante de material betuminoso utilizado para instalação do reforço no pavimento. A Figura 2.15 apresenta a diferença entre os 2 materiais quanto à composição de CAP em sua mistura.

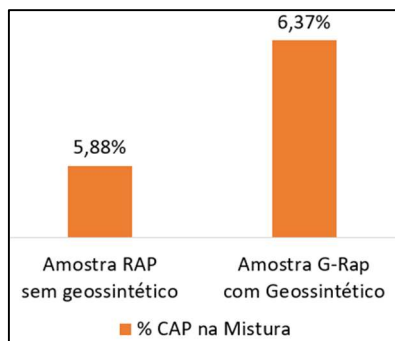


Figura 2.15 - Comparação do teor de CAP presente nas misturas de RAP com e sem fragmentos de geossintéticos de Tran et al. (2012). Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O processo de reciclagem dos materiais para compor uma nova mistura asfáltica foi realizado com o método Superpave. Foram utilizados agregados com diâmetro máximo de 12,5mm. As amostras da nova mistura asfáltica foram preparadas com RAP controle e G-RAP separadamente para serem comparadas entre si, a uma proporção de 30% do peso da mistura em RAP ou G-RAP e 70% de agregado virgem. Na sequência, as amostras foram submetidas ao ensaio da *Hamburg wheel-tracking test* (AASHTO T324-04, 2007) onde corpos-de-prova de 255 mm ou 300 mm são acoplados em ao equipamento para sofrerem ciclos de passagem de uma roda metálica. A principal função deste ensaio é aferir a suscetibilidade da mistura a deformações permanentes e consequentemente falhas prematuras, causadas principalmente pela baixa rigidez do material, fraqueza do agregado ou inadequada escolha do ligante asfáltico. A Figura 2.16 apresenta os corpos-de-prova submetidos ao ensaio e a profundidade dos sulcos causados.



Figura 2.16 - Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de Hamburg wheel-tracking test.
Fonte: Wang and Huang (2020).

Os resultados mostraram uma equivalência em termos de resistência dos CAUQs produzidos com mistura de RAP e G-RAP nas proporções descritas. Apesar da mistura composta por G-RAP ter apresentado um sulco mais profundo após o ensaio, com um resultado de 7,3 mm, frente à mistura com o RAP controle (5,1 mm), isso não caracteriza menor resistência do material, pois este suportou 5222 ciclos frente aos 4248 da mistura com RAP controle. A Figura 2.17 abaixo apresenta os resultados obtidos por Tran et al. (2012).

Após a execução e fresagem da seção teste e coleta e ensaios laboratoriais dos RAPs e G-RAPs obtidos neste processo, os autores concluíram que apesar de haver diferença nos teores de CAP das amostras, isso pouco influenciou no projeto da mistura. Tran et al. (2012) concluem também que as misturas recicladas com RAP e G-RAP, quando submetido a testes de resistência de do tipo *Hamburg wheel-tracking* e aferido seus módulos, apresentaram diferentes resultados,

porém sem diferença significativa. Os autores não abordaram detalhes relacionados ao processo de fresagem da seção reforçada.

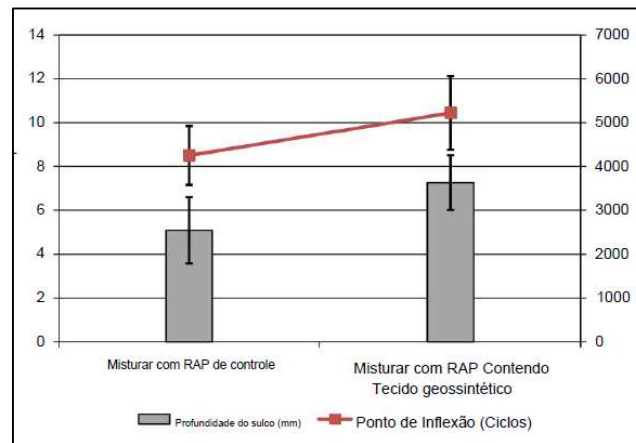


Figura 2.17 - Resultados do *Hamburg wheel-tracking test*. Fonte: Modificado de Tran et al. (2012).

2.6 Estudo de Gu et al. (2021)

No estudo de Gu et al. (2021), foram realizados tanto a moldagem de corpos-de-prova em laboratório quanto a instalação de geossintéticos em um pavimento pré-existente para reforçá-lo com posterior fase de coleta dos agregados RAP com fragmento de geossintéticos. Os autores deste estudo não aprofundam as explicações quanto às dimensões da seção teste ou dos equipamentos utilizados no procedimento de fresagem adotado, mas informam apenas que a seção teste de pavimento reforçado foi construída sob um pavimento pré-existente de 50 mm de espessura. Este pavimento teria então sido fresado por procedimento padrão para a obtenção de RAP e G-RAP. A Figura 2.18 abaixo demonstra os aspectos dos agregados RAP e G-RAP.

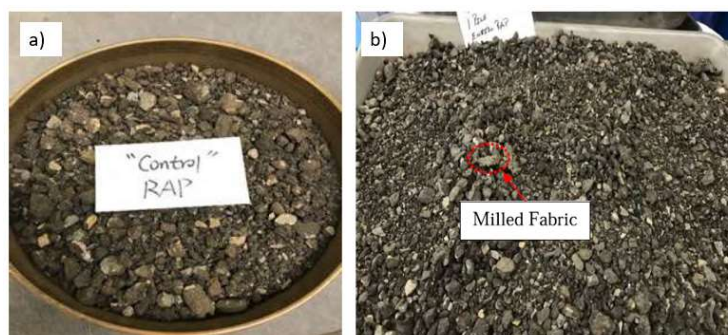


Figura 2.18 - Aspectos do material fresado com fragmentos de geossintéticos de fibra de vidro: a) RAP controle e b) G-RAP. Fonte: Gu et al. (2021).

Após a obtenção do RAP e G-RAP, os autores realizaram estudos relacionados ao percentil de CAP e ensaios de resistência mecânica. Assim como em Tran et al. (2012), os autores relataram uma presença de CAP superior no G-RAP frente ao RAP controle na mistura, sendo encontrados 5,0% de CAP no G-RAP e 4,5% no RAP controle.

Assim, para compor os estudos relacionados à resistência mecânica das misturas asfálticas recicladas, diferentes misturas compostas por 30% de G-RAP ou RAP controle e 70% de material virgem foram elaboradas pelo método Superpave e submetidos o ensaio *Hamburg wheel-tracking test* (AASHTO T324-04, 2007). Foram realizados ainda ensaios de dano por umidade induzida obtidos por ensaio de resistência à tração indireta (AASHTO T283). Os resultados do ensaio da *Hamburg wheel-tracking test*, demonstraram uma boa resistência dos materiais reciclados com RAP e G-RAP, com resultados muito superiores ao limite previsto na norma utilizada como base deste estudo, a *Caltrans Specification Section 39* do Departamento de Transportes da Califórnia, nos Estados Unidos. Nesta especificação é citado que uma mistura asfáltica não pode exceder uma profundidade de sulco de 12,5 mm aos 15000 ciclos, onde o material reciclado apresentou apenas 2,65 mm. A Figura 2.19 abaixo demonstra os resultados dos ensaios realizados por Gu et al. (2021).

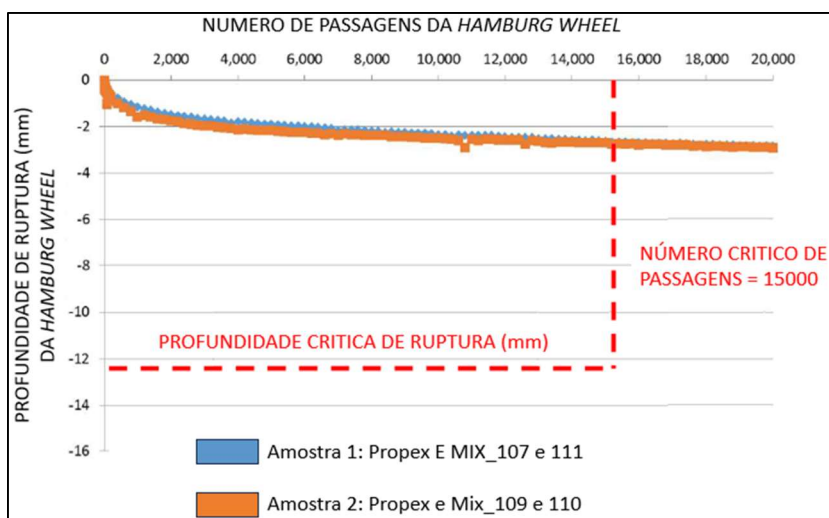


Figura 2.19 - Resultados do Hamburg wheel-tracking test. Fonte: Modificado de Gu et al. (2021).

Nos ensaios de dano por umidade induzida, os corpos-de-prova foram submetidos a ciclos de secagem e saturação, para posteriormente serem submetidos a ensaios de resistência. De acordo com a norma adotada como base do estudo (*Caltrans Specification Section 39*), os resultados foram satisfatórios pois a razão entre a resistência do corpos-de-prova úmido e a do corpos-de-prova seco,

que deveria ser no mínimo de 0,80, resultou em 0,93. A Figura 2.20 demonstra os resultados de resistência ao dano por umidade induzida obtidos por Gu et al. (2021).

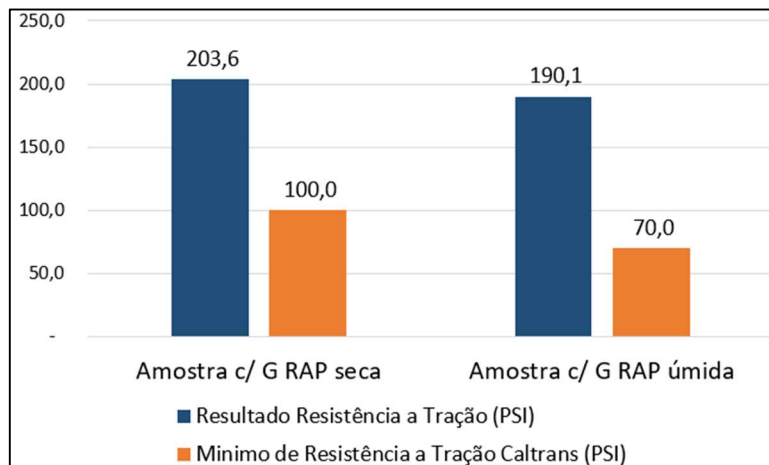


Figura 2.20 – Resultados de resistência à tração (RT) das amostras de G-RAP de Gu et al. (2021).
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os autores não apresentam conclusão sobre o processo de fresagem do pavimento reforçado com geossintéticos de fibra de vidro, mesmo que este tenha sido apresentado como um dos objetivos do artigo. Quanto à reciclabilidade dos G-RAPs, os autores concluem com base nos resultados dos ensaios de resistência ao dano causado pela umidade e a *Hamburg wheel-tracking test*, que uma mistura contendo 30% de G-RAP não afetou adversamente o desempenho da mistura asfáltica reciclada quando com parado à uma mistura com mesma proporção de RAP convencional.

2.7 Estudo de Saxena et al. (2023)

No estudo de Saxena et al. (2023), foram coletados dados e amostras de uma reabilitação de pavimento realizada na rodovia US 70/84 em Muleshoe no estado do Texas, Estados Unidos. O perfil do pavimento era composto por uma base e sub-base granular de calcário com uma espessura total de 30,0 cm, uma camada de 5,0 cm de material betuminoso pré-existente, um reforço de geotêxtil não tecido de polipropileno e uma camada de revestimento asfáltico superior de 6,0 cm. A Figura 2.21 apresenta as camadas do pavimento estudado.

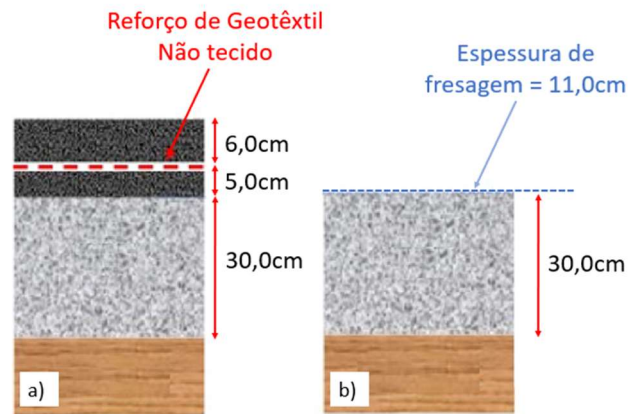


Figura 2.21 - Perfil do pavimento existente e localização do reforço. Fonte: Adaptado de Saxena et al. (2023).

Neste estudo, a intenção dos autores foi a de coletar os agregados provenientes do RAP e os agregados provenientes do G-RAP com fragmentos de geotêxtil em sua mistura. Para isso, o processo de fresagem inicialmente atingiu uma espessura de 5,0 cm de profundidade coletando assim apenas o RAP sem geossintético. Na sequência do processo, a fresagem removeu por completo a camada betuminosa restante de 6,0 cm juntamente com o geotêxtil. A Figura 2.22 mostra as etapas de fresagem realizada pelos autores e os detalhes de campo quanto a presença do geotêxtil entre as camadas.

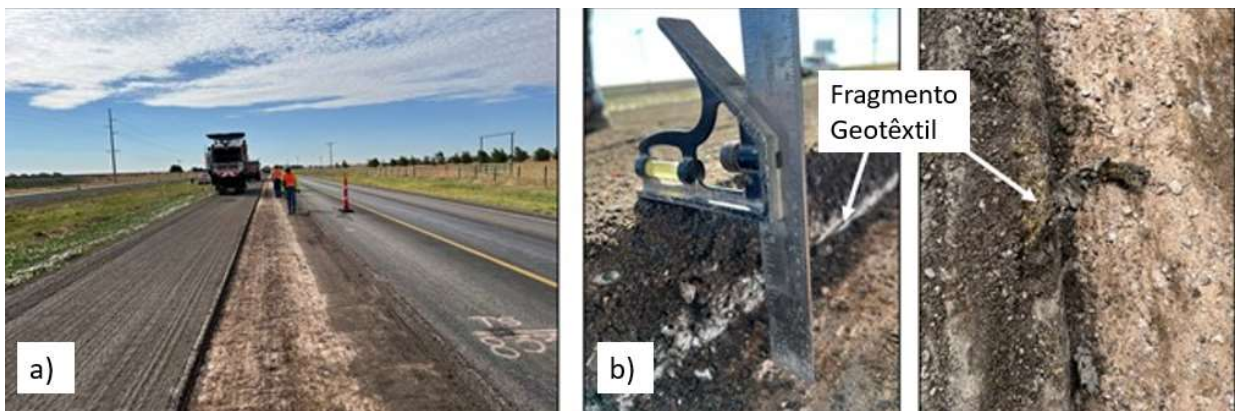


Figura 2.22 - Etapas de fresagem para coleta do RAP e G-RAP: (a) fresagem no campo b) espessura de fresagem e detalhe do geotêxtil. Fonte: Adaptado de Saxena et al. (2023).

Os autores não fazem menção ao equipamento utilizado no processo e nem informaram detalhes quanto à configuração do tambor ou rotação de fresagem. Porém, pelos registros

fotográficos é possível identificar que se trata de uma fresadora do tipo Wirtgem modelo W200, com largura de corte de 2,00 m. A Figura 2.23 demonstra o equipamento utilizado.



Figura 2.23 - Fresadoras Wirtgem modelo W200: (a) Estudos de Saxena et al (2023); b) modelo típico Wirtgem W200. Fontes: Elaborado pelo autor (2024).

Após a coleta dos materiais para compor agregado para reuso em base de pavimentos, os autores realizaram a caracterização granulométrica. Para preparo dos agregados, os autores realizaram um destorroamento/trituração no RAP e no G-RAP, separadamente. As amostras passaram então por um processo de peneiramento com abertura máxima de 25,4 mm e a menor peneira com abertura de 0,075 mm (# 200). Os autores relatam que a graduação do G-RAP se mostrou mais grossa devido aos fragmentos maiores de geotêxtil retidos nas peneiras 25,4 mm, 19,05 mm e 12,7 mm. Não foram encontrados fragmentos de geossintéticos em peneiras com abertura inferior a 12,7 mm. A curva granulométrica dos materiais pode ser observada na Figura 2.24, mostrando similaridade entre a distribuição de agregados de mesmo tamanho.

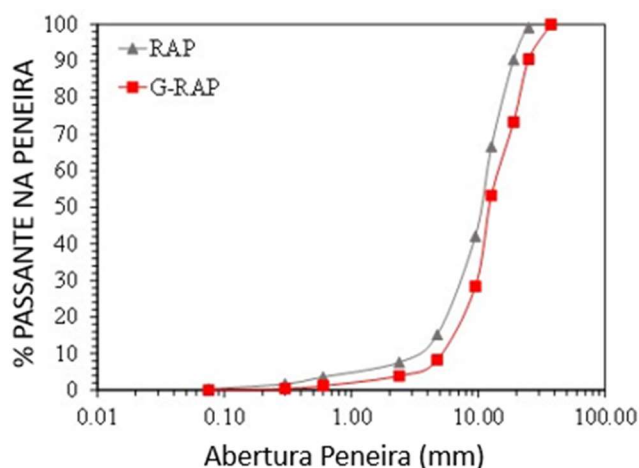


Figura 2.24 – Distribuição granulométrica de RAP e G-RAP. Fonte: Adaptado de Saxena et al 2023.

Após a caracterização dos materiais, os autores realizaram ensaios quanto à capacidade de reciclagem do RAP e G-RAP para reuso em base de pavimentos. Para isso, foram preparadas misturas com proporção de 50% de RAP ou G-RAP com 50% de material virgem, bem como comparação com 100% de agregado virgem. Foram realizados 4 ensaios sendo: compactação por proctor modificado (norma AASHTO T 180), permeabilidade (ASTM D 2434), absorção de água (AASHTO T85), extração de Betume (AASHTO T164) e fragmentação (ASTM D1557).

Com relação ao teor de betume, na pesquisa de Saxena at al. (2023), assim como nas pesquisas de Tran at al. (2012) e Gu at al. (2021), foram encontrados valores superiores nas amostras de G-RAP em comparação as de RAP, sendo respectivamente 4,92% e 5,87%. Estes resultados são atribuídos a absorção do material ligante pelos fragmentos de geossintéticos que compõem o G-RAP. Ressalta-se que o teor de ligante adicional nos G-RAPs pode se tornar um benefício quando forem reutilizados para compor CAUQs reciclados, pois proporcionariam, provavelmente, uma redução no teor ótimo de ligante em relação a uma mistura virgem. A Figura 2.25 resume alguns dos principais resultados encontrados na pesquisa de Saxena at al. (2023).

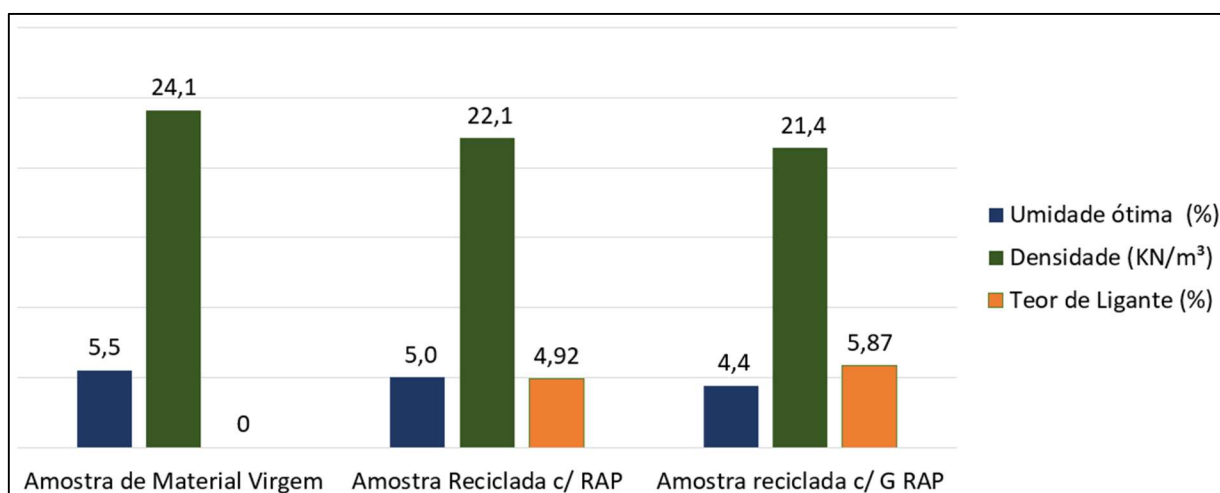


Figura 2.25 – Resultado dos ensaios de Densidade e teor de betume em RAP e G-RAP realizados por Saxena at al. (2023). Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Quando comparados os resultados das misturas com G-RAP com a amostra de material virgem, os resultados do reciclado com G-RAP pode ser considerado significativo, porém entre as amostras recicladas com RAP e G-RAP as diferenças foram mínimas, demonstrando pouca influência dos fragmentos de geotêxtil no desempenho das misturas.

Quanto à reciclabilidade do material para G-RAP para compor uma mistura granular para base de pavimentação, este estudo mostrou que as diferenças apontadas nos resultados foram mínimas quando comparadas às amostras recicladas com RAP e satisfatórias quando comparadas às amostras compostas por 100% de agregado virgem.

2.8 Considerações finais

As experiências pregressas da literatura demonstram que a fresagem de pavimentos reforçados com geossintéticos e a subsequente reutilização de RAP e G-RAP são práticas viáveis e eficazes, desde que sejam observadas certas limitações e cuidados técnicos. No entanto, os contrastes observados sugerem que a eficiência da fresagem pode depender de fatores como o tipo de equipamento utilizado, a metodologia aplicada e as especificações dos geossintéticos empregados. Esses entendimentos reforçam a melhoria contínua das técnicas de reciclagem da pavimentação asfáltica, promovendo uma abordagem mais suscetível e eficiente na gestão de pavimentos. Foi verificando ainda que nem todos os artigos abordam os temas de fresagem e reciclagem, demonstrando a carência de estudos acadêmicos completos sobre a fresagem de pavimentos reforçados e a reutilização de G-RAPs em novas misturas asfálticas. Nota-se, entretanto, um aumento no interesse sobre tendo em vista de 3 dos 7 artigos aqui abordados datam da década de 2020.

Quanto à reciclabilidade, todos os estudos mencionam a possibilidade de utilizar RAP e G-RAP em novas misturas asfálticas, recomendando uma proporção de até 30%. Ensaio laboratoriais indicam que as misturas contendo G-RAP, apesar da presença de geossintéticos, apresentam características mecânicas adequadas para pavimentação. A resistência das misturas contendo RAP e G-RAP foi considerada compatível, sem diferenças significativas nos ensaios de fluência, estabilidade Marshall, e nos testes de resistência tipo *Hamburg Wheel Tracking*, conforme observado no estudos do report Huesker (2008) e Tran et al. (2012). Em relação ao impacto dos fragmentos de geossintéticos na mistura asfáltica, Damish e Kirschiner (1994) notaram um aumento na estabilidade Marshall em misturas contendo G-RAP, enquanto no report Huesker (2008) e Tran et al. (2012) relataram diferenças mínimas na resistência entre misturas contendo RAP e G-RAP, indicando que a presença de geossintéticos não altera significativamente as propriedades da mistura final.

Por fim, na caracterização do material fresado, Damish e Kirschiner (1994) observaram diferenças na presença de CAP entre RAP e G-RAP, atribuídas ao desgaste da camada do pavimento reforçado, enquanto no report Huesker (2008) e em Tran et al. (2012), os autores concluíram que essas variações na composição do RAP não afetam significativamente o desempenho das misturas recicladas. As semelhanças de observações sobre a reciclabilidade e comportamento mecânico das misturas indicam que o uso de geossintéticos não compromete a qualidade das misturas asfálticas recicladas.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Estudos de Caso no Aeroporto Internacional de Salvador

Entre os anos de 2018 e 2020, nos serviços de revitalização dos pavimentos do aeroporto Internacional de Salvador, em Salvador Bahia, os operários se depararam com situações de pavimentos reforçados com geossintéticos durante o processo de fresagem. Na ocasião, relatos e registros foram coletados, demonstrando dificuldades em situações reais de trabalho em grande escala na fresagem de pavimentos reforçados.

Caso 1 - Fresagem da pista rolamento A entre antiga PR-J1 e PR-J2

Em janeiro de 2018, um trecho da pista de rolamento A localizado no Aeroporto Internacional de Salvador contendo 120,0 m de comprimento e 10,0 m de largura apresentava ondulações, trincas e fissuras. A Figura 3.1 demonstra o local interditado devido às patologias no pavimento.



Figura 3.1 - Localização da Pista de Rolamento A interditada devido a patologias no pavimento.

O trecho estava localizado entre as pistas de rolamento J1 e J2, local estratégico para o tráfego de taxiamento das aeronaves, interligando o pátio de aeronaves a principal cabeceira da pista – cabeceira 10 da pista 10/28. As patologias progrediram ao longo do ano de 2017 causando a interrupção das operações neste local proporcionando ocasionando significativa redução nas operações das aeronaves. Para recompor as condições normais de operação e o retorno do taxiamento das aeronaves, o processo sugerido por especialistas foi a remoção da camada deteriorada de pavimento pela fresagem para posterior aplicação de uma nova camada betuminosa. O equipamento disponibilizado para este trabalho foi uma fresadora Caterpillar modelo PM 102, conforme mostra apresenta a Figura 3.2.

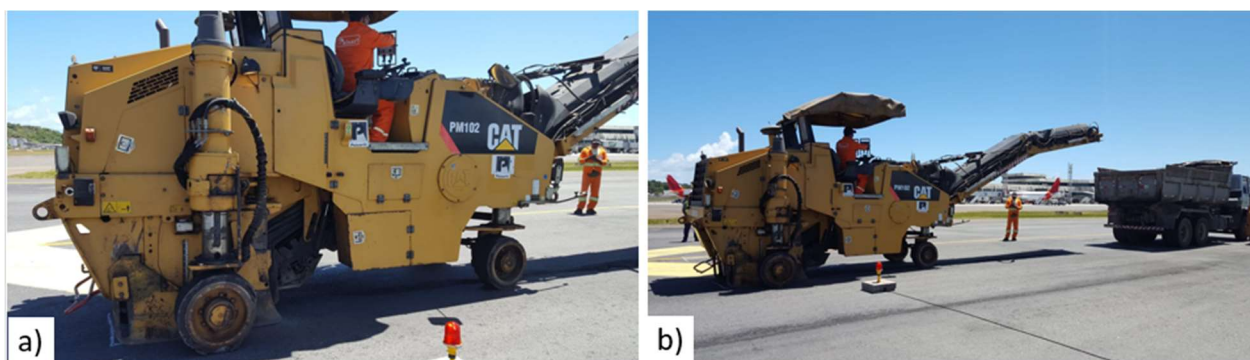


Figura 3.2 - Equipamento de fresagem: a) Fresadora Caterpillar modelo PM102; b) Fresadora realizando o trabalho de fresagem no local deteriorado pelas patologias. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No início do processo de fresagem, constatou-se que se tratava de um revestimento asfáltico reforçado com geossintético. Por se tratar de uma situação não prevista no planejamento dos trabalhos, sem que houvesse qualquer tipo de orientação específica para lidar com o problema, os funcionários da frente de trabalho tiveram que seguir em frente e se adaptar a situação. Relatos e registros da frente de trabalho mostram que houve uma redução no rendimento da fresagem devido a presença de fragmentos de geossintéticos que se enroscaram no tambor de fresagem, causando constantes paradas para a limpeza do equipamento. Na ocasião, não houve o ímpeto de registrar a duração do trabalho, por não se tratar de um estudo acadêmico, impossibilitando mensurar com precisão o impacto causado pela presença do reforço no processo de fresagem. A Figura 3.3 demonstra os fragmentos do geocomposto de reforço e o equipamento de fresagem com fragmentos de geossintético enroscados no tambor.

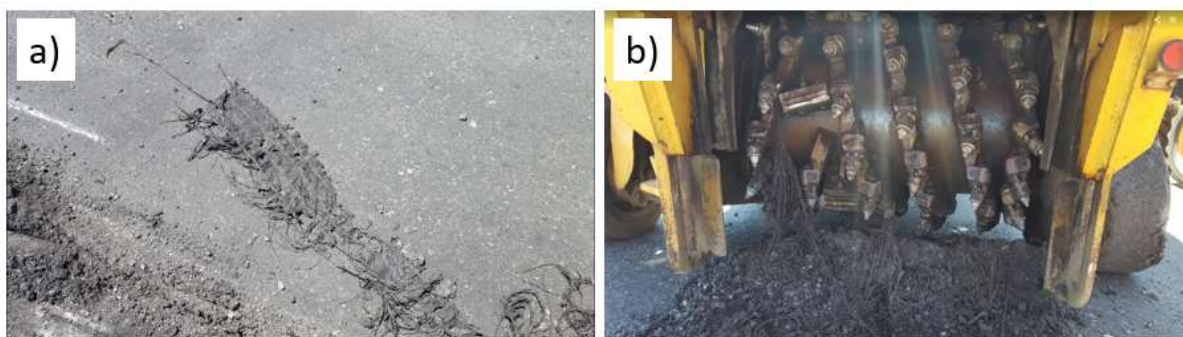


Figura 3.3 - Registro fotográfico do momento da revitalização TWY – A no Aeroporto de Salvador: a) fragmentos de geossintéticos soltos; b) filamentos de poliéster enroscado no tambor de fresagem.

Caso 2 - Fresagem pista de pouso e decolagem PPD - 10/28

Em março de 2020, após a identificação de patologias no pavimento da PPD 10/28, em trechos compreendidos entre a pista de rolamento E e pista de rolamento F, uma campanha de fresagem e recapeamento foi planejada para o reestabelecimento das condições normais de operação. Na ocasião, a área projetada para a recuperação continha dimensões de 290m de comprimento por 14 m de largura. A Figura 3.4 demonstra a localização deteriorada da pista principal 10/20.



Figura 3.4 - Local deteriorado da PPD 10/28. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Neste caso, diferentemente do caso 1, a presença do reforço geossintético no local era conhecida pela equipe, porém os transtornos causados pela presença do reforço durante o processo

de fresagem surpreenderam os operadores. Durante o processo de fresagem realizada à frio, o operador do equipamento de fresagem em questão, no caso uma fresadora Wirtgem modelo W100, teve que realizar diversas paradas técnicas no processo de fresagem para a remoção dos fragmentos de geossintéticos enroscados no tambor. O trabalho para a remoção do geossintético não só foi impactado como inviabilizado, restando a opção de demolição por escarificação do pavimento com o auxílio de uma retroescavadeira.

A Figura 3.5 demonstra as condições da fresadora durante o processo de fresagem e a demolição do pavimento com auxílio de retroescavadeira. Uma peculiaridade deste pavimento é de que o tratamento realizado previamente à instalação do reforço foi realizado com uma camada de 2 cm de areia betuminosa. Provavelmente, a adoção deste tipo não usual de instalação corroborou com a menor eficiência de aderência de interface entre o reforço e as camadas de revestimento asfáltico, facilitando a remoção do reforço intacto durante a tentativa de fresagem.



Figura 3.5 - Fresagem pista de pouso e decolagem PPD - 10/28: a) tambor de fresagem com geossintéticos enroscado; b) limpeza do tambor; c) filamentos de geossintéticos removidos da fresadora; d) momento da remoção por demolição. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os relatos e experiências dos casos de obra observados no Aeroporto de Salvador revelam tanto semelhanças quanto contrastes com os relatos da literatura sobre a fresagem de pavimentos reforçados com geossintéticos, e que contribuem para o entendimento das práticas e desafios dessa técnica. No que diz respeito à eficiência na fresagem, Damish e Kirschiner (1994), nos reports da Huesker (2008) e na pesquisa de Tran et al. (2012), as observações indicam que a fresagem de pavimentos reforçados é viável, com algumas dificuldades técnicas em casos específicos, como aqui evidenciado nos estudos de caso do Aeroporto de Salvador.

Embora a fresagem tenha sido possível na pista de rolamento A, na pista de pouso e decolagem 10/28 esta não foi possível, exigindo inclusive a demolição do pavimento com auxílio de retroescavadeira devido à grande dificuldade encontrada. No entanto, dificuldades na fresagem foram também relatadas por Damish e Kirschiner (1994), assim como nos casos do Aeroporto de Salvador, onde a necessidade de reduzir a velocidade de fresagem e necessidade de paradas frequentes para desenroscar geossintéticos do tambor foram desafios destacados. Em contraste, os casos de 2004, 2008 e 2022 nos report Huesker, e em Tran et al. (2012), não observaram dificuldades significativas, embora os autores comentam sobre fragmentos no tambor, sugerindo que avanços tecnológicos e metodológicos podem ter mitigado os problemas iniciais.

As experiências observadas no Aeroporto Internacional de Salvador, onde foram identificados tanto desafios na fresagem de pavimentos reforçados com geossintéticos, serviram como uma motivação central para a realização de uma pesquisa a ser realizada no local, a qual foi iniciada em 2021. Essa pesquisa busca aprofundar o entendimento sobre a fresabilidade de pavimentos reforçados com geossintéticos e a reciclabilidade de misturas asfálticas contendo geossintéticos. Assim, o objetivo central do projeto de pesquisa foi analisar, de forma detalhada, as condições específicas que influenciam a eficiência da fresagem e a qualidade dos materiais reciclados, com base nas dificuldades enfrentadas pela equipe do Aeroporto nas tentativa de fresagem das pistas de rolamento e de pouso e decolagem. A investigação da presente pesquisa se propõe a contribuir para o desenvolvimento de metodologias práticas mais eficazes e adaptadas à realidade dos pavimentos reforçados, ampliando o conhecimento neste assunto.

3.2 Construção da pista experimental

Com o intuito de simular uma situação real de fresagem de pavimentos reforçados com geossintéticos para posterior verificação da reciclabilidade do RAP com fragmentos de geossintéticos, em maio de 2021 foi construída uma seção teste de escala real no Aeroporto Internacional de Salvador. Nesta seção experimental, foram utilizados 5 diferentes geossintéticos específicos para uso em revestimentos asfálticos. Além das seções reforçadas, foi construída uma seção controle, destinada ao estudo comparativo tanto dos parâmetros de fresagem com e sem geossintéticos, quanto da reciclabilidade do RAP.

A escolha dos diferentes geossintéticos utilizados nesta pesquisa foi baseada em um projeto de pesquisa anterior, apresentado por Correia et al. (2022), cujo estudo é referente à avaliação da aderência de interface entre as camadas de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos. A metodologia utilizada no programa experimental e resultados obtidos em Correia et al. (2022), relacionados a seção teste, também serão abordados no presente estudo, uma vez que os trabalhos estão correlacionados.

3.2.1 Planejamento da seção teste no Aeroporto internacional de Salvador

Após a identificação da demanda pelo desenvolvimento deste estudo, um longo planejamento foi realizado para realizar a construção da seção teste no Aeroporto internacional de Salvador. A mobilização de uma equipe de pavimentação enseja uma preparação adequada, tendo em vista o local de construção da seção teste. Em aeroportos, a rigorosidade no controle de acesso de pessoas e equipamentos é elevada, pois o operador aeroportuário segue rígidas normas destinadas a manter a segurança operacional das aeronaves que pousam e decolam naquele local, além de combaterem atos ilícitos como tráfico de drogas e armas. Por este motivo, parte do tempo total programado para a construção da seção teste foi destinada à inspeção de máquinas e de pessoas que iriam adentrar no sítio aeroportuário, demandando um tempo total de execução maior que de um serviço realizado em um local convencional.

Outro fator importante no planejamento da construção da seção teste esteve ligada às condições do tempo e da Pandemia COVID-19. Devido à natureza do trabalho (projeto de pesquisa) a disponibilidade de material era suficiente para apenas uma tentativa, o que demandava escolhas

com precisão quanto a data de construção da seção teste, sem que houvesse previsão de chuva ou eventuais paralizações durante os trabalhos.

O primeiro passo para a construção da seção teste foi a escolha do local. Inicialmente pensou-se na construção em uma área carregada (com tráfego de aeronaves). Porém, devido à questões de segurança e restrições quanto a manipulação do pavimento no local da seção teste, essa opção foi descartada. Optou-se então por uma região sem tráfego de aeronaves ou veículos para que houvesse exclusividade quanto ao local para o experimento. Assim, uma via interna do aeroporto desativada para tráfego de veículos foi escolhida. A localização da seção teste fica próxima ao Pátio de Aeronaves 3, conforme apresentado na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Localização da seção teste nas proximidades do pátio 3 do Aeroporto de Salvador. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.2.2 Geossintéticos

A premissa adotada para a escolha dos geossintéticos a serem instalados na seção teste foi variar ao máximo as características dos produtos disponíveis no Brasil para uso em reforço de revestimentos asfálticos. Por este motivo, foram selecionados geossintéticos com diferentes aberturas de malha, resistência máxima à tração, presença ou não de geotêxtil e tipo do material do geossintético (polimérico ou fibra de vidro), os quais garantem uma maior abrangência de produtos e propriedades ao estudo. Figura 3.7 apresenta os geossintéticos utilizados neste estudo. Nesta pesquisa, os geossintéticos são intitulados GG1, GG2, GG3, GG4 e GG5.

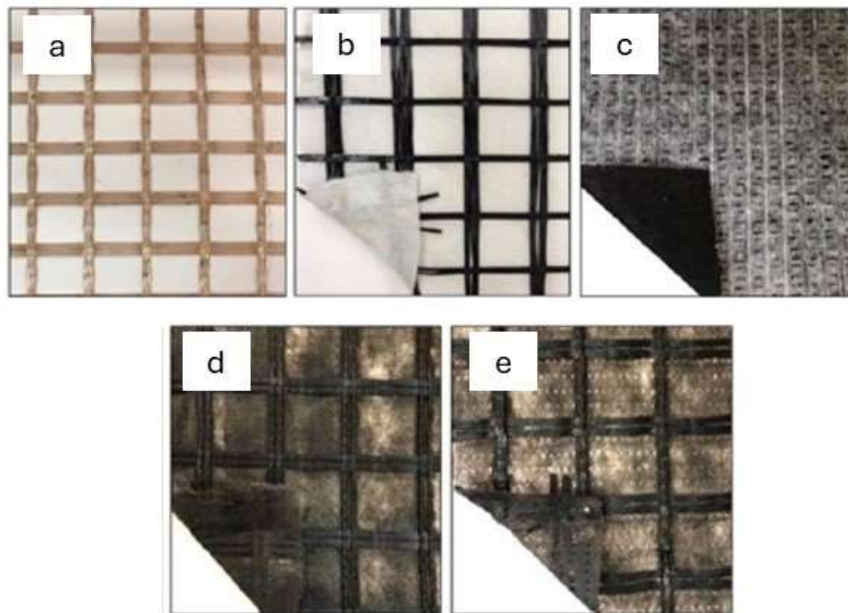


Figura 3.7 - Geossintéticos utilizados neste estudo: (a) geogrelha de fibra de vidro com revestimento polimérico (GG1); (b) geocomposto de fibra de vidro (GG2); (c) Paving mat de fibra de vidro (GG3); (d) geocomposto de fibra de vidro com geotêxtil não tecido ultraleve (GG4); geocomposto de poliéster com geotêxtil não tecido ultraleve (GG5). Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A geogrelha GG1 possui pintura polimérica adesiva, é produzida em fibra de vidro e apresenta resistência à tração de 75-95 kN/m nas direções longitudinal e transversal, com uma deformação de alongamento máxima de 3%. O GG2 é um geocomposto que contém um geotêxtil não tecido espesso termicamente ligado a uma geogrelha de fibra de vidro, e que apresenta resistência à tração de 50 kN/m em uma deformação de alongamento máxima de 3%, em ambas as direções. O GG3 é um material conhecido como *Paving mat* que incorpora uma malha de microfibras de vidro em um geotêxtil de poliéster (PET), revestido com uma pintura elastomérica, que apresenta resistência à tração de 25-30 kN/m com uma deformação de alongamento máxima de 7%. O GG4 é um geocomposto produzido com geogrelha de fibra de vidro acoplada a um geotêxtil não tecido ultraleve, completamente revestidos com uma pintura betuminosa, que apresenta com resistência máxima à tração de 50 kN/m e uma deformação de alongamento máxima de 3% nas direções longitudinal e transversal. Por fim, o GG5 é um geocomposto que contém uma geogrelha de poliéster (PET) acoplada a um geotêxtil não tecido ultraleve, completamente revestido com uma pintura betuminosa e com resistência à tração de 50 kN/m e deformação de alongamento máxima de 12% nas direções longitudinal e transversal. As principais características dos cinco reforços geossintéticos estão resumidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características dos geossintéticos utilizados neste estudo.

Propriedades	GG1	GG2	GG3	GG4	GG5
Tipo	Geogrelha	Geocomposto	"Paving mat"	Geocomposto	Geocomposto
Polímero/Composição	Fibra de vidro	Fibra de vidro	Fibra de Vidro	Fibra de vidro	Poliéster
Abertura da malha (mm x mm)	20(L)x25(T)	31(L)x30(T)	-	31(L)x32(T)	33(L)x39(T)
Massa total por unidade de áreas (g/m ²) (Geogrelha + Geotêxtil)	412	382	145	326	272
Massa por unidade de área do geotêxtil (g/m ²)	-	168	-	27,5	57,7
Resistência à tração Longitudinal (kN/m) (ATM D667)	75	50	30	50	50
Resistência à tração transversal (kN/m) (ATM D667)	95	50	30	50	50
Alongamento máxima na Ruptura	<3%	<3%	<7%	<3%	<12%

3.2.3 Preparação da seção teste

A escolha das dimensões da seção teste foi planejada previamente para atender alguns requisitos, com destaque a capacidade dos equipamentos de pavimentação. A premissa inicial foi a de executar, de uma só vez, a faixa de pavimentação, sem emendas laterais. Em conjunto com a escolha de ensaiar ao menos 5 tipos de geossintéticos para reforçar 5 diferentes seções de pavimentos, além da seção controle, optou-se por uma largura total de 5,0 m devido esta ser a abertura máxima da mesa espalhadora de asfalto da Vibro Acabadora. As larguras de cada seção reforçada foram então definidas em 0,90 m, sendo o restante de 0,50 m largura para a seção controle.

Com relação ao comprimento da seção teste, devido a questões relacionadas ao volume de material CAUQ a ser utilizado e posteriormente armazenado, e pelas dimensões do local, optou-se por um comprimento de pista de 10,0 m, sendo este o suficiente para simular com qualidade uma pista real de pavimento reforçado durante o processo de fresagem. Figura 3.8 demonstra o layout seção teste.

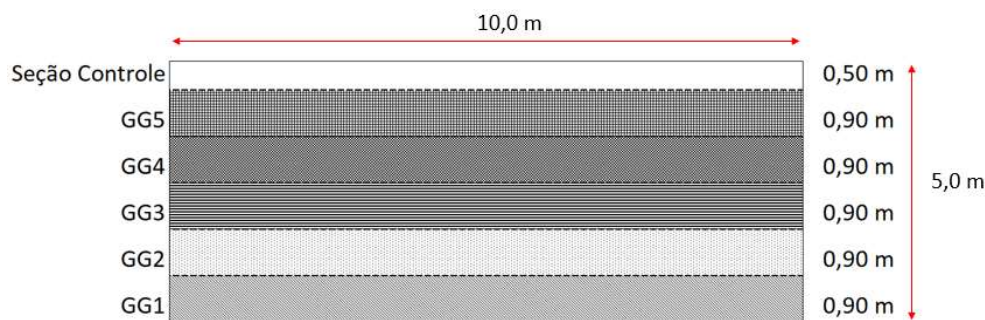


Figura 3.8 - Dimensões das seções reforçadas e da seção controle. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a escolha do local de construção da seção teste e a definição das especificações dos geossintéticos que irão compor os pavimentos reforçados, foi necessária a preparação do local. Como forma de simular uma situação real de revitalização de um pavimento e seguida da instalação de reforços geossintéticos, a área de pavimento existente passou por um processo de fresagem superficial, onde foi removida parte da camada de desgaste.

Ensaio de sondagem anteriores à construção da seção teste demonstraram que a estrutura do pavimento local era composta por um subleito compactado, uma camada de base de brita graduada simples com granulometria não especificada e uma camada betuminosa de 50 mm de espessura. De posse destes dados, optou-se pela remoção controlada de 20 mm da camada de desgaste, restando assim 30 mm remanescentes de camada betuminosa para a instalação dos geossintéticos. A fresagem do local foi executada por uma fresadora Wirtgen modelo W 200 com tambor de fresagem padrão e ponteiros de desgastes apropriadas para pavimentos flexíveis. A Figura 3.9 demonstra o processo de fresagem executado na região de construção da seção teste.



Figura 3.9 - Processo de fresagem da área da seção teste: com a utilização da Fresadora Wirtgen W200; Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a execução do processo de fresagem e da limpeza da área, realizada com vassoura mecânica acoplada em um equipamento conhecido como minicarregadeira, foi realizada uma caracterização quanto os sulcos remanescentes no pavimento. A distância lateral entre os sulcos de fresagem foi aferida com auxílio de uma régua padrão, demonstraram um afastamento variando entre 10 mm e 20 mm. Já a profundidade dos sulcos foi medida pelo procedimento normativo de aferição da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria ABNT NBR 16504 (2016). O resultado demonstrou uma profundidade média de 1,2 mm de espessura. A Figura 3.10 demonstra o processo de fresagem de preparação da área em execução e o aspecto final da camada asfáltica fresada.



Figura 3.10 - Aspecto do pavimento após a fresagem. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.2.4 Aplicação do ligante asfáltico e instalação dos reforços geossintéticos

Para a realização da pintura de ligação e posterior instalação dos reforços na camada asfáltica “a ser restaurada”, foi escolhida a emulsão asfáltica de ruptura rápida do tipo RR-2C, a qual é comumente utilizada em obras de pavimentação no estado da Bahia e em outros estados brasileiros. Ensaio de caracterização da emulsão asfáltica foram realizados, sendo apresentada viscosidade de Sybolt Furol a 50°C (ABNT NBR 14491, 2007) de 182,5 s, peneiração (0,84mm) de 0,03% em massa (ABNT NBR 14393, 2012) e teor de resíduo seco de 53% em massa (ABNT NBR 14376, 2019). A aplicação da pintura de ligação foi realizada pelo processo de aspersão por barra. A Figura 3.11 apresenta o sistema utilizado para controle e aplicação da taxa de ligante. Para a coleta do resultado da taxa residual de asfalto, bandejas metálicas com dimensões definidas e tara

conhecidas foram colocadas em 4 diferentes pontos ao longo da área da seção teste e utilizadas para a coleta da emulsão no momento da aplicação.



Figura 3.11 - Controle de taxa de emulsão: a) bandejas coletoras utilizadas no processo de aplicação da emulsão; b) bandejas coletoras de emulsão em utilização. Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Coletada as massas de emulsão asfáltica das bandejas coletoras, realizou-se uma média do residual de asfalto aplicado ao longo da área da seção teste. O valor residual de taxa de emulsão aplicado foi de $661,05\text{g/m}^2$. Realizada a aplicação do ligante asfáltico, foi respeitado o tempo de cura/rompimento da emulsão. Por se tratar de uma emulsão de ruptura rápida, pelas condições do ambiente quente e seco e da temperatura adequada de aplicação, entre que foi de 55°C conforme demonstrado na Figura 3.12 o tempo de espera para a cura não ultrapassou 10 min.



Figura 3.12 - Temperatura da emulsão asfáltica na aplicação. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a cura, realizou-se a instalação dos reforços geossintéticos conforme ilustrado na **Error! Reference source not found.** A instalação dos geossintéticos ocorreu de forma manual, com o auxílio da equipe local formada por funcionários experientes em pequenas obras de manutenção em pavimento. Vale ressaltar que antes dos trabalhos, esta equipe recebeu orientações acerca do processo de instalação para evitar contaminação na área imprimada com sujeiras proveniente das botas. Ainda, outro importante planejamento no processo de construção da seção teste que foram as pré-definições das localizações dos geossintéticos na seção teste. Este importante cuidado se deve ao fato de que após a realização da pavimentação o referencial visual deixa de existir. Por este motivo uma sinalização (pintura) demarcando a posição dos geossintéticos na seção teste foram realizadas. A Figura 3.13 mostra a detalhes da alocação dos geossintéticos na seção teste.



Figura 3.13 - Sinalização e alocação dos diferentes geossintéticos na seção teste.
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Outro cuidado realizado durante a instalação dos geossintéticos foi a de não sobrepor lateralmente um produto ao outro, de forma que o alinhamento fosse o mais perfeito possível. Após a aplicação da pavimentação uma marcação no pavimento em linhas delimitou a região de cada um dos diferentes geossintéticos facilitando a localização destes durante os trabalhos que no futuro viriam a acontecer para compor a pesquisa. A Figura 3.14 apresenta os detalhes do processo de instalação dos geossintéticos.



Figura 3.14 - Processo de instalação dos geossintéticos. a) Processo de instalação da GG1; b) finalização da instalação da GG1; c) Geossintéticos em processo de instalação; d) aspecto dos 5 diferentes geossintéticos após a instalação. Elaborado pelo autor (2024).

3.2.5 Aplicação da camada de revestimento asfáltico

Após a etapa de instalação dos geossintéticos, prosseguiu-se com a aplicação da camada de revestimento asfáltico superior. A mistura asfáltica CAUQ utilizado nesta etapa foi a correspondente a Faixa 3 da norma aeroportuária DIRENGE 04.05.610 - Diretoria de Engenharia Aeronáutica. A espessura de aplicação de CAUQ foi de 60 mm. Essa mistura asfáltica é a mesma utilizada em serviços de revitalização e restauração nos pavimentos do Aeroporto Internacional de Salvador. A faixa granulométrica superior, inferior e a faixa executada durante a construção da seção teste estão demonstradas na Tabela 3.2, abaixo, e na Figura 3.15.

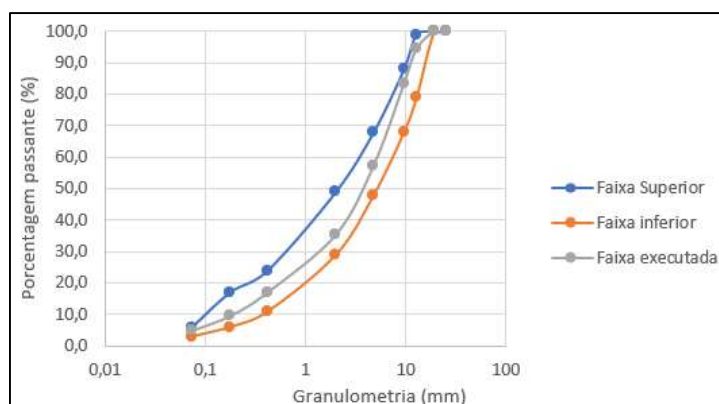


Figura 3.15 - Faixas granulométricas superior, inferior e resultado da mistura aplicada no presente estudo.
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 3.2 - Faixas granulométricas superior e inferior da mistura asfáltica CAUQ da seção teste.

Peneiras (mm)	Faixa Superior da Mistura (% passante)	Faixa inferior da mistura (% Passante)	Mistura aplicada no estudo (% Passante)
25,4	100,0	100,0	100
19,1	100,0	100,0	100
12,7	99,0	79,0	94,6
9,52	88,0	68,0	83,5
4,76	68,0	48,0	57,5
2	49,0	29,0	35,5
0,42	24,0	11,0	17,2
0,177	17,0	6,0	9,6
0,074	6,0	3,0	4,9

Nesta etapa, os principais cuidados se voltaram para o controle de qualidade do processo, sendo o primeiro deles o controle da temperatura de aplicação da mistura asfáltica. Para a aplicação e compactação do CAUQ, que deve estar em uma temperatura superior a 120°C, de acordo com os estudos realizados previamente. Sendo assim, o tempo decorrido entre a usinagem e a forma de armazenamento do material foram importantes para garantir a temperatura adequada durante a aplicação e o processo de compactação. A usinagem do material se deu aproximadamente 3 horas antes da aplicação, o que é adequado para este tipo de trabalho. O caminhão caçamba de transporte e descarga esteve com lona protetora durante o período de espera para a aplicação, o que corroborou para que a temperatura estivesse a aproximadamente 120° no processo de compactação no local, conforme demonstrado na Figura 3.16.



Figura 3.16 - Controle de qualidade no processo de aplicação da camada de revestimento: a) caminhão lonado antes do processo de aplicação; b) controle de temperatura. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os equipamentos utilizados para a aplicação continham calibragem e lastreamento específicos para a compactação do material. A vibroacabadora utilizada era uma Ammann modelo AFT 500, Rolo compactador Duplo tandem Ammann – Lastreado 11 ton e Rolo de pneus Ammann – Lastreado 12 ton. Os processos de rolagem e compactação desta etapa foram os mesmos utilizados em outros serviços de restauro de pavimento no aeroporto de Salvador, iniciando pela compactação com rolos de Pneus (de 12 a 15 passagens em todo o CAUQ) seguido da compactação com rolo duplo tandem (12 a 15 passagens em todo o CAUQ). O resultado foi um material com grau de compactação satisfatório, superior a 96% relativo ao projeto do CAUQ. A Figura 3.17 demonstra o processo construtivo e as camadas do pavimento após a construção da seção teste. A Figura 3.18 apresenta o aspecto final da seção teste para estudo da fresagem.



Figura 3.17 - Pista teste em processo de execução: a) Aplicação da mistura asfáltica; b) Compactação da mistura asfáltica. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).



Figura 3.18 - Aspecto final da seção teste para estudo da fresagem: (a) marcação das linhas (b) layout final das áreas de fresagem. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.3 A seção teste e o estudo da aderência de interface de Souza e Correia (2022)

Anteriormente a execução dos ensaios relacionados aos aspectos da fresagem e características de RAPs obtidos de pavimentos reforçados com geossintéticos, o presente autor desta dissertação e a orientadora Profa. Dra. Natália Correia realizaram um projeto de pesquisa relacionado à aderência de interface de pavimentos reforçados nesta mesma seção teste, cujos resultados podem ser observados nas publicações Correia et al. (2022) e Souza e Correia (2022). Na ocasião do estudo, corpos-de-prova foram extraídos em diferentes áreas da seção teste reforçados com diferentes taxas de emulsão aplicadas na seção teste. A extração dos corpos-de-prova foi realizada com o auxílio de uma extratora rotativa e os corpos-de-prova foram levados do Aeroporto de Salvador para o laboratório de Geotecnia e Geossintéticos da UFSCar.

Na sequência, foram realizados ensaios de cisalhamento de interface do tipo Leutner Shear Test (1979) para aferir a resistência da aderência na interface de ligação das camadas. Este ensaio consiste em aplicar uma taxa constante de deslocamento de cisalhamento na interface entre duas camadas de revestimento asfáltico. A análise dos resultados mostrou que, em média, os valores de resistência ao cisalhamento de interface foram impactados pela presença dos diferentes tipos de geossintéticos, em relação a camada controle. A Figura 3.19 demonstra os resultados do ensaio de Cisalhamento Leutner. Verificou-se que os geossintéticos GG3 e GG4 alcançaram, em média, resultados estatisticamente comparáveis aos da seção controle, e que as combinações reforçadas com GG3, GG4 e GG5 atingiram a força de cisalhamento de interface de 10 kN (ou 0.56 MPa), sugerida pela especificação alemã FGSV 770 (FGSV, 2013) para corpos-de-prova reforçados com geossintéticos.

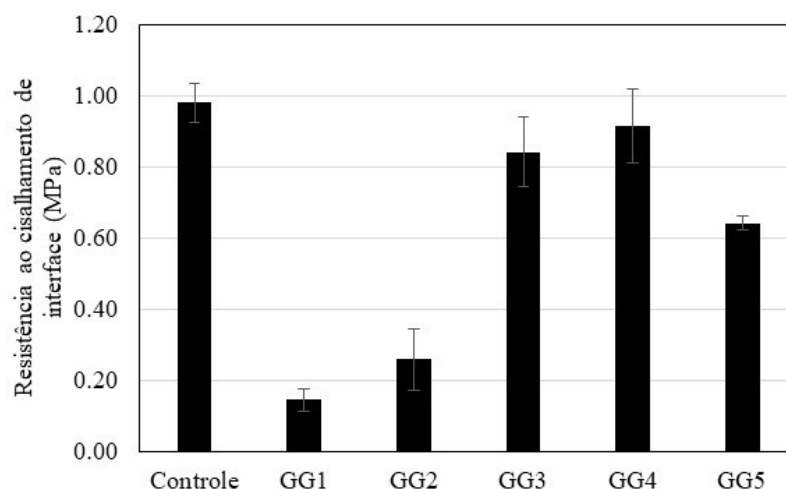


Figura 3.19 - Média dos resultados de resistência ao cisalhamento de interface realizados em amostras extraída da seção experimental. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Apenas os geossintéticos GG1 e o GG2, que são relativamente mais espessos, apresentaram, em média, valores baixo de aderência na interface. Quanto ao desempenho de aderência da GG1, a espessa geogrelha de fibra de vidro não deve ter tido boa acomodação com a camada fresada e sem a camada de tratamento prévia à instalação do reforço, resultando na perda de aderência mesmo com altas taxas de ligante (Correia et al. 2022). Já o geocomposto GG2, por ter um espesso geotêxtil não tecido (de elevada gramatura), não foi completamente impregnado com as taxas de emulsão utilizadas (devido a alta taxa de retenção asfáltico apresentada), o que também corroborou para valores de aderência significativamente inferiores em relação as demais seções reforçadas. Vale salientar ainda que esta ação realizada na seção teste não interferiu de forma significativa no objeto deste estudo. Entende-se ainda que devido as açõesde fresagem previas para estudo em toda a pista experimental construída, foi possível obter uma condição usual de uma obra real onde houve pontos de extração de corpos-de-prova para aferir a qualidade do serviço executado. Outros aspectos do estudo de aderência de interface podem ser encontrados em Souza e Correia (2022).

3.4 Fresagem da seção teste

Após a etapa de construção, em 30 de julho de 2022, foi realizada a fresagem dos pavimentos reforçados. O planejamento e execução deste trabalho passou por diversas etapas para que a simulação fosse a mais fidedigna possível a um processo de restauração real. Todos os testes

e cuidados prévios ao ensaio foram exaustivamente realizados e checados pois, por se tratar de um teste experimental único, sem possibilidade de reconstrução em curto ou médio prazo, nenhuma falha poderia ocorrer nesta etapa.

3.4.1 Teste e calibração do equipamento de fresagem

O processo de fresagem avaliado nesta pesquisa foi executado por um equipamento da marca Wirtgem, modelo W100, com potência de 173 hp. Este equipamento é capaz desbastar o pavimento a uma largura máxima de 100 cm e, a depender do material a ser desbastado, ele pode proporcionar um corte com profundidade de até 250 mm de acordo com o manual do equipamento (Wirtgem 2010).

O equipamento W100 utilizado contém, em seu tambor de fresagem, 92 dentes de corte com haste de 20mm. Para a realização do processo de fresagem, os dentes de corte desgastados foram substituídos por novos para que o equipamento estivesse em plenas condições de desbastar o pavimento reforçado sem a necessidade de nenhum esforço extra devido a falhas em alguma peça. A Figura 3.20 demonstra os detalhes do tambor de fresagem da W100 e dos dentes de corte da fresadora.



Figura 3.20 - Detalhes da fresadora W100: a) Aspectos do tambor de fresagem; b) Detalhe entre ponta de corte nova e desgasta; c) processo de substituição das pontas de corte; d) detalhe da nova ponta de corte.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para evitar o desgaste prematuro das pontas de corte e auxiliar no processo de desbaste, é comum que os equipamentos de fresagem contenham dispositivo aspersor de água no tambor de fresagem. Este dispositivo é também citado na pesquisa Damisch e Kirschner (1994), onde os autores relatam que em um dado momento desligaram a aspersão de água na fresagem. Na presente

pesquisa, com a intenção de simular a real condição de um processo de fresagem, a opção foi de manter o tempo todo a aspersão de água, assim como é feito em trabalhos de campo de larga escala. Por este motivo, testes prévios na fresadora foram realizados para verificar a efetividade do dispositivo aspersor de água. Para tal, um pequeno trecho fora da seção teste foi fresado, onde verificou-se que o volume de água era superior ao necessário. Uma calibragem neste dispositivo foi então realizada para que a quantidade de água fosse a adequada para o resfriamento, sem que houvesse empossamentos na região fresada. A Figura 3.21 demonstra o processo dos testes prévios realizados no local.



Figura 3.21 - Testes prévios para calibração do aspersor de água antes do processo de fresagem
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.4.2 Processo de fresagem

Uma vez calibrado o equipamento de fresagem, em uma pequena área de sobra da seção teste, fora da área de testes válidos, e com 1,0 m de largura e 5,0 m de comprimento, contendo geossintéticos, foi fresada para verificar se haveria algum distúrbio não previsto no processo de fresagem do estudo. A Figura 3.22 demonstra detalhes quanto área da pré fresagem da seção teste.

Também nesta etapa, foram conferidos detalhes quanto à rotação da esteira de transportadora responsável por coletar o RAP no caminhão caçamba. O detalhe quanto à carga do caminhão caçamba foi muito importante no planejamento experimental, uma vez que a segunda etapa da pesquisa consistia nos ensaios de reciclabilidade dos G-RAPs coletados no processo de fresagem, os quais não podiam, portanto, se misturar ou serem descartados indevidamente.



Figura 3.22 - Área teste de fresagem: a) área de pré-fresagem; b) fresagem após o teste
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.4.3 Métodos de verificação da fresabilidade dos pavimentos reforçados

Para promover uma verificação assertiva e um comparativo correto quanto à fresabilidade dos pavimentos reforçados, parâmetros usuais de produtividade e parâmetros de equipamentos de fresagem foram previamente definidos para serem aferidos durante os testes. De acordo com Zaumanis et al. (2021), em um pavimento homogêneo, como é o caso de nossa seção teste, os parâmetros que podem variar durante o processo de fresagem são a velocidade da fresadora, a velocidade de rotação do tambor de fresagem e a profundidade de fresagem. Assim, para se atingir a premissa de realizar um comparativo entre as diferentes seções reforçadas e a seção controle, a profundidade da fresagem e a rotação do tambor de fresagem foram mantidos fixos em um mesmo patamar. A espessura de fresagem foi mantida constante em 90 mm de profundidade, sendo 30 mm abaixo da posição do geossintético ou da interface da seção controle, conforme demonstrado na Figura 3.23.

Quanto à velocidade de rotação do tambor, esta foi mantida na 2ª Marcha do equipamento que condiz com a rotação máxima da fresadora. No manual da fresadora W1000L (Wirtgem 2010), é citada que a produtividade nestes parâmetros está estimada em 30,0 m lineares por minuto. Desta forma, a diferença de produtividade na fresagem entre os diferentes pavimentos é a velocidade linear do equipamento ou, neste caso, o tempo de fresagem da seção teste que contém 10,0 m de comprimento.



Figura 3.23 - Espessura de fresagem executada e posição do geossintético durante a pesquisa.
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Assim, para verificar a fresabilidade dos diferentes pavimentos reforçados, uma análise visual minuciosa foi realizada com o intuito de identificar fragmentos de geossintéticos enroscados no tambor de fresagem ou algum aspecto particular não convencional ao processo de fresagem. Possíveis materiais enroscados no equipamento podem interferir na capacidade de fresagem e, conseqüentemente, na eficiência do equipamento. Esta afirmação é realizada com base em condições experienciadas anteriormente no Aeroporto de Salvador, conforme demonstrado no capítulo 2 desta dissertação.

3.4.4 Coleta dos materiais fresados RAP-C e G-RAPs

Para viabilizar a segunda etapa do projeto de pesquisa que consiste nos ensaios de reciclabilidade dos agregados reciclados coletados (RAP e G-RAPs), a correta coleta e estocagem são muito importantes para garantir que se mantenham a pureza de cada tipo de material, bem como suas características singulares. Desta forma, realizou-se a coleta separadamente para cada uma das 5 seções reforçadas, além da seção controle. Outro aspecto importante foi a preservação das amostras no local de estocagem, garantindo que esta se mantivesse livre de umidade excessiva e da exposição solar. Caso contrário, é possível que os fragmentos de geossintéticos se deteriorem, distorcendo os resultados da pesquisa durante a etapa laboratorial. Assim, buscando mitigar estes riscos, baias de estocagem para as pilhas de RAP foram construídas em uma área coberta, no pátio do Aeroporto, com as devidas marcações para garantir a identificação das amostras. A Figura 3.24 demonstra o estoque das amostras de RAP-C e G-RAPs.



Figura 3.24 - Estocagem dos RAP-C e G-RAPs no Aeroporto: a) Processo de descarga; b) Vista da cobertura do estoque; c) Vista superior das pilhas de RAP; d) amostras cobertas para impedir ação das intempéries. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.5 Ensaios laboratoriais de caracterização física e mecânica dos G-RAPs

Uma vez coletados os cinco diferentes G-RAPs da seção teste e o RAP-C, iniciou-se a etapa de investigação laboratorial deste projeto de pesquisa. A primeira etapa dos ensaios consistiu em compreender e mensurar as características físicas G-RAPs, enquanto a segunda etapa se concentrou em analisar, por meio de ensaios mecânicos, o potencial de reciclabilidade através de sua incorporação na fabricação de novas misturas de CAUQ recicladas com estes materiais.

Os ensaios de caracterização física dos RAPs tiveram o intuito de fornecer quantitativos sobre a capacidade de fragmentação dos diferentes geossintéticos utilizados na seção teste. Em caso de baixa fragmentação, espera-se que o material apresente uma granulometria mais grosseira, sendo esperado observar fragmentos maiores de geossintéticos na composição do G-RAP. Já em materiais com alta capacidade de fragmentação, o aspecto granulométrico dos agregados fresados deve ser mais fino e os fragmentos de geossintéticos também menores ou mesmo em pó.

Outro aspecto relacionado à característica física destes materiais está no teor de betume encontrado em cada um dos cinco diferentes G-RAPs. A presença de geossintéticos pré-

impregnados com betume, cujo intuito é melhorar a aderência entre as camadas do pavimento, podem influenciar diretamente nos resultados do teor de betume dos G-RAP coletados e, conseqüentemente, nos resultados das misturas de CAUQs reciclados com estes materiais.

Para compor os estudos laboratoriais, esta segunda etapa do estudo avaliou os resultados de ensaios de resistência mecânica com corpos-de-prova moldados com a mistura asfáltica reciclada. As misturas de CAUQ reciclados são compostas com material britado virgem e uma porcentagem de RAP (G-RAP ou RAP-C). A escolha pela utilização do G-RAP em um processo de reciclagem à quente, foi impulsionada pelo crescente interesse da construção civil de infraestrutura e pela reciclagem neste processo.

Não por coincidência, o DNIT (2021) publicou a 033/2021 – ES, uma especificação de serviço que trata da especificação para reciclagem de revestimentos asfálticos em usinagem à quente com a utilização de RAP convencional. Nesta especificação de serviço, detalhes quanto aos procedimentos de adaptação da usina de asfalto e o controle de qualidade prévios necessário para a realização deste tipo de trabalho são abordados. No entanto, tal especificação técnica ainda não faz menção quanto à utilização de RAPs com fragmentos de geossintéticos nos processos de reciclagem de misturas asfálticas, apesar de suas possíveis características singulares causarem potencial interferência nos parâmetros mecânicos das misturas compactadas, quando comparados à CAUQs reciclados com materiais convencionais.

3.5.1 Análise granulométrica

A caracterização física das amostras de G-RAPs e RAP-C foi realizada por 3 processos distintos, sendo o primeiro deles a análise granulométrica dos materiais coletados, normatizada pela especificação do DNIT 412/2019 (2019). O ensaio consiste na coleta de material granular em uma quantidade de massa variável de acordo com o tamanho máximo dos agregados, conforme demonstrado na Tabela 3.3 - Massa de amostra para análise granulométrica.

No entanto, como os agregados de G-RAP e do RAP-C apresentavam-se com fragmentos superiores a 25 mm e fragmentos de geossintéticos, uma massa de 20 kg de cada amostra foi utilizada para os ensaios de análise granulométrica. Esta etapa da pesquisa foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC), na Universidade Federal de São Carlos, como ilustra a Figura 3.25.

Tabela 3.3 - Massa de amostra para análise granulométrica.

Tamanho máximo dos agregados (mm)	Massa mínima de Amostra para o ensaio (kg)
4,75	0,3 a 0,5
9,50	1,00
12,50	2,00
19,00	5,00
25,00	10,00



Figura 3.25 - Ensaio de peneiramento realizado para a determinação da granulometria nos G-RAPs e RAP-C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No presente estudo, a curva de distribuição granulométrica dos G-RAPs foi calculada considerando-se a fração de fragmentos de geossintéticos como agregados. Especificamente no caso de alguns G-RAPs, buscou-se separar os fragmentos de geossintéticos de tamanho maior do que 38,1 mm, da massa total de amostra, os quais foram posteriormente pesados e quantificados. Na sequência, no segundo processo de caracterização física dos G-RAPs, as amostras foram submetidas a coleta de fragmentos de geossintéticos para se determinar o teor de fibras presente na amostra. As amostras de G-RAP, especialmente de fibra de vidro, que eventualmente se fragmentarem em pó terão sua massa contabilizada no teor de finos (# 0,074).

3.5.2 Teor de fibras presentes nas amostras de G-RAP.

O segundo processo de classificação dos G-RAPs consistiu na análise do teor de fibras ou fragmentos presentes nas amostras. Para a quantificação do teor de fibras presente nas amostras de G-RAP, buscou-se estabelecer uma metodologia, uma vez que não existe normativa para esta análise. Assim, após o peneiramento, com o auxílio de uma pinça metálica, de forma manual, foi realizada a coleta de todos os fragmentos de geossintéticos visíveis em cada uma das peneiras utilizadas no processo de determinação da granulometria dos agregados. Os fragmentos de geossintéticos coletados em cada peneira tiveram a sua massa aferida em uma balança de precisão. O resultado do teor de geossintético (*TG*) presente nas amostras de G-RAP é expresso pela razão entre a massa de fragmentos de geossintéticos e a massa total da amostra residual na peneira, conforme apresentado na Equação 1:

$$TG (\%) = \frac{\text{Peso dos fragmentos}}{\text{Peso total da amostra na peneira}} \times 100 \quad (1)$$

Como este ensaio para a determinação do teor de geossintético presente nas amostras de G-RAPs não é normatizado, procedimentos para evitar distorções nos resultados foram adotados. Um dos procedimentos adotados foi o de não contabilizar grandes fragmentos de geossintéticos unidos (ou colados) a materiais britados. Foi possível observar esta situação principalmente em materiais cuja composição continha pré-impregnação com betume e presença de geotêxtil espesso. A Figura 3.26 demonstra uma amostra de fragmento de geossintético unido com material britado, de tamanho superior a 38,1 mm.



Figura 3.26 - Fragmento de geossintético fresado com presença de material britado. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.5.3 Determinação do teor de betume nas amostras de G-RAP

O terceiro processo de caracterização física dos G-RAPs e RAP-C consistiu na determinação do teor de betume que compõe as amostras fresadas, normatizado pela DNER 053/94 para misturas convencionais. Neste ensaio, as amostras de aproximadamente 1000 g são acondicionadas em um recipiente centrifugador com filtro separador de líquido e sólidos. As amostras acondicionadas dentro desta centrifuga são submetidas a sucessivas lavagens com solvente de betume, até que as britas que compõe a amostra estejam expostas sem qualquer vestígio de betume. O ensaio foi adaptado para amostras de G-RAP, não sendo observado nenhuma dificuldade na realização. O resultado do ensaio é expresso pela Equação 2:

$$P (\%) = \frac{\text{Peso do Betume}}{\text{Peso total da amostra}} \times 100 \quad (2)$$

3.6 Projeto de misturas asfálticas recicladas

A dosagem de uma mistura asfáltica envolve a seleção de um teor ótimo de ligante dentro de uma faixa granulométrica especificada por meio de processos experimentais. Para tanto, são necessários alguns procedimentos para a análise dos agregados e do material fresado visando o enquadramento da granulometria da nova mistura em uma das faixas requeridas nas especificações de projeto.

Nesta etapa do projeto de pesquisa, foi necessário determinar a faixa granulometria que se pretendia utilizar no estudo comparativo para compor as misturas recicladas com G-RAP e RAP-C. A faixa granulométrica escolhida para compor a nova mistura asfáltica foi a FAIXA C da norma DNIT 031/2006-ES, por ser comum na pavimentação rodoviária nacional para camada de rolamento. Nesta faixa, o tamanho máximo do agregado é de 19,0 mm. Assim, os resultados podem proporcionar uma fácil comparação entre os resultados de uma mistura asfáltica reciclada apenas com material virgem britado e uma mistura reciclada com G-RAP. A brita utilizada para compor a proporção de materia virgem é do tipo Granito-Gnaiss, cuja origem é da pedreira Mineração Montreal de Belo Horizonte – MG.

Determinada a faixa granulométrica da mistura asfáltica, fez-se necessário determinar qual a proporção entre agregado reciclado e agregado virgem que irão compor a mistura. Apesar da

especificação DNIT 033/2021 apresentar especificações de serviço para concreto asfáltico reciclado usinado à quente, esta não determina ou direciona uma proporção ideal de RAP e de material britado virgem a ser utilizado em uma mistura, citando apenas que os parâmetros gerais a serem seguidos na reciclagem de pavimentos asfálticos.

Neste sentido, com base nas recomendações da revisão de literatura apresentada no presente estudo, resultados promissores em misturas asfálticas recicladas com fragmentos de G-RAP foram obtidos em teores de até 30 de RAP%. Assim, com base nos estudos prévios e nas indicações da FHWA (2011), neste projeto de pesquisa, para compor as misturas de CAUQ reciclados determinou-se uma proporção máxima de 20% de G-RAPs e 80% de material britado virgem, sem adição de agente rejuvenecedor (AR). Esta abordagem foi escolhida para evitar novas variáveis as misturas recicladas, impossibilitando isolar o efeito isolado da presença dos fragmentos de geossintéticos.

As Figura 3.27 e 3.28 apresentam, respectivamente, um exemplo da granulometria da mistura composta por 20% de RAP controle e 80% de agregado virgem, e 20% de G-RAP1 e 80% de agregado virgem, enquadrados na Faixa C.

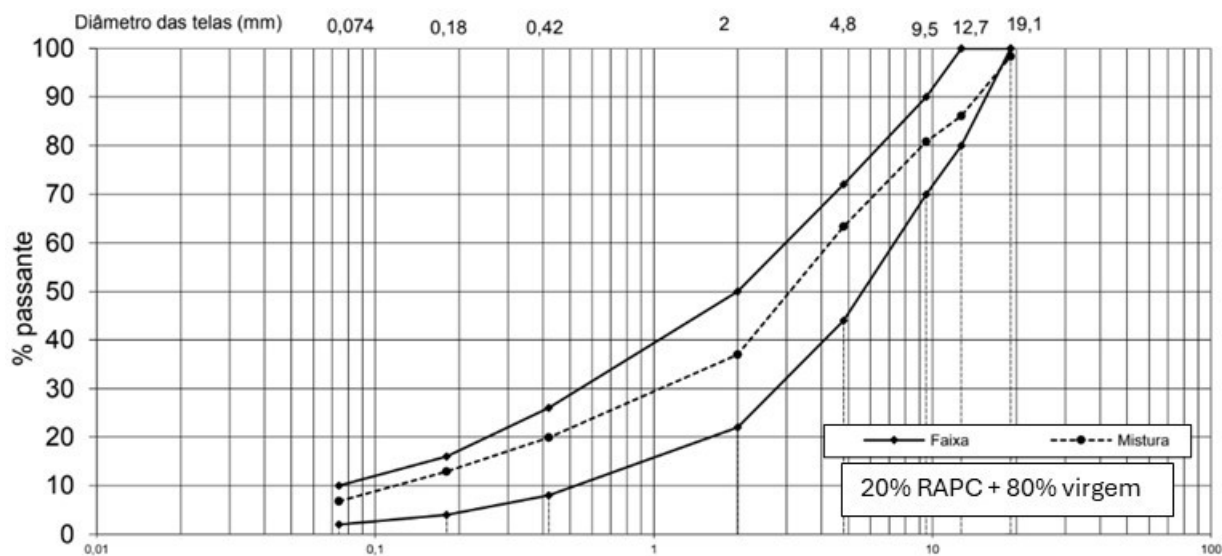


Figura 3.27 - Curva granulométrica da mistura composta por 20% de RAP controle e 80% de agregado virgem, enquadrada na Faixa C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

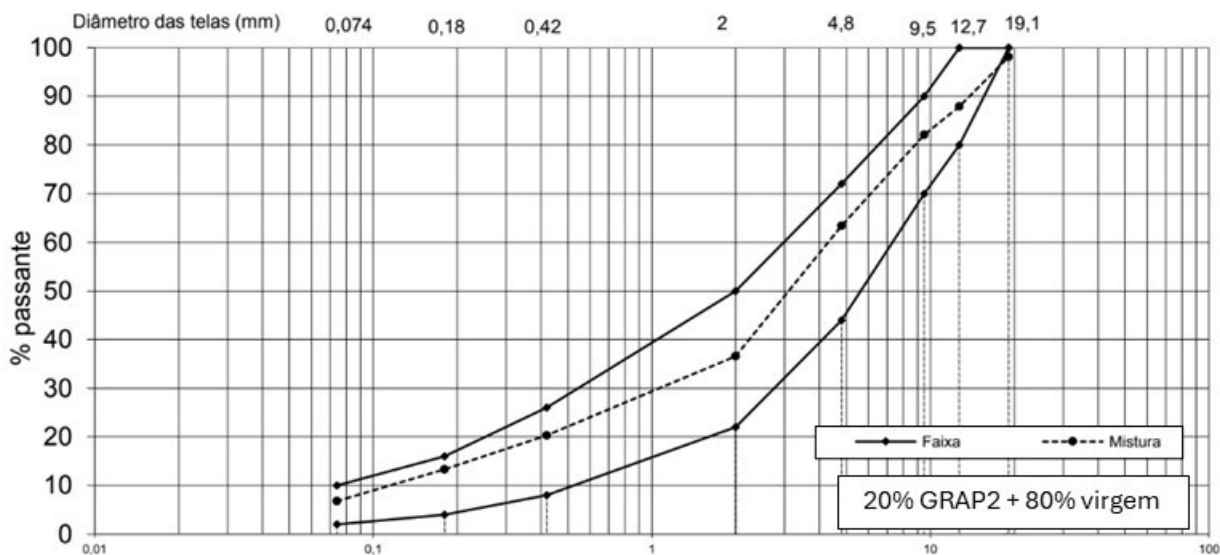


Figura 3.28 - Curva granulométrica da mistura composta por 20% de G-RAP1 e 80% de agregado virgem, enquadrada na Faixa C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na sequência do projeto de misturas asfálticas, deve-se determinar o teor ótimo de ligante asfáltico. Este teor ótimo de ligante é determinado com base no projeto e varia de acordo com o critério utilizado em sua avaliação. O teor de projeto é influenciado por parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura e temperatura à qual o pavimento será exposto, entre outros fatores.

No presente estudo, para se determinar os parâmetros ótimos de misturas asfálticas recicladas com G-RAP, foi escolhida a metodologia Marshall, descrito na norma DNER-ME 043/95. A metodologia Marshall é o método de dosagem mais utilizado no mundo até os dias de hoje (IPR, 2022). Embora o método Superpave seja reconhecido por representar mais fielmente as densidades do pavimento em campo, a equipe de pesquisa deste projeto não dispunha de equipamentos do tipo compactador giratório para conduzir as pesquisas.

A metodologia Marshall permite, através de ensaios de caracterização volumétrica e mecânica realizados em corpos-de-prova moldados em laboratório, que se determine qual o percentual de CAP ótimo para compor a mistura asfáltica. Nesta pesquisa, o CAP utilizado na moldagem dos corpos-de-prova foi o especificado como CAP 50/70, o qual apresentou uma penetração real de 56 decimímetros e densidade 1,006 a 24°C.

Para compor misturas densas, com alto volume de tráfego, foram adotados 75 golpes por face do corpo-de-prova de acordo com a norma DNER-ME 043/95. Assim, nesta pesquisa, a energia de compactação utilizada foi a de 75 golpes. Para compor esta etapa da pesquisa, os ensaios

Marshal, para cada um dos diferentes G-RAPs foram moldados 2 conjuntos de corpos-de-prova com 5 teores diferentes de CAP. Os teores de CAP utilizados nas moldagens dos corpos-de-prova foram de 4,75%, 5,0%, 5,25%, 5,5% e 5,75%. Ainda, foram moldados 2 conjuntos de 5 corpos-de-prova com os mesmos teores descritos para ensaiar os materiais controles CAUQ reciclado com RAP convencional da seção teste e o CAUQ convencional sem adição de RAP. Sendo assim, nesta etapa de trabalho foram moldados um total de 70 corpos-de-prova.

A Figura 3.29 abaixo demonstra a preparação dos corpos-de-prova em testes iniciais com RAP e o aspecto de um dos corpos-de-prova moldados no laboratório com adição de G-RAP. Os testes iniciais foram realizados no Laboratório da empresa Pavitec em Feira de Santana - BA. No entanto, os ensaios válidos finais foram realizados no Laboratório da SOLOCAP – Geotecnologia Rodoviária Ltda localizado em Belo Horizonte – MG.



Figura 3.29 - Preparação dos corpos-de-prova em testes iniciais com RAP e o aspecto de um dos corpos-de-prova moldados com adição de G-RAP. Fonte elaborado pelo autor (2024).

Posteriormente às moldagens dos corpos-de-prova nos teores descritos, conforme preconizados no procedimento Marshall, os ensaios para a determinação dos parâmetros

volumétricos e ensaios de resistência mecânica foram realizados para auxiliar na determinação do teor de CAP ótimo. Os parâmetros obtidos neste ensaio foram:

- Densidade Aparente em g/cm^3 que expressa a densidade do corpo-de-prova considerando os vazios da mistura;
- Densidade Teórica em g/cm^3 que demonstra a densidade do corpo-de-prova sem considerar os vazios da mistura;
- O Volume de Vazios (V_v) da mistura expresso em %;
- Vazios do agregado mineral (VAM) em %
- Relação de Betume Vazios (RBV) em %;
- Estabilidade Marshall, obtido através da resistência máxima à compressão suportada pelo corpo-de-prova antes da ruptura, expresso em kgf;
- Fluência, sendo o deslocamento máximo do corpo-de-prova quando atinge a ruptura durante o ensaio de determinação da estabilidade Marshall, expresso em mm;
- Resistência à tração na compressão diametral, sendo a resistência máxima a uma carga aplicada no corpo-de-prova lateralmente antes que este atinja a ruptura, expressa em MPa.

A Figura 3.30 demonstra o ensaio de resistência à tração (RT) por compressão diametral sendo realizado em amostra compactada de mistura reciclada com G-RAP. Para a determinação da resistência à tração das misturas asfálticas analisadas, procedeu-se conforme a metodologia descrita em DNIT 136/2018, sendo determinadas às resistências a tração para três corpos-de-prova, previamente confinados em uma câmara por um período não inferior a quatro horas, estabilizando a temperatura em 25°C . Após três determinações de RT para cada mistura estudada, foi considerado o valor médio para cada uma das determinações.

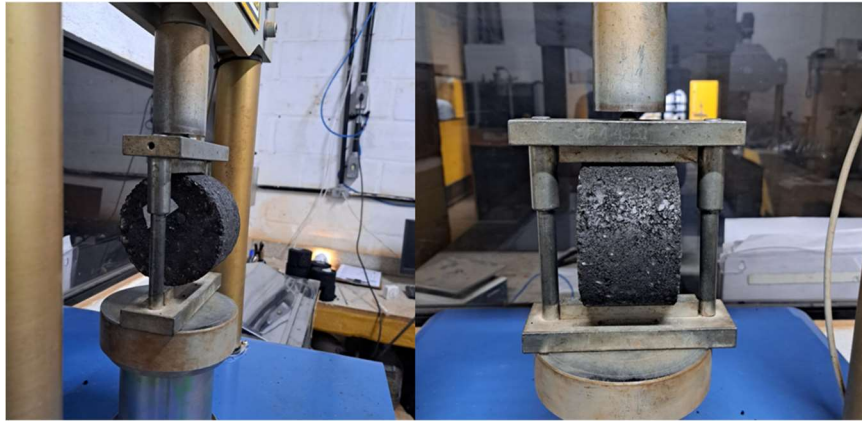


Figura 3.30 - Aspecto do corpo-de-prova moldado com adição de G-RAP. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a obtenção dos parâmetros volumétricos e mecânicos dos ensaios, determina-se o teor ótimo de asfalto das misturas. Foram analisados os diferentes teores de CAP em cada combinação de G-RAP, RAP convencional e CAUQ convencional (sem a adição de RAP). Esses resultados auxiliam na definição do teor ótimo de CAP, conseqüentemente, dos parâmetros ótimos da mistura.

Para este estudo, o parâmetro utilizado foi o VAM, onde se convencionou que o teor de CAP ótimo é aquele apresentado no ponto de inflexão da curva gráfica traçada através dos diferentes resultados dos diferentes teores de CAP utilizados em cada mistura, de acordo com Moreira (2009). A Figura 3.31 demonstra a determinação do teor de CAP ótimo obtido através desta metodologia.

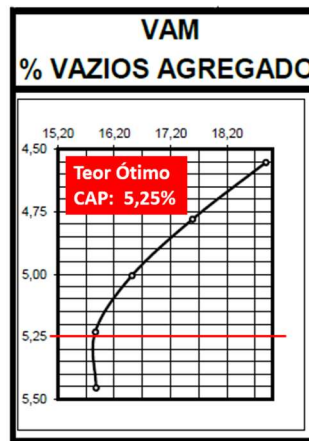


Figura 3.31 - Determinação do teor ótimo de CAP através dos resultados de VAM. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Determinado o teor ótimo de CAP, é realizada uma conferência nos demais parâmetros para analisar se os requisitos mínimos, estipulados em norma, foram obtidos. A mistura asfáltica poderá ser produzida, em escala, desde que estes parâmetros mínimos de projeto sejam atendidos. Na presente pesquisa, os parâmetros de projetos seguiram os preconizados na norma DNIT 031/2006 para utilização em camada de rolamento, conforme apresenta a Figura 3.32.

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65	0,65

Figura 3.32- Parâmetros estipulados para validação da mistura asfáltica reciclada à quente com adição de G-RAP. Fonte: Adaptada da DNIT 031/2006.

3.7 Determinação do módulo de resiliência de CAUQs reciclados com G-RAPs

As misturas asfálticas, assim como solo e outros materiais utilizados no processo de pavimentação rodoviária e aeroportuária, quando submetidos a uma carga axial aplicadas por pneus de veículos e aeronaves por exemplo, sofrem deformações em sua estrutura. Parte destas deformações não são regeneradas após a aplicação da carga e são consideradas deformações plásticas. No entanto, os materiais utilizados na pavimentação contêm a capacidade de sofrerem deformações elásticas, retornando ao seu estado inicial quando finalizada a aplicação da carga. A capacidade do material em sofrer deformações elásticas e retornar a sua condição inicial por diversas vezes é conhecida como módulo de resiliência (Balbo 2007).

O módulo de resiliência é definido como a relação entre a tensão e a deformação de tração gerada no ensaio de compressão diametral sob carga repetida. A metodologia escolhida para a determinação do módulo de resiliência para este projeto de pesquisa foi a laboratorial, baseada na norma DNIT 135/2018-ME, com ensaios realizados a temperatura de 25 °C. Nesta metodologia, corpos-de-prova com dimensões aproximadas ao da metodologia Marshall (65mm de altura e 100mm de diâmetro) são moldados e submetidos ao ensaio de módulo de resiliência. Para tanto,

inicialmente foram moldados corpos-de-prova com os teores ótimos de CAP, parâmetros volumétricos e mecânicos determinados no ensaio Marshall. O resultado do ensaio é expresso como a média dos valores obtidos nos 5 últimos pulsos de cargas, para 3 níveis de carga.

No presente estudo, as proporções de G-RAPs para a determinação do módulo de resiliência de misturas recicladas também foram de 20% de G-RAP e 80% de material virgem britado. Para o programa experimental de ensaios de módulo de resiliência, foram moldados, ao todo, moldados 42 corpos-de-prova, sendo 6 corpos-de-prova para cada um dos 5 diferentes G-RAPs, 6 corpos-de-prova para o RAP convencional (com teor de 20%) e 6 corpos-de-prova para o CAUQ convencional (sem a adição de RAP). A Figura 3.33 apresenta os corpos-de-prova sendo moldados no laboratório da SOLOCAP em MG.

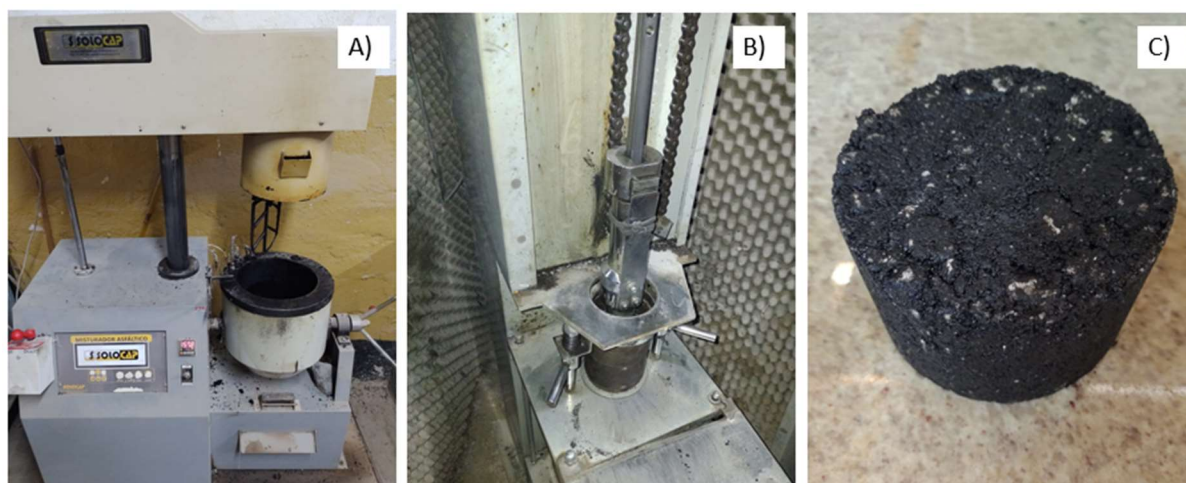


Figura 3.33 - Moldagem dos corpos-de-prova em laboratório: a) misturador automático de CAUQ; b) soquete automático e c) corpo-de-prova moldado ensaio. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a moldagem dos corpos-de-prova, estes foram acoplados a um equipamento capaz de aplicar cargas cíclicas verticais a uma frequência de 1hz, sendo 0,1s o pulso de carga e 0,9s o período de descanso. Sensores de medição de deslocamento linear LVTD (*Linear variable differential transformer*) foram instalados na lateral do corpo-de-prova para medir a sua deformação horizontal. A Figura 3.34 apresenta um corpo-de-prova de mistura asfáltica reciclada com G-RAP instalado em um equipamento para a determinação do módulo de resiliência, no Laboratório da SOLOCAP – Geotecnologia Rodoviária Ltda.

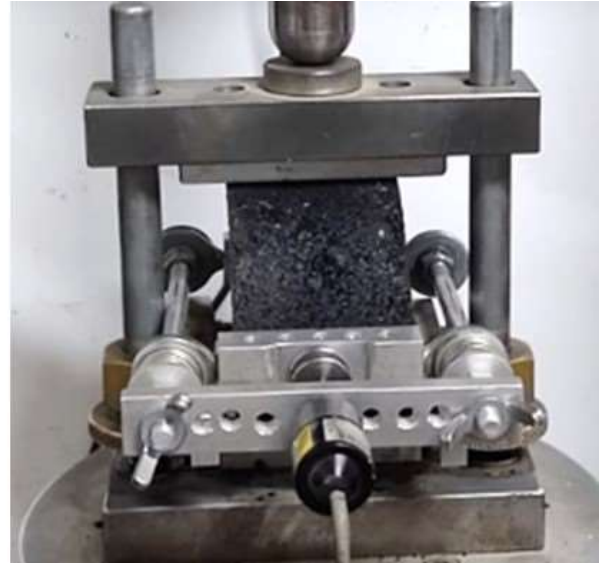


Figura 3.34 - Corpo-de-prova de mistura reciclada com G-RAP instalado no equipamento de medição do módulo de resiliência. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4 RESULTADOS

4.1 Fresagem de Pavimentos Reforçados com Geossintéticos

4.1.1 Aspectos da fresagem das seções reforçadas

A primeira etapa do estudo quanto à fresabilidade das seções reforçadas com geossintéticos foi a verificação quanto à ocorrência de eventos de perturbação no processo de fresagem e quanto à capacidade dos geossintéticos se fragmentarem durante o processo de fresagem. Para isso, todo o processo de fresagem foi monitorado e, ao final de cada seção reforçada, foi realizada uma análise visual em campo. A análise consistiu na verificação das condições da fresadora pela abertura da comporta do tambor de fresagem ao final dos 10,0 m de cada seção teste, de modo a identificar fragmentos de geossintéticos enroscados no tambor ou nos dentes de corte.

A primeira seção a ser apresentada será a do pavimento reforçado com o geossintético GG1, uma geogrelha de fibra de vidro (relativamente espessa), revestida com pintura polimérica adesiva. Ao final do processo de fresagem, uma análise visual na pista e no equipamento de fresagem foi realizada e não foram identificados fragmentos desta geogrelha enroscados no tambor ou nos dentes de corte. A Figura 4.1 demonstra a seção fresada e o aspecto íntegro e sem nenhum vestígio de fragmentos da geogrelha no tambor de fresagem após o trabalho. A Figura 4.2 demonstra o G-RAP1 sendo lançado para armazenamento no caminhão de coleta. Destaca-se que, nesta primeira seção, o serviço de fresagem não sofreu nenhum tipo de dificuldade operacional para ser produzido.

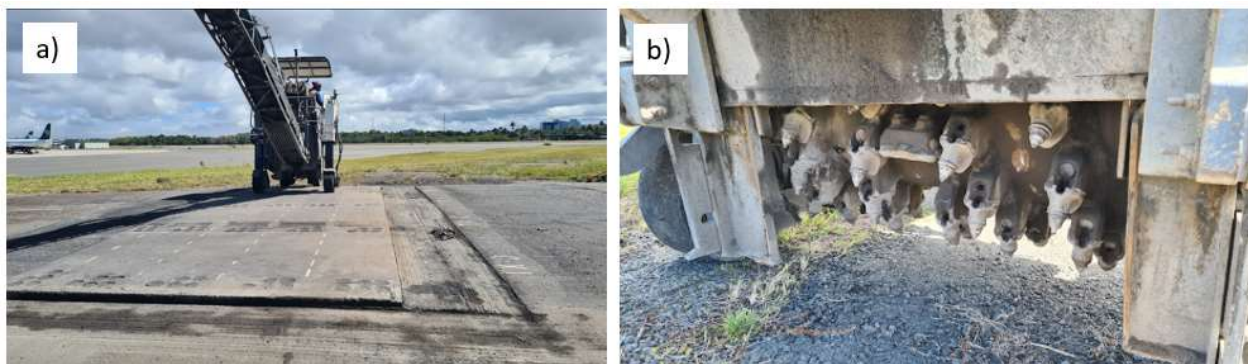


Figura 4.1 - Aspectos da fresagem da seção teste 1: a) seção teste após a fresagem e b) tambor de fresagem após, sem geossintético GG1. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

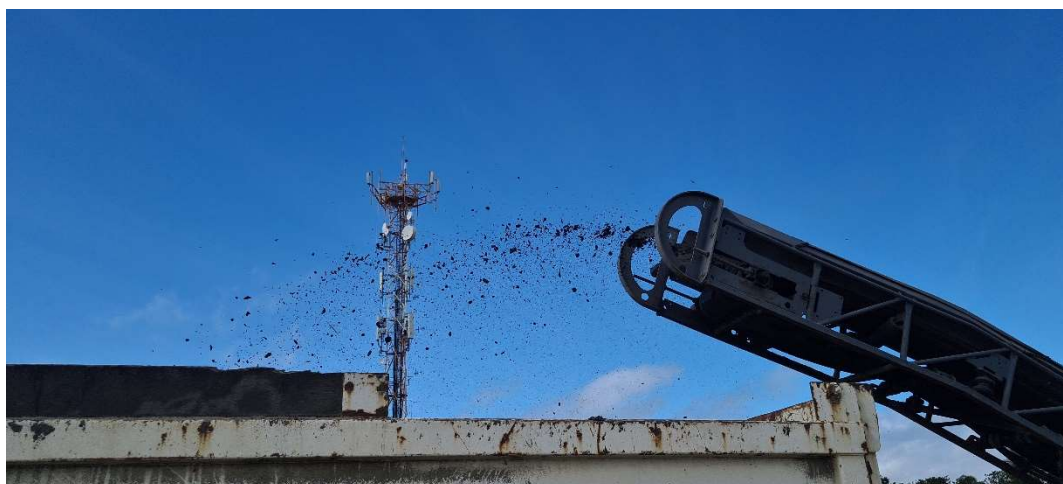


Figura 4.2 - G-RAP1 sendo lançado na caçamba do caminhão de coleta. Elaborado pelo autor (2024).

Os serviços de fresagem continuaram na sequência crescente de instalação dos geossintéticos nas seções teste. Nesse sentido, a segunda seção teste a ser fresada foi o pavimento reforçado com o geocomposto de reforço (geotêxtil espesso e geogrelha de fibra de vidro) GG2. A fresagem ocorreu normalmente, sem dificuldades operacionais e, após a realização do processo nesta seção teste, na inspeção visual não foram identificados fragmentos de geossintéticos da GG2 no tambor de fresagem. A Figura 4.3 abaixo ilustra a seção teste GG2 fresada e o aspecto do tambor de fresagem sem fragmentos de geossintéticos.



Figura 4.3 - Aspectos da fresagem da seção teste 2: a) seção teste após a fresagem e b) tambor de fresagem após, sem geossintético GG2. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A terceira seção teste, composta pelo geocomposto GG3 *Paving mat* de fibra de vidro, foi fresada na sequência, conforme pré-definição. A fresagem ocorreu normalmente, sem dificuldades

operacionais. Após a fresagem, a conferência visual no tambor de fresagem não identificou qualquer fragmento do geossintético GG3, conforme demonstra a Figura 4.4.



Figura 4.4 - Aspectos da fresagem da seção teste 3: a) seção teste após a fresagem e b) tambor de fresagem após, sem geossintético GG3. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A quarta seção teste, onde foi instalado o geocomposto para reforço GG4 (geotêxtil ultraleve + geogrelha de fibra de vidro) passou pelo processo de fresagem não demonstrando qualquer dificuldade operacional de fresagem. Ao final da fresagem, também não foi identificado qualquer fragmento do geossintético GG4 no tambor de fresagem, conforme mostra a Figura 4.5.



Figura 4.5 - Aspectos da fresagem da seção teste 4: a) seção teste após a fresagem e b) tambor de fresagem após, sem geossintético GG4. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A quinta seção teste, composta pelo geocomposto para reforço GG5 (geotêxtil ultraleve + geogrelha de poliéster) foi fresada na sequência e, durante este processo, foi possível perceber que filamentos de poliéster estavam enroscados no tambor. Tal condição foi identificada, pois alguns

dos filamentos de geogrelha estavam presentes na lateral da comporta de fresagem. Após a fresagem de toda a seção teste, que ocorreu sem paradas ou complicações, na verificação do tambor de fresagem, foi possível notar que parte dos filamentos da geogrelha de poliéster encontravam-se enroscados. A Figura 4.6 demonstra a fresagem da seção teste reforçada com a GG5 e o aspecto do tambor de fresagem com filamentos de poliéster enroscados no tambor de fresagem. Este fato corrobora com os relatos de dificuldades na fresagem também encontradas por Damish e Kirschiner (1994), assim como nos casos observados no Aeroporto Internacional de Salvador, onde a necessidade de reduzir a velocidade de fresagem para desenroscar filamentos da geogrelha de poliéster no tambor foram desafios destacados. Salienta-se ainda que, a seção teste realizada neste estudo, de 10,0 metros de comprimento, é relativamente pequena e, por esta razão, o fato de terem sido identificado filamentos da geogrelha de poliéster enroscados no tambor da fresadora ao final do processo de fresagem pode ser um ponto de atenção relevante para a produção dos serviços de fresagem em larga escala.



Figura 4.6 - Aspectos da fresagem da seção teste 5: a) seção teste após a fresagem e b) tambor de fresagem após, com fragmentos de geogrelha de poliéster GG5. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

De modo a resumir as observações relatadas neste estudo, a Tabela 4.1 – apresenta os resultados desta etapa do trabalho. Na tabela, onde não foram identificados fragmentos de geossintéticos no tambor de fresagem, lê-se “não” e onde lê-se “sim”, houve registro da presença de fragmentos de geossintéticos enroscados no tambor de fresagem. Além disso, registrou-se a necessidade de paradas durante o estudo de fresagem das seções.

Tabela 4.1 – Resultados do estudo da fresabilidade de geossintéticos desta pesquisa.

Identificação da seção	Tipo de Geossintético	Material	Material enroscado ao final da fresagem da seção teste	Necessidade de paradas
GG1	Geogrelha	Fibra de vidro	Não	Não
GG2	Geocomposto	Fibra de vidro	Não	Não
GG3	"Paving mat"	Fibra de Vidro	Não	Não
GG4	Geocomposto	Fibra de vidro	Não	Não
GG5	Geocomposto	Poliéster	Sim	Não
Controle	Sem reforço	-	-	Não

A Figura 4.7 demonstra mais detalhes dos filamentos e do tambor de fresagem ao final do processo realizado no pavimento reforçado com o GG5. Um ponto importante desta investigação está no fato de que, em 10,0 m de fresagem contínua da GG5, apenas uma pequena quantidade de filamentos de poliéster se enroscou no tambor de fresagem. Uma vez identificada a condição de geossintético enroscado no tambor de fresagem, o passo seguinte foi realizar a retirada cuidadosa deste material para análise. Não foi necessário cortar o material, mas apenas desenrolá-lo do tambor girando esta peça no sentido contrário ao do corte. Os filamentos foram então esticados no local para uma medição do comprimento.



Figura 4.7 - Filamentos de geogrelha de poliéster enroscados no tambor de fresagem.
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 4.8 demonstra que tais filamentos do geocomposto de poliéster variavam entre 0,90 m a 1,28 m de comprimento. Um resultado semelhante foi obtido na pesquisa de Damisch e Kirschner (1994) onde os comprimentos de filamentos do mesmo geocomposto de poliéster observados após a fresagem foram da ordem de 8 mm a 300 mm.

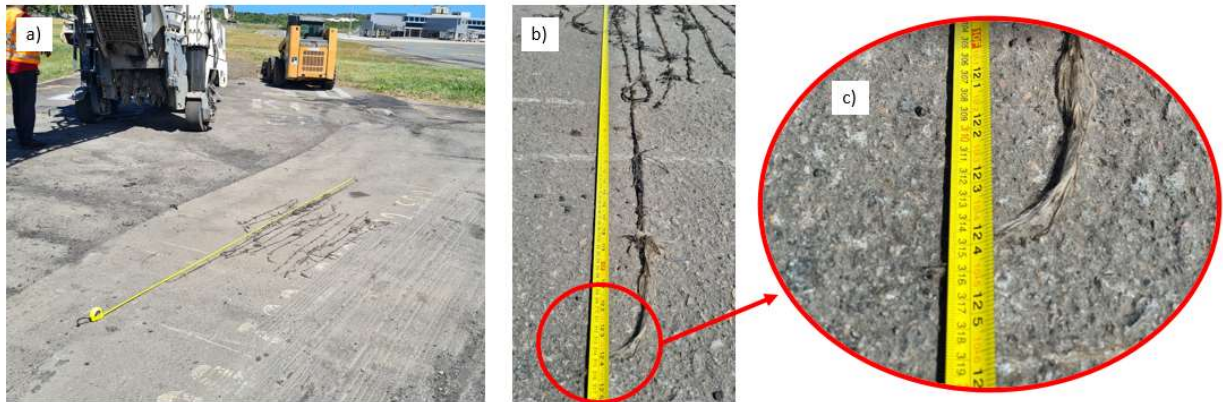


Figura 4.8 – Filamentos de geogrelha de poliéster GG5 após fresagem: a) material coletado; b) medição do maior filamento de geossintético; c) detalhe da medida. Fonte Elaborado pelo autor (2024).

Após a medida do comprimento dos filamentos de poliéster retirados do tambor de fresagem da seção da GG5, estes foram levados ao laboratório para serem pesados. Com este procedimento, foi possível estimar do percentil de fragmentos de geossintético que se enroscaram no tambor da fresadora, em relação a massa inicial de geossintéticos que foi instalada em toda a área da seção teste.

A Tabela 4.2, abaixo, demonstra a análise de percentil de fragmentos de geossintéticos que se enroscaram no tambor de fresagem. Conforme observado na Tabela 4.2, apenas 4,7% do geossintético de poliéster presente na seção teste se enroscou no tambor de fresagem. Esse resultado é considerado não significativo. É possível estimar que, em um trabalho de grande escala, considerando processos de fresagem contínua, a eficiência do equipamento pode diminuir, sendo necessário realizar paradas no equipamento para realizar a limpeza do tambor de fresagem.

Tabela 4.2 - Percentual de fragmentos de geossintéticos enroscado no tambor de fresagem.

Identificação da seção	Tipo de Geossintético	Área de Geossintético na seção teste (m ²)	Massa por unidade de área (g/m ²)	Massa total de geossintético na seção teste (g)	Massa de material enroscado no tambor (g)	Porcentagem de material enroscado no tambor
GG1	Fibra de vidro Geogrelha	9,0	412,0	3708,0	0,0	0,0%
GG2	Fibra de vidro Geocomposto	9,0	382,0	3438,0	0,0	0,0%
GG3	Fibra de Vidro "Paving mat"	9,0	145,0	1305,0	0,0	0,0%
GG4	Fibra de vidro Geocomposto	9,0	326,0	2934,0	0,0	0,0%
GG5	Poliéster Geocomposto	9,0	272,0	2448,0	115,0	4,7%

4.1.2 Eficiência do processo de fresagem.

A Tabela 4.3 demonstram os resultados dos tempos de fresagem para cada tipo de pavimento reforçado. São apresentados resultados quanto à velocidade atingida pelo equipamento durante o processo de fresagem, medidas em metros por minuto. Para a verificação da eficiência de fresagem nos pavimentos reforçados, foi usado como parâmetro o pavimento controle, cuja estrutura não continha reforço.

Tabela 4.3 - Resultado de velocidade e eficiência da fresagem de pavimentos reforçados e da seção controle.

Geossintético utilizado no reforço	Tipo de Material	Tempo Total (s)	Tempo Total (min e seg)	Velocidade (m/min)	Eficiência de fresagem
Controle	Sem Reforço	96,0	1:36	6,25	100%
GG1	Fibra de vidro Geogrelha	99,0	1:39	6,06	97%
GG2	Fibra de vidro Geocomposto	117,0	1:57	5,13	82%
GG3	Fibra de Vidro "Paving mat"	114,0	1:54	5,26	85%
GG4	Fibra de vidro Geocomposto	118,0	1:58	5,08	81%
GG5	Poliéster Geocomposto	145,0	2:26	4,14	66%

Os resultados apresentados na Tabela 4.3 indicam uma variação significativa no tempo de fresagem em função do tipo de geossintético utilizado nos revestimentos asfálticos durante a fresagem, em relação a seção controle. Na seção controle (sem reforço), o tempo de fresagem de 96,0 segundos. No caso da seção com o produto GG1 (geogrelha de fibra de vidro), o processo de fresagem levou 99,0 segundos, sendo apenas ligeiramente maior que a seção controle, sugerindo praticamente nenhuma resistência adicional ao processo de fresagem. No caso da GG2 (geocomposto de fibra de vidro), verificou-se um tempo de fresagem de 117,0 segundos, indicando um pequeno aumento na resistência de fresagem, possivelmente devido à combinação de materiais na estrutura do geocomposto (geotêxtil não tecido + geogrelha de fibra de vidro). Uma situação semelhante ocorreu com o GG4 (geocomposto de fibra de vidro), o qual apresentou similar tempo de fresagem (118,0 segundos) ao GG2, também atribuído a combinação de materiais na estrutura do geocomposto. Já o "*Paving mat*" (GG3) malha ultrafina de microfibras de vidro apresentou ligeira redução no tempo de fresagem (114,0 segundos) em relação aos geocompostos anteriores, também indicando uma resistência adicional na fresagem em relação à seção controle.

O geocomposto GG5 (geocomposto de poliéster) apresentou o maior tempo de fresagem, com 145,0 segundos, indicando uma resistência muito maior em comparação aos outros geossintéticos testados. Isso pode estar relacionado às propriedades específicas do poliéster em relação à fibra de vidro. Assim, pode-se verificar que a presença de geossintéticos nas misturas asfálticas aumentou o tempo de fresagem, sendo o geocomposto de poliéster o material que mais prolongou, comparativamente, o tempo de fresagem entre os produtos testados, seguido pelos produtos que contêm geotêxtil não tecido em sua estrutura.

De modo geral, é possível notar que todos os tempos de fresagem dos pavimentos reforçados foram superiores à fresagem da seção controle, demonstrando assim que há uma certa resistência ao corte provocada pela presença do reforço com geossintético entre as camadas de revestimento asfáltico. A consequência, como demonstrado na Tabela 4.3, é uma redução na eficiência do equipamento de fresagem quando comparada com a eficiência de fresagem da seção controle com os pavimentos reforçados.

A Figura 4.9 demonstra a diferença na eficiência de fresagem entre os pavimentos reforçados e o pavimento controle. Verifica-se a inferior eficiência de fresagem observada para o pavimento reforçado com o geossintético GG5, de poliéster, que apresentou resultado 20% inferior quando comparado à média de eficiência de fresagem dos outros pavimentos reforçados. Em

trabalhos de fresagem de grande escala, tais diferenças poderiam ser significativas em termos de tempo total prejudicando a produtividade do serviço. Esses resultados são importantes para considerar a eficiência e os custos associados à manutenção de pavimentos reforçados com diferentes tipos de geossintéticos.

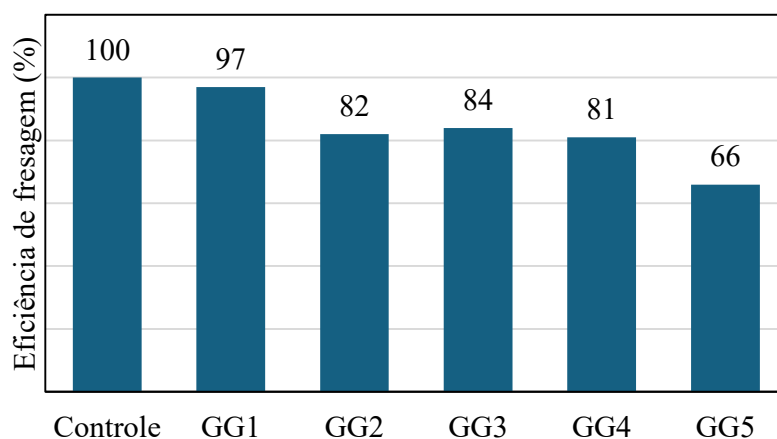


Figura 4.9 - Diferença na eficiência de fresagem entre os diferentes pavimentos reforçados durante o processo de fresagem. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.2 Características físicas dos G-RAPs e RAP-C

Uma vez realizada a fresagem dos pavimentos reforçados e da seção controle, foram coletados os RAPs dos 6 diferentes materiais (G-RAPs e RAP-C), os quais foram submetidos ao processo de caracterização das amostras em laboratório. Este processo é importante para entender qual o aspecto geral dos G-RAPs em comparação ao RAP-C, permitindo uma avaliação do potencial de reutilização e suas limitações.

4.2.1 Aspectos visuais dos G-RAPs

A Figura 4.10 apresenta os aspectos das pilhas de G-RAP1 e G-RAP2 logo após a coleta, em área de estocagem no Aeroporto Internacional de Salvador. O G-RAP1 (Figura 4.10a), que contém uma geogrelha de fibra de vidro, apresentou-se aspecto geral de um fresado convencional, porém com a presença muito nítida de filamentos de fibra de vidro. O G-RAP2 (Figura 4.10b), um

geocomposto mais espesso, apresentou-se com aspectos comuns de fresado de maior granulometria, e com a presença visível de fragmentos de geotêxtil e filamentos da geogrelha fibra de vidro.

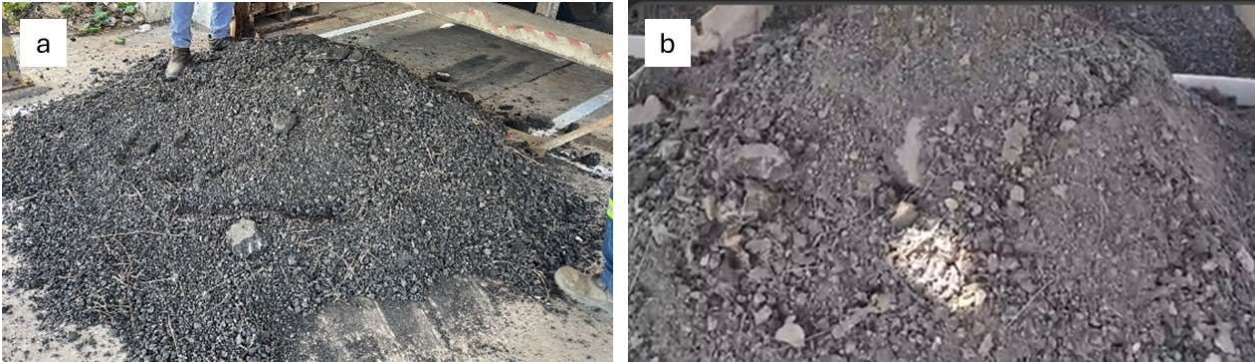


Figura 4.10 - Aspectos do G-RAP1 e G-RAP2. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 4.11 apresenta os aspectos dos fresados G-RAP3 e G-RAP4. O G-RAP3 (Figura 4.11a), um geocomposto relativamente fino de malha de fibra de vidro, apresentou aspecto de um fresado RAP comum de maior granulometria, embora contendo fragmentos da malha de fibra de vidro, porém menos perceptíveis. O G-RAP4 Figura 4.11b), um geocomposto de geogrelha de fibra de vidro e geotêxtil ultraleve, apresentou aspecto de fresado RAP de menor granulometria, com pequenos fragmentos de fibra de vidro (tais como fibras curtas), bem como visível presença de pó de fibra de vidro.

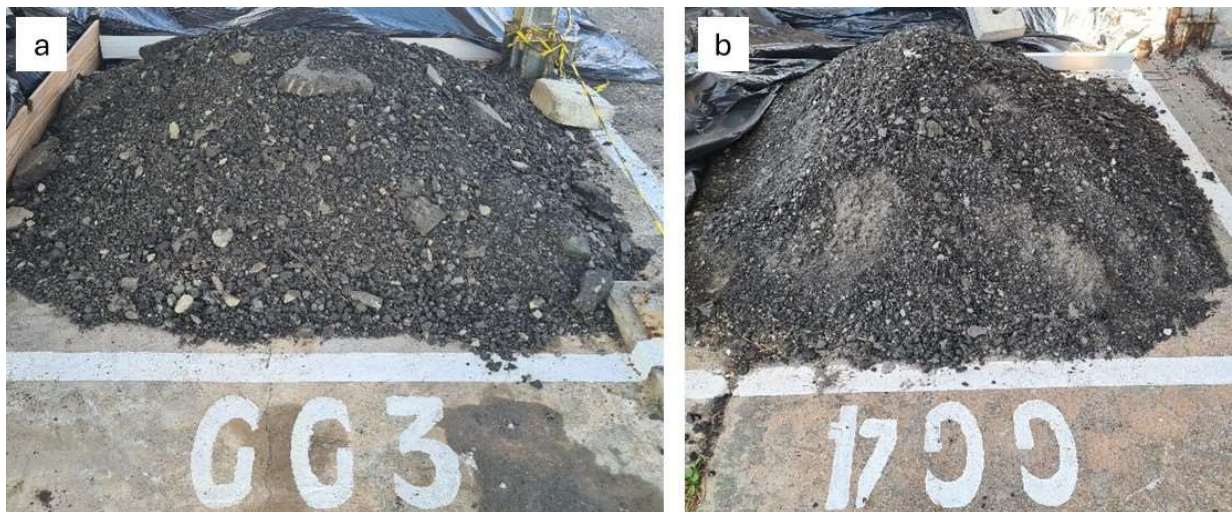


Figura 4.11 - Aspectos do G-RAP3 e G-RAP4. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 4.12 apresenta os aspectos do G-RAP5, o que qual contém fragmentos de geocomposto de poliéster. Este fresado apresentou aspecto de um fresado RAP de menor granulometria, tal como o G-RAP4, porém com curtos fragmentos de fibras de poliéster e poliéster moído.



Figura 4.12 - Aspectos do G-RAP5. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

De modo geral, a análise in loco demonstrou que os G-RAPs apresentam aspectos diferentes entre si, principalmente quanto ao tamanho dos fragmentos e características particulares da presença de cada geossintético fragmentado. Desta forma, conclui-se que o tipo de geossintético, o tamanho dos filamentos da geogrelha e rigidez do geossintético e a presença de geotêxtil fino ou espesso, são decisivos na qualidade do G-RAP produzido. A Figura 4.13 demonstra um comparativo dos G-RAPs com o RAP obtido na seção controle, depositados em bandejas.

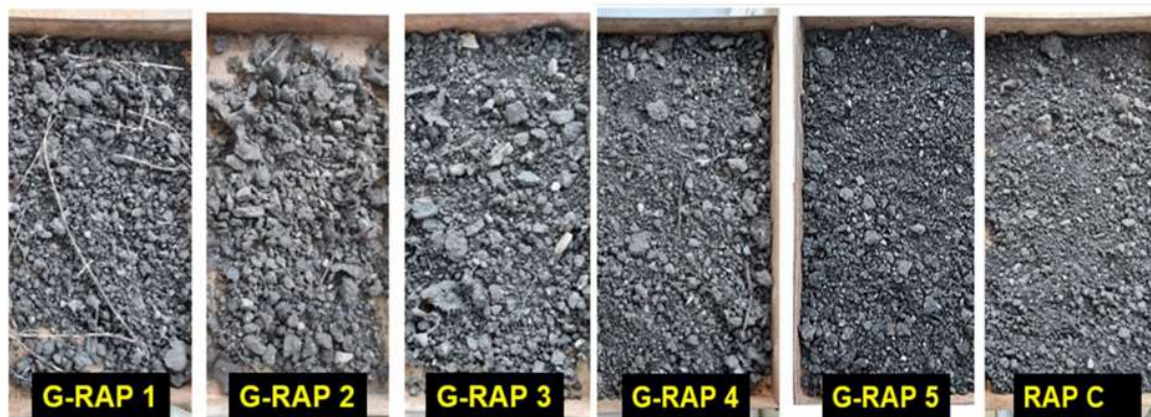


Figura 4.13 - Aspectos dos diferentes G-RAPs e comparativo com RAP controle, obtidos nesta pesquisa. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Especificamente no caso do GG5 (Figura 4.12), o geocomposto de poliéster, apesar de ter apresentado filamentos de geogrelha enroscados no tambor de fresagem, apresentou menores e menos perceptíveis fragmentos de geossintéticos do que os provenientes da geogrelha GG1 e dos demais geocompostos GG2 e GG3. Uma segunda diferença marcante entre estes G-RAPs está na presença de geotêxteis na composição do fresado. Nos casos do G-RAP2 e G-RAP3, foi possível visualizar fragmentos de geotêxtil. Quando os geossintéticos contêm este produto em sua confecção, pequenos pedaços de tecido são percebidos frente a presença de filamentos mais longos, como no caso da geogrelha. Esta característica também foi notada na pesquisa de Saxena et al. (2023), conforme demonstrado na Figura 4.14.



Figura 4.14 - Fragmentos de geotêxtil nos G-RAPs: a) Geotêxtil não tecido em amostra de Saxena et al. (2023) e b) G-RAP 3 oriundos desta pesquisa. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.2.2 Análise granulométrica dos G-RAPs.

A caracterização granulométrica dos G-RAPs e do RAP controle foi realizada seguindo a norma DNIT 412/2019 (2019), com aberturas de peneiras variando entre 50,0 mm (2 Polegadas) e 0,075 mm (# 200). Todos os 5 diferentes G-RAPs foram submetidos, isoladamente, a este processo, bem como o RAP controle. Os resultados da caracterização granulométrica podem ser observados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Caracterização granulométrica dos 5 diferentes G-RAPs e RAP controle.

Abertura da Malha (mm)	% Passando (G-RAP 1)	% Passando (G-RAP 2)	% Passando (G-RAP 3)	% Passando (G-RAP 4)	% Passando (G-RAP 5)	% Passando (RAP-C)
38,1	98,4%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
25,4	97,2%	97,2%	99,5%	97,6%	100,0%	99,0%
19,1	94,7%	92,7%	96,1%	96,3%	98,7%	97,3%
12,7	81,9%	76,0%	84,0%	88,3%	91,9%	91,7%
9,52	69,5%	64,6%	73,7%	79,1%	82,5%	84,5%
4,76	45,1%	44,1%	47,2%	56,8%	59,4%	59,7%
2,00	15,9%	23,7%	20,2%	25,5%	27,8%	29,7%
1,19	8,5%	16,5%	12,9%	15,8%	16,0%	14,8%
0,59	2,9%	9,4%	6,3%	7,5%	6,1%	6,4%
0,25	0,7%	4,1%	2,4%	2,2%	1,9%	2,5%
0,149	0,1%	1,8%	1,0%	0,4%	0,8%	1,4%
0,074	0,0%	1,2%	0,5%	0,0%	0,4%	0,0%
prato	0	0,6%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%

É possível notar que não houve diferenças significativas entre as amostras de RAP-C e as amostras de G-RAPs. Mesmo entre amostras de G-RAP, a distribuição granulométrica se mostra bastante similar. A Figura 4.15 apresenta um comparativo das curvas granulométricas dos diferentes G-RAPs e do RAP-C. 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 potencial de reuso, assim como o RAP convencional.

Outro ponto relevante desta análise é que mesmo com a diferença de aderência entre as camadas, que foi observada em campo em Souza e Correia (2023), a fragmentação dos pavimentos ocorreu de forma similar, mostrando uma homogeneidade no processo de fresagem, que pode ser interpretado como uma validação para os estudos.

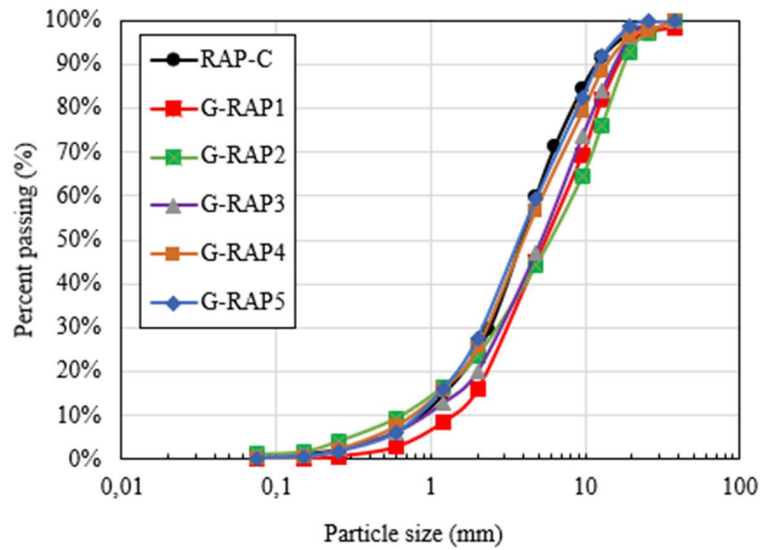


Figura 4.15 - Curva granulométrica dos G-RAPs e do RAP-C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 4.16 apresenta um aspecto dos agregados e fibras de geossintéticos dos G-RAPs e RAP-C. De acordo com as curvas granulométricas apresentadas na Figura 4.16, é possível verificar novamente que as diferenças entre tamanho de fresado, em relação ao RAP controle, foram pouco significativas entre amostras, com exceção do G-RAP2 que apresentou agregados de maior tamanho.

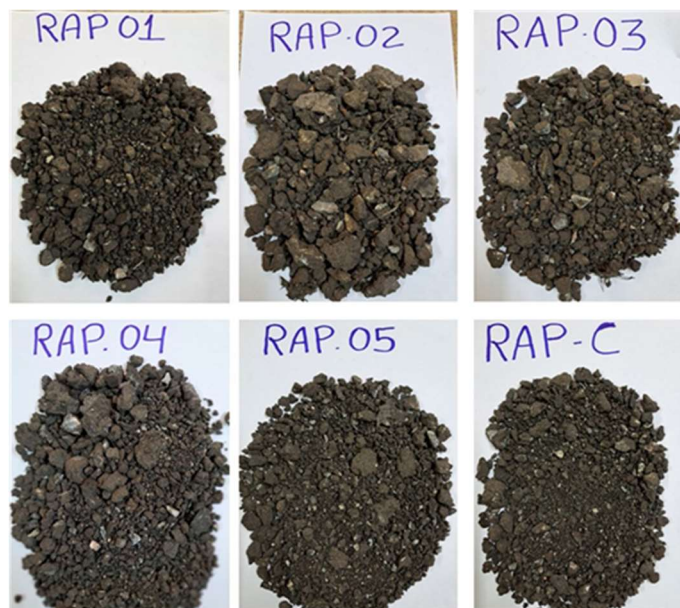


Figura 4.16 - Aspectos dos agregados nos G-RAPs e RAP-C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

De acordo com as curvas granulométricas apresentadas na Figura 4.17, as maiores variações ocorreram nos fragmentos de 0,25 a 12,7 mm, os quais foram verificados com uma nova bateria de ensaios de peneiramento para análises do aspecto do material retido e da quantificação de fibras nos RAPs. A Figura 4.17 apresenta as proporções de diferentes G-RAPS de tamanho máximo de 12,7 mm, observados em cada peneira. Para esta análises, amostras de cerca de 2,0 kg foram utilizadas.

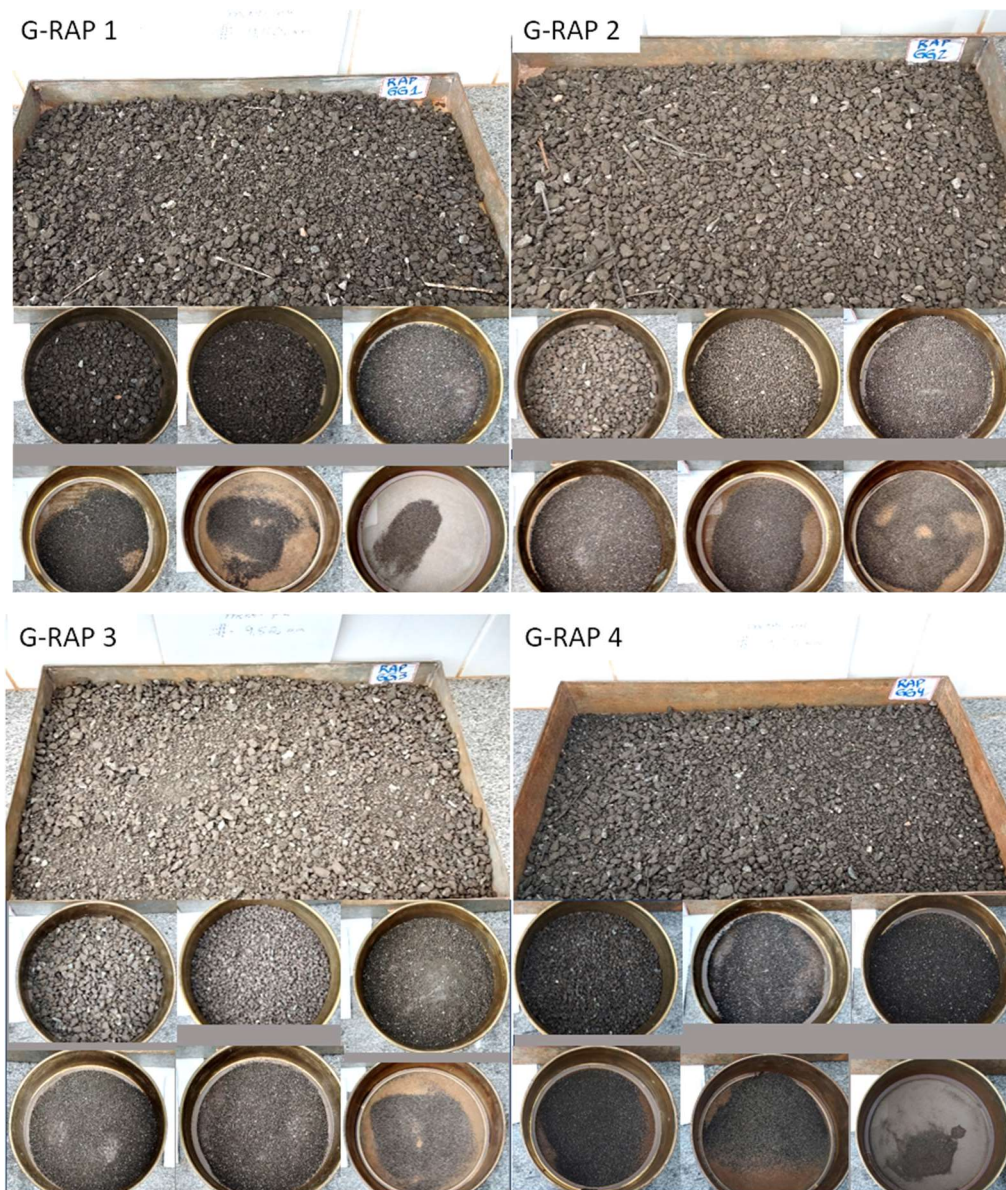




Figura 4.17 - Proporções de diferentes G-RAPS coletados nas peneiras. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Conforme esperado, notou-se a diferença de tamanho de agregados fresados e de fragmentos de geossintéticos, bem como presença de pó de fibra de vidro ou de poliéster na #200 ou no prato. Após este ensaios, foi realizada a análise do teor de fibras encontrados em cada G-RAP.

4.2.3 Teor de fibras presente nos G-RAPs

Nesta etapa do projeto, foi aferido o teor de fibras presentes nas amostras peneiradas de G-RAPs. Com o auxílio de uma pinça metálica, o operador realizou a coleta de todos os fragmentos de geossintéticos maiores (visíveis) e possíveis de serem coletados. Alguns fragmentos de geossintéticos não puderam ser coletados devido ao seu pequeno tamanho, inviabilizando a sua separação dos outros fragmentos menores gerados no processo de fresagem, como o pó de pedra. As fibras coletadas nas amostras de G-RAP, retidas em cada peneira, foram pesadas em balança de precisão 0,001 g, para a determinação do teor de fibras quantificáveis nas amostras de G-RAP.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados dos teores de fibra presentes nas amostras, por kg, seguida de correlações quanto aos resultados de capacidade de fragmentação. Nesta etapa, avaliou-se o teor de fibras teórico nas amostras (g/kg), ou seja, o esperado com relação ao peso de

geossintético instalado na seção, bem como o teor de fibras aparente presente nas amostras (ou seja, o teor quantificável) e a capacidade de micro-fragmentação dos geossintéticos.

Tabela 4.5 - Teor de fibras presente nas amostras de G-RAP abaixo de 12,7 mm.

	G-RAP 1	G-RAP 2	G-RAP 3	G-RAP 4	G-RAP 5
Massa da amostra dos G-RAP (kg)	2,523	2,763	2,313	2,080	1,872
Massa de geossintético (fibras) coletado nas peneiras (g)	0,350	0,3066	0,2097	0,625	0,2157
Teor de fibras aparente nas amostras (g/kg)	0,14	0,31	0,21	0,30	0,20
Teor de fibras teórico nas amostras (g/kg)	1,88	1,74	0,66	1,49	1,24
Teor de fibras aparente nas amostras (%)	7,37%	17,75%	31,67%	20,18%	16,49%
Capacidade de micro-fragmentação dos geossintéticos (%)	92,6%	82,3%	68,3%	79,8%	83,5%

O teor de fibras teórico em cada amostra foi calculado com base na gramatura (massa por unidade de área) dos geossintéticos e na área instalada na seção teste, ou seja, podendo se obter fielmente a massa de geossintéticos presente em cada seção.

De acordo com os resultados, verificou-se que, o material G-RAP1 foi o fresado que apresentou o menor teor de fibras aparente, ou seja 0,14g/kg de amostra ou 7,37% em peso coletados na peneira abaixo de 12,7 mm. A Figura 4.18 abaixo demonstra os aspectos dos fragmentos de maior tamanho visualizados na amostra de G-RAP1. Apesar deste resultado, destaca-se o fato de que haver presença de grandes filamentos de fibra de vidro neste G-RAP. Esta percepção visual é corroborada pelo fato de a maioria das fibras coletadas neste ensaio se apresentaram nas peneiras de tamanho 12,7mm, 9,52mm e 4,76m. Nas peneiras com aberturas de malhas inferiores, não foi possível coletar amostras de fibra, notando-se a presença de pó de fibra de vidro.

A análise quanto ao teor de fibras no G-RAP 1 demonstrou que, apesar da presença de fragmentos visíveis antes do peneiramento, 92,6% da massa de geossintético teórico presente na amostra de G-RAP (< 9,52 mm) se fragmentou em pequenos pedaços imperceptíveis a olho nú ou não coletáveis com a pinça, para a massa inicial de G-RAP considerada. Esta análise demonstra a

capacidade do material de se microfragmentar durante o processo de fresagem, podendo ser usado para compor novas misturas de CAUQ.



Figura 4.18 - Fragmentos de geossintéticos coletados no G-RAP 1. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nas análises do teor de fibras presente na amostra de G-RAP ($< 9,52$ mm), verificou-se que o G-RAP2 apresentou um teor de fibras de 17,75% ou 0,31g/kg de amostra. No caso deste G-RAP, foram verificados fragmentos de geotêxtil espesso aderidos aos agregados. Neste caso, o resultado do teor de fibra poderia ter sido maior, uma vez que os fragmentos de fibras coletados que continham fragmentos de fresado não foram considerados para compor o resultado de teor de geossintéticos fragmentado. A Figura 4.19 demonstra o aspecto do G-RAP2. Apesar dos resíduos, a capacidade de fragmentação do G-RAP 2 (82,3%) pode ser considerada boa, e a não presença de filamentos de geossintéticos enroscados no tambor de fresagem pode ser considerado um indício desta afirmação.



Figura 4.19 - Fragmentos de geossintéticos coletados no G-RAP2. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O teore de fibras do G-RAP 3, presente na amostra de G-RAP ($< 9,52$ mm), foi de 31,67%, sendo o maior teor de fibras visíveis dentre as 5 amostras de G-RAP avaliadas neste estudo. Este

material demonstrou uma fragmentação singular, com a maioria das fibras se apresentando em pedaços de tamanhos variados de fragmentos da malha de fibra de vidro. A Figura 4.20 ilustra o aspecto da fragmentação do G-RAP3. Uma característica marcante em G-RAPs com alto teor de geossintético é que podemos afirmar que a sua micro-fragmentação pode ser considerada baixa, uma vez que foi possível, coletar a olho nú, uma grande quantidade de fragmentos de geossintéticos. Neste caso, esta afirmação é corroborada tanto pelas características dos fragmentos quanto pelo teor de fibras quantificáveis na amostra de G-RAP ($< 9,52$ mm). A capacidade de micro-fragmentação do G-RAP3 foi de 68,3%.



Figura 4.20 - Fragmentos de geossintéticos coletados G-RAP 3. Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O G-RAP 4 apresentou um teor de fibras aparente nas amostras de G-RAP de 20,18% para amostra considerada de tamanho inferior a 9,52 mm. Fragmentos desse geossintético foram verificadas em peneiras do tramo grosso ($>12,7$ mm) e fino, mostrando assim que este material se fragmentou em diversos tamanhos, tanto em pedaços, por serem constituídos de geotêxtil leve, quanto em filamentos de fibra de vidro (com aspecto de fibra cortada). A Figura 4.21 apresenta aspectos dos variados tipos de fibras fragmentadas presentes na amostra de G-RAP 4. Nota-se pela imagem comparativa da peneira, que os agregados se fragmentaram em tamanhos menores, em comparação aos do G-RAP2 e G-RAP3, os quais também continham geotêxtil. Esta análise demonstra que a capacidade de microfragmentação do material coletado ($<9,52$ mm) durante o processo de fresagem foi de 79,8%.

Na forma com os filamentos do GG4 se apresentaram, é possível afirmar que a micro fragmentação deste material foi intermediária, pois um alto teor de fibras pôde ser coletado durante o ensaio em peneiras maiores. No entanto, o GG4 não se enroscou no tambor de fresagem,

mostrando que esta característica não afetou a sua fresabilidade e muito material se fragmentou em pó, como verificado na Figura 4.17.



Figura 4.21 - Fragmentos de geossintéticos coletados G-RAP 4: a) Fibras entre 15 cm e 1 cm; b) Pedacos de fibras e geotêxtis; c) Fibras de até 25 cm e pedaços de geotêxtis. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O teor de fibras quantificável (visível) no G-RAP5, em amostras menores do que 9,52 mm foi aferido em 16,5%. Seguindo o procedimento adotado na pesquisa e pelo resultado apresentado durante o ensaio de fresagem, esperava-se um maior teor de fibras quantificáveis, já que o GG5 apresentou fragmentos enroscados no tambor de fresagem. No entanto, este G-RAP apresentou alta capacidade de fragmentação (83,5%) abaixo de 9,52 mm, com muitos fragmentos em pó de poliéster. A Figura 4.22 apresenta o aspecto das fibras curtas coletadas em laboratório, comparadas as coletas em campo.

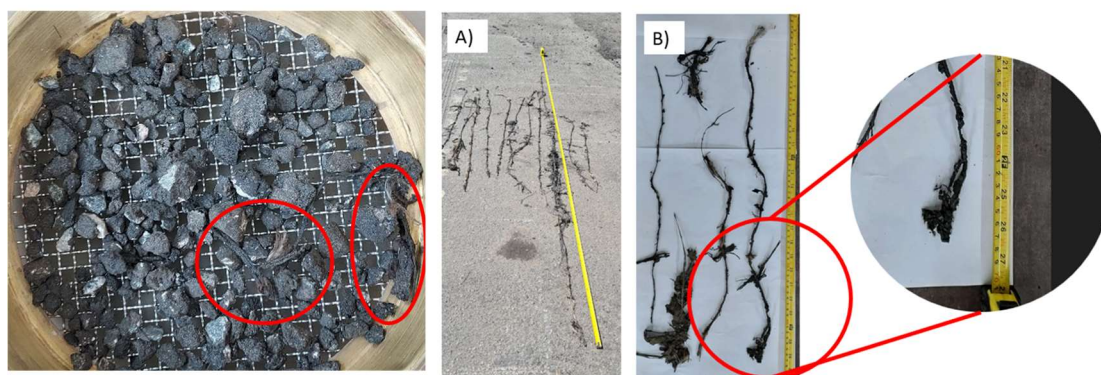


Figura 4.22 - Fragmentos de geossintéticos coletados no G-RAP 5: a) Fibras coletadas em campo; b) fibras curtas coletadas em laboratório. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.2.4 Teor de betume presente nas amostras de G-RAP

Para compor o projeto de pesquisa e para compreender as influências das amostras de G-RAP em processos de reciclagens de CAUQs, todas as características dos fresados avaliados neste estudo foram verificadas. Uma das características mais importantes é o teor de betume presente nas amostras. Na Figura 4.23 estão apresentados os agregados após o ensaio de teor de extração de betume nas amostras de G-RAP (GG1 a GG5) e na amostra controle (GG6). Nota-se pouca presença de filamentos de geossintéticos, com exceção da amostra GG2.

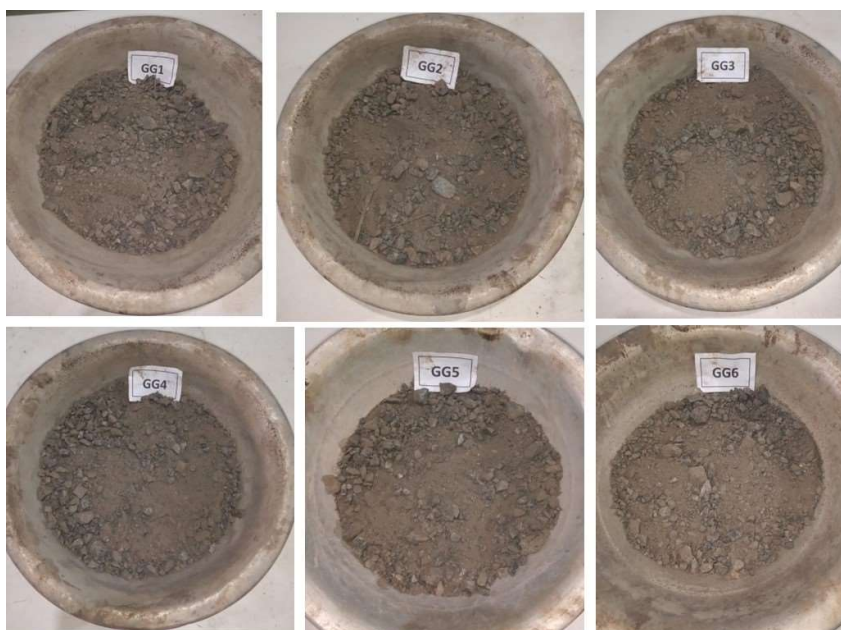


Figura 4.23 - Ensaio de extração de teor de betume das amostras de G-RAPs e RAP-C.
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 4.24 apresenta o resultado do teor de betume presente nas amostras de G-RAP e RAP-C. Vale ressaltar que a mistura de CAUQ utilizada no processo construtivo da seção teste, que originou o RAP-C, apresentou em sua composição o teor (teórico) de 4,8% de CAP. No presente estudo, pós-fresagem, o resultado obtido para o teor de ligante da amostra controle foi de 4,87%. O resultado do teor de CAP no G-RAP1 está coerente com o esperado, em torno de 4,8%, uma vez que a GG1 não tem pré-impregnação com betume em sua estrutura. Já o G-RAP2, por apresentar um geotêxtil não tecido relativamente espesso e sem pré-impregnação de betume, apresenta também teor de CAP de 4,8%. O G-RAP3 apresentou baixo teor de CAP em relação aos

demais, uma vez que este material apresenta pintura elastomérica com ligante que não sai facilmente com solvente. A Figura 4.24 demonstra o resultado dos teores de CAP presente nos G-RAPs.

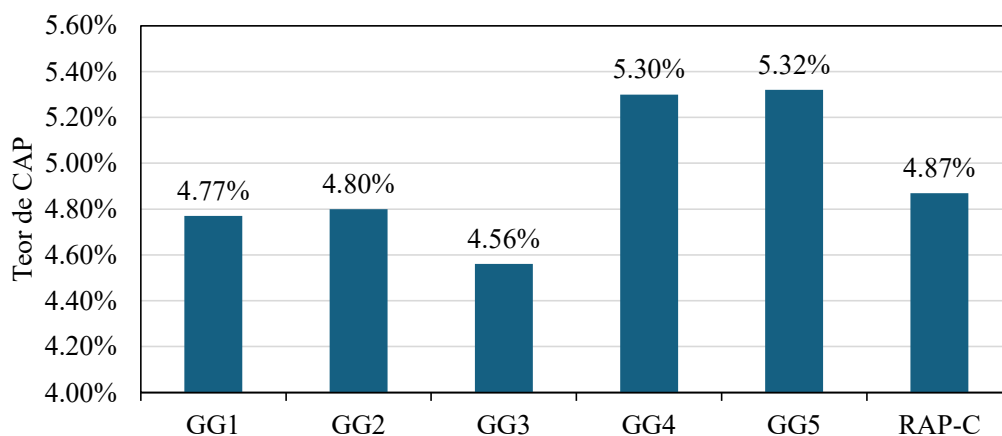


Figura 4.24 - Teor de CAP nas amostras de G-RAP e RAP-C. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

De acordo com a Figura 4.24, os teores de CAP mais altos observados estão presentes no G-RAP4 e G-RAP5. Isso se deve ao fato de que na composição dos geossintéticos GG4 e GG5 há uma pré-impregnação com betume de fábrica, para melhorar a aderência, elevando assim o teor de CAP nesses materiais fresados. Já o G-RAP3 contém um geossintético (GG3) com pintura elastomérica, a qual não é removida com facilidade no processo de extração do betume. Os produtos GG1 e GG2, que não contém pré-impregnação apresentaram resultados comparáveis com o encontrado na seção controle, conforme esperado. Estes resultados poderão ser indicativos da influência da presença de fragmentos de geossintéticos na dosagem do teor ótimo de CAUQs reciclados.

4.3 Propriedades mecânicas de CAUQs reciclados com G-RAPs

Nesta etapa de trabalho, foram conduzidos os ensaios de resistência mecânicas de CAUQs reciclados com amostras de G-RAP para verificar a viabilidade de utilização deste fresado em processos de reciclagem de misturas asfálticas em larga escala. Para a determinação dos parâmetros ótimos de cada mistura asfáltica reciclada foi utilizada a metodologia Marshall. Na sequência, os ensaios para a determinação do módulo de resiliência, obtidos com os parâmetros ótimos encontrados no ensaio Marshall, foram conduzidos para aferir a influência dos fragmentos de geossintéticos no comportamento mecânico das misturas asfálticas recicladas. Cabe salientar que

exigidos dos parâmetros de projeto estabelecidos. Isso demonstra que, em intervenções de reciclagem em larga escala, o CAUQ reciclado com fragmentos geossintéticos apresentaria reuso viável na mistura asfáltica, para os materiais geossintéticos e condições avaliadas nesta pesquisa, e para a faixa de granulometria e método de dosagem adotado. Nota-se ainda que o teor ótimo de betume observado para as misturas com 20% de G-RAP esteve na ordem de 5,2% a 5,5%, enquanto o RAP-C apresentou os parâmetros ótimos atingidos com 5,6% de teor ótimo de betume. Isso demonstra que houve uma redução no teor de CAP necessário para atingir os parâmetros ótimos de dosagem nas misturas com fragmentos de geossintéticos. Este é um importante resultado para fins econômicos e sustentáveis.

Tabela 4.6 - Resultado dos parâmetros Marshall dos CAUQs reciclados com G-RAP e CAUQs controle.

Características	G-RAP 1	G-RAP 2	G-RAP 3	G-RAP 4	G-RAP 5	RAP-C	Controle 1 FX C DNIT (SOLOCAP)	Controle 2 (FX III DIRENGE)	Parâmetros de projeto
Densidade aparente (g/cm ³)	2,348	2,357	2,361	2,358	2,35	2,352	2,374	2,433	-
Densidade teórica (g/cm ³)	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
Estabilidade (%)	282%	262%	262%	257%	277%	-	-	-	-
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	1,2	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	-

A Figura 4.26 demonstra o comparativo entre os resultados obtidos no ensaio de dosagem Marshall e os limites exigidos na norma DNIT 031/2006. Com relação aos resultados de V.A.M (Figura 4.26a), verificou-se que todas as misturas de CAUQ recicladas com G-RAP atingiram o mínimo exigido de 15%. Já a R.B.V estimada em projeto (Figura 4.26b), entre 75 e 82%, foi obtida em todas as misturas de CAUQ recicladas com 20% de G-RAP, as quais apresentaram, em média, valores de 77,5%, enquanto a mistura de CAUQ reciclada com 20% de RAP-C apresentou o mesmo valor. Com relação aos vazios da amostra (Figura 4.26c), esperados entre 3 e 5%, todas as misturas de CAUQ recicladas com 20% de G-RAP atingiram o mínimo exigido, tal como o a mistura de CAUQ reciclada com 20% de RAP-P.

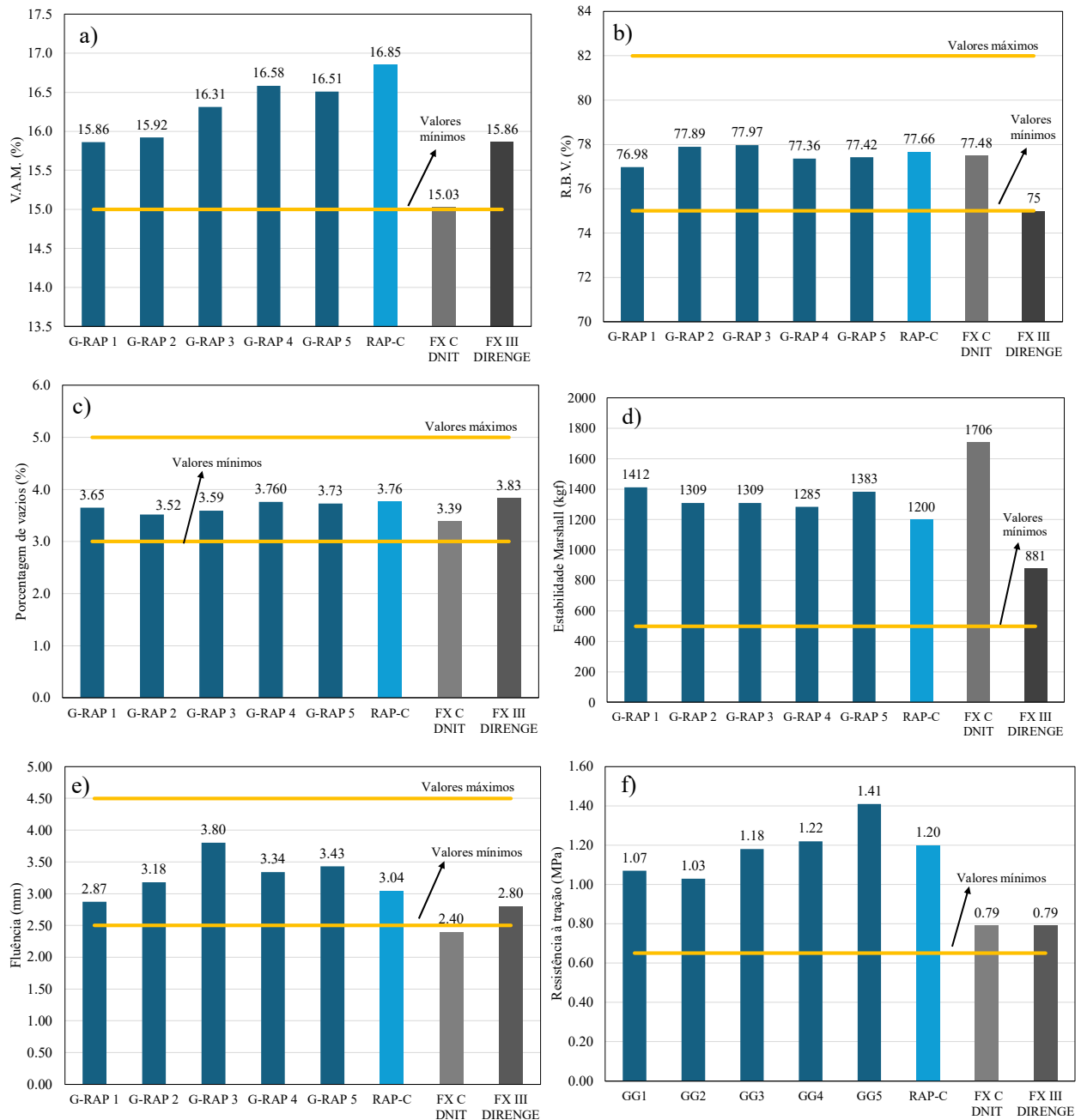


Figura 4.26 - Resultado dos parâmetros Marshall dos CAUQs reciclados com G-RAP e CAUQs controle: (a) V.A.M.; (b) R.B.V.; (c) Volume de vazios; (d) Estabilidade Marshall; (e) Fluência; (f) Resistência à tração. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com relação aos ensaios de estabilidade (Figura 4.26d), a fluência (Figura 4.26e) e a resistência à tração por compressão diametral (Figura 4.26f), novamente, todas as misturas de CAUQ recicladas com 20% de G-RAP apresentaram resultados acima da especificação mínima de

projeto. Isso demonstra uma influência positiva das fibras e fragmentos de geossintéticos nos parâmetros mecânicos do CAUQ, que apresentaram, em alguns casos, resultados superiores à mistura de CAUQ reciclada com 20% de RAP-C, especialmente na fluência e resistência à tração.

A estabilidade Marshall é determinada pela máxima carga que o corpo-de-prova resiste antes de sofrer a ruptura. Na prática, a estabilidade Marshall traduz a resistência do CAUQ quando submetido à uma carga de tráfego de caminhão, carro, aeronave etc. É possível afirmar, portanto, que quanto maior a estabilidade Marshall, melhor será o desempenho do CAUQ nas obras de pavimentação. A Figura 4.27 apresenta os resultados médios da estabilidade Marshall obtidos com CAUQs reciclados com 20% de G-RAP comparados com os demais CAUQs avaliados neste estudo.

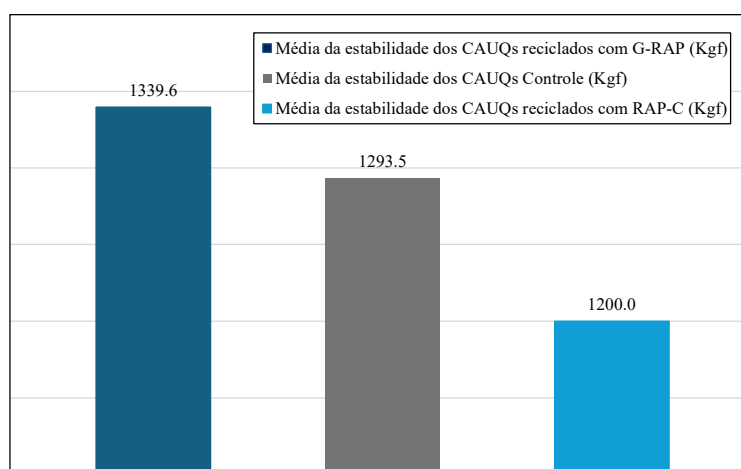


Figura 4.27 - Comparativo da média da estabilidade Marshall entre os CAUQs reciclados com 20% de G-RAP, 20% de RAP-C e CAUQs controles. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

De acordo com as Figuras 4.26d e 4.27, todos os resultados de estabilidade dos CAUQs reciclados com 20% de G-RAP atingiram, no mínimo, 2 vezes o mínimo exigido em norma. No caso do CAUQ reciclado com 20% de G-RAP 1, este parâmetro chegou a 2,8 vezes o valor mínimo esperado, o que pode ser devido ao G-RAP1 apresentar fragmentos moídos de fibra de vidro em sua composição e alta capacidade de fragmentação (92,6%). De forma similar, os resultados do G-RAP5 evidenciaram a presença de fragmentos de pó de poliéster na amostra, cujo resultado de capacidade de fragmentação foi de 83,5%, alcançando o segundo maior resultados de estabilidade Marshall.

Outro dado que corrobora com a possível influência das fibras no resultado da estabilidade Marshall é o fato de que foi possível fazer uma correlação entre as análises de laboratório quanto ao teor de fibras teórico e capacidade de fragmentação dos geossintéticos e os resultados obtidos para este parâmetro. A Figura 4.28 demonstra os resultados da estabilidade em comparação com o teor de fibras teórico (Figura 4.28a) de geossintéticos presentes nas misturas e capacidade de microfragmentação (Figura 4.28b). Quanto maior o teor de fibras presente na mistura de CAUQ reciclada com G-RAP, em geral, maior foi o resultado obtido na estabilidade Marshall. Já a análise de fragmentação, que demonstra o teor calculado de fragmentos presentes na mistura reciclada apresentou-se ainda mais aderente aos resultados mecânicos. Quanto maior a capacidade de fragmentação, maior foi o resultado de estabilidade Marshall para todos os geossintéticos avaliados nesta pesquisa.

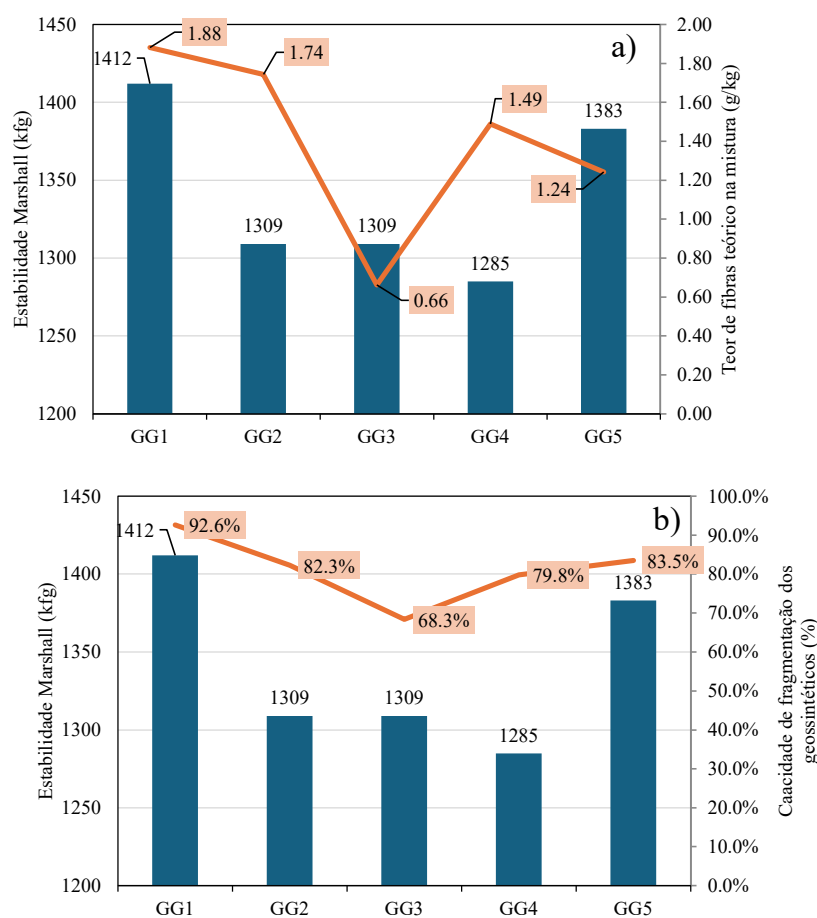


Figura 4.28 – Resultados de Estabilidade Marshall: (a) teor de fibras teórico de geossintéticos nos CAUQs reciclados com G-RAP; (b) capacidade de fragmentação dos geossintéticos.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Outro parâmetro de destaque nos resultados do ensaio dos CAUQs reciclados com G-RAP foi a resistência à tração (RT) por compressão diametral. A capacidade do material em resistir a este tipo de esforço está ligado diretamente a vida útil do pavimento, uma vez que ao resistir aos esforços de tração, este terá uma probabilidade menor de sofrer patologias como escorregamento plástico. A **Error! Reference source not found.** apresenta um comparativo dos resultados médios de RT obtidos para as amostras de CAUQ recicladas com 20% de G-RAP frente ao exigido na norma DNIT 031/2006-ES.

De acordo com a Figura 4.29, a RT média das misturas recicladas com 20% de G-RAPs apresentou resultados próximo aos obtidos para a amostra RAP-C. Isso demonstra minimamente que, em geral, não houve uma influência negativa das fibras de geossintéticos na mistura recicladas. Quando comparados ao material convencional, as amostras de CAUQ reciclado com G-RAP obtiveram resultados superiores corroborando com o fato de que há uma tendência de influência positiva das fibras e fragmentos de geossintéticos no desempenho das misturas recicladas.

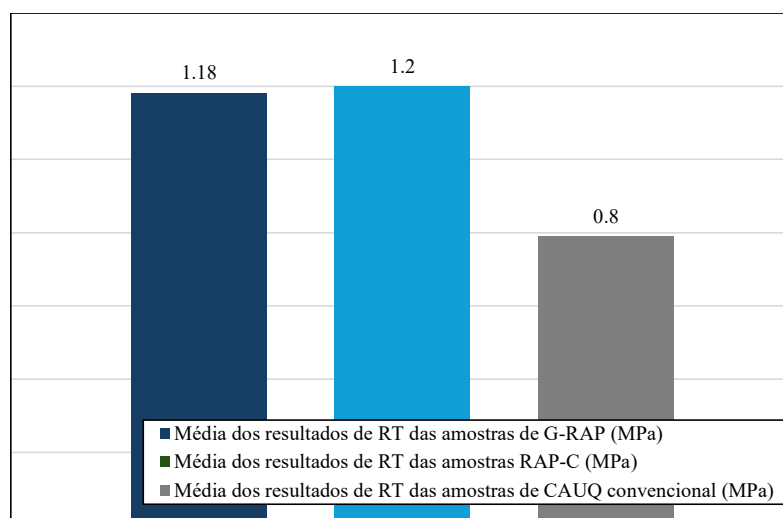


Figura 4.29 - Resultado médios dos parâmetros Marshall dos CAUQs reciclados com G-RAP e comparativo com CAUQs controle. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 4.30 apresenta os resultados da RT das misturas recicladas com 20% de G-RAPs comparado ao teor de fibras teórico (Figura 4.30a) presente nas amostras e a capacidade de microfragmentação (Figura 4.30b).

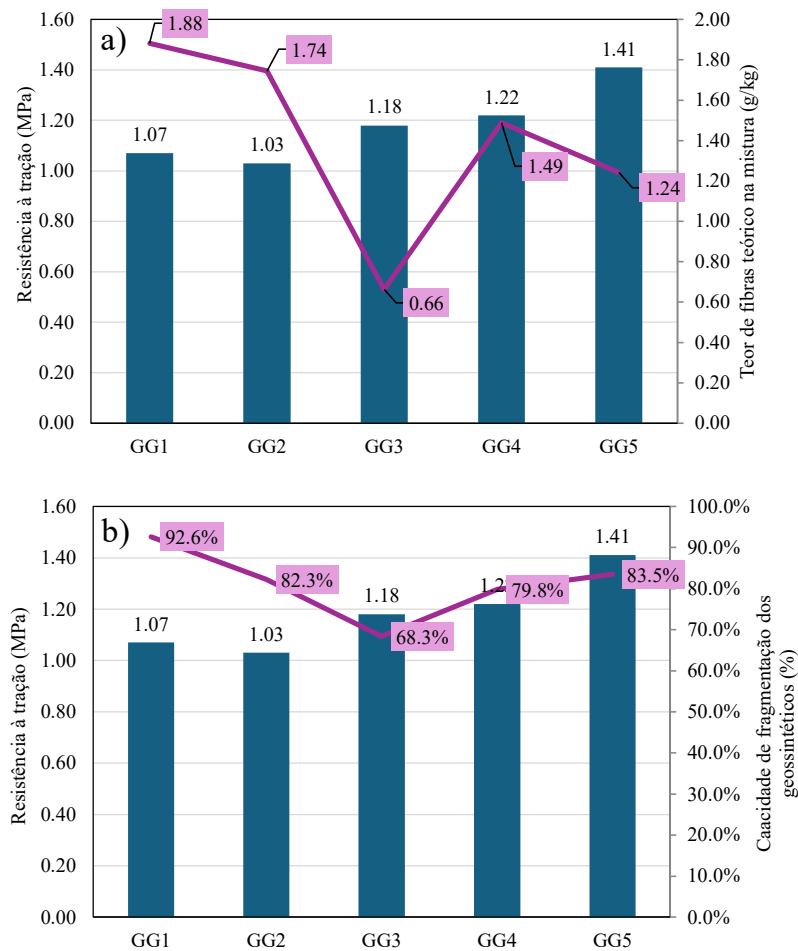


Figura 4.30 - Resultados de Resistência à tração diametral: (a) teor de fibras teórico de geossintéticos nos CAUQs reciclados com G-RAP; (b) capacidade de fragmentação dos geossintéticos. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em relação ao teor de fibras teórico, não foi possível fazer uma correlação direta com os resultados de RT, ou seja, não foi observado uma relação diretamente proporcional ao teor de fibras devido a presença dos geossintéticos (em termos de massa por unidade de área) e o resultado da RT. Isso porque a combinação de comprimento e disposição das fibras nas misturas pode levar a comportamento mecânicos distintos das misturas asfálticas compactadas. É então provável que haja influência da forma com que estas fibras se fragmentaram e, conseqüentemente, impactam nos resultados de resistência mecânica. Este resultado pode ser observado na Figura 4.30b, que demonstra uma relação mais aderente entre as análises de capacidade de fragmentação e os resultados de RT.

4.3.1 Módulo de resiliência para CAUQs reciclados com 20% de G-RAPs e CAUQs controle

O módulo de resiliência traduz diretamente a capacidade do material em resistir a esforços repetitivos durante a sua utilização em pavimentos. Por este motivo, seu resultado elevado expressa diretamente um aumento na vida útil do pavimento. A Figura 4.31 apresenta um exemplo de resultados de módulo de resiliência referentes a mistura asfáltica reciclada com 20% de G-RAP1. Ao final da dissertação, nos anexos, são apresentados os laudos técnicos dos ensaios de todas as combinações avaliadas nesta pesquisa.

DETERMINAÇÃO DO MR - MÓDULO DE RESILIÊNCIA							
CP	CICLO	CARGA CICLICA (P)			DESLOCAMENTO RESILIENTE (ΔH)	MÓDULO RESILIENTE (MR)	MEDIA
N°	N°	(%)	(kgf)	(N)	(mm)	(MPa)	(MPa)
3	1	9,81	111,08	1089,32	0,00228	4,226	4.174
	2	14,51	164,28	1611,04	0,00340	4,191	
	3	19,23	217,69	2134,81	0,00460	4,105	
4	1	9,30	105,27	1032,35	0,00225	4,083	3.573
	2	15,25	172,72	1693,80	0,00430	3,506	
	3	19,01	215,20	2110,39	0,00600	3,130	
5	1	9,67	109,51	1073,93	0,00225	4,248	3.694
	2	15,27	172,94	1695,96	0,00440	3,430	
	3	19,30	218,47	2142,46	0,00560	3,405	
RESULTADO (MPa)							
3.814							

Figura 4.31 - Resultados de módulo de resiliência obtido para a mistura asfáltica reciclada com 20% de G-RAP1. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 4.32 apresenta os resultados de módulo de resiliência obtido nos ensaios realizados nos diferentes CAUQS reciclados com 20% de G-RAPs e CAUQs controle. É possível notar que, em termos de módulo de resiliência, todos os CAUQs apresentaram valores superiores a 2750 MPa. Ademais, os fragmentos de GG1 e o GG2 levaram as misturas a apresentarem MR superiores ao CAUQ reciclado com 20% de RAP-C, demonstrando influência de fragmentos de fibra de vidro nos resultados do modulo. Já o G-RAP3, que apresentou o menor teor de fibras teórico, apresentou o menor valor de MR.

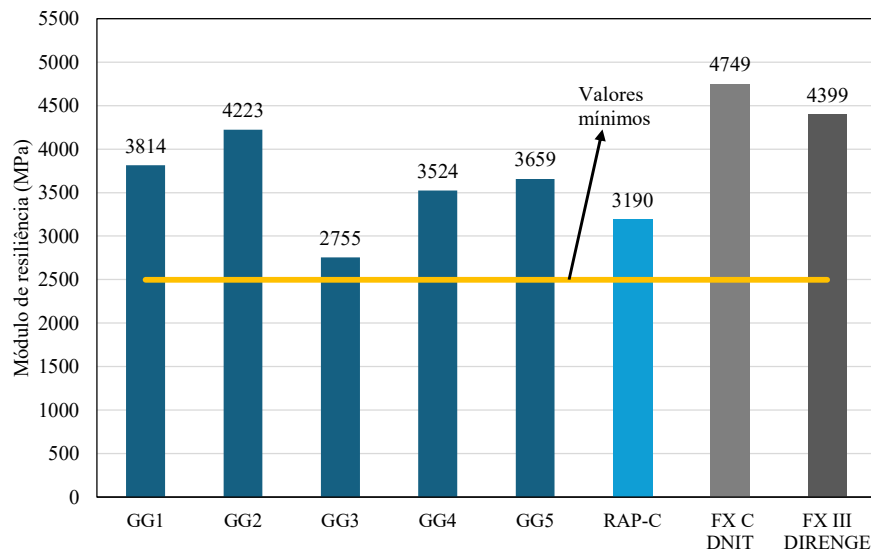


Figura 4.32 - Resultados de Módulos de resiliência dos CAUQs reciclados com 20% de G-RAP e mínimo estipulado para o projeto. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 4.33 demonstra um comparativo entre as médias de módulo de resiliência dos CAUQs reciclados com 20% de G-RAP e misturas controle, além do percentual atingido frente ao mínimo estipulado para este projeto (2500 MPa). Nos resultados do módulo de resiliência, assim como na estabilidade Marshall, é possível observar uma correlação direta entre com a presença de fibras e fragmentos de geossintéticos no desempenho das misturas, bem como da capacidade de fragmentação dos geossintéticos.

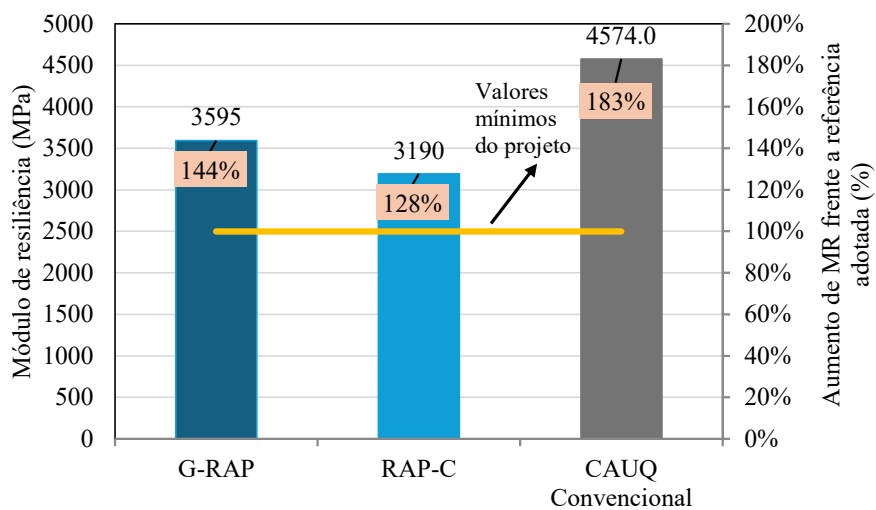


Figura 4.33 - Média dos módulos de resiliência dos CAUQs reciclados com G-RAP e o percentual do resultado obtido frente ao mínimo estipulado para o projeto. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 4.34 abaixo demonstra os resultados do módulo de resiliência comparados ao teor de fibras teórico presente na mistura (Figura 4.35a) e capacidade de fragmentação dos geossintéticos (Figura 4.35b). Há uma relação geral entre o teor de fibra técnica e o módulo de resiliência, com um aumento no módulo para valores intermediários de teor de fibra. No entanto, a relação não é diretamente linear, sugerindo que outros fatores podem estar influenciando o comportamento da mistura. Já a capacidade de fragmentação parece ter uma influência significativa no módulo de resiliência, mas novamente. O GG2 e GG5 apresentam altos módulos de resiliência com capacidades de fragmentação elevadas, enquanto o GG3, com a menor capacidade de fragmentação, apresentou o menor módulo de resiliência.

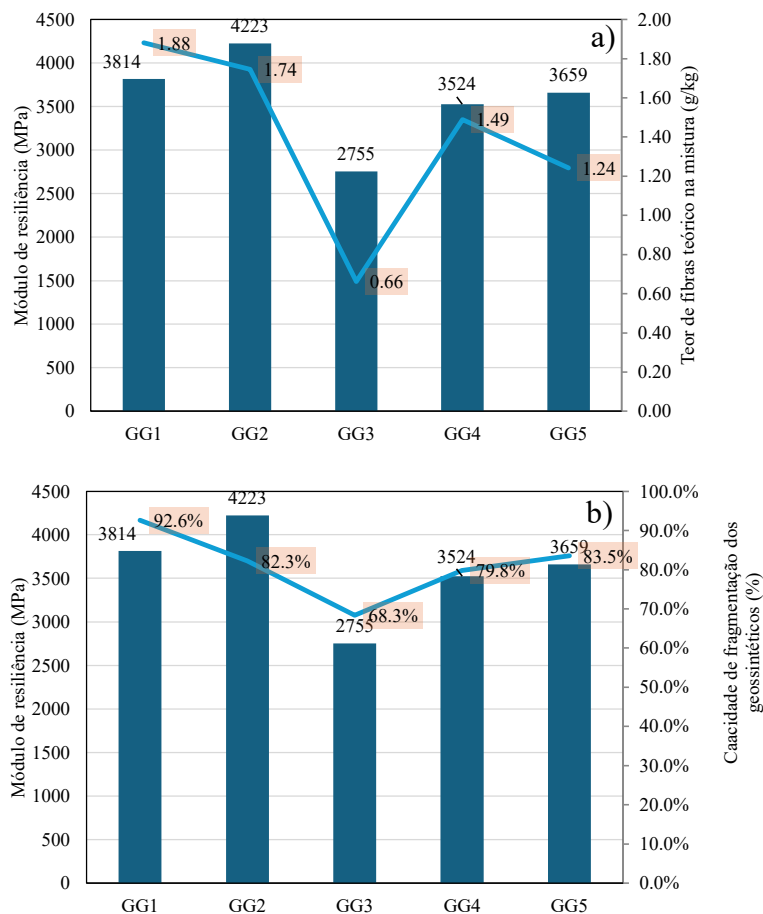


Figura 4.34 - Módulos de resiliência dos CAUQs reciclados com G-RAPs frente ao teor de fibras teórico presente nas amostras. Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A presente pesquisa mostrou que os G-RAPs coletados apresentaram fragmentos de geossintéticos em diferentes formas e tamanhos, mesmo quando mantidos o padrão de fresagem

para os diferentes pavimentos reforçados com geogrelha ou geocompostos. Assim, diferentes pavimentos reforçados geram G-RAPs diferentes. Neste sentido, projetistas e planejadores de obras de revitalização de revestimentos asfálticos que envolva o processo de fresagem, devem estar atentos a presença de geossintéticos reforçando o pavimento e das possíveis implicações do fresado no RAP.

No caso das misturas recicladas com G-RAP avaliadas nesta pesquisa, o destaque positivo está no fato de que as fibras ou fragmentos de geossintéticos exerceram um impacto positivo nos resultados de resistência mecânica dos materiais. Os resultados da estabilidade Marshal, resistência à tração e módulo de resiliência apresentaram-se superiores aos materiais reciclados com RAP convencional, corroborando com as afirmações já realizadas.

Conclui-se nesta pesquisa que os G-RAPs aqui avaliados, no percentual de 20% de fresado com geossintéticos, podem ser incorporados em processos de reciclagem de misturas à quente sem restrições (para a faixa granulométrica adotada), uma vez que as misturas atingiram parâmetros exigidos para serem utilizados em camadas de rolamento. No entanto, deve-se destacar a importância de prever adaptações necessárias em usinas de asfalto para a produção de misturas recicladas com G-RAPs.

5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa avaliou a fresabilidade de pavimentos reforçados com diferentes geossintéticos presentes no revestimento asfáltico, em uma seção de campo de escala real, no Aeroporto Internacional de Salvador. Em complemento ao estudo, os RAPs coletados durante o processo de fresagem, denominados de G-RAPs por conterem fragmentos de geossintéticos, foram caracterizados e utilizados para compor misturas asfálticas recicladas, as quais foram submetidas a ensaios laboratoriais de caracterização física e mecânica. Do presente estudo, foi possível obter as seguintes conclusões:

- Os revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos de fibra de vidro e poliéster foram fresáveis, uma vez que não houve ineficiência do processo de fresagem, frente a seção não reforçada. Houve pequena redução na eficiência do processo de fresagem (média de 18%) quando comparado à eficiência de fresagem da seção de pavimento convencional, sem necessidades de paradas;
- Os geossintéticos de fibra de vidro, aqui representados por geogrelha, *paving mat* e geocomposto com geogrelha, não se enroscaram no tambor de fresagem, enquanto o geocomposto de poliéster apresentou-se suscetível a este processo para o trecho experimental de 10,0m avaliado. No entanto, a quantidade de filamentos de poliéster enroscada no tambor, quantificado nesta pesquisa, foi de apenas 4,7% em relação a massa de geossintético presente na seção, não sendo considerado um percentual significativo;
- A distribuição granulométrica dos G-RAPs, em geral, não diferiu significativamente da distribuição granulométrica do RAP convencional, embora a fragmentação dos agregados e a fragmentação dos geossintéticos tenha resultado em fibras e fragmentos de diferentes formas e tamanhos, o que proporcionou características singulares aos diferentes G-RAPs. No RAP com presença de geotêxtil espesso (G-RAP2), os agregados se fragmentaram, em geral, em tamanho maior;
- O teor de betume presente nos G-RAPs, foi, em geral, superior ao teor de betume presente no RAP controle para os casos de geossintéticos com presença de pré-pintura betuminosa no processo de fabricação dos geossintéticos;

- Os teores aparente (quantificáveis) de fibras e fragmentos de geossintéticos nos diferentes G-RAPs foram de 0,14 a 0,31 g/kg, que se diferem entre si devido a diferença na fragmentação de cada um dos tipos de geossintéticos utilizados no estudo. Todos os geossintéticos avaliados apresentaram capacidade de micro-fragmentação (entre 68,3 e 92,6%), uma vez que a massa de geossintéticos teórica presente na camada asfáltica não foi possível de ser quantificada após a fresagem, ou seja, os produtos se fragmentaram em tamanho muito pequeno e em pó;
- De acordo com os ensaios de dosagem Marshall, todas as misturas CAUQs reciclados com 20% de G-RAP atingiram os resultados mínimos exigidos dos parâmetros de projeto estabelecidos (V.A.M, R.B.V e volume de vazios), o que demonstra que, em intervenções de larga escala, o CAUQ reciclado com fragmentos geossintéticos apresentaria reuso viável em uma mistura asfáltica reciclada;
- A presença de fibras de geossintéticos influenciou positivamente nos resultados de estabilidade, fluência e resistência à tração por compressão diametral de todas as misturas de CAUQ recicladas com 20% de G-RAP. Quanto maior o teor de fibras, maior foi, em média, o resultado obtido na estabilidade Marshall. O CAUQ reciclado com G-RAP apresentou, em média, resultados de resistência à tração por compressão diametral superiores ao CAUQ com convencional, corroborando com a hipótese de que as fibras de geossintéticos no fresado influenciam positivamente no desempenho da mistura;
- Os CAUQs reciclados com 20% G-RAPs apresentaram valores de módulo de resiliência, em média, superiores aqueles encontrados na mistura reciclada controle. A capacidade de fragmentação dos geossintéticos em fibras e pó teve uma influência significativa no módulo de resiliência, uma vez que os geossintéticos que mais se fragmentaram apresentaram, em geral, maior módulo de resiliência.

6.1 Recomendações para fresagem com geossintéticos e sugestões para pesquisas futuras

Os resultados presentes neste estudo demonstraram que pavimentos reforçados com geossintéticos podem apresentar características diferentes quando comparadas a pavimentos convencionais, no que se refere a um processo de revitalização com fresagem e recapeamento. No

processo de fresagem, ficou constatado que é possível realizar a fresagem, porém o responsável técnico da obra deverá ter ciência de possíveis improdutividades caso o serviço não seja acompanhado com atenção. Observou-se nesta pesquisa que a forma mais eficiente de fresar os revestimentos asfálticos com geossintéticos foi com a fresadora W100L em potência máxima (320 rpm), na condição com água. Nesse sentido, sugere-se para futuras pesquisas a variação na capacidade dos equipamentos como exemplo a utilização de fresadoras W200 ou similares e ainda, a profundidade de fresagem. Outra pesquisa viável seria a avaliação da variação e do posicionamento dos dentes de corte nas fibras embutidas no pavimento, cujo intuito seria o de rompê-las no impacto, principalmente no caso do poliéster.

Para melhorar o entendimento quanto à fresabilidade de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos, sugere-se que sejam conduzidos estudos complementares em que seja possível ter um controle maior quanto ao teor de fibras coletadas e impregnadas nos CAUQs. Desta forma, correlações quanto ao teor de fibras e resistência das misturas de CAUQ recicladas poderiam ser mais precisas.

Sugere-se, para as misturas recicladas com G-RAP, avaliar o efeito do uso de agente rejuvenecedor nas propriedades das misturas, bem como avaliar o efeito de diferentes porcentagens de G-RAP na composição de misturas recicladas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO T164 2022. Standard Method of Test Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. Washington, DC: American Association of State and Highway Transportation Officials
- AASHTO T180 (2022). Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop. Washington, DC: American Association of State and Highway Transportation Officials.
- AASHTO T85 (2022). Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. Washington, DC: American Association of State and Highway Transportation Officials.
- ABNT, 2016. NBR 16504: Misturas asfálticas - Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria – método mancha da aereaia,
- ABNT, 2012. NBR 14393: Emulsões asfálticas – Determinação da peneiração.
- ABNT, 2019. NBR 14376: Ligantes asfáltivos – Determinação do teor de resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas – Métodos expeditos.
- ABNT, 2008. NBR 6569: Emulsões asfálticas catiônicas – Determinação da desemulsibilidade.
- ABNT, 2007a. NBR 6576: Materiais asfálticos — Determinação da penetração.
- ABNT, 2007b. NBR 14491: Emulsões asfálticas — Determinação da viscosidade Saybolt Furol.
- ASTM D1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic of Soil using Modified Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D2434 (2022). Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Coarse-Grained Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Balbo, J.T., 2007. Pavimentação Asfáltica, 4º Reimpressão. ed. São Paulo.
- Bomfim, V., 2020. Pavimento Sustentável, 1º Edição. ed. Exceção Editorial, São Paulo.
- Bomfim, V., 2011. Fresagem de pavimentos asfálticos, 3º Edição. ed. Exceção Editorial, São Paulo.
- Correia, N.S., Zornberg, J.G., 2018. Strain distribution along geogrid-reinforced asphalt overlays under traffic loading. Geotextiles and Geomembranes 46, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.10.002>


- Correia, N.S., Zornberg, J.G., 2016. Mechanical response of flexible pavements enhanced with Geogrid-reinforced asphalt overlays. *Geosynth Int* 23, 183–193. <https://doi.org/10.1680/jgein.15.00041>
- Correia, N.S., Zornberg, J.G., 2014a. Influence of tack coat rate on the properties of paving geosynthetics. *Transportation Geotechnics* 1, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.01.002>
- Correia, N.S., Souza, T.R., Silva, M.P., Kumar, V.V. 2022. Investigations on interlayer shear strength characteristics of geosynthetic-reinforced asphalt overlay sections at Salvador International Airport. *Road Materials and Pavement Design*
- Damisch, A.; Kirschner, R. 1994. Recycling of Grid Reinforced Asphalt Pavements. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, ICG 5 - 1994 Singapore, pp. 105–108.
- DNER-ME 043/95, 1995. Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall.
- DNER-ME 053/94, 1994. Misturas betuminosas-percentagem de betume.
- DNIT, 2006. Manual de restauração de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro.
- DNIT 031/2006-ES, 2006, Pavimentos flexíveis-Concreto asfáltico-Especificação de serviço. Rio de Janeiro.
- DNIT 033/2021 - ES, 2021, Pavimentos flexíveis-Concreto asfáltico reciclado em usina a quente-Especificação de serviço.
- DNIT 135/2018 - ME, 2018. Pavimentação asfáltica-Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência-Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- DNIT 136/2018, 2018. Pavimentação asfáltica-Misturas asfálticas-Determinação da resistência à tração por compressão diametral-Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- DNIT 178/2018 - PRO, 2018 Pavimentação asfáltica-Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall-Procedimento.
- DNIT 412/2019-ME, 2019. Pavimentação-Misturas asfálticas-Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento-Método de ensaio. Brasília-DF.
- FGSV 2012, RSTO 12, Guidelines for the standardisation of pavement structures of traffic áreas Cologne, Germany.
- FHWA, F.H.A., 2011. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Publication No. FHWA-HRT-11-021.

- Gu, F., Andrews, D., Marienfeld, M., 2021. Evaluation of Bond Strength, Permeability & Recyclability of Geosynthetic Products. Geosynthetics Conference.
- Huesker, 2008. Milling and recycling HaTelit ®-reinforced asphalt. Technical report on milling and recycling. www.huesker.com
- Institut für Straßenwesen, 2022. Visual evaluation of the milling behavior of asphalt reinforcement grids. Aachen .
- Islam, S., Sufian, A., Tavakol, M., & Hossain, M. (2016). Effect of RAP and RAS Mixture on Flexible Pavement Design, Transportation research board 95th annual meeting, Washington DC, United States
- Kaseer, F., Arámbula-Mercado, E., & Martin, A. E. 2019. A Method to Quantify Reclaimed Asphalt Pavement Binder Availability (Effective RAP Binder) in Recycled Asphalt Mixes. Transportation Research Record, <https://doi.org/10.1177/0361198118821366>
- Khodaii, A., Fallah, S., Moghadas Nejad, F., 2009. Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays. *Geotextiles and Geomembranes* 27, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.05.007>
- Kumar, V. V., Saride, S., 2019. Influence of crack depth on performance of geosynthetic-reinforced asphalt overlays, *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6713-7_15
- Kumar, V.V., Saride, S., Zornberg, J.G., 2022. Behavior of Asphalt Overlays with Geogrids and Geocomposite Interlayer Systems, *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77234-5_50
- Moreira, Cristiano Costa, 2009. O conceito e a prática do teor ótimo de asfalto. Belo Horizonte.
- Nautiyal, A., & Sharma, S., 2022. Methods and factors of prioritizing roads for maintenance: a review for sustainable flexible pavement maintenance program. *Innovative infrastructure solutions*.
- NAPA - National Asphalt Pavement Association, 2020. Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2020.
- Saxena, A., Correia, N.S., Vinay Kumar, V., Zornberg, J.G., n.d. Evaluation of Geosynthetic-reinforced Asphalt Milling Characteristics and Suitability as Pavement Base Course.


- Singh, S., Monu, K., Ransinchung, G.D., 2020. Laboratory investigation of RAP for various layers of flexible and concrete pavement. *International Journal of Pavement Engineering* 21, 1780–1793. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1567920>
- Souza, T. R.; Correia, N. S. 2023. Aspectos da fresagem e características de RAPs obtidos de pavimentos reforçados com geossintéticos – IX Congresso Brasileiro de Geossintéticos - REGEO Geossintéticos, Salvador, Bahia.
- Souza, T. R; Correia, N.S. 2022. Investigação da aderência de interface de revestimentos asfálticos reforçados com geossintéticos em seção experimental no Aeroporto Internacional de Salvador, 24º ENACOR - Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 47ª RAPv - Reunião Anual de Pavimentação, Bento Gonçalves RS.
- Suzuki, K.Y., 2019. Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes de material fresado. São Paulo.
- Thenoux, G., González, Á., Dowling, R., 2007. Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile. *Resour Conserv Recycl* 49, 325–339. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.02.005>
- Tran, N., Julian, G., Taylor, A., Willis, R., Hunt, D., 2012. Effect of geosynthetic material in reclaimed asphalt pavement on performance properties of asphalt mixtures. *Transp Res Rec* 26–33. <https://doi.org/10.3141/2294-03>
- West, R.C.; 2015. Best Practices for RAP and RAS Management, Technical Report D, Lunham, MD, USA, 44p.
- Wood, J.F., 1979. Cold asphalt asphalt recycling equipment. Michigan.
- Wang, W.H., Huang, C.W., 2020. Establishing indicators and an analytic method for moisture susceptibility and rutting resistance evaluation using a hamburg wheel tracking test. *Materials* 13. <https://doi.org/10.3390/MA13153269>
- Wirtgem, 2010 Technical specification cold milling machine W1000 L, Nashville USA.
- Wirtgem, 2022. O mundo das fresadoras a frio.
- Working Group Infrastructure Management, 2012. Guidelines for the standardisation of pavement structures of traffic areas RStO 12. Road and Transportation Research Association.
- Zaumanis, M., Loetscher, D., Mazor, S., Stöckli, F., Poulikakos, L., 2021. Impact of milling machine parameters on the properties of reclaimed asphalt pavement. *Constr Build Mater* 307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125114>

6 ANEXOS


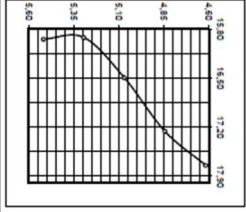
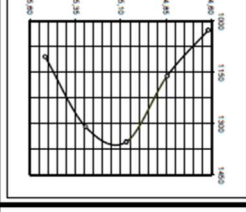
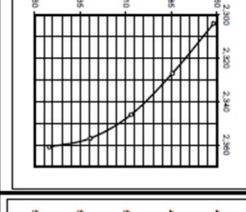
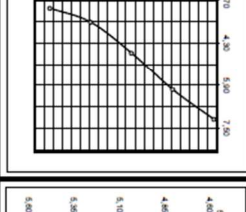
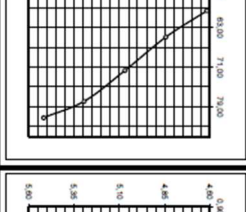
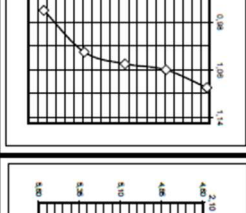
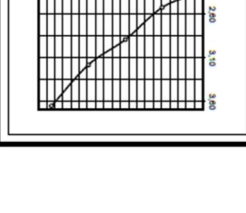
6.1 G-RAP 1 - Dosagem Marshall

		DOSAGEM MARSHALL - III (ABNT-NBR-12891)(DNER-ME-043)											
FOR-DI-AF-007/REV04-21-03-18		CLIENTE:	TIAGO RODRIGUES SOUZA							SUB-TRECHO:	-		
№ GOLPES / FACE	75	OBRA:	PESQUISA RAP							ESTUDO:	CBUQ FAIXA 'C' - ES 031-2006		
VALORES ENCONT.	ESPECIFICAÇÕES	TRECHO:	18/11/2023							OPERADOR:	21/11/2023		
PERCENTUAL DE COMPACTAÇÃO	150	INÍCIO DO ENSAIO:	18/11/2023	h / min	08:40	FINAL DO ENSAIO:	21/11/2023	h / min	16:00				
DENSIDADE APARENTE - g/dm³	2,348	TRAÇO INDICADO (% Peso)	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO		50/70	AMOST.	PROCEDÊNCIA	MATERIAL	DENSIDADE				
DENSIDADE TEÓRICA - g/cm³	2,437	BRITA 1	9,48	DENSIDADE DO CIMENTO ASFÁLTICO - d.CAP	1,006	1		BRITA 1	10%	Real	2,620	1,425	
VAZIOS AGREGADOS MINERAL/V.A.M.%	15,86	BRITA 0	18,96	DENSIDADE MÉDIA MISTURA AGREGADO-d.A.G.R	2,613	1		BRITA 0	20%	Real	2,620	1,385	
RELUÇÃO DE BETUME VAZIOS (R.B.V)%	76,98	PÓ DE PEDRA	47,40	TEOR DE CAP INDICADO	0,994	2	MINERAÇÃO MONTREAL	BRITA 0	20%	Real	2,654	1,561	
VAZIOS TOTAIS %	3,65	G-RAP 01	18,96	TEOR ÓTIMO =	0,994	3		PÓ DE PEDRA	50%	Real	2,500	1,416	
ESTABILIDADE MARSHALL Kgf	1412	CAP 50/70	5,20	FAIXA DNIT:	4,9	À	5,5	G-RAP 01	20%	Real	2,500	1,416	
FLUÊNCIA mm	2,87	% C.A.P	100,0	CAP 50/70	4,9	À	5,5						
TRAÇÃO PI COMpressão DIAMETRAL-Mpa	1,07	% C.A.P	100,0	AUXILIARES	DENSIDADE		VAZIOS		ESTABILIDADE		FLUÊNCIA		
MÓDULO RESILIENTE - Kgf/cm²	-	PI/MIST.	1,02	A	Teórica	V.C.B	AUX	REAIS	V.A.M	R.B.V	ade	mm	
		RAP 01	4,77	B	RICE	I	J	K	L	M	N	O	
		TOTAL	4,55	C	g/cm³	C.G	100-(GH)	100-J	I+K	M	N	P	
		ADICION.	4,78	D	g/cm³								
		ADICION.	5,02	E	g/cm³								
		ADICION.	5,27	F	g/cm³								
		ADICION.	5,52	G	g/cm³								
		ADICION.	5,77	H	g/cm³								
		ADICION.	5,46	I	g/cm³								
		ADICION.	5,42	J	g/cm³								
		ADICION.	5,46	K	g/cm³								
		ADICION.	5,46	L	g/cm³								
		ADICION.	5,46	M	g/cm³								
		ADICION.	5,46	N	g/cm³								
		ADICION.	5,46	O	g/cm³								
		ADICION.	5,46	P	g/cm³								
		ADICION.	5,46	Q	g/cm³								
		ADICION.	5,46	R	g/cm³								
		ADICION.	5,46	S	g/cm³								
		ADICION.	5,46	T	g/cm³								
		ADICION.	5,46	U	g/cm³								
		ADICION.	5,46	V	g/cm³								
		ADICION.	5,46	W	g/cm³								
		ADICION.	5,46	X	g/cm³								
		ADICION.	5,46	Y	g/cm³								
		ADICION.	5,46	Z	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AA	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AB	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AC	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AD	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AE	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AF	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AG	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AH	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AI	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AJ	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AK	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AL	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AM	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AN	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AO	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AP	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AQ	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AR	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AS	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AT	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AU	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AV	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AW	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AX	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AY	g/cm³								
		ADICION.	5,46	AZ	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BA	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BB	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BC	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BD	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BE	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BF	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BG	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BH	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BI	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BJ	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BK	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BL	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BM	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BN	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BO	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BP	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BQ	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BR	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BS	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BT	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BU	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BV	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BW	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BX	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BY	g/cm³								
		ADICION.	5,46	BZ	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CA	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CB	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CC	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CD	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CE	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CF	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CG	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CH	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CI	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CJ	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CK	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CL	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CM	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CN	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CO	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CP	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CQ	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CR	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CS	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CT	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CU	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CV	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CW	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CX	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CY	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CZ	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CA	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CB	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CC	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CD	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CE	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CF	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CG	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CH	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CI	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CJ	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CK	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CL	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CM	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CN	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CO	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CP	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CQ	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CR	g/cm³								
		ADICION.	5,46	CS	g/cm³								


6.2 G-RAP1 - Determinação módulo de resiliência

 FOR-DI-AF-016-REV06-14-09-21		MISTURAS ASFÁLTICAS DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DNIT 135 /2018 - ME				DATA:	06/12/2023									
						RELATÓRIO Nº:	1993-010-010-23									
						O.S Nº:	1993-010-SP14									
						REVISÃO Nº:	0									
				FOLHA Nº:	-											
CLIENTE:	TIAGO RODRIGUES SOUZA			PROCEDÊNCIA:	PESQUISA RAP 01											
OBRA:	-			MATERIAL:	CBUQ											
TRECHO:	-			REGISTRO:												
SUB-TRECHO:	-			OPERADOR:	ADENILSON											
CONTROLE DE EXECUÇÃO DO ENSAIO (DATA E HORA)																
INÍCIO DO ENSAIO:	05/12/2023	h / min	13:00	FINAL DO ENSAIO:	06/12/2023	h / min 11:00										
CONTROLE DE EQUIPAMENTOS																
EQUIPAMENTO				PRENSA	LVDT 1											
Nº / CÓDIGO				PRE007	G10											
Nº CERT. CAL				1230033												
VALIDADE				30/06/2024	22/03/2024											
DADOS DA AMOSTRA																
Granulometria (porcentagem passando)																
2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	10										
50,8	25,4	19,1	12,7	9,52	4,76	2,0										
-	-	100	89,9	83,1	63,8	36,0										
40	80	200	Cap	Estabilidade	Fluência	Vazios										
0,42	0,18	0,076	tipo	%	kgf	mm										
19,7	12,7	6,8	50-70	5,2	1412	2,87										
						3,65										
						78,98										
R.V.B																
DENSIDADE CORPO DE PROVA				RESISTENCIA TRAÇÃO COMPRESSÃO DIAMETRAL - DNER - ME 136/2010												
CP Nº	PESO		Volun e (cm³)	Densidade Aparente		ALTURA DOS CP'S mm (H)				DIAMETRO CP'S (cm) (Ø)				Força	Tração	Média
	Ao Ar	Imerso		ind.	Média	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	1ª	2ª	3ª	Média	kn	Mpa
1	1211	698	512,6	2,362	2,363	65,2	65,3	65,3	65,4	62,9	101,5	101,5	101,5	101,5	10,359	1,03
2	1201	693	507,9	2,364		64,6	64,4	64,5	64,5	63,5	101,5	101,5	101,5	101,5	11,695	1,16
3	1202	696	508,2	2,375		64,9	65,0	64,8	64,9	63,7	101,5	101,5	101,5	101,5	11,256	1,11
4	1204	695	509,7	2,363		64,10	64,20	64,40	64,40	64,3	101,5	101,5	101,5	101,5		
5	1197	688	508,6	2,353		63,70	63,90	63,90	64,00	63,9	101,5	101,5	101,5	101,5		
6	1198	691	507,5	2,361		63,80	64,00	63,80	63,90	63,9	101,5	101,5	101,5	101,5		
DETERMINAÇÃO DO MR - MÓDULO DE RESILIÊNCIA																
CP	CICLO	CARGA CÍCLICA (P)			DESLOCAMENTO RESILIENTE (ΔH)	MODULO RESILIENTE (MR)	MÉDIA									
Nº	Nº	(%)	(kgf)	(N)	(mm)	(MPa)	(MPa)									
3	1	9,81	111,08	1089,32	0,00228	4.226	4.174									
	2	14,51	164,28	1611,04	0,00340	4.191										
	3	19,23	217,69	2134,81	0,00460	4.105										
4	1	9,30	105,27	1032,35	0,00225	4.083	3.573									
	2	15,25	172,72	1693,80	0,00430	3.506										
	3	19,01	215,20	2110,39	0,00600	3.130										
5	1	9,67	109,51	1073,93	0,00225	4.248	3.694									
	2	15,27	172,94	1695,96	0,00440	3.430										
	3	19,30	218,47	2142,46	0,00560	3.405										
RESULTADO (MPa)																
3.814																
FORMULA																
MR - é o módulo de resiliência, expresso em MPa; P - é a carga cíclica, expressa em N; ΔH - é o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente). t - é a espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm μ - é o coeficiente de Poisson adotado (0,3)					$MR = \frac{P}{ \Delta H t} (0,2692 + 0,9976\mu)$											
OBSERVAÇÕES:																


6.3 G-RAP 2 - Dosagem Marshall

		DOSAGEM MARSHALL - III (ABNT-NBR-12891)(DNBR-ME-043)											
FOR-DIAR-007-REV04-21-03-18		CLIENTE: TIAGO RODRIGUES SOUZA		SUB-TRECHO: -		DATA: 15/12/2023							
Nº GOLPES /FACE 75		OBRA: PESQUISA RAP		ESTUDO: CBUQ FAIXA 'C' - ES 031-2006		RELATORIO Nº: 1993-010-010-23							
VALORES ENCONT. ESPECIFICAÇÕES		TRECHO:		OPERADOR: RICARDO		Nº OS: 1993-010-SP14							
DENSIDADE APARENTE- g/dcm³		INICIO DO ENSAIO: 18/11/2023		h / min 08:40		FINAL DO ENSAIO: 27/11/2023		h / min 16:00					
2,357		TRAÇO INDICADO t % Peso		CIMENTO ASFALTICO DE PETROLEO		50/70		AMOST.		PROCEDÊNCIA			
DENSIDADE TEÓRICA- g/cm³		BRITA 1		9,47		DENSIDADE DO CIMENTO ASFALTICO - dCAP		1,006		1			
2,443		BRITA O		18,94		DENSIDADE MÉDIA MISTURA AGREGADO- d. A.G.R		2,613		2			
VAZIOS AGREGADOS MINERAL(V.A.M)%		PÓ DE PEDRA		47,35		TEOR DE CAP INDICADO		5,3		3			
15,92		G-RAP 02		18,94		TEOR ÓTIMO =		0,994		4			
RELAÇÃO DE BETUME VAZIOS (R.B.V)%		CAP 50/70		0,00		FAIXA DNIT:		5,0		À 5,6			
77,89		CAP 50/70		5,30		%		0,383					
VAZIOS TOTAIS %		Total		100,0		CAP 50/70		TEOR DE BETUME DO G-RAP 02 - 4,2					
3,52		% C.A.P		% C.A.P		AUXILIARES		DENSIDADE		%			
ESTABILIDADE MARSHALL Kgf		P/ MIST.		RAP 02		P/ MIST		V.C.B		AUX			
1309		A		0,84		B		C		D			
FLUÊNCIA mm		ADICION.		TOTAL		A(1000A)/10		B.a		D.b			
3,18		4,00		4,84		4,62		4,59		96,50			
TRAÇÃO PI COMPRESSÃO DIAMETRAL- Mpa		4,25		5,09		4,84		4,81		95,16			
1,03		4,50		5,34		5,07		5,04		94,93			
MÓDULO RESILIENTE - Kgf/cm²		4,75		5,59		5,29		94,71		36,24			
4,223		5,00		5,84		5,52		94,48		36,16			
VAM		ESTABILIDADE Kg		DENSIDADE APARENTE g/cm³		% VAZIOS REAIS V.V		% DE BETUME VAZIOS R.B.V		TRAÇÃO Kgf / cm²		FLUÊNCIA mm	
													
4,223		5,00		5,52		36,16		12,95		3,00		1104	
3,18		4,00		4,84		4,62		4,59		96,50		1026	
4,25		4,50		5,09		4,84		4,81		95,16		1160	
4,50		4,75		5,34		5,07		5,04		94,93		1353	
4,75		5,00		5,59		5,29		94,71		36,24		1309	
5,00		5,25		5,84		5,52		94,48		36,16		1104	
5,25		5,50		6,25		5,93		94,19		36,07		1026	
5,50		5,75		7,00		6,64		93,94		36,00		942	
5,75		6,00		7,75		7,36		92,83		35,93		858	
6,00		6,25		8,50		8,12		91,72		35,82		774	
6,25		6,50		9,25		8,87		90,61		35,71		690	
6,50		6,75		10,00		9,62		89,50		35,60		606	
6,75		7,00		10,75		10,37		88,39		35,49		522	
7,00		7,25		11,50		11,12		87,28		35,38		438	
7,25		7,50		12,25		11,87		86,17		35,27		354	
7,50		7,75		13,00		12,62		85,06		35,16		270	
7,75		8,00		13,75		13,37		83,95		35,05		186	
8,00		8,25		14,50		14,12		82,84		34,94		102	
8,25		8,50		15,25		14,87		81,73		34,83		18	
8,50		8,75		16,00		15,62		80,62		34,72			
8,75		9,00		16,75		16,37		79,51		34,61			
9,00		9,25		17,50		17,12		78,40		34,50			
9,25		9,50		18,25		17,87		77,29		34,39			
9,50		9,75		19,00		18,62		76,18		34,28			
9,75		10,00		19,75		19,37		75,07		34,17			
10,00		10,25		20,50		20,12		73,96		34,06			
10,25		10,50		21,25		20,87		72,85		33,95			
10,50		10,75		22,00		21,62		71,74		33,84			
10,75		11,00		22,75		22,37		70,63		33,73			
11,00		11,25		23,50		23,12		69,52		33,62			
11,25		11,50		24,25		23,87		68,41		33,51			
11,50		11,75		25,00		24,62		67,30		33,40			
11,75		12,00		25,75		25,37		66,19		33,29			
12,00		12,25		26,50		26,12		65,08		33,18			
12,25		12,50		27,25		26,87		63,97		33,07			
12,50		12,75		28,00		27,62		62,86		32,96			
12,75		13,00		28,75		28,37		61,75		32,85			
13,00		13,25		29,50		29,12		60,64		32,74			
13,25		13,50		30,25		29,87		59,53		32,63			
13,50		13,75		31,00		30,62		58,42		32,52			
13,75		14,00		31,75		31,37		57,31		32,41			
14,00		14,25		32,50		32,12		56,20		32,30			
14,25		14,50		33,25		32,87		55,09		32,19			
14,50		14,75		34,00		33,62		53,98		32,08			
14,75		15,00		34,75		34,37		52,87		31,97			
15,00		15,25		35,50		35,12		51,76		31,86			
15,25		15,50		36,25		35,87		50,65		31,75			
15,50		15,75		37,00		36,62		49,54		31,64			
15,75		16,00		37,75		37,37		48,43		31,53			
16,00		16,25		38,50		38,12		47,32		31,42			
16,25		16,50		39,25		38,87		46,21		31,31			
16,50		16,75		40,00		39,62		45,10		31,20			
16,75		17,00		40,75		40,37		43,99		31,09			
17,00		17,25		41,50		41,12		42,88		30,98			
17,25		17,50		42,25		41,87		41,77		30,87			
17,50		17,75		43,00		42,62		40,66		30,76			
17,75		18,00		43,75		43,37		39,55		30,65			
18,00		18,25		44,50		44,12		38,44		30,54			
18,25		18,50		45,25		44,87		37,33		30,43			
18,50		18,75		46,00		45,62		36,22		30,32			
18,75		19,00		46,75		46,37		35,11		30,21			
19,00		19,25		47,50		47,12		34,00		30,10			
19,25		19,50		48,25		47,87		32,89		30,00			
19,50		19,75		49,00		48,62		31,78		29,89			
19,75		20,00		49,75		49,37		30,67		29,78			
20,00		20,25		50,50		50,12		29,56		29,67			
20,25		20,50		51,25		50,87		28,45		29,56			
20,50		20,75		52,00		51,62		27,34		29,45			
20,75		21,00		52,75		52,37		26,23		29,34			
21,00		21,25		53,50		53,12		25,12		29,23			
21,25		21,50		54,25		53,87		24,01		29,12			
21,50		21,75		55,00		54,62		22,90		29,01			
21,75		22,00		55,75		55,37		21,79		28,90			
22,00		22,25		56,50		56,12		20,68		28,79			
22,25		22,50		57,25		56,87		19,57		28,68			
22,50		22,75		58,00		57,62		18,46		28,57			
22,75		23,00		58,75		58,37		17,35		28,46			
23,00		23,25		59,50		59,12		16,24		28,35			
23,25		23,50		60,25		59,87		15,13		28,24			
23,50		23,75		61,00		60,62		14,02		28,13			
23,75		24,00		61,75		61,37		12,91		28,02			
24,00		24,25		62,50		62,12		11,80		27,91			
24,25		24,50		63,25		62,87		10,69		27,80			
24,50		24,75		64,00		63,62		9,58		27,69			
24,75		25,00		64,75		64,37		8,47		27,58			
25,00		25,25		65,50		65,12		7,36		27,47			
25,25		25,50		66,25		65,87		6,25		27,36			
25,50		25,75		67,00		66,62		5,14		27,25			
25,75		26,00		67,75		67,37		4,03		27,14			
26,00		26,25		68,50		68,12		2,92		27,03			
26,25		26,50		69,25		68,87		1,81		26,92			
26,50		26,75		70,00		69,62		0,70		26,81			
26,75		27,00		70,75		70,37		0,59		26,70			
27,00		27,25		71,50		71,12		0,48		26,59			
27,25		27,50		72,25		71,87		0,37		26,48			
27,50		27,75		73,00		72,62		0,26		26,37			
27,75		28,00		73,75		73,37		0,15		26,26			
28,00		28,25		74,50		74,12		0,04		26,15			
28,25		28,50		75,25		74,87		0,03					

6.4 G-RAP 2 - Determinação módulo de resiliência

		MISTURAS ASFÁLTICAS DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA				DATA:	15/12/2023										
						RELATÓRIO Nº:	1993-010-010-23										
FOR-DI-AF-016-REV06-14-09-21		DNIT 135 /2018 - ME				O.S Nº:	1993-010-SP14										
						REVISÃO Nº:	0										
						FOLHA Nº:	6/6										
CLIENTE:	TIAGO RODRIGUES SOUZA				PROCEDÊNCIA:	PESQUISA RAP 02											
OBRA:	-				MATERIAL:	CBUQ											
TRECHO:	-				REGISTRO:												
SUB-TRECHO:	-				OPERADOR:	ADENILSON											
CONTROLE DE EXECUÇÃO DO ENSAIO (DATA E HORA)																	
INÍCIO DO ENSAIO:	06/12/2023	h / min	13:00	FINAL DO ENSAIO:	06/12/2023	h / min	15:03										
CONTROLE DE EQUIPAMENTOS																	
EQUIPAMENTO				PRESA	LVDT 1												
Nº / CÓDIGO				PRE007	G10												
Nº CERT. CAL				1230033													
VALIDADE				30/06/2024	22/03/2024												
DADOS DA AMOSTRA																	
Granulometria (porcentagem passando)																	
				Cap	Estabilidade	Fluência	Vazios	R.V.B									
2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	10	40	80	200	tipo	%	kgf	mm	%	%		
50,8	25,4	19,1	12,7	9,52	4,76	2,0	0,42	0,18	0,076	50-70	5,3	1309	3,18	3,52	77,89		
-	100	98,1	87,9	82,1	63,4	36,6	20,3	13,3	6,8								
DENSIDADE CORPO DE PROVA				RESISTENCIA TRAÇÃO COMPRESSÃO DIAMETRAL - DNER - ME 136/2010													
CP Nº	PESO		Volun e (cm³)	Densidade Aparente		ALTURA DOS CP'S mm (H)					DIAMETRO CP'S (cm) (Ø)				Força kn	Tração Mpa	Média
	Ao Ar	Imerso		ind.	Média	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	1ª	2ª	3ª	Média			
1	1201	895	508,2	2,373	2,363	65,3	65,4	65,4	65,5	62,9	101,5	101,5	101,5	101,5	11,000	1,10	1,12
2	1207	898	509,6	2,369		65,5	65,4	65,3	65,4	63,5	101,5	101,5	101,5	101,5	11,695	1,16	
3	1203	894	509,6	2,361		64,9	65,0	65,1	65,1	63,7	101,5	101,5	101,5	101,5	11,256	1,11	
4	1203	893	509,9	2,359		64,4	64,5	64,5	64,4	64,5	101,5	101,5	101,5	101,5			
5	1198	889	508,7	2,354		64,4	64,4	64,4	64,4	64,4	101,5	101,5	101,5	101,5			
6	1200	892	508,4	2,360		64,5	64,4	64,4	64,4	64,4	101,5	101,5	101,5	101,5			
DETERMINAÇÃO DO MR - MÓDULO DE RESILIÊNCIA																	
CP	CICLO	CARGA CÍCLICA (P)			DESLOCAMENTO RESILIENTE (ΔH)	MÓDULO RESILIENTE (MR)	MÉDIA										
Nº	Nº	(%)	(kgf)	(N)	(mm)	(MPa)	(MPa)										
3	1	9,40	108,53	1064,32	0,00200	4.694	4.062										
	2	14,57	168,20	1649,48	0,00340	4.279											
	3	19,32	222,91	2186,00	0,00600	3.214											
4	1	9,24	106,61	1045,49	0,00172	5.366	4.485										
	2	14,83	171,15	1678,41	0,00354	4.185											
	3	19,54	225,54	2211,79	0,00500	3.905											
5	1	9,24	106,68	1046,17	0,00184	5.017	4.121										
	2	14,43	166,57	1633,49	0,00350	4.118											
	3	19,39	223,76	2194,34	0,00600	3.227											
RESULTADO (MPa)																	
4.223																	
FORMULA																	
MR - é o módulo de resiliência, expresso em MPa; P - é a carga cíclica, expressa em N; ΔH - é o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente), t - é a espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm μ - é o coeficiente de Poisson adotado (0,3)					$MR = \frac{P}{ \Delta H t} \quad (0,2692 + 0,9976\mu)$												
OBSERVAÇÕES:																	


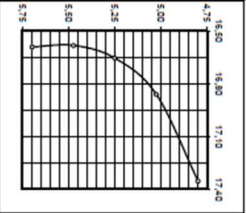
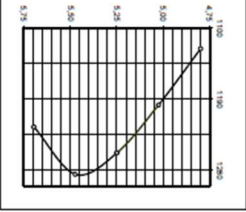
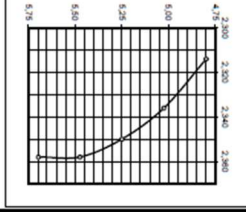
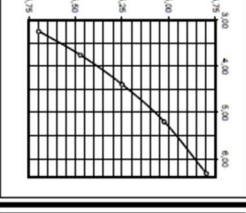
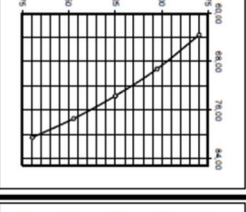
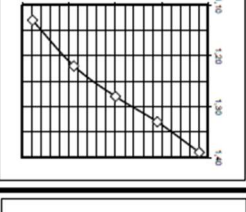
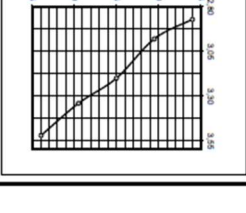
6.5 G-RAP 3 - Dosagem Marshall

		DOSAGEM MARSHALL - III (ABNT-NBR-12891)(DNER-ME-043)										
FOR-DI-AE-007-REV04-21-03-18		CLIENTE:	TIAGO RODRIGUES SOUZA							SUB-TRECHO:		
% COMPACTAÇÃO	150	OBRA:	PESQUISA RAP							ESTUDO:	CBUQ FAIXA 'C' - ES 031-2006	
VALORES ENCONT.	ESPECIFICAÇÕES	TRECHO:								OPERADOR:	PAULO ROBERTO	
DENSIDADE APARENTE - g/dm ³	2,361	INICIO DO ENSAIO:	04/12/2023		h / min	10:00		FINAL DO ENSAIO:	11/12/2023			
DENSIDADE TEÓRICA - g/cm ³	2,449	TRAÇÃO INDICADO (% Peso)	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO		50/70		AMOST.	PROCEDÊNCIA		MATERIAL		
VAZIOS AGREGADOS MINERAL(V.A.M)/%	16,31	BRITA 1	DENSIDADE DO CIMENTO ASFÁLTICO - d.CAP		1,006		1	MINERAÇÃO MONTREAL		BRITA 1		
RELUÇÃO DE BETUME VAZIOS (R.B.V)/%	77,97	BRITA O	DENSIDADE MÉDIA MISTURA AGREGADO-D.A.G.R		2,613		2			BRITA O		
VAZIOS TOTAIS %	3,59	PÓ DE PEDRA	TEOR DE CAP INDICADO		5,4		3			PÓ DE PEDRA		
ESTABILIDADE MARSHALL Kgf	1321	G-RAP 03	TEOR ÓTIMO =		5,4		4			G-RAP 03		
FLUÊNCIA mm	3,80	ADICION. TOTAL	FAIXA DNIT:		5,1 À 5,7		CAP 50/70		0,383		TEOR DE BETUME DO G-RAP 03 - 4,9	
TRAÇÃO PI COMPRESSÃO DIAMETRAL- Mpa	1,18	A	AUXILIARES		DENSIDADE		VAZIOS		Estabilid		Fluência	
MÓDULO RESILIENTE - Kgf/cm ²	2,755	B	Apresente		Teórica		REAIS		ade		Tração	
		C	D		E		F		G		H	
		D	E		F		G		H		I	
		E	F		G		H		I		J	
		F	G		H		I		J		K	
		G	H		I		J		K		L	
		H	I		J		K		L		M	
		I	J		K		L		M		N	
		J	K		L		M		N		O	
		K	L		M		N		O		P	
		L	M		N		O		P		Q	
		M	N		O		P		Q		R	
		N	O		P		Q		R		S	
		O	P		Q		R		S		T	
		P	Q		R		S		T		U	
		Q	R		S		T		U		V	
		R	S		T		U		V		W	
		S	T		U		V		W		X	
		T	U		V		W		X		Y	
		U	V		W		X		Y		Z	
		V	W		X		Y		Z		AA	
		W	X		Y		Z		AA		AB	
		X	Y		Z		AA		AB		AC	
		Y	Z		AA		AB		AC		AD	
		Z	AA		AB		AC		AD		AE	
		AA	AB		AC		AD		AE		AF	
		AB	AC		AD		AE		AF		AG	
		AC	AD		AE		AF		AG		AH	
		AD	AE		AF		AG		AH		AI	
		AE	AF		AG		AH		AI		AJ	
		AF	AG		AH		AI		AJ		AK	
		AG	AH		AI		AJ		AK		AL	
		AH	AI		AJ		AK		AL		AM	
		AI	AJ		AK		AL		AM		AN	
		AJ	AK		AL		AM		AN		AO	
		AK	AL		AM		AN		AO		AP	
		AL	AM		AN		AO		AP		AQ	
		AM	AN		AO		AP		AQ		AR	
		AN	AO		AP		AQ		AR		AS	
		AO	AP		AQ		AR		AS		AT	
		AP	AQ		AR		AS		AT		AU	
		AQ	AR		AS		AT		AU		AV	
		AR	AS		AT		AU		AV		AW	
		AS	AT		AU		AV		AW		AX	
		AT	AU		AV		AW		AX		AY	
		AU	AV		AW		AX		AY		AZ	
		AV	AW		AX		AY		AZ		BA	
		AW	AX		AY		AZ		BA		BB	
		AX	AY		AZ		BA		BB		BC	
		AY	AZ		BA		BB		BC		BD	
		AZ	BA		BB		BC		BD		BE	
		BA	BB		BC		BD		BE		BF	
		BB	BC		BD		BE		BF		BG	
		BC	BD		BE		BF		BG		BH	
		BD	BE		BF		BG		BH		BI	
		BE	BF		BG		BH		BI		BJ	
		BF	BG		BH		BI		BJ		BK	
		BG	BH		BI		BJ		BK		BL	
		BH	BI		BJ		BK		BL		BM	
		BI	BJ		BK		BL		BM		BN	
		BJ	BK		BL		BM		BN		BO	
		BK	BL		BM		BN		BO		BP	
		BL	BM		BN		BO		BP		BQ	
		BM	BN		BO		BP		BQ		BR	
		BN	BO		BP		BQ		BR		BS	
		BO	BP		BQ		BR		BS		BT	
		BP	BQ		BR		BS		BT		BU	
		BQ	BR		BS		BT		BU		BV	
		BR	BS		BT		BU		BV		BW	
		BS	BT		BU		BV		BW		BX	
		BT	BU		BV		BW		BX		BY	
		BU	BV		BW		BX		BY		BZ	
		BV	BW		BX		BY		BZ		CA	
		BW	BX		BY		BZ		CA		CB	
		BX	BY		BZ		CA		CB		CC	
		BY	BZ		CA		CB		CC		CD	
		BZ	CA		CB		CC		CD		CE	
		CA	CB		CC		CD		CE		CF	
		CB	CC		CD		CE		CF		CG	
		CC	CD		CE		CF		CG		CH	
		CD	CE		CF		CG		CH		CI	
		CE	CF		CG		CH		CI		CJ	
		CF	CG		CH		CI		CJ		CK	
		CG	CH		CI		CJ		CK		CL	
		CH	CI		CJ		CK		CL		CM	
		CI	CJ		CK		CL		CM		CN	
		CJ	CK		CL		CM		CN		CO	
		CK	CL		CM		CN		CO		CP	
		CL	CM		CN		CO		CP		CQ	
		CM	CN		CO		CP		CQ		CR	
		CN	CO		CP		CQ		CR		CS	
		CO	CP		CQ		CR		CS		CT	
		CP	CQ		CR		CS		CT		CU	
		CQ	CR		CS		CT		CU		CV	
		CR	CS		CT		CU		CV		CW	
		CS	CT		CU		CV		CW		CX	
		CT	CU		CV		CW		CX		CY	
		CU	CV		CW		CX		CY		CZ	
		CV	CW		CX		CY		CZ		DA	
		CW	CX		CY		CZ		DA		DB	
		CX	CY		CZ		DA		DB		DC	
		CY	CZ		DA		DB		DC		DD	
		CZ	DA		DB		DC		DD		DE	
		DA	DB		DC		DD		DE		DF	
		DB	DC		DD		DE		DF		DG	
		DC	DD		DE		DF		DG		DH	
		DD	DE		DF		DG		DH		DI	
		DE	DF		DG		DH		DI		DJ	
		DF	DG		DH		DI		DJ		DK	
		DG	DH		DI		DJ		DK		DL	
		DH	DI		DJ		DK		DL		DM	
		DI	DJ		DK		DL		DM		DN	
		DJ	DK		DL		DM		DN		DO	
		DK	DL		DM		DN		DO		DP	
		DL	DM		DN		DO		DP		DQ	
		DM	DN		DO		DP		DQ		DR	
		DN	DO		DP		DQ		DR		DS	
		DO	DP		DQ		DR		DS		DT	
		DP	DQ		DR		DS		DT		DU	
		DQ	DR		DS		DT		DU		DV	
		DR	DS		DT		DU		DV		DW	
		DS	DT		DU		DV		DW		DX	
		DT	DU		DV		DW		DX		DY	
		DU	DV		DW		DX		DY		DZ	
		DV	DW		DX		DY		DZ		EA	
		DW	DX		DY		DZ		EA		EB	
		DX	DY		DZ		EA		EB		EC	
		DY	DZ		EA		EB		EC		ED	
		DZ	EA		EB		EC		ED		EE	
		EA	EB		EC		ED		EE		EF	
		EB	EC		ED		EE		EF		EG	
		EC	ED		EE		EF		EG		EH	
		ED	EE		EF		EG		EH		EI	
		EE	EF		EG		EH		EI		EJ	
		EF	EG		EH		EI		EJ		EK	
		EG	EH		EI		EJ		EK		EL	
		EH	EI		EJ		EK		EL		EM	
		EI	EJ		EK		EL		EM		EN	
		EJ	EK		EL		EM		EN		EO	
		EK	EL		EM		EN		EO		EP	
		EL	EM		EN		EO		EP		EQ	
		EM	EN		EO		EP		EQ		ER	
		EN	EO		EP		EQ		ER		ES	
		EO	EP		EQ		ER		ES		ET	
		EP	EQ		ER		ES		ET		EU	
		EQ	ER		ES		ET		EU		EV	
		ER	ES		ET		EU		EV		EW	
		ES	ET		EU		EV		EW		EX	
		ET	EU		EV		EW					


6.6 G-RAP 3 - Determinação módulo de resiliência

SOLOCAP		MISTURAS ASFÁLTICAS DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA										DATA:		15/12/2023				
FOR-DI-AF-018-REV06-14-09-21		DNIT 135 /2018 - ME										RELATÓRIO Nº:		1993-010-010-23				
												O.S Nº:		1993-010-SP14				
												REVISÃO Nº:		0				
												FOLHA Nº:		6/6				
CLIENTE: TIAGO RODRIGUES SOUZA					PROCEDÊNCIA: PESQUISA RAP 03													
OBRA: -					MATERIAL: CBUQ													
TRECHO: -					REGISTRO:													
SUB-TRECHO: -					OPERADOR: ADENILSON/ERICK													
CONTROLE DE EXECUÇÃO DO ENSAIO (DATA E HORA)																		
INÍCIO DO ENSAIO: 12/12/2023 h / min 16:30					FINAL DO ENSAIO: 13/12/2023 h / min 11:27													
CONTROLE DE EQUIPAMENTOS																		
EQUIPAMENTO					PRENSA					LVDT 1								
Nº / CODIGO					PRE007					G10								
Nº CERT. CAL					1230033													
VALIDADE					30/06/2024					22/03/2024								
DADOS DA AMOSTRA																		
Granulometria (porcentagem passando)										Cap		Estabilidade		Fluência		Vazios		R.V.B
2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	10	40	80	200	tipo	%	kgf	mm	%	%			
50,8	25,4	19,1	12,7	9,52	4,76	2,0	0,42	0,18	0,076									
-	100	98,3	88,7	83,3	82,2	36,2	19,9	12,9	6,8	50-70	5,4	1321	3,80	3,59	77,97			
DENSIDADE CORPO DE PROVA					RESISTENCIA TRAÇÃO COMPRESSÃO DIAMETRAL - DNER - ME 136/2010													
CP Nº	PESO		Volun e (cm³)	Densidade Aparente		ALTURA DOS CP'S mm (H)					DIAMETRO CP'S (cm) (Ø)				Força		Tração	Média
	Ao Ar	Imerso		ind.	Média	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	1ª	2ª	3ª	Média	kn	Mpa		
1	1193	690	503,4	2,371	2,365	63,5	62,2	63,1	64,0	62,9	101,5	101,5	101,5	101,5	11,000	1,10	1,12	
2	1195	691	503,9	2,372		63,1	64,1	64,5	63,6	63,5	101,5	101,5	101,5	101,5	11,695	1,16		
3	1196	692	503,4	2,375		63,3	64,6	63,9	63,2	63,7	101,5	101,5	101,5	101,5	11,256	1,11		
4	1203	693	509,9	2,359		64,4	64,5	64,5	64,4	64,5	101,5	101,5	101,5	101,5				
5	1198	689	508,7	2,354		64,4	64,4	64,4	64,4	64,4	101,5	101,5	101,5	101,5				
6	1200	692	508,4	2,360		64,5	64,4	64,4	64,4	64,4	101,5	101,5	101,5	101,5				
DETERMINAÇÃO DO MR - MÓDULO DE RESILIÊNCIA																		
CP	CICLO		CARGA CÍCLICA (P)			DESLOCAMENTO RESILIENTE (ΔH)		MÓDULO RESILIENTE (MR)		MÉDIA								
Nº	Nº		(%)	(kgf)	(N)	(mm)		(MPa)		(MPa)								
3	1		9,00	103,90	1018,91	0,00276		3,256		2.842								
	2		15,40	177,75	1743,13	0,00550		2,796										
	3		19,34	223,14	2188,26	0,00780		2,475										
4	1		9,17	105,83	1037,84	0,00260		3,524		2.826								
	2		14,87	171,66	1683,41	0,00530		2,804										
	3		19,37	223,58	2192,57	0,00900		2,151										
5	1		9,59	110,68	1085,40	0,00300		3,192		2.598								
	2		15,20	175,45	1720,58	0,00640		2,372										
	3		19,19	221,47	2171,88	0,00860		2,228										
RESULTADO (MPa)																		
2.755																		
FORMULA																		
MR - é o módulo de resiliência, expresso em MPa; P - é a carga cíclica, expressa em N; ΔH - é o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente). t - é a espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm μ - é o coeficiente de Poisson, adotado (0,3)										$MR = \frac{P}{ \Delta H t} (0,2692 + 0,9976\mu)$								
OBSERVAÇÕES:																		


6.7 G-RAP 4 - Dosagem Marshall

		DOSAGEM MARSHALL - III (ABNT-NBR-12891)(DNER-ME-043)											
FOR-DI-AP-007-REV04-21-03-18		CLIENTE: TIAGO RODRIGUES SOUZA		SUB-TRECHO: -		DATA: 26/12/2023							
Nº GOLPES /FACE 75		OBRÁ: PESQUISA RAP		ESTUDO: CBUQ FAIXA 'C' - ES 031.2006		RELATORIO Nº: 1993-010-010-23		Nº OS: 1993-010-SP14		REVISÃO Nº: 0			
% COMPACTAÇÃO 150		TRECHO: -		OPERADOR: -		FOLHA Nº 5/6							
VALORES ENCONT. ESPECIFICAÇÕES		INICIO DO ENSAIO: 11/12/2023		h / min 13:31		FINAL DO ENSAIO: 18/12/2023		h / min 11:14					
DENSIDADE APARENTE - g/dm³ 2.358		TRAÇO INDICADO (% Peso)		CIMENTO ASFÁLTICO DE PETROLEO		50/70		AMOST. PROCEDÊNCIA		MATERIAL			
DENSIDADE TEÓRICA - g/dm³ 2.450		BRITA 1 12,29		DENSIDADE DO CIMENTO ASFÁLTICO - d.CAP 1,006		2.639		1		BRITA 1 13%			
VAZIOS AGREGADOS MINERAL(V.AM)% 16,58		PÓ DEPEDRA 45,37		DENSIDADE MÉDIA MISTURA AGREGADO-d. A.G.R. TEOR DE CAP INDICADO		0,994		2		BRITA O 20%			
RELAÇÃO DE BETUME VAZIOS (R.B.V)% 77,36		G-RAP 04 18,91		TEOR ÓTIMO = 5,5		0,994		3		PÓ DEPEDRA 48%			
VAZIOS TOTAIS % 3,76		CAP 50/70 5,47		FAIXA DNIT: 5,2 À 5,8		0,379		4		G-RAP 04 20%			
ESTABILIDADE MARSHALL Kgf 1285		% CAP I % CAP II % CAP III		AUXILIARES		DENSIDADE		%		ESTABILIDADE			
FLUÊNCIA mm 3,34		P/MIST. RAP 03 P/MIST		A		Teórica		V.C.B		Fluência			
TRAÇÃO PI COMPRESSÃO DIAMETRAL- Mpa 1,22		ADICION I TOTAL A/100(A)10		B		g/cm³		AUX		Tração			
MÓDULO RESILIENTE - Kgf/cm² -		4,00 5,04		C		g/cm³		REAIS		V.A.M			
		4,25 5,29		D		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
		4,50 5,54		E		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
		4,75 5,79		F		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
		5,00 6,04		G		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
				H		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
				I		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
				J		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
				K		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
				L		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
				M		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
				N		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
				O		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
				P		g/cm³		V.A.M		R.B.V			
% VAZIOS AGREGADO 		ESTABILIDADE Kg 		DENSIDADE APARENTE g/cm³ 		% VAZIOS REAIS V.V 		% DE BETUME VAZIOS R.B.V 		TRAÇÃO Kgf / cm² 		FLUÊNCIA mm 	


6.8 G-RAP 4 - Determinação módulo de resiliência

		MISTURAS ASFÁLTICAS DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA								DATA: 02/01/2024						
FOR-DI-AF-016-REV06-14-09-21		DNIT 135 /2018 - ME								RELATÓRIO Nº: 1993-010-010-23						
										O.S Nº: 1993-010-SP14						
										REVISÃO Nº: 0						
										FOLHA Nº: 6/6						
CLIENTE: TIAGO RODRIGUES SOUZA				PROCEDÊNCIA: PESQUISA RAP 03												
OBRA: PESQUISA RAP				MATERIAL: CBUQ												
TRECHO: -				REGISTRO:												
SUB-TRECHO: -				OPERADOR: ERICK												
CONTROLE DE EXECUÇÃO DO ENSAIO (DATA E HORA)																
INÍCIO DO ENSAIO: 02/01/2024			h / min 9:40			FINAL DO ENSAIO: 02/01/2024			h / min 14:52							
CONTROLE DE EQUIPAMENTOS																
EQUIPAMENTO				PRENSA				LVDT 1								
Nº / CÓDIGO				PRE007				G10								
Nº CERT. CAL				1230033												
VALIDADE				30/06/2024				22/03/2024								
DADOS DA AMOSTRA																
Granulometria (porcentagem passando)										Cap		Estabilidade	Fluência	Vazios	R.V.B	
2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	10	40	80	200							
50,8	25,4	19,1	12,7	9,52	4,76	2,0	0,42	0,18	0,076	tipo	%	kgf	mm	%	%	
-	100	98,3	88,7	83,3	62,2	36,2	19,9	12,9	6,8	50-70	5,4	1321	3,80	3,59	77,97	
DENSIDADE CORPO DE PROVA						RESISTENCIA TRAÇÃO COMPRESSÃO DIAMETRAL - DNER - ME 136/2010										
CP Nº	PESO		Volun e (cm³)	Densidade Aparente		ALTURA DOS CP'S mm (H)				DIAMETRO CP'S (cm) (d)				Força kn	Tração Mpa	Média
	Ao Ar	Imerso		ind.	Média	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	1ª	2ª	3ª			
1	1195	682	513,2	2,329	2,345	63,5	62,2	63,1	64,0	62,9	101,5	101,5	101,5	101,5	11,000	1,10
2	1197	685	511,9	2,339		63,1	64,1	64,5	63,6	63,5	101,5	101,5	101,5	101,5	11,695	1,16
3	1195	682	512,5	2,331		63,3	64,6	63,9	63,2	63,7	101,5	101,5	101,5	101,5	11,256	1,11
4	1203	693	509,9	2,359		64,4	64,5	64,5	64,4	64,5	101,5	101,5	101,5	101,5		
5	1198	689	508,7	2,354		64,4	64,4	64,4	64,4	64,4	101,5	101,5	101,5	101,5		
6	1200	692	508,4	2,360		64,5	64,4	64,4	64,4	64,4	101,5	101,5	101,5	101,5		
DETERMINAÇÃO DO MR - MÓDULO DE RESILIÊNCIA																
CP	CICLO	CARGA CÍCLICA (P)			DESLOCAMENTO RESILIENTE (ΔH)		MÓDULO RESILIENTE (MR)		MÉDIA							
Nº	Nº	(%)	(kgf)	(N)	(mm)	(MPa)			(MPa)							
3	1	10,58	122,14	1197,78	0,00272	3,884			3,352							
	2	15,53	179,22	1757,55	0,00490	3,164										
	3	19,89	229,52	2250,82	0,00660	3,008										
4	1	10,38	119,76	1174,44	0,00252	4,114			3,588							
	2	15,37	177,38	1739,50	0,00450	3,412										
	3	19,77	228,20	2237,88	0,00610	3,238										
5	1	9,57	110,42	1082,85	0,00224	4,266			3,631							
	2	15,41	177,81	1743,72	0,00440	3,497										
	3	19,76	228,01	2236,01	0,00630	3,132										
RESULTADO (MPa)																
3.524																
FORMULA																
MR - é o módulo de resiliência, expresso em MPa;						$MR = \frac{P}{[\Delta H]t} \quad (0,2692 + 0,9976\mu)$										
P - é a carga cíclica, expressa em N;																
ΔH - é o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente).																
t - é a espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm																
μ - é o coeficiente de Poisson, adotado (0,3)																
OBSERVAÇÕES:																


6.9 G-RAP 5 - Dosagem Marshall

		<h3 style="text-align: center;">DOSAGEM MARSHALL - III</h3> <p style="text-align: center;">(ABNT-NBR-12891) (DNBR-ME-043)</p>										DATA: 26/12/2023 RELATORIO Nº: 1993-010-10-23 Nº OS: 1993-010-SP14 REVISÃO Nº: 0 FOLHA Nº:			
FOR-DI-007-REV04-21-03-18		CLIENTE: TIAGO RODRIGUES SOUZA		SUB-TRECHO: -		OPERADOR: FERNANDO		ESTUDO: CBUO FAIXA 'C' - ES 031-2006		26/12/2023		16:00			
Nº GOLPES /FACE: 75		% COMPACTAÇÃO: 150		OBRA: PESQUISA RAP		TRECHO: -		INICIO DO ENSAIO: 22/12/2023		h / min 14:00		FINAL DO ENSAIO: 22/12/2023		h / min 16:00	
VALORES ENCONT. ESPECIFICAÇÕES		DENSIDADE APARENTE - g/cm³: 2,350		TRAÇO INDICADO (% Peso): 14,18		CIMENTO ASFALTICO DE PETROLEO: 1,006		50/70		AMOST. PROCEDÊNCIA		MATERIAL		DENSIDADE	
DENSIDADE TEÓRICA - g/cm³: 2,441		BRITA O: 14,18		DENSIDADE DO CIMENTO ASFALTICO - d.CAP: 2,613		1		1		MINERAÇÃO MONTREAL		BRITA O		Real	
VAZIOS AGREGADOS MINERAL(VAM)%: 16,51		PÓ DEPEDRA: 47,27		TEOR DE CAP INDICADO: 5,5		2		3		PÓ DEPEDRA		BRITA O		Apante	
RELAÇÃO DE BETUME VAZIOS (R.B.V)%: 77,42		G-RAP 05: 18,91		TEOR ÓTIMO = 5,5		3		4		G-RAP 05		PÓ DEPEDRA		50%	
VAZIOS TOTAIS%: 3,73		CAP 50/70: 5,47		FAIXA DNIT: 5,2 À 5,8		%		0,383		TEOR DE BETUME DO G-RAP 05 - 5,2		G-RAP 05		20%	
ESTABILIDADE MARSHALL Kgf: 1383		% CAP I: 100,0		AUXILIARES		DENSIDADE		%		VAZIOS		R.B.V		Estabilid	
FLUÊNCIA mm: 3,43		P/MIST. RAP 03: 1,04		A		Teórica		V.C.B		AUX		REAIS		Fluência	
TRAÇÃO PI COMPRESSÃO DIAMETRAL- Mpa: 1,41		ADICION. TOTAL: 4,00		B		g/cm³		C.G		100(GH)		100 - J		Tração	
MÓDULO RESILIENTE - Kgf/cm²: -		4,25		C		g/cm³		10,97		7,30		18,27		Kgf	
		5,02		D		g/cm³		92,70		7,30		60,06		Kgf/cm²	
		5,25		E		g/cm³		11,59		93,78		6,22		1019	
		5,47		F		g/cm³		12,22		94,97		5,03		2,93	
		5,70		G		g/cm³		12,79		96,27		3,73		1123	
		5,70		H		g/cm³		13,29		96,71		3,29		3,00	
		5,70		I		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,46	
		5,70		J		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,44	
		5,70		K		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,41	
		5,70		L		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		M		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		N		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		O		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		P		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		Q		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		R		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		S		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		T		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		U		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		V		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		W		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		X		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		Y		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		Z		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AA		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AB		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AC		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AD		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AE		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AF		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AG		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AH		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AI		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AJ		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AK		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AL		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AM		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AN		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AO		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AP		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AQ		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AR		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AS		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AT		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AU		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AV		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AW		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AX		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AY		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		AZ		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BA		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BB		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BC		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BD		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BE		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BF		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BG		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BH		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BI		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BJ		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BK		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BL		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BM		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BN		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BO		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BP		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BQ		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BR		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BS		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BT		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BU		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BV		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BW		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BX		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BY		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		BZ		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CA		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CB		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CC		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CD		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CE		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CF		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CG		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CH		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CI		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CJ		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CK		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CL		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CM		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CN		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CO		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CP		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CQ		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CR		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CS		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CT		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CU		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CV		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CW		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CX		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CY		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		CZ		g/cm³		13,29		96,71		3,29		1,35	
		5,70		DA		g/cm³		13,29							


6.10 G-RAP 5 - Determinação módulo de resiliência

		MISTURAS ASFÁLTICAS DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA				DATA: 03/01/2023											
FOR-DI-AF-016-REV06-14-09-21		DNIT 135 /2018 - ME				RELATÓRIO N°: 1993-010-010-23											
						O.S N°: 1993-010-SP14											
						REVISÃO N°: 0											
						FOLHA N°: -											
CLIENTE: TIAGO RODRIGUES SOUZA				PROCEDÊNCIA: PESQUISA RAP 03													
OBRA: PESQUISA RAP				MATERIAL: CBUQ													
TRECHO: -				REGISTRO:													
SUB-TRECHO: -				OPERADOR: ERICK													
CONTROLE DE EXECUÇÃO DO ENSAIO (DATA E HORA)																	
INÍCIO DO ENSAIO: 02/01/2024		h / min 15:21		FINAL DO ENSAIO: 02/01/2024		h / min 17:13											
CONTROLE DE EQUIPAMENTOS																	
EQUIPAMENTO				PRENSA		LVDT 1											
Nº / CÓDIGO				PRE007		G10											
Nº CERT. CAL				1230033													
VALIDADE				30/06/2024		22/03/2024											
DADOS DA AMOSTRA																	
Granulometria (porcentagem passando)																	
2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	10	40	80	200	Cap	Estabilidade	Fluência	Vazios	R.V.B			
50,8	25,4	19,1	12,7	9,52	4,76	2,0	0,42	0,18	0,076	tipo	%	kgf	mm	%			
-	100	98,3	88,7	83,3	62,2	36,2	19,9	12,9	6,8	50-70	5,4	1321	3,80	3,59			
DENSIDADE CORPO DE PROVA								RESISTENCIA TRAÇÃO COMPRESSÃO DIAMETRAL - DNER - ME 136/2010									
CP N°	PESO		Volun e (cm³)	Densidade Aparente		ALTURA DOS CP'S mm (H)				DIAMETRO CP'S (cm) (Ø)				Força kn	Tração Mpa	Média	
	Ao Ar	Imerso		ind.	Média	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	1ª	2ª	3ª				Média
1	1198	680	516,4	2,317	2,315	63,5	62,1	63,2	64,0	62,9	101,5	101,5	101,5	101,5	11,000	1,10	1,12
2	1193	679	514,3	2,320		63,5	62,2	63,1	64,0	63,5	101,5	101,5	101,5	101,5	11,695	1,16	
3	1198	679	516,4	2,315		63,1	64,1	64,5	63,6	63,7	101,5	101,5	101,5	101,5	11,256	1,11	
4	1203	680	522,8	2,301		64,4	64,5	64,5	64,4	64,5	101,5	101,5	101,5	101,5			
5	1198	682	515,6	2,323		64,4	64,4	64,4	64,4	64,4	101,5	101,5	101,5	101,5			
6	1200	681	519,0	2,312		64,5	64,4	64,4	64,4	64,4	101,5	101,5	101,5	101,5			
DETERMINAÇÃO DO MR - MÓDULO DE RESILIÊNCIA																	
CP	CICLO	CARGA CÍCLICA (P)			DESLOCAMENTO RESILIENTE (ΔH)	MÓDULO RESILIENTE (MR)	MÉDIA										
		(%)	(kgf)	(N)				(mm)	(MPa)	(MPa)							
3	1	10,00	115,39	1131,59	0,00236	4,229	3,668										
	2	14,56	167,99	1647,42	0,00400	3,633											
	3	19,83	228,81	2243,86	0,00630	3,142											
4	1	10,33	119,23	1169,25	0,00244	4,230	3,697										
	2	14,81	170,91	1676,05	0,00410	3,609											
	3	19,93	229,99	2255,43	0,00612	3,253											
5	1	10,21	117,83	1155,52	0,00252	4,046	3,613										
	2	14,75	170,26	1669,68	0,00410	3,593											
	3	20,18	232,84	2283,38	0,00630	3,198											
RESULTADO (MPa)																	
3.659																	
FORMULA																	
MR - é o módulo de resiliência, expresso em MPa; P - é a carga cíclica, expressa em N; ΔH - é o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente). t - é a espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm μ - é o coeficiente de Poisson adotado (0,3)					$MR = \frac{P}{[\Delta H]t} (0,2692 + 0,9976\mu)$												
OBSERVAÇÕES:																	

6.11 RAP-C - Dosagem Marshall

		DOSAGEM MARSHALL - III (ABNT-NBR-12891)(DNBR-ME-043)											
FOR-DIAF-007-REV04-21-03-18		CLIENTE: TIAGO RODRIGUES SOUZA		SUB-TRECHO: -		DATA: 08/01/2024							
Nº GOLPES /FACE: 75		OBRA: PESQUISA RAP		ESTUDO: -		RELATORIO Nº: 1993-010-010-23							
% COMPACTAÇÃO: 180		TRECHO: -		OPERADOR: -		Nº OS: 1993-010-SP14							
VALORES ENCONT. ESPECIFICAÇÕES		INICIO DO ENSAIO: 03/01/2024		h / min: 08:30		FINAL DO ENSAIO: 05/01/2024		h / min: 11:50					
DENSIDADE APARENTE- g/cm³: 2,352		TRAÇO INDICADO (% Peso):		CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO		50/70		PROCEDÊNCIA		MATERIAL		DENSIDADE	
DENSIDADE TEÓRICA -g/cm³: 2,444		BRITA 1: 14,16		DENSIDADE DO CIMENTO ASFÁLTICO - d.CAP: 2,613		1,006		AMOST.:		BRITA 1		Real: 2,620	
VAZIOS AGREGADOS MINERAL(VAM)%: 16,85		PÓ DE PEDRA: 47,20		DENSIDADE MÉDIA MISTURA AGREGADO- d. A.G.R: 2,613		1,006		1		BRITA O		Real: 1,425	
RELACÃO DE BETUME VAZIOS (R.B.V)%: 77,66		G-RAP C: 18,88		TEOR ÓTIMO = 5,6		0,994		2		PO DE PEDRA		Real: 1,385	
VAZIOS TOTAIS %: 3,76		CAP 50/70: 5,60		FAIXA DNIT: 5,3 À 5,9		0,383		3		G-RAP C		Real: 2,500	
ESTABILIDADE MARSHALL Kgf: 1200		Total: 100,0		CAP 50/70: 5,3		0,383		4		-		Real: 2,500	
FLUÊNCIA mm: 3,04		ADICION: 1,18		AUXILIARES		DENSIDADE		%		VAZIOS		Estabilid: 1081	
TRAÇÃO PI COMRESSÃO DIAMETRAL- Mpa: 1,20		TOTAL: 4,00		A: 1,18		Aprenite: Teórica		V.C.B		REAIS		Fluência: 3,62	
MÓDULO RESILIENTE - MPA: 3,190		4,92		B: 4,92		g/cm³		I		3,76		Tração: 1,28	
		5,15		C: 5,15		g/cm³		J		16,85			
		5,37		D: 5,37		g/cm³		K		77,66			
		5,60		E: 5,60		g/cm³		L		1200			
		5,79		F: 5,79		g/cm³		M		80,53			
		36,04		G: 36,04		g/cm³		N		1081			
		41,83		H: 41,83		g/cm³		O		3,62			
		2,352		I: 2,352		g/cm³		P		1,18			
		2,432		J: 2,432		g/cm³							
		2,444		K: 2,444		g/cm³							
		13,09		L: 13,09		g/cm³							
		96,24		M: 96,24		g/cm³							
		13,61		N: 13,61		g/cm³							
		96,71		O: 96,71		g/cm³							
		3,29		P: 3,29		g/cm³							
		16,90		Q: 16,90		g/cm³							
		80,53		R: 80,53		g/cm³							
		1081		S: 1081		g/cm³							
		3,62		T: 3,62		g/cm³							
		1,18		U: 1,18		g/cm³							
		1,18		V: 1,18		g/cm³							
		1,18		W: 1,18		g/cm³							
		1,18		X: 1,18		g/cm³							
		1,18		Y: 1,18		g/cm³							
		1,18		Z: 1,18		g/cm³							
		1,18		AA: 1,18		g/cm³							
		1,18		AB: 1,18		g/cm³							
		1,18		AC: 1,18		g/cm³							
		1,18		AD: 1,18		g/cm³							
		1,18		AE: 1,18		g/cm³							
		1,18		AF: 1,18		g/cm³							
		1,18		AG: 1,18		g/cm³							
		1,18		AH: 1,18		g/cm³							
		1,18		AI: 1,18		g/cm³							
		1,18		AJ: 1,18		g/cm³							
		1,18		AK: 1,18		g/cm³							
		1,18		AL: 1,18		g/cm³							
		1,18		AM: 1,18		g/cm³							
		1,18		AN: 1,18		g/cm³							
		1,18		AO: 1,18		g/cm³							
		1,18		AP: 1,18		g/cm³							
		1,18		AQ: 1,18		g/cm³							
		1,18		AR: 1,18		g/cm³							
		1,18		AS: 1,18		g/cm³							
		1,18		AT: 1,18		g/cm³							
		1,18		AU: 1,18		g/cm³							
		1,18		AV: 1,18		g/cm³							
		1,18		AW: 1,18		g/cm³							
		1,18		AX: 1,18		g/cm³							
		1,18		AY: 1,18		g/cm³							
		1,18		AZ: 1,18		g/cm³							
		1,18		BA: 1,18		g/cm³							
		1,18		BB: 1,18		g/cm³							
		1,18		BC: 1,18		g/cm³							
		1,18		BD: 1,18		g/cm³							
		1,18		BE: 1,18		g/cm³							
		1,18		BF: 1,18		g/cm³							
		1,18		BG: 1,18		g/cm³							
		1,18		BH: 1,18		g/cm³							
		1,18		BI: 1,18		g/cm³							
		1,18		BJ: 1,18		g/cm³							
		1,18		BK: 1,18		g/cm³							
		1,18		BL: 1,18		g/cm³							
		1,18		BM: 1,18		g/cm³							
		1,18		BN: 1,18		g/cm³							
		1,18		BO: 1,18		g/cm³							
		1,18		BP: 1,18		g/cm³							
		1,18		BQ: 1,18		g/cm³							
		1,18		BR: 1,18		g/cm³							
		1,18		BS: 1,18		g/cm³							
		1,18		BT: 1,18		g/cm³							
		1,18		BU: 1,18		g/cm³							
		1,18		BV: 1,18		g/cm³							
		1,18		BW: 1,18		g/cm³							
		1,18		BX: 1,18		g/cm³							
		1,18		BY: 1,18		g/cm³							
		1,18		BZ: 1,18		g/cm³							
		1,18		CA: 1,18		g/cm³							
		1,18		CB: 1,18		g/cm³							
		1,18		CC: 1,18		g/cm³							
		1,18		CD: 1,18		g/cm³							
		1,18		CE: 1,18		g/cm³							
		1,18		CF: 1,18		g/cm³							
		1,18		CG: 1,18		g/cm³							
		1,18		CH: 1,18		g/cm³							
		1,18		CI: 1,18		g/cm³							
		1,18		CJ: 1,18		g/cm³							
		1,18		CK: 1,18		g/cm³							
		1,18		CL: 1,18		g/cm³							
		1,18		CM: 1,18		g/cm³							
		1,18		CN: 1,18		g/cm³							
		1,18		CO: 1,18		g/cm³							
		1,18		CP: 1,18		g/cm³							
		1,18		CQ: 1,18		g/cm³							
		1,18		CR: 1,18		g/cm³							
		1,18		CS: 1,18		g/cm³							
		1,18		CT: 1,18		g/cm³							
		1,18		CU: 1,18		g/cm³							
		1,18		CV: 1,18		g/cm³							
		1,18		CW: 1,18		g/cm³							
		1,18		CX: 1,18		g/cm³							
		1,18		CY: 1,18		g/cm³							
		1,18		CZ: 1,18		g/cm³							
		1,18		DA: 1,18		g/cm³							
		1,18		DB: 1,18		g/cm³							
		1,18		DC: 1,18		g/cm³							
		1,18		DD: 1,18		g/cm³							
		1,18		DE: 1,18		g/cm³							
		1,18		DF: 1,18		g/cm³							
		1,18		DG: 1,18		g/cm³							
		1,18		DH: 1,18		g/cm³							
		1,18		DI: 1,18		g/cm³							
		1,18		DJ: 1,18		g/cm³							
		1,18		DK: 1,18		g/cm³							
		1,18		DL: 1,18		g/cm³							
		1,18		DM: 1,18		g/cm³							
		1,18		DN: 1,18		g/cm³							
		1,18		DO: 1,18		g/cm³							
		1,18		DP: 1,18		g/cm³							
		1,18		DQ: 1,18		g/cm³							
		1,18		DR: 1,18		g/cm³							
		1,18		DS: 1,18		g/cm³							
		1,18		DT: 1,18		g/cm³							
		1,18		DU: 1,18		g/cm³							
		1,18		DV: 1,18		g/cm³							
		1,18		DW: 1,18		g/cm³							
		1,18		DX: 1,18		g/cm³							
		1,18		DY: 1,18		g/cm³							
		1,18		DZ: 1,18		g/cm³							
		1,18		EA: 1,18		g/cm³							
		1,18		EB: 1,18		g/cm³							
		1,18		EC: 1,18		g/cm³							
		1,18		ED: 1,18		g/cm³							
		1											

6.12 RAP-C - Determinação módulo de resiliência

		MISTURAS ASFÁLTICAS DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA										DATA: 08/01/2024							
FOR-DI-AF-016-REV06-14-09-21		DNIT 135 /2018 - ME										RELATÓRIO Nº: 1993-010-010-23							
												O.S Nº: 1993-010-SP14							
												REVISÃO Nº: -							
												FOLHA Nº: -							
CLIENTE: TIAGO RODRIGUES SOUZA					PROCEDÊNCIA: PESQUISA RAP c														
OBRA: PESQUISA RAP					MATERIAL: CBUQ														
TRECHO: -					REGISTRO:														
SUB-TRECHO: -					OPERADOR: ERICK														
CONTROLE DE EXECUÇÃO DO ENSAIO (DATA E HORA)																			
INÍCIO DO ENSAIO: 05/01/2024				h / min 13:43				FINAL DO ENSAIO: 05/01/2024				h / min 15:20							
CONTROLE DE EQUIPAMENTOS																			
EQUIPAMENTO						PRENSA				LVDT 1									
Nº / CÓDIGO						PRE007				G10									
Nº CERT. CAL						1230033													
VALIDADE						30/06/2024				22/03/2024									
DADOS DA AMOSTRA																			
Granulometria (porcentagem passando)										Cap		Estabilidade		Fluência		Vazios		R.V.B	
2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	10	40	80	200										
50,8	25,4	19,1	12,7	8,52	4,76	2,0	0,42	0,18	0,076	50-70	5,6	1200	3,04	3,76	77,66				
DENSIDADE CORPO DE PROVA						RESISTENCIA TRACÃO COMPRESSÃO DIAMETRAL - DNER - ME 136/2010													
CP Nº	PESO		Volun e (cm³)	Densidade Aparente		ALTURA DOS CP'S mm (H)				DIAMETRO CP'S (cm) (d)				Força kn	Tração Mpa	Média			
	Ao Ar	Imerso		ind.	Média	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	1ª	2ª	3ª				Média		
1	1193	686	506,9	2,354	2,352	66,0	66,0	66,1	66,2	62,9	101,5	101,5	101,5	101,5	11.000	1,10	1,12		
2	1194	686	508,2	2,349		64,1	64,1	64,3	64,3	63,5	101,5	101,5	101,5	101,5	11.693	1,16			
3	1192	685	507,3	2,350		64,6	64,1	64,5	63,6	63,7	101,5	101,5	101,5	101,5	11.256	1,11			
4	1194	687	507,0	2,355		64,4	64,5	64,5	64,4	64,5	101,5	101,5	101,5	101,5					
5	1193	686	507,0	2,353		64,4	64,4	64,4	64,4	64,4	101,5	101,5	101,5	101,5					
6	1195	687	508,0	2,352		64,5	64,4	64,4	64,4	64,4	101,5	101,5	101,5	101,5					
DETERMINAÇÃO DO MR - MÓDULO DE RESILIÊNCIA																			
CP	CICLO		CARGA CÍCLICA (P)				DESLOCAMENTO RESILIENTE (ΔH)		MÓDULO RESILIENTE (MR)		MÉDIA								
Nº	Nº		(%)	(kgf)	(N)		(mm)		(MPa)		(MPa)								
3	1		9,94	114,71	1124,92		0,00265		3.744		3.079								
	2		14,55	167,94	1646,93		0,00490		2.965										
	3		19,77	228,10	2236,90		0,00780		2.530										
4	1		9,97	115,10	1128,75		0,00250		3.986		3.284								
	2		14,70	169,70	1664,19		0,00480		3.060										
	3		19,67	226,99	2226,01		0,00700		2.807										
5	1		10,01	115,54	1133,06		0,00265		3.773		3.206								
	2		14,60	168,49	1652,32		0,00480		3.037										
	3		19,69	227,21	2228,17		0,00700		2.809										
RESULTADO (MPa)																			
3.190																			
FORMULA																			
MR - é o módulo de resiliência, expresso em MPa; P - é a carga cíclica, expressa em N; ΔH - é o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente). t - é a espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm μ - é o coeficiente de Poisson adotado (0,3)								$MR = \frac{P}{[\Delta H]t} \quad (0,2692 + 0,9976\mu)$											
OBSERVAÇÕES:																			