

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FERNANDO AFFONSO NÉVOA

**DANOS DE INSTALAÇÃO EM GEOGRELHAS DE
POLIÉSTER EM AGREGADO NATURAL E FRESADO DE
REVESTIMENTO ASFÁLTICO (RAP)**

SÃO CARLOS - SP

2025

FERNANDO AFFONSO NÉVOA

**DANOS DE INSTALAÇÃO EM GEOGRELHAS DE
POLIÉSTER EM AGREGADO NATURAL E FRESADO DE
REVESTIMENTO ASFÁLTICO (RAP)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Dra. Natália de Souza Correia

Área de concentração: Estruturas e Geotecnia

SÃO CARLOS - SP

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Fernando Affonso Névoa, realizada em 09/05/2025.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Natália de Souza Correia (UFSCar)

Prof. Dr. Fernando Luiz Lavoie (EESC/USP)

Prof. Dr. José Orlando Avesani Neto (POLI/USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

DEDICATÓRIA

A Jeová Deus, por ser refúgio nos momentos de dúvida.

À memória do meu pai, Silvio, pelos valores ensinados, à minha mãe, Valéria, pelo incentivo e à minha irmã, Bruna, pelo encorajamento.

À minha esposa, Talita, por todo amor, paciência e compreensão. Ao meu filho, Nicolas, por trazer a alegria que faltava em nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, minha gratidão infinita à minha esposa, Talita Névoa. Foram anos de dedicação, carinho e amor incondicional ao meu lado, acreditando em mim, mesmo nos momentos de incerteza. Sua paciência e apoio foram a base que me sustentou durante essa caminhada. Sem você, este mestrado não teria sido possível.

Aos meus pais, minha eterna gratidão por todo amor, incentivo e apoio inabalável. Por serem meu porto seguro, exemplos de força, cumplicidade e parceria, especialmente nos momentos mais difíceis. Tudo o que sou hoje carrego dos valores que me ensinaram.

À minha orientadora, Professora Dra. Natália Correia, meu profundo reconhecimento. Desde a iniciação científica, passando pela graduação e agora no mestrado, sua orientação e dedicação foram fundamentais na minha formação. Seu conhecimento, paciência e compromisso com a pesquisa são inspirações para mim, e sou privilegiado por tê-la como referência acadêmica.

Ao professor Dr. Fernando Portelina, minha sincera gratidão pela disponibilidade, orientação e valiosas sugestões ao longo desta pesquisa.

Ao Grupo de Estudos em Geotecnia e Geossintéticos (GEGEOS) e ao Laboratório de Geotecnia e Geossintéticos da UFSCar, por proporcionarem um ambiente de aprendizado e colaboração tão enriquecedores. Aos colegas de pós-graduação Karolina Santos, Andrea Vieira, Ana Laura Gianello, Ramon Felipe, Thiago Silva, Carolina Nogueira e Saurav Kar, pelo apoio, troca de experiências e amizade ao longo dessa jornada.

Um agradecimento especial ao amigo Mauro Alexandre, pelo incentivo constante, pela ajuda sempre prestativa e pelas conversas inspiradoras sobre engenharia, que tornaram esse caminho ainda mais gratificante.

Sou imensamente grato ao Departamento de Estradas e Rodagem (DER-DR 4) e a Correia Terraplanagem de Araraquara-SP, por fornecerem os materiais essenciais para esta pesquisa. Agradecimento especial à OBER pelas geogrelhas utilizadas na pesquisa.

Por fim, expresso minha gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv) e a Universidade Federal de São Carlos pelo suporte institucional, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Geogrelhas são frequentemente utilizadas como elementos de reforço em obras de infraestrutura e estruturas geotécnicas, proporcionando aumento da capacidade de carga e redução de deformações. No entanto, a função de reforço da geogrelha pode ser comprometida pelos danos causados durante o processo de instalação em campo. Para garantir que a resistência de projeto do reforço esteja de acordo com as condições reais de serviço, esses danos são considerados nos projetos por meio de fatores de redução de danos de instalação (FR_{DI}), que variam de acordo com as características do material que compõe a camada de aterro. Entretanto, há uma lacuna no entendimento dos fatores de redução de geogrelhas quando empregadas com materiais alternativos, como RCD ou os provenientes da reciclagem de pavimentos asfálticos (RAP). Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar os danos mecânicos causados pela instalação de geogrelhas em camadas compactadas de agregados RAP, comparando-os a agregados convencionais (areia) e analisando a influência das características físicas do fresado nos micros e macro danos observados no reforço. Para isso, foram conduzidos ensaios experimentais seguindo a norma ASTM D5818-22. Os resultados indicam uma perda significativa de resistência das geogrelhas utilizadas com RAP, com fatores de redução por danos de instalação (FR_{DI}) variando de 1,36 a 1,59. Apesar da granulometria do RAP ser maior que a da areia, os FR_{DI} não foram substancialmente superiores. Isso sugere que a presença do ligante asfáltico pode ter reduzido o impacto dos danos mecânicos, atenuando a severidade das solicitações sobre as geogrelhas. Os resultados obtidos neste estudo ressaltam a importância da consideração de fatores de redução específicos para materiais de aterro alternativos, e revela a importância da adequada qualidade da pintura de revestimento polimérico sobre as geogrelhas.

Palavras-chave: RAP, Geossintéticos, Danos mecânicos, Fatores de redução.

ABSTRACT

Geogrids are frequently used as reinforcement elements in infrastructure projects and geotechnical structures, providing increased load-bearing capacity and reduced deformations. However, the reinforcement function of geogrids can be compromised by damage occurring during the field installation process. To ensure that the design strength of the reinforcement aligns with actual service conditions, these damages are accounted for in engineering designs through installation damage reduction factors (FR_{DI}), which vary depending on the characteristics of the material comprising the backfill layer. However, there is a gap in understanding the reduction factors for geogrids when used with alternative materials, such as construction and demolition waste (RCD) or recycled asphalt pavement (RAP). In this context, this study aims to assess the mechanical damage caused by the installation of geogrids in compacted RAP aggregate layers, comparing them to conventional aggregates (sand) and analyzing the influence of the physical characteristics of RAP on the micro and macro damage observed in the reinforcement. To achieve this, experimental tests were conducted following the ASTM D5818-22 standard. The results indicate a significant loss of strength in the geogrids used with RAP, with installation damage reduction factors (FR_{DI}) ranging from 1.36 to 1.59. Despite the coarser granulometry of RAP compared to sand, the FR_{DI} values were not substantially higher. This suggests that the presence of the asphalt binder may have mitigated the impact of mechanical damage, reducing the severity of stress on the geogrids. The results obtained in this study highlight the importance of considering specific reduction factors for alternative backfill materials and reveal the significance of ensuring adequate quality of the polymeric coating on geogrids.

Key words: *RAP, Geosynthetic, Mechanical damage, Reduction factors.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Danos de instalação em geogrelhas: (a) Abrasão; (b) Desfilamento; (c) Esmagamento; (d) Corte (Adaptado de Lim & McCartney, 2013).....	27
Figura 3.1 – Geogrelhas: (a) GG1, (b) GG2, (c) GG3 e (d) GG4.	35
Figura 3.2 – Características físicas das geogrelhas.....	36
Figura 3.3 – Agregado natural e fresado: (a) areia; (b) RAP.	37
Figura 3.4 – Curva de distribuição granulométrica da areia.	38
Figura 3.5 – Curva de distribuição granulométrica do RAP.....	40
Figura 3.6 – Curvas de distribuição granulométrica da areia e do RAP.	41
Figura 3.7 – Equipamento do ensaio de resistência à tração de geogrelhas do Laboratório de Geotecnia da UFSCar.	43
Figura 3.8 – Layout da seção experimental.	44
Figura 3.9 – Execução do nivelamento do terreno natural.....	45
Figura 3.10 – Execução da camada de base e controle de compactação: (a) Aplanamento do material; (b) Cilindro para controle de compactação.....	45
Figura 3.11 – Execução da camada de base: (a) RAP; (b) Areia.	46
Figura 3.12 – Compactação da camada de base: (a) Camada da areia; (b) Camada do fresado; (c) Extração do cilindro para aferir o G.C.....	46
Figura 3.13 – Preparação da camada de base: (a) instalação das geogrelhas com RAP; (b) Instalação das geogrelhas com areia; (c) seção do RAP pronta; (d) Seção da areia pronta.	47
Figura 3.14 – Despejo dos agregados: (a) Despejo da areia sobre geogrelhas; (b) Material sobre Geogrelhas; (c) Despejo do RAP sobre geogrelhas; (d) Material sobre Geogrelhas.	48
Figura 3.15 – Compactação da camada superior: (a) RAP; (b) Areia.....	48
Figura 3.16 – Máquinas utilizadas: (a) Pá carregadeira; (b) Rolo liso vibratório.	49
Figura 3.17 – Exumação das geogrelhas: (a) Ferramenta usada; (b) Desagregação do RAP.	50
Figura 3.18 – Retirada da geogrelha: (a) Geogrelha exposta; (b) Processo de retirada; (c) Geogrelha exumada. .	50
Figura 3.19 – Ensaio de índice de forma: (a) Comprimento; (b) Espessura.	53
Figura 3.20 – Agregado natural e fresado passantes na peneira #4: (a) RAP; (b) Areia.....	54
Figura 3.21 – Equipamentos usados para ensaio de MEV e microscopia digital: (a) MEV; (b) Microscopia digital.....	55
Figura 3.22 – Amostras para ensaio de Teor de RAP impregnado.	56
Figura 4.1 – Geogrelhas Sentido Longitudinal – areia: (a) GG1; (b) Registro do estado da Geogrelha; (c) GG2; (d) Registro do estado da Geogrelha; (e) GG3; (f) Registro do estado da Geogrelha; (g) GG4; (h) Registro do estado da Geogrelha.	58
Figura 4.2 – Geogrelhas sentido transversal – areia: (a) GG1; (b) Registro do estado da Geogrelha; (c) GG2; (d) Registro do estado da Geogrelha; (e) GG3; (f) Registro do estado da Geogrelha; (g) GG4; (h) Registro do estado da Geogrelha.	59
Figura 4.3 – Geogrelhas Sentido Longitudinal – fresado: (a) GG1; (b) Registro do estado da Geogrelha; (c) GG2; (d) Registro do estado da Geogrelha; (e) GG3; (f) Registro do estado da Geogrelha; (g) GG4; (h) Registro do estado da Geogrelha.	62
Figura 4.4 – Geogrelhas sentido transversal – fresado: (a) GG1; (b) Registro do estado da Geogrelha; (c) GG2; (d) Registro do estado da Geogrelha; (e) GG3; (f) Registro do estado da Geogrelha; (g) GG4; (h) Registro do estado da Geogrelha.	63
Figura 4.5 – Geogrelha intacta: (a) GG1-4X; (b) GG2-3.2X; (c) GG3-2X; (d) GG4- 1.6X.....	64
Figura 4.6 – Geogrelha da areia: (a) GG1-4X; (b) GG2-3.2X; (c) GG3-2X; (d) GG4-1.25X).....	65
Figura 4.7 – Geogrelha do RAP: (a) GG1-4X; (b) GG2-3.2X; (c) GG3-2X; (d) GG4-1.25X.....	65
Figura 4.8 – Geogrelha limpa – pós ensaio de impregnação: (a) GG1-4X; (b) GG2-3.2X; (c) GG3-2X; (d) GG4-1.25X.	66
Figura 4.9 – Imagem MEV da superfície da geogrelha intacta – GG1: (a) Intacta – LE - BSE – 40X; (b) Intacta – LE – BSE – 500X; (c) Intacta – LE – BSE – 999X.	67

Figura 4.10 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da areia – GG1: (a) Areia – LE - BSE – 40X; (b) Areia – LE – BSE – 500X; (c) Areia – LE – BSE – 1000X.	68
Figura 4.11 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da RAP – GG1: (a) RAP – LE - BSE – 40X; (b) RAP – LE – BSE – 500X; (c) RAP – LE – BSE – 1000X.....	69
Figura 4.12 – Imagem MEV da superfície da geogrelha intacta – GG2: (a) Intacta – LE - BSE – 40X; (b) Intacta – LE – BSE – 500X; (c) Intacta – LE – BSE – 1000X.	70
Figura 4.13 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da areia – GG2: (a) Areia – LE - BSE – 40X; (b) Areia – LE – BSE – 500X; (c) Areia – LE – BSE – 1000X.	71
Figura 4.14 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da RAP – GG2: (a) RAP – LE - BSE – 40X; (b) RAP – LE – BSE – 500X; (c) RAP – LE – BSE – 1000X.....	72
Figura 4.15 – Imagem MEV da superfície da geogrelha intacta – GG3: (a) Intacta - SE – 40X; (b) Intacta – SE – 1000X.	73
Figura 4.16 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da areia – GG3: (a) Areia - SE – 40X; (b) Areia – SE – 500X; (c) Areia – LE – BSE – 1000X.	73
Figura 4.17 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da RAP – GG3: (a) RAP – LE - BSE – 40X; (b) RAP – LE – BSE – 500X; (c) RAP – SE – 1000X.....	74
Figura 4.18 – Imagem MEV da superfície da geogrelha intacta – GG4: (a) Intacta - SE – 40X; (b) Intacta – LE – BSE – 500X.....	75
Figura 4.19 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da areia – GG4: (a) Areia – LE - BSE – 40X; (b) Areia – SE – 500X; (c) Areia – SE – 1000X.	76
Figura 4.20 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da RAP – GG4: (a) RAP - SE – 40X; (b) RAP – LE – BSE – 500X; (c) RAP – LE – BSE – 1000X.	76
Figura 4.21 – Curva tensão-deformação: (a) GG1 longitudinal; (b) GG2 Longitudinal; (c) GG3 longitudinal; (d) GG4 Longitudinal.....	77
Figura 4.22 – Gráfico Q-Q da geogrelha intacta: (a) GG1; (b) GG2; (c) GG3; e (d) GG4.	88
Figura 4.23 – Gráfico Q-Q da geogrelha da areia: (a) GG1; (b) GG2; (c) GG3; e (d) GG4.....	89
Figura 4.24 – Gráfico Q-Q da geogrelha do RAP: (a) GG1; (b) GG2; (c) GG3; e (d) GG4.	89
Figura 4.25 – Gráfico em barras – Resistência à tração média.....	93
Figura 4.26 – Fator de dano de instalação (FR_{DI}) versus resistência última à tração.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades Granulométricas - RAP	23
Tabela 2.2 – Fatores de redução por dano de instalação (FR_{DI}) para diferentes materiais de aterro e geossintéticos.....	32
Tabela 2.3 – Valores de FR_{DI} Disponibilizados em Catálogos de Fabricantes e Órgãos Técnicos.....	33
Tabela 3.1 – Propriedades físicas do agregado miúdo.....	37
Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	38
Tabela 3.3 – Propriedades físicas do fresado RAP.....	39
Tabela 3.4 – Distribuição granulométrica do fresado - RAP.....	39
Tabela 3.5 – Parâmetros de compactação de campo.....	51
Tabela 3.6 – Parâmetros de compactação de laboratório.....	52
Tabela 3.7 – Compactação e número de passadas do rolo compactador.....	52
Tabela 3.8 – Índice de forma do RAP.....	53
Tabela 3.9 – Teor de RAP impregnado	56
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas da geogrelha GG1.....	78
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas da geogrelha GG2.....	79
Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas da geogrelha GG3.....	80
Tabela 4.4 – Propriedades mecânicas da geogrelha GG4.....	81
Tabela 4.5 – Propriedades mecânicas da geogrelha exumada da areia.....	83
Tabela 4.6 – Propriedades mecânicas da geogrelha exumada do RAP.....	86
Tabela 4.7 – Estatística descritiva e teste Shapiro-Wilk.....	87
Tabela 4.8 – Intervalo de confiança.....	91
Tabela 4.9 – Resumo dos valores de dano de instalação (FR_{DI}).....	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Relevância dos principais mecanismos que afetam a durabilidade dos geossintéticos de acordo com as principais funções.....	28
Quadro 3.1 – Propriedades de catálogo das geogrelhas utilizadas nesta pesquisa.....	36
Quadro 3.2 – Teor de Ligante asfáltico	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Justificativa	16
1.2. Objetivo geral.....	17
1.3. Objetivos específicos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Estruturas reforçadas com geossintéticos	19
2.2. Agregados alternativos em obras de infraestrutura geotécnica.....	21
2.3. Características do RAP	22
2.4. Danos mecânicos em geossintéticos	25
2.5. Dimensionamento e fatores de redução	27
2.6. Estudos sobre danos de instalação em geogrelhas	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1. Materiais.....	35
3.1.1. Geogrelhas	35
3.1.2. Agregados e Fresado RAP.....	36
3.2. Características físicas dos agregados e do fresado.....	37
3.2.1. Agregado miúdo - Areia	37
3.2.2. Agregado Fresado - RAP.....	39
3.3. Procedimento de ensaio – ASTM D6637 – Single Rib	42
3.4. Procedimento de ensaio – ASTM D5818	44
3.5. Exumação das geogrelhas	49
3.6. Grau de compactação do canteiro experimental	51
3.7. Índice de forma e angulosidade dos grãos	52
3.8. Ensaio não destrutivo - microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura	54
3.9. Teor de ligante impregnado	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1. Análise visual dos danos	57
4.1.1. Seção experimental – Areia	57
4.1.2. Seção experimental – Fresado RAP	60
4.2. Análise por ensaios não destrutivos	63
4.2.1. Microscopia Óptica.....	63
4.2.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	66

4.2.2.1. MEV das geogrelhas – GG1	66
4.2.2.2. MEV das geogrelhas – GG2	69
4.2.2.3. MEV das geogrelhas – GG3	72
4.2.2.4. MEV das geogrelhas – GG4	75
4.3. Resultados do ensaio de resistência à tração das geogrelhas intactas	77
4.4. Resultados do ensaio de resistência à tração das geogrelhas danificadas	82
4.4.1. Resistência à tração das geogrelhas exumadas da areia	82
4.4.2. Resistência à tração das geogrelhas exumadas da RAP	84
4.5. Análise estatística – distribuição normal da amostra	86
4.5.1. Teste Shapiro-Wilk	87
4.5.2. Outliers	90
4.5.3. Intervalo de confiança	90
4.6. Cálculo do fator de redução de danos de instalação	92
5. CONCLUSÃO	97
6. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	98
7. REFERÊNCIAS	99

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso dos geossintéticos tem impulsionado grandes avanços em obras de terra, ganhando cada vez mais espaço na engenharia civil (Palmeira et al., 2021). Na engenharia geotécnica, esses materiais se destacam por sua versatilidade e ampla gama de aplicações, podendo ser empregados em estruturas de solos reforçados, muros de contenção, taludes, aterros, sistemas de controle de erosão e de proteção costeira (Shu kla,2017). Além disso, os geossintéticos são amplamente utilizadas como reforço de solo em plataformas de suporte em áreas de mineração e na infraestrutura de pavimentos, incluindo estradas não pavimentadas, ferrovias e pavimentos flexíveis (Sharbaf et al., 2017; Tschöke et al., 2023).

Dentre os diversos tipos de geossintéticos, as geogrelhas destacam-se como uma das soluções mais empregadas em projetos que visam aumentar a estabilidade de obras de terra e melhorar seu desempenho (Varma et al., 2019). As principais características desejadas pelos projetistas ao utilizarem esses materiais são a alta resistência à tração dos filamentos, associada a ocorrência de menores deformações nas estruturas. Esse comportamento menos deformável decorre da interação eficiente entre o geossintético e o solo ou agregado, proporcionada pelo imbricamento das partículas nas aberturas da malha da geogrelha (Ziegler, 2017).

A instalação de geogrelhas como reforço envolve sua aplicação sobre uma camada de solo ou agregado previamente compactada e nivelada, seguida pela deposição e compactação de uma nova camada de aterro. Contudo, esse processo pode induzir danos às geogrelhas, decorrentes das tensões e esforços aplicados durante a instalação. Barbosa et al. (2021) destacam que a severidade desses danos está diretamente relacionada ao tipo de polímero utilizado na fabricação da geogrelha, à intensidade da compactação e às características do material de aterro.

O dano de instalação das geogrelhas é quantificado por meio do Fator de Redução (FR), definido como o quociente entre as resistências à tração da geogrelha antes e após a instalação. Esse fator é fundamental no dimensionamento, visto que a resistência admissível de das geogrelhas e geotêxteis é obtida a partir da resistência nominal à tração do material, devidamente reduzida pela aplicação de fatores parciais de segurança que consideram diferentes mecanismos de degradação, incluindo o dano de instalação (Koerner et al., 2023).

A prática de determinar e aplicar fatores de redução está consolidada na literatura técnica desde a década de 1990, sendo tema de extensa pesquisa. No Brasil, não há referência de valores normativos estabelecidos pela ABNT para os fatores de redução de danos de instalação, cabendo ao projetista recorrer a publicações técnicas e estudos de referência para

determinar esses valores e justificá-los no memorial de projeto (ABNT NBR 16920 – Muros e taludes em solos reforçados). Esse cenário reforça a necessidade de estudos contínuos sobre os danos mecânicos sofridos por materiais poliméricos, de forma a garantir que os fatores adotados representem adequadamente as condições reais de instalação e representem com mais precisão as condições de dano. A maioria das estruturas de solos reforçados com geossintéticos são projetadas para durar até 100 anos, o que implica que os materiais de reforço, como as geogrelhas, também tenham uma durabilidade correspondente, mantendo suas propriedades de resistência ao longo desse período (Hufenus et al., 2005). Esse requisito de durabilidade amplia ainda mais a relevância de estudos que busquem compreender e quantificar os danos sofridos pelos geossintéticos desde sua instalação, assegurando o desempenho esperado ao longo da vida útil da estrutura.

Na literatura, diversas pesquisas têm mostrado avaliações de danos de instalação em geogrelhas fabricadas com diferentes materiais, combinados com diferentes tipos de solos, agregados de diferentes granulometrias, impacto do processo de compactação, entre outros aspectos (Miyata & Bathurst 2015, Biazotto & Avesani 2018, McCartney 2013, Tschöke et al., 2023, (Koerner et al., 2023). De forma geral, os resultados desses estudos evidenciam que a severidade do dano é fortemente influenciada por parâmetros intrínsecos ao projeto e à obra, tornando os fatores de redução altamente sensíveis às condições específicas de instalação.

Allen & Bathurst (1994) avaliaram mais de 3500 ensaios de resistência à tração-deformação, de 12 fontes diferentes, observando que o comportamento carga-deformação das geogrelhas pós-dano varia significativamente entre diferentes tipos de produtos geossintéticos, sendo este comportamento condicionado, entre outros fatores, pela natureza do polímero utilizado. Miyata e Bathurst (2015) sugerem, ainda, que a análise estatística da variação nos resultados dos testes de dano de instalação é essencial para futuras abordagens probabilísticas no projeto de estruturas de solo reforçado com geogrelhas. Estas análises permitem avaliar o estado limite de ruptura por tração e contribuir para a calibração de métodos de projeto baseado em fatores de redução de carga e resistência.

Paralelamente a essas discussões técnicas, surge um tema cada vez mais relevante: a busca por soluções sustentáveis que reduzam o consumo de agregados naturais, frente ao aumento expressivo da geração de resíduos na construção civil e na pavimentação asfáltica. Nesse contexto, cresce o interesse pelo uso de materiais alternativos, como solo-brita, resíduos de construção e demolição (RCD) e pavimento asfáltico reciclado (RAP) em obras geotécnicas e rodoviárias. Palmeira et al. (2021) destacam a importância do estudo do RCD como material

geotécnico, enquanto Mariyappan et al. (2023) ressaltam os avanços no entendimento do comportamento do RAP.

Neste sentido, pesquisas tem buscado avaliar o comportamento das geogrelhas quanto aos danos de instalação em materiais alternativos. Uma das primeiras pesquisas sobre o tema no Brasil foi elaborada por Santos (2011), onde foram construídos dois muros de 3,60 metros de altura com RCD. Foram obtidos Fatores de redução de danos de instalação (FR_{DI}) para geogrelha de poliéster variando de 1,12 a 1,28, sendo observado que fatores como a energia de compactação, a temperatura e o pH do material podem exercer influência nos danos constatados. Koerner et al. (2023) também abordaram o tema, relatando, por exemplo, um FR_{DI} de 1,6 para geogrelhas instaladas comm agregados naturais com granulometria conforme a AASHTO #57 (similar ao agregado brita #2) e ou um FR_{DI} de 1,2 no caso de agregados de vidro espumado ultraleve, com partículas acima de 32 mm.

Dentre os materiais alternativos, atualmente o fresado RAP se destaca como um dos agregados mais gerados no mundo. Embora o uso de materiais naturais ainda seja uma opção mais comum, o interesse pela reutilização de RAP e pela avaliação de suas propriedades de engenharia tem crescido significativamente nas últimas três décadas (Dager et al., 2023). Lopes et al. (2024) realizaram um levantamento sobre a produção de fresado RAP no Brasil, indicando que as concessionárias de rodovias produziram, entre 2019 e 2021, uma média superior a 1,03 milhão de toneladas. Esse valor é semelhante à média registrada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) no período de 2019 a 2023. No entanto, diferentemente dos solos e agregados convencionais, o fresado RAP apresenta particularidades que podem gerar danos ou microdanos diferenciados nas geogrelhas, devido a presenã de grãos graúdos e angulares, à presença de ligante betuminoso e às condições específicas de compactação empregadas quando utilizado como material de aterro.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar os danos mecânicos causados pela instalação de diferentes geogrelhas de poliéster em agregados de fresado RAP, comparando seus efeitos com aqueles observados em agregados convencionais (areia), por meio de ensaios de campo, ensaios de laboratório, avaliações estatísticas e análises microscópicas.

1.1. Justificativa

Considerando o crescente interesse na sustentabilidade e na redução do consumo de recursos naturais na construção civil, o reuso de materiais recicláveis, como o RAP, tem ganhado destaque como alternativa viável. No entanto, apesar dos benefícios ambientais e

econômicos associados ao uso de RAP, pouco se sabe sobre seu potencial impacto na integridade e desempenho dos reforços geossintéticos, particularmente das geogrelhas.

Levando em conta a importância das geogrelhas como elementos de reforço em obras geotécnicas, é fundamental compreender como diferentes materiais de aterro podem afetar sua eficácia e durabilidade. Os resultados desta pesquisa não só fornecerão dados valiosos para projetistas e engenheiros geotécnicos, mas também contribuirão para o desenvolvimento de diretrizes e práticas recomendadas para o uso seguro e eficiente de geogrelhas em conjunto com agregados de fresado RAP.

Além disso, o estudo terá relevância prática e impacto significativo na indústria da construção civil, especialmente em obras e países onde o reuso de RAP é uma prática comum, como os Estados Unidos e o Brasil. A compreensão dos potenciais danos às geogrelhas causados pela utilização de RAP como material de aterro permitirá uma melhor gestão de riscos e uma otimização dos processos de projeto e construção em obras que empregam essa técnica de reciclagem de materiais.

Diante dessa lacuna, é essencial investigar os efeitos do fresado RAP na integridade de geogrelhas sob condições reais de instalação, algo ainda não explorado na literatura. Além disso, também é correlacionado os diferentes tipos de danos com as propriedades mecânicas das geogrelhas, fornecendo subsídios para escolha dos fatores de redução de danos de instalação. Os resultados poderão contribuir para a melhoria das diretrizes técnicas e embasar futuras revisões normativas sobre o uso de RAP em camadas estruturais reforçadas.

Portanto, esta pesquisa pode contribuir significativamente para o avanço do conhecimento na área de engenharia geotécnica, fornecendo informações valiosas para a tomada de decisões em projetos que envolvem o uso de geogrelhas em conjunto com agregados de fresado RAP.

1.2. Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar os danos mecânicos resultantes da instalação de geogrelhas de poliéster em agregados de fresado RAP, e compará-los com aqueles observados em um agregado convencional (areia). Para isso, serão adotados os procedimentos normativos estabelecidos pela ASTM D5818-22, permitindo a determinação de fatores de redução a serem usados em projetos geotécnicos.

1.3. Objetivos específicos

- (a) Construir seções experimentais de campo que simulem danos de instalação em geogrelhas submetidas a condições de compactação e diferentes agregados;
- (b) Determinar o Fator de redução de danos de instalação (FR_{DI}) à tração das geogrelhas quando instaladas em camadas compactadas com agregados de fresado RAP, comparando os resultados com aqueles obtidos em materiais de aterro convencionais;
- (c) Avaliar o impacto do uso de RAP na integridade física e na resistência à tração das geogrelhas em aplicações geotécnicas.
- (d) Aplicar ferramentas estatísticas para analisar a significância das diferenças de resultados obtidos, garantindo consistência das conclusões.
- (e) Caracterizar e comparar, por meio da microscopia, os danos causados nas geogrelhas pelo fresado RAP em relação aos observados com agregados naturais, buscando identificar padrões de degradação específicos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estruturas reforçadas com geossintéticos

Diversos autores estudaram estruturas reforçadas com geossintéticos, como muros, taludes, aterros, barragens de terra e bases, sub-bases e sub-leitos de pavimentos e ferrovias (Avesani et al., 2016; Portelinha et al., 2016; Puppi & Caron, 2023; Rowe & Li, 2002; Maruyama et al., 2012). De acordo com Avesani et al. (2016), os muros de solo reforçado com geossintético são amplamente utilizados em várias regiões do mundo. Suas principais vantagens incluem simplicidade e rapidez na construção, controle preciso dos materiais utilizados, estética final atraente, bom desempenho geral e custo relativamente baixo em comparação com outras opções de contenção geotécnica. Os muros de solo reforçado são geralmente definidos como estruturas cuja face possui inclinação igual ou superior a 70° em relação à horizontal. O dimensionamento dessas estruturas exige a determinação da quantidade e do comprimento das camadas de reforço necessárias para garantir a estabilidade. Esse processo considera a ancoragem das camadas de reforço, bem como outros possíveis mecanismos de instabilidade (Puppi & Caron, 2023).

Portelinha et al. (2016) descrevem os taludes de solo reforçado como estruturas coesas de contenção, que funcionam de maneira similar aos muros de gravidade. Os elementos de reforço são organizados em camadas horizontais sucessivas, intercaladas com material de aterro compactado, para estabelecer um maciço coeso e reforçado conforme a altura e inclinação desejadas da face. A técnica de reforço do solo com o uso de geossintéticos implica na construção de um sistema que integra camadas alternadas de solo ou material granular com geossintéticos, como geogrelhas ou geotêxteis tecidos.

Estruturas de disposição de resíduos estabilizadas com geossintéticos podem ser realizadas com o uso geotêxteis e geogrelhas. Esses reforços são fundamentais para evitar o deslocamento ou colapso do solo sob o peso dos resíduos, assegurando que o aterro possa conter os materiais de forma segura, sem causar danos ao meio ambiente (Rowe & Li, 2002).

Barragens de terra reforçadas com geossintéticos são estruturas construídas utilizando camadas de reforço para aumentar a estabilidade e a resistência do solo. Esse tipo de barragem emprega geossintéticos para criar inclinações íngremes, que ajudam a resistir ao movimento do solo, assegurando a estabilidade de longo prazo da estrutura. Durante a construção, o solo do aterro é compactado em camadas reforçadas com geossintéticos, o que aumenta a pressão de

confinamento no solo, melhorando a resistência ao cisalhamento e a estabilidade geral da barragem (Maruyama et al., 2012).

Obras de terra mecanicamente estabilizada (MSE) proporcionam métodos de construção simples, uma estética agradável e soluções econômicas como uma alternativa às paredes de gravidade tradicionais. No entanto, é crucial que o projeto e a construção sejam meticulosamente avaliados para garantir um desempenho satisfatório da parede (Kibria et al., 2014).

Na pavimentação, as geogrelhas são utilizadas como reforço das camadas de base e sub-base aumentando a capacidade de suporte, minimizando o efeito membrana e limitando movimentos laterais (Sharbaf et al., 2017). Em ferrovias, o reforço é inserido na camada de sub-leito e em algumas situações de projeto pode ser utilizado comprimentos de geogrelhas diferentes locais específicos da estrutura (Kim & Kim, 2020).

Na concepção dessas estruturas, a interação entre o solo e o reforço é um aspecto crucial a ser considerado no processo de dimensionamento. Esta interação é influenciada pela geometria da estrutura, características do local, do material usado como aterro, resistência e rigidez do reforço (Fontenelle et al., 2018). O desempenho de uma massa de solo reforçado é influenciado não apenas pelas características de seus componentes, mas também pela interação entre eles e por diversos fatores, incluindo o processo construtivo (Castorina, 2008).

Assim, compreender o comportamento dos materiais usados e suas interações, é crucial para o desenvolvimento de um bom projeto e para o desempenho eficaz da estrutura. Para garantir durabilidade, boa drenagem, facilidade de construção e interação adequada com o reforço, é essencial utilizar materiais de aterro de alta qualidade. Portanto, são preferencialmente escolhidos para a construção dessas estruturas, solos granulares bem graduados (Kibria et al., 2014).

Nos últimos anos o uso de materiais reciclados como substituto dos materiais naturais tem providenciado benefícios econômicos e ambientais na engenharia. Dois materiais que tem atraído interesse em ser usado como matéria prima para estruturas estabilizadas mecanicamente são o RCD e o RAP Bleakley et al., 2014).

Rathje et al. (2006) examinaram as propriedades geotécnicas do asfalto reciclado fresado (RAP), constatando que, em geral, o material possui granulometria dentro dos limites estabelecidos pela TxDOT. Além disso, o RAP não absorve água devido ao revestimento das partículas com betume, e apresenta uma boa capacidade de drenagem. Os resultados dos ensaios triaxiais consolidados drenados controlados por deformação indicam que o RAP exhibe

características de resistência satisfatórias, embora seja necessário precaução contra deformações excessivas devido à fluência.

Dessa forma, observa-se que os geossintéticos desempenham um papel fundamental na melhoria do desempenho estrutural e funcional de diversas obras geotécnicas, desde contenções verticais e taludes até estruturas de disposição de resíduos, barragens de terra e sistemas de pavimentação e ferrovias. O sucesso dessas aplicações depende diretamente da compreensão adequada do comportamento mecânico dos materiais envolvidos, da interação solo-reforço e da adoção de práticas construtivas criteriosas. Além disso, a crescente incorporação de materiais reciclados como o RAP e o RCD em substituição parcial ou total aos materiais convencionais representa uma alternativa promissora, desde que suas propriedades geotécnicas e o desempenho a longo prazo sejam cuidadosamente avaliados.

2.2. Agregados alternativos em obras de infraestrutura geotécnica

Devido à significativa demanda por agregados naturais na construção civil, os recursos naturais estão sendo consumidos em larga escala em todo o mundo. Essa utilização de recursos naturais contribui para o consumo global de energia, emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis e poluição atmosférica em escala mundial (Sheikh & Shah, 2020). Para mitigar esse impacto, é crucial adotar materiais reciclados como alternativa viável, promovendo assim o desenvolvimento sustentável (Głuchowski et al., 2020).

O crescente índice de urbanização tem resultado em uma maior produção de resíduos. A disposição desses resíduos frequentemente constitui um grande problema, e, portanto, sua utilização na construção civil é objeto de estudo por pesquisadores para resolver o desafio do descarte de resíduos (Venkatachalam et al., 2022).

Diante da significativa quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados, uma estratégia adequada de gestão, como a reciclagem, gera novos materiais brutos para aplicações geotécnicas (Fleury et al., 2019). Diversos estudos têm avaliado a utilização de agregados reciclados como uma alternativa viável para fomentar práticas sustentáveis e ecologicamente responsáveis na indústria da construção. Na engenharia geotécnica, há um interesse particular na investigação dos potenciais aplicações dos resíduos em áreas como construção de estradas, desenvolvimento de aterros sanitários e, mais recentemente, como materiais para compor estruturas de solo (Fleury et al., 2023).

Dois tipos de materiais reciclados gerados em volumes significativos e com potencial de uso, são os resíduos de construção e demolição (RCD), em especial o agregado de concreto

reciclado e o Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP). O agregado de concreto reciclado é obtido da reforma ou demolição de pavimentos de concreto de cimento Portland, pistas de aeroportos, estruturas de pontes e edifícios, enquanto o RAP é obtido por meio do processo de manutenção por fresa de pavimentos de concreto asfáltico (Soleimanbeigi et al., 2019).

Anualmente, a produção global de resíduos de construção e demolição (RCD) supera 10 bilhões de toneladas, com os Estados Unidos e a União Europeia contribuindo, respectivamente, com 700 milhões e 800 milhões (Wu et al., 2019). Segundo (Chen et al. (2021), a China é responsável pela geração de aproximadamente 2,3 bilhões de toneladas de RCD anualmente, representando cerca de 40% do total de resíduos sólidos produzidos, devido à rápida urbanização e a realização de amplos projetos de renovação urbana.

Segundo Sheikh et al (2020), no final de 2018, foram produzidas 110,3 milhões de toneladas de RAP. O uso do RAP resultou em uma economia de cerca de 4,5 milhões de metros cúbicos de material em aterros e 78 milhões de toneladas de agregados, com um custo total estimado em US\$ 2,8 bilhões. No final do ano as empresas que declararam ter armazenado RAP aumentaram seu estoque de 93,9% em 2019 para 97,1% em 2020. No total, foram produzidos cerca de 96,3 milhões de toneladas e utilizaram cerca de 93,7 milhões de toneladas em 2020 (NAPA, 2020). Segundo a Associação Europeia de Pavimento Asfáltico, em 2022, cerca de 40 milhões de toneladas de RAP estavam disponíveis para reuso pela indústria asfáltica na Europa (EAPA, 2022). No Brasil, a média nacional produzida entre os anos de 2019 e 2021 foi de mais de 2 milhões de toneladas (Lopes et al., 2024).

Diante da crescente geração de resíduos e da intensa exploração de recursos naturais, torna-se imprescindível adotar abordagens que aliem eficiência técnica e responsabilidade ambiental. A incorporação de materiais reciclados como o RCD e o RAP em obras geotécnicas representa uma estratégia promissora para reduzir os impactos ambientais da construção civil, promover a economia circular e minimizar a necessidade de disposição final em aterros. A consolidação dessas práticas, no entanto, depende de avanços em pesquisas que assegurem o desempenho geotécnico adequado desses materiais, além da implementação de políticas públicas que incentivem sua aplicação em larga escala.

2.3. Características do RAP

O RAP resultante da fresagem do pavimento asfáltico tem no geral boa granulometria. Essa granulometria resultante tem relação com diversos fatores, entre eles, a espessura da

camada de corte, a velocidade de entrada do cilindro de desbaste e o grau de deterioração em que se encontra o pavimento. (Bonfim, 2020).

Os ensaios de caracterização granulométricas realizados em amostras de RAP por Soleimanbeigi et al. (2022) e, beigi et al. (2022) apresentam um material com aproximadamente 5,1% de finos, constituído de partículas angulares com superfície áspera e classificado como areia mal graduada pelo Sistema Unificado de Classificação de Solo (da sigla em inglês USCS). Dager et al. (2023) classificaram 9 (nove) amostras de RAP (Tabla 2.1) e concluíram que a granulometria do material está diretamente ligada ao método de processamento da camada asfáltica, podendo variar a porcentagem de fino de 0% à 6% e conclui que a granulometria do RAP pode variar de areia bem graduada à brita (ou cascalho) bem graduado.

Os ensaios realizados por Rathje et al., (2006) indicam que o RAP pode ter graduação material que permite seu uso como material geotécnico/aterro.

Tabela 2.1 – Propriedades Granulométricas - RAP

	Diam. Máx.(mm)	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	C _c	C _u	SUCS Classificação	AASHTO Classificação
Cosentino et al. (2003)	37,5	7,0	1,5	0,33	0,97	21,2	GW	A-1-a
Morro (2021)	12,5	4,8	1,9	0,52	1,40	9,8	SW	A-3-a
Rathje et al. (2002)	37,5	9,6	4,2	1,20	1,53	8,0	GW	A-1-a
Bennert & Maher, (2005)	12,5	5,7	1,9	0,51	1,22	10,9	SW	A-1-a
Cooley et al. (2005)	19,0	5,0	1,8	0,50	1,30	10,0	SW	A-1-a
Arulrajah et al. (2013)	25,0	5,4	1,6	0,23	2,06	23,5	SW	A-1-a
Titi et al. (2019)	n/a	5,9	1,9	0,24	2,50	25,6	GW/GP	A-1-a
Mousa et al. (2021)	25,4	8,0	3,5	0,85	1,80	9,4	GW	A-1-a

Fonte: Adaptado de Dager et al (2023).

De acordo com o Método A da AASHTO T 164, Barzegar et al. (2023) determinou que o teor de ligante asfáltico de cinco amostras de RAP variam de 5,00% à 6,33%. Isso porque

o RAP possui resíduos de ligante asfáltico em sua composição e apresenta características viscoelásticas.

Ensaio de fluência indicaram que o RAP compactado apresenta grandes deformações sob carga constante e falha sob tensões elevadas. Com base nesses resultados, o uso de RAP em estruturas estabilizadas mecanicamente é recomendado somente quando reforçado. Para evitar a ruptura por fluência do RAP compactado, a tensão máxima deve ser limitada a menos de 80% da resistência à compressão. Essas considerações são cruciais ao projetar uma estrutura MSE utilizando RAP como materiais de aterro (Soleimanbeigi & Likos, 2019).

Dager et al. (2023) avaliaram a densidade específica do RAP apresenta variações entre diversos estudos, possivelmente devido aos métodos de fresagem. Observou-se que o RAP possui uma densidade específica menor quando comparado com os materiais agregados de granulometria grossa. O intervalo de valores de densidade específica do RAP da literatura avaliada foi de 2,17 a 2,63.

O processo de fresagem da camada asfáltica e os métodos de armazenamento do RAP impactam a quantidade de finos e, conseqüentemente, a condutividade hidráulica saturada (k_{sat}). Os valores de k_{sat} relatados na literatura para RAP variaram de $3,5 \times 10^{-5}$ cm/s a $1,5 \times 10^{-1}$ cm/s, sendo o valor médio de $4,1 \times 10^{-2}$ cm/s (Dager et al., 2023).

Soleimanbeigi et al. (2019) estudaram o uso de RAP com geogrelhas em obras de terra, e verificaram que essa combinação apresenta uma resistência ao cisalhamento da interface na faixa de 50-60% maior do que os geotêxteis correspondentes. Os ângulos de atrito de interface para RAP reforçado com geogrelha ($\delta=32-40^\circ$) são comparáveis aos observados em areia e cascalho reforçados com o mesmo geossintético. Os testes de arrancamento revelaram que fresado RAP compactado pode oferecer resistência competitiva ao arrancamento em comparação com geotêxteis tecidos e geogrelhas uniaxiais, em relação a areia compactada e cascalho. Soleimanbeigi et al. (2019) concluem que não houve ruptura da estrutura por fluência, e a falha ocorreu devido à ruptura do geotêxtil ou da geogrelha (Soleimanbeigi & Likos, 2019).

A constituição do RAP resultante da fresagem dos pavimentos asfálticos é altamente variável, influenciada por fatores como o teor de ligante asfáltico, a idade do pavimento fresado, e as características dos agregados utilizados em sua construção. Estudos indicam que sua granulometria pode variar de areia bem graduada a brita bem graduada, dependendo do método de processamento. Além disso, a densidade específica do RAP tende a ser menor que a dos agregados naturais, impactando seu comportamento mecânico e hidráulico. O uso de RAP em estruturas estabilizadas mecanicamente requer reforço, especialmente com geogrelhas, que

demonstraram melhorar a resistência ao cisalhamento e reduzir a susceptibilidade à fluência. Portanto, a adoção do RAP como alternativa sustentável aos agregados naturais deve considerar esses fatores para garantir um desempenho adequado em aplicações geotécnicas e rodoviárias.

2.4. Danos mecânicos em geossintéticos

Os geossintéticos mais comuns para reforço de solo são geotêxteis e geogrelhas. As geogrelhas oferecem variedade de resistências à tração e melhor interação com o solo devido à sua geometria. Geralmente, as geogrelhas tecidas são preferidas por serem mais flexíveis e resistentes à tração. Elas são tipicamente uniaxiais, adequadas para situações de estado plano de tensões, como muros e taludes, onde o reforço é necessário apenas ortogonalmente à face (Portelinha, et. al 2016).

Na escolha do tipo de geogrelha a ser utilizada, é importante considerar não apenas os fatores econômicos, mas também a magnitude das tensões às quais as geogrelhas serão expostas, seu desempenho diante das deformações desejadas, a severidade do ambiente e os potenciais danos durante a instalação (Avesani et al, 2016). Danos mecânicos durante o processo de instalação de geossintéticos são relativamente comuns e podem comprometer a eficácia desses materiais. Os danos mecânicos, em sua maioria, são resultado da manipulação, instalação e compactação de materiais de reforço (Carlos et al., 2015). Dessa forma, esses danos têm origem principalmente devido às condições mecânicas de contato entre o geossintético e os materiais circundantes ou utilizados na construção. Portanto, alguns autores preferem usar o termo "dano mecânico" como uma alternativa à expressão "danos durante a instalação na obra" (Lopes, 2006).

Santos (2019) define danos mecânicos como sendo a transformação sofrida por um geossintético pelos esforços gerados do processo de manipulação, instalação e compactação. Segundo Lopes (2006) esses danos podem ser dividido em seis tipos, já McCartney (2013) descreve quatro tipos como sendo os danos encontrados em geogrelhas exumadas, sendo:

- **Abrasão:** A abrasão ocorre devido à ação repetida de contato entre o geossintético e um material abrasivo, e quando há movimentos cíclicos envolvendo o geossintético e o solo que está em contato com ele. Mesmo materiais com partículas pequenas podem causar danos prejudiciais, pois a forma (angular, sub-angular, arredondado ou sub-arredondado) das partículas exerce mais influência na geração desse tipo de desgaste do que o seu tamanho (Lopes, 2006).

Portanto, durante o processo de espalhamento e compactação do material de aterro sobre os geossintéticos e o tráfego de máquinas de construção podem manifestar mecanismos abrasivos. Alguns desses mecanismos abrasivos são visíveis a olho nu, como no caso de geogrelhas que foram exumadas (Lim & McCartney, 2013). A Figura 2.1 apresenta exemplos de dano em geogrelha. As principais consequências da abrasão (Figura. 2.1a) incluem a redução na espessura, o que pode resultar em uma diminuição local na resistência do geossintético. Esse tipo de dano pode ocorrer em aplicações de geossintéticos, como revestimento de canais, proteção costeira em áreas com movimento de sedimentos, estradas e ferrovias (Lopes, 2006).

- **Desfilamento (*Splitting*):** Splitting é o termo utilizado para descrever o tipo de dano que provoca a separação das fibras do material geossintético. Isto ocorre devido à interação direta entre partículas angulares ou superfícies cortantes presentes no material de aterro e o geossintético, agravada pelo impacto do tráfego de equipamentos de construção. Esse conjunto de fatores pode gerar fendas no material, levando à sua separação, conforme ilustrado na Figura 2.1b (Delmas et al., 2002).

- **Esmagamento (*Bruising*):** O dano por esmagamento localizado ocorre quando materiais de aterro com bordas cortantes entram em contato direto com o geossintético ou quando camadas finas de material de aterro são compactadas com equipamento pesado.

Em termos gerais, esse mecanismo é mais comum em materiais contínuos, como geotêxteis e geomembranas, onde a sua vasta superfície está mais sujeita de ocorrência do dano por esmagamento. No entanto, em uma escala menor, o esmagamento também pode afetar com corte parciais os filamentos de uma geogrelha, especialmente se o material de aterro tiver partículas pontiagudas que possam penetrar e causar danos aos filamentos do geossintético conforme ilustrado na Figura 2.1c (Lopes, 2006).

- **Corte de fibras (*cutting*):** A instalação no campo pode resultar em danos por corte das fibras, conforme ilustrado na Figura 2.1d. Esse tipo de dano mecânico ocorre quando o material em contato com o geossintético possui bordas afiadas, especialmente quando o geossintético é instalado sobre uma base mais rígida. Em materiais cujas fibras apresentam menor resistência ao corte, dependendo das especificações, o impacto desse mecanismo pode ser ainda mais significativo (Lim & McCartney, 2013).

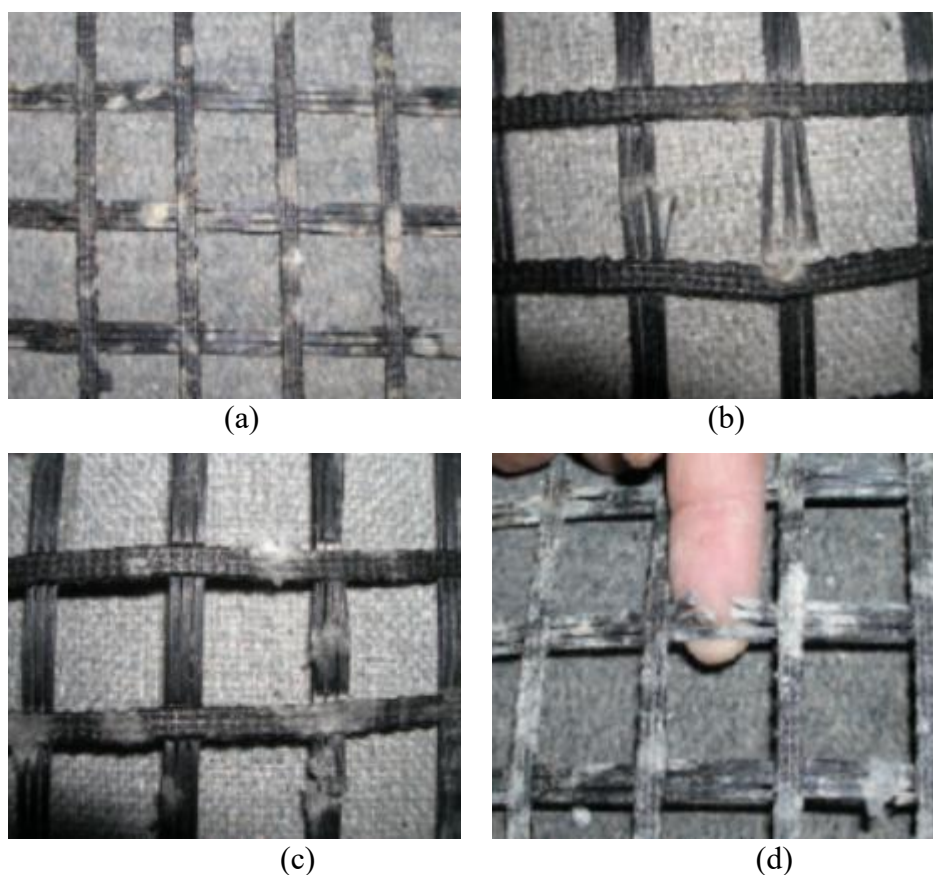


Figura 2.1 – Danos de instalação em geogrelhas: (a) Abrasão; (b) Desfilamento; (c) Esmagamento; (d) Corte (Adaptado de Lim & McCartney, 2013).

2.5. Dimensionamento e fatores de redução

Um geossintético pode ter uma ou mais propriedades críticas que influenciam o desempenho da função desejada, como resistência à tração ou permeabilidade no plano. No processo de dimensionamento, é comum diferenciar dois conjuntos de valores para essas propriedades: o valor disponível (associado ao geossintético selecionado ou a ser selecionado) e o valor requerido (o mínimo necessário para que o geossintético cumpra adequadamente sua função). No entanto, é importante observar que esses dois conjuntos de valores podem variar ao longo do tempo (Lopes et al., 2021).

Quadro 2.1 – Relevância dos principais mecanismos que afetam a durabilidade dos geossintéticos de acordo com as principais funções

Função dos geossintéticos						
Mecanismos	Separação	Filtração	Drenagem	Reforço	Proteção	Barreira
Danos durante instalação	+	+	+	+	+	+
Fluência em tração	-	-	-	+	-	-
Fluência em compressão	-	-	+	-	-	-
Agentes atmosféricos	+	+	+	+	+	+

Fonte: Adaptado de Greenwood *et al.* (2016).

O método de projeto por função envolve a avaliação da função primária que o geossintético deve desempenhar e, em seguida, o cálculo do valor numérico específico necessário para essa função (Koerner, 2016).

Devido à influência de diversos agentes e mecanismos na durabilidade dos geossintéticos, que são relevantes para cada projeto, é de se esperar que o valor disponível das propriedades do material varie com o tempo. Além disso, em razão das variações nas solicitações ao longo da vida útil do geossintético, é esperado também que o valor requerido das propriedades seja afetado por uma série de eventos. Portanto, no processo de dimensionamento, é crucial assegurar que, ao término da vida útil do geossintético, o valor disponível da propriedade funcional em análise seja apropriado em relação ao valor requerido dessa mesma propriedade (Lopes et al., 2021).

Koerner (2016) expõe que o princípio do projeto com base na função envolve a definição de um fator de segurança. No caso de geogrelhas, em que o reforço desempenha papel principal, esse fator de segurança é calculado pela seguinte equação:

$$FS = \frac{T_{disp}}{T_{adm}} \quad (1)$$

onde:

FS = Fator de Segurança;

T_{disp} = Resistência à tração disponível obtida após aplicado fatores de redução;

T_{adm} = Resistência à tração admissível do projeto para uma situação de campo específica.

O valor “ T_{adm} ” é obtido de um teste de tração específico, no qual é necessário comparar as condições do teste com a condição de campo desejada. Se o procedimento de teste não representar completamente a situação de campo, o valor obtido em laboratório deve ser devidamente ajustado, essa situação é a mais comum. Portanto, a resistência à tração obtida em ambiente laboratorial normalmente é considerada como um valor máximo que requer redução antes de ser aplicada no projeto:

$$T_{adm} < T_{ult}$$

Uma maneira de obter valores mais realistas é introduzir fatores de redução para cada um dos parâmetros não representados no teste de laboratório. A seguinte equação deve ser usada:

$$T_{adm} = T_{ult} * \left(\frac{1}{FR_{di} * FR_{fl} * FR_{amb}} \right) \quad (2)$$

onde:

T_{adm} = Resistência à tração admissível obtida após aplicado fatores de redução;

T_{ult} = Resistência à tração última obtido de ensaio de laboratório;

FR_{di} = Fator de redução por dano de instalação;

FR_{fl} = Fator de redução para evitar fluência ao longo da vida útil da estrutura;

FR_{amb} = Fator de redução contra degradação ambiental (química e biológica).

Os fatores de redução obtidos são usados no projeto geotécnico para levar em consideração os danos potenciais que as geogrelhas podem sofrer durante a instalação, garantindo que as especificações de resistência sejam atendidas mesmo após os danos. Isso é importante para garantir a segurança e eficácia das geogrelhas em aplicações geotécnicas (Korner, 2016).

2.6. Estudos sobre danos de instalação em geogrelhas

Diversos estudos têm investigado danos sofridos por geogrelhas em decorrência do processo de instalação em materiais de aterro naturais ou reciclados (Paula et al., 2004; Lim & McCartney, 2013; Fleury et al., 2019; Koerner et al., 2023). Paula et al. (2004) avaliaram a intensidade de dano causado à geogrelhas por diferentes materiais granulares, para isso foram conduzidos testes de laboratório com três agregados com composições e níveis de dureza diferentes, material cerâmico de alta resistência (óxido de alumínio sinterizado – $D_{máx.}$ 10mm e coeficiente Los Angeles 16), granito ($D_{máx.}$ 12,5mm e coeficiente Los Angeles 28) e calcário ($D_{máx.}$ 19mm e coeficiente Los Angeles 19). Os diferentes materiais usados nos ensaios mostram níveis de dano variados ao geossintético, com agregado sintético sendo geralmente mais agressivo, quando comparado com agregados naturais. A partir dos ensaios conduzidos, foram obtidos FR_{DI} (máximo) para geogrelhas no agregado sintético 1,29, no agregado de granito 1,24 e no agregado de calcário 1,11.

Lim & McCartne (2013) investigaram a influência do diâmetro das partículas no dano causado a diferentes tipos de geogrelhas. Para isso, construíram um canteiro experimental utilizando aterro granular natural mal graduado, com materiais de diferentes diâmetros máximos, variando entre 6 mm e 100 mm. Os resultados mostraram que tanto o tipo de polímero quanto o diâmetro das partículas afetam o nível de dano ao geossintético, com as geogrelhas de poliéster sofrendo os maiores danos, principalmente com grãos maiores. Os fatores de redução por dano à instalação (FR_{DI}) para a geogrelha de poliéster (PET-d) variaram de 1,01 a 1,40.

Para avaliar a influência do procedimento de construção nos danos sofridos pelas geogrelhas, Hufenus et al. (2005) construíram seções experimentais utilizando três diferentes materiais de aterro: areia, cascalho arredondado e brita. Esses materiais foram compactados com rolos lisos tandem de 2,5 e 8,0 toneladas e, posteriormente, submetidos a testes de tráfego com um caminhão truck, tanto descarregado (13 toneladas) quanto carregado (28 toneladas), em diferentes números de passadas (8, 20 e 61). Os fatores de redução por dano à instalação (FR_{DI}) obtidos para a pressão máxima (>55 kPa) variaram de 1,1 a 1,7 para a areia, de 1,2 a 1,8 para o cascalho arredondado e de 1,3 a 2,1 para a brita.

Biazotto & Avesani (2018), identificaram FR_{DI} entre 1,16 e 1,30 para geogrelhas de PET em brita graduada simples. No estudo realizado por Fleury et al. (2019) o objetivo era investigar os efeitos de diferentes alturas de queda e energia de compactação em agregado reciclado de construção e demolição (RCD) usados como aterro. Para isso, foi realizado lançamento do RCD da altura de 2 metros, 1 metro e 0 metro, este último o RCD foi só colocado

sobre o geossintético. Os equipamentos de compactação usados foram rolo vibratório de 1400 kg e placa vibratória de 74 kg. O maior diâmetro do grão de RCD era de 19 mm. Os resultados mostraram que a altura de queda do agregado causou pouco dano nos geossintéticos, já o método de compactação mostrou ser fator determinante nos danos sofridos pelas geogrelhas, que mostrou ter sofrido mais dano pela placa vibratória, segundo os autores este fato foi devido ao maior grau de compactação alcançado (92%) em comparação ao alcançado pelo rolo (89%). Os fatores de redução obtidos foram de 1,00 a 1,23. Barbosa et al. (2021) investigaram os danos causados pelo RCD às geogrelhas quando submetidas a carregamento cíclico. Para isso, foram construídas seções experimentais em campo, compactadas com três diferentes métodos: placa vibratória (0,12 toneladas), rolo vibratório (1,2 toneladas) e rolo vibratório seguido de carregamento cíclico devido à passagem de caminhões truck. Os fatores de redução por dano à instalação (FR_{DI}) obtidos para as geogrelhas de poliéster foram de 1,23 para aquelas compactadas com placa vibratória, 1,12 para as compactadas com rolo vibratório e 1,44 para as submetidas tanto ao rolo vibratório quanto ao carregamento cíclico.

Na busca por materiais sustentáveis para aplicação na geotecnia, Koerner et al. (2024) estudaram o agregado ultraleve de vidro espumado (UF-LGA), um material produzido a partir de vidro reciclado, caracterizado por sua extrema leveza, alta capacidade de isolamento e baixa absorção de água. Sua estrutura fechada permite a drenagem eficiente, tornando-o uma alternativa promissora para uso em obras geotécnicas. Dada a sua recente introdução na engenharia de solos, o estudo avaliou os danos causados às geogrelhas pelo UF-LGA, cuja granulometria segue a classificação AASHTO #57, comparando os resultados com materiais granulares naturais tradicionalmente utilizados em reforço com geossintéticos. Os resultados indicaram que o UF-LGA causou danos mínimos às geogrelhas, com fatores de redução por dano à instalação (FR_{DI}) variando entre 1,0 e 1,2, enquanto o agregado natural apresentou FR_{DI} entre 1,4 e 1,6. Esses achados evidenciam que o UF-LGA gera significativamente menos danos ao geossintético em comparação com o AASHTO #57, favorecendo seu desempenho e aumentando sua longevidade. Os estudos analisados destacam a variabilidade dos danos sofridos pelos geossintéticos em função do tipo de agregado e das condições de instalação. Os fatores de redução obtidos indicam que materiais alternativos, como o UF-LGA, apresentam menor potencial de dano em comparação com agregados convencionais. Esses resultados reforçam a importância da adoção de materiais sustentáveis na engenharia geotécnica, visando melhorar o desempenho, a durabilidade e a confiabilidade das estruturas reforçadas com geossintéticos.

A Tabela 2.2 resume os fatores de redução por dano de instalação (FR_{DI}) disponibilizados na literatura.

Tabela 2.2 – Fatores de redução por dano de instalação (FR_{DI}) para diferentes materiais de aterro e geossintéticos.

Autor e Ano	Tipo de Geossintético	Tipo de Material	Diâmetro Máximo (mm)	Fator de Redução (FR_{DI})
Paula et al. (2004)	Geogrelhas de PET	Óxido de alumínio sinterizado	10,0	1,29
		Granito	12,5	1,24
		Calcário	19,0	1,11
Lim & McCartney (2013)	Geogrelhas de PET	Aterro granular natural mal graduado	6 - 100	1,01 - 1,40
Hufenus et al. (2005)	Geogrelhas	Areia		1,1 - 1,7
		Cascalho arredondado	<150	1,2 - 1,8
		Brita		1,3 - 2,1
Fleury et al. (2019)	Geogrelhas de PET	Resíduo de construção e demolição (RCD)	19,0	1,00 - 1,23
Biazotto & Avesani (2018)	Geogrelhas de PET	Brita graduada simples	---	1,16 - 1,30
Barbosa et al. (2021)	Geogrelhas de PET	RCD compactado com placa vibratória (0,12 ton)		1,23
		RCD compactado com rolo vibratório (1,2 ton)	>20,0	1,12
		RCD com rolo vibratório e carregamento cíclico		1,44
Koerner et al. (2024)	Geogrelhas de PET	Vidro espumado ultraleve (UF-LGA, AASHTO #57)	>32,0	1,0 - 1,2
	Geogrelhas de PET	Agregado natural (AASHTO #57)	>32,0	1,4 - 1,6

Os estudos analisados demonstram que mesmo pequenas variações nos processos construtivos, nos materiais utilizados e nos equipamentos empregados resultam em fatores de redução por dano à instalação distintos. Essa variação ressalta a importância de investigar e determinar fatores de redução específicos para diferentes cenários e materiais, garantindo maior precisão no dimensionamento de estruturas reforçadas com geossintéticos.

Nesse contexto, como forma de complementar a análise acadêmica com uma perspectiva aplicada à prática profissional, foram verificados os valores de fator de redução por danos de instalação (FR_{DI}) sugeridos por fabricantes de geossintéticos em seus catálogos técnicos disponíveis na internet, e por dois dos órgãos técnicos: o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Federal Highway Administration (FHWA). A busca

concentrou-se em documentos de acesso público que apresentassem, de forma clara, os valores recomendados de FRDI para diferentes tipos de geogrelhas e materiais de aterro.

Os fatores apresentados na Tabela 2.3 refletem as recomendações dos fabricantes, aqui denominados A, B e C, para o uso seguro e eficiente de seus produtos, frequentemente adotados como parâmetros de projeto em aplicações práticas. Já os valores fornecidos pelos órgãos técnicos têm como base compilações de dados provenientes de estudos acadêmicos e experiências de campo.

Tabela 2.3 – Valores de FR_{DI} Disponibilizados em Catálogos de Fabricantes e Órgãos Técnicos.

Fabricante/Órgão	Tipo de Geogrelha	Características do Material de aterro	Fator de Redução (FR _{DI})
A	PEAD (Uniaxial extrudada)	Não informado	1,05 - 1,07
B	PET revestida com PVC (Biaxial tecida)	Pedra Britada	1,08 – 1,29
		Areia	1,03 – 1,07
		Areia Siltosa	1,07 – 1,12
C	PET	Não informado	1,07 – 1,20
FHWA	PET revestida com PVC	D < 100 mm	1,30 - 1,85
		D < 20 mm	1,30 – 1,10
	PEAD (Uniaxial) / PP (Biaxial)	D < 100 mm	1,20 – 1,45
		D < 20 mm	1,10 – 1,20
DNIT	Não informado	D < 200 mm	1,10 – 1,70
		D < 100 mm	1,15 – 1,50
		D < 2,0 mm	1,05 – 1,25
		D < 0,06 mm	1,05 – 1,15

Realizando uma análise dos fatores de redução por danos de instalação (FR_{DI}) apresentados na Tabela 2.3, é possível observar uma tendência de valores de FR_{DI} comparativamente mais baixos indicados pelos fabricantes, mesmo considerando geogrelhas que apresentam características, estruturas e processos de fabricação distintos. É possível verificar, por exemplo, que geogrelhas de polietileno de alta densidade (PEAD), poliéster (PET) e polipropileno (PP), com orientações uniaxiais, biaxiais ou tecidas, apresentam faixas de FR_{DI} bastante próximas, geralmente variando entre 1,05 e 1,20.

Já os fatores de redução por danos de instalação apresentados pelos órgãos técnicos como a FHWA e o DNIT revelam uma abordagem mais criteriosa. Diferentemente dos

fabricantes, que apresentam faixas relativamente uniformes, os valores de FR_{DI} indicados por esses órgãos são mais elevados e abrangentes, variando de 1,05 a 1,85, refletindo diferentes níveis de severidade do dano mecânico em função das características granulométricas do solo, bem como diferenças entre geogrelhas.

A adoção de fatores de redução mais representativos das condições reais de campo contribui significativamente para a elaboração de projetos mais seguros e eficientes, ao reduzir incertezas e aumentar a confiabilidade e o desempenho das geogrelhas nas diversas situações de instalação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental envolve a instalação de geogrelhas de poliéster com quatro diferentes resistências à tração última, em fresado RAP e areia. Esses agregados foram selecionados por representar aproximadamente uma parcela da granulometria total do RAP, permitindo uma maior compreensão dos mecanismos e da influência dos agregados nos danos causados. O procedimento de execução do ensaio de campo segue as diretrizes descritas na norma ASTM D5818:22.

3.1. Materiais

3.1.1. Geogrelhas

Foram utilizados quatro tipos de geogrelhas (Figura 3.1), com resistências máxima à tração variando entre 55 e 150 kN/m, no sentido de fabricação, cada uma desempenhando um papel importante no estudo sobre o comportamento quando instaladas com agregados e fresado RAP. De acordo com as especificações do catálogo do fabricante, as geogrelhas usadas na pesquisa são confeccionadas com filamentos de poliéster (PET) de alta tenacidade e revestidas por pintura de PVC, o que confere resistência a danos mecânicos, químicos e biológicos. A Figura 3.2 apresenta a origem das informações adicionais, que estão detalhadas no Quadro 3.1.

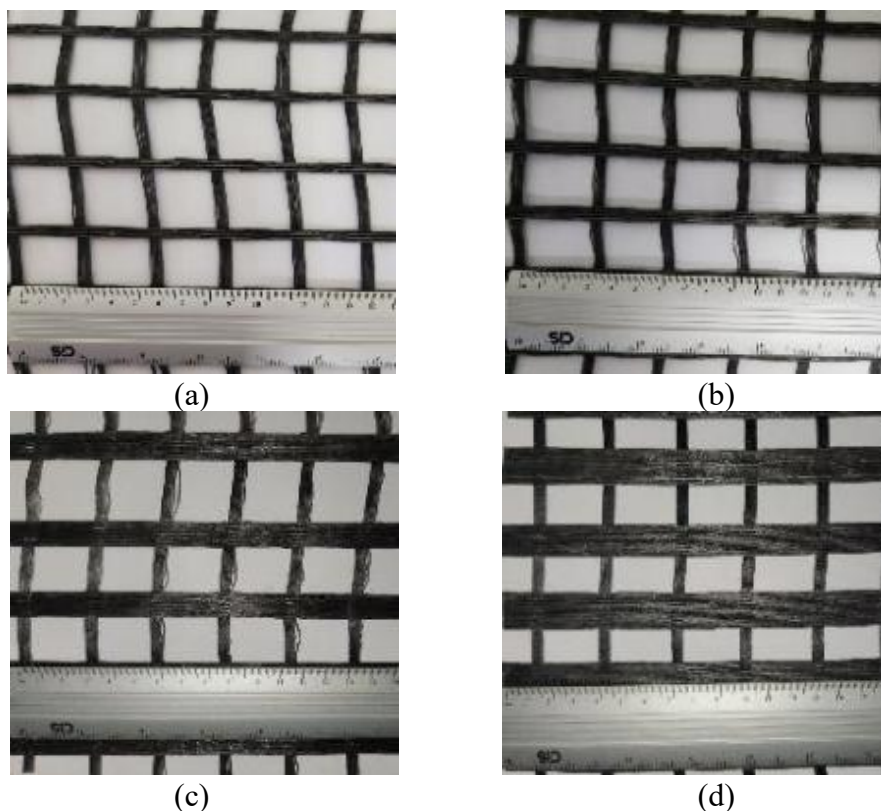


Figura 3.1 – Geogrelhas: (a) GG1, (b) GG2, (c) GG3 e (d) GG4.

Quadro 3.1 – Propriedades de catálogo das geogrelhas utilizadas nesta pesquisa

Propriedades mecânica		Norma	Unidade	GG1	GG2	GG3	GG4
	Resistência à tração (L) Nominal de catálogo	ASTM D6637	kN/m	55	80	110	155
	Alongamento resistência Máxima	ASTM D6637	%	<12	<12	<12	<12
	Resistência à 2% deformação	ASTM D6637	kN/m	11.3	14.8	19.0	27.8
	Resistência à 5% deformação			15.0	19.0	26.1	35.6
Informações Adicionais	Abertura nominal vertical	-	mm	24	26	25	26
	Abertura nominal horizontal	-	mm	24	24	20	15
	Largura do filamento longitudinal	-	mm	4	6	11	14
	Largura do filamento transversal	-	mm	5	5	5	5
	Comprimento do rolo	-	m	50			
	Largura do rolo	-	m	3,4			



- 1 – Comprimento longitudinal
- 2 – Comprimento transversal
- 3 – Largura longitudinal do filamento
- 4 – Largura transversal do filamento
- 5 – Abertura longitudinal
- 6 – Abertura transversal

Figura 3.2 – Características físicas das geogrelhas.

3.1.2. Agregados e Fresado RAP

Os agregados naturais foram adquiridos do comércio local e o fresado RAP foi disponibilizado pelo DER – Departamento de Estradas e Rodagem – DR4 para esta pesquisa. Esses materiais foram entregues no local disponibilizado pela mesma empresa que forneceu os maquinários para realização dos ensaios de campo, conforme ilustrado na Figura 3.3.

O agregado miúdo (areia) foi adquirido da pedreira Ouro Fino de Araraquara. Foram utilizados sete metros cúbicos de cada agregado para a construção do canteiro experimental.

O Fresado RAP é proveniente do processo de manutenção da SP331 que liga Ibitinga à Gavião Peixoto, cidades próximas de Araraquara. O Transporte dos agregados naturais foi

realizado pela empresa que o comercializou, já o fresado foi transportado pela empresa Correa Terraplanagem, de Araraquara-SP.



Figura 3.3 – Agregado natural e fresado: (a) areia; (b) RAP.

3.2. Características físicas dos agregados e do fresado

Por meio dos ensaios de granulometria, avaliou-se as curvas granulométricas do material fresado e dos agregados miúdo e graúdo. Os materiais agregados foram escolhidos por compor uma faixa parcial da granulometria total do fresado, na intenção de buscar uma explicação no comportamento e dano que o material possa causar nas geogrelhas. Segundo Allen e Bathurst (1994), os fatores do material que influenciam os danos durante o processo de instalação são: distribuição granulométrica, o índice de forma e angularidade das partículas dos materiais.

3.2.1. Agregado miúdo - Areia

A areia é classificada na engenharia como material natural e é um agregado miúdo, cujos grãos podem passar pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de 150 μm . A areia escolhida para este estudo se apresenta dentro da faixa granulométrica de média à fina, sendo classificada pela SUCS como areia mal graduada com silte (Poorly graded sand with silt), com coeficiente de uniformidade $C_u < 6$ e coeficiente de curvatura $C_c < 1,0$ e $C_c > 3,0$, a Tabela 3.1 apresenta as propriedades físicas da areia.

Tabela 3.1 – Propriedades físicas do agregado miúdo.

D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	D_{max}	D_{min}	C_c	C_u	Módulo de finura	Classificação SUCS
0,16	0,21	0,35	5,66	0,074	0,79	2,19	1,76	SP/SM

A amostra utilizada no ensaio foi retirada da mesma pilha de material empregado na construção do canteiro experimental, cujo procedimento de ensaio está detalhado no próximo tópico. Antes da realização do ensaio de granulometria, a amostra foi submetida a um processo

de secagem prévia em estufa, com temperatura controlada entre 120 e 130 °C. Em seguida, foi desagregada e dividida em quatro partes aproximadamente iguais, totalizando cerca de 1 kg de material. Todas as peneiras foram devidamente limpas para assegurar a precisão na leitura das massas retidas. As aberturas das peneiras utilizadas, juntamente com as massas passante, retida e os limites máximo e mínimo conforme estabelecido pela ABNT NBR 7211:2022, estão detalhados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneiras (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Passante (%)	Retido (%)	Limite de distribuição zona utilizável	
			Inferior (%)	Superior (%)
9,5 mm	100,00	0	100	100
6,3 mm	97,70	2,30	100	93
4,75 mm	96,73	0,98	100	90
2,36 mm	94,37	2,35	100	75
1,18 mm	90,21	4,17	95	50
600 µm	81,81	8,40	85	30
300 µm	52,87	28,94	50	5
150 µm	7,54	45,33	15	0
74 µm	0	7,54	-	-

A faixa granulométrica, apresentada na Figura 3.4, resultante do ensaio de granulometria realizado, excede ligeiramente o limite inferior da zona utilizável, conforme estabelecido pela ABNT NBR 7211:2022, porém encontra-se dentro da zona superior desse mesmo limite.

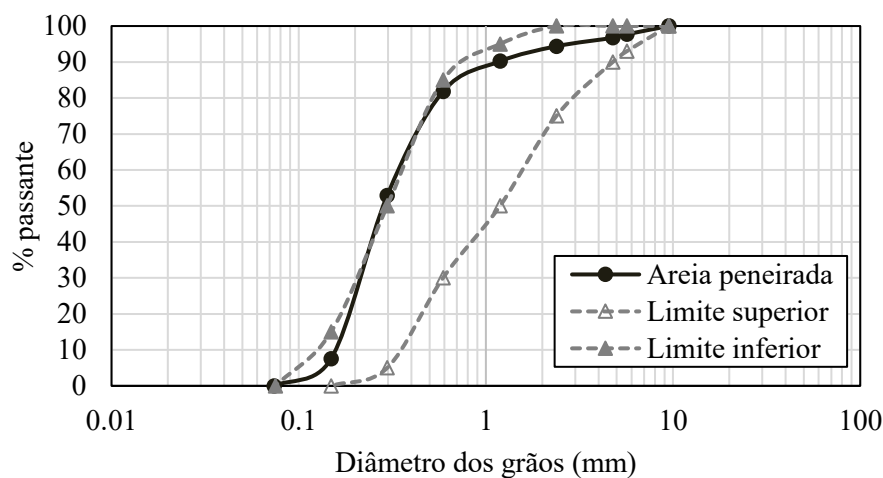


Figura 3.4 – Curva de distribuição granulométrica da areia.

3.2.2. Agregado Fresado - RAP

O material fresado possui granulometria distinta dos materiais usuais da engenharia, seus grãos vão desde os que passam na peneira com malha de 50,8 mm aos retidos na peneira com abertura de malha 0,074 mm. O fresado é classificado pela SUCS como brita bem graduada com silt e areia (Well-Graded gravel with silt and sand), com coeficiente de uniformidade $C_u \geq 4$ e coeficiente de curvatura entre $1,0 \leq C_c \leq 3,0$ e apresenta propriedades físicas conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades físicas do fresado RAP.

D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Dmax.	Dmin.	C_c	C_u	Classificação SUCS
1,19	4,0	12,50	50,80	0,074	1,08	10,50	GW/GM

O fresado ensaiado é da mesma pilha usada para a construção do canteiro experimental e diferente dos agregados não foi secado em estufa, por ter ligante asfáltico em sua composição o material pode derreter e formar grupos que alterariam sua composição granulométrica, por isso o material foi seco ao ar livre, na sala onde a estufa se encontra e com temperatura entre 30 e 35° C por uma semana. Para o ensaio de granulometria do fresado foi separado separado cerca de 15 kg de material. As peneiras utilizadas, juntamente com as massas passante e retida estão detalhados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Distribuição granulométrica do fresado - RAP.

Peneiras (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Passante (%)	Retido (%)
50,8 mm	100	0
38,1 mm	93,52	6,48
31,7 mm	91,35	2,18
25,4 mm	82,59	8,60
19,1 mm	76,22	6,36
12,7 mm	62,13	14,10
9,5 mm	52,92	9,21
4,75 mm	34,92	18,00
2,36 mm	17,28	17,64
1,19 mm	10,20	7,80
1,00 mm	9,00	1,20
0,71 mm	6,40	2,60
0,59 mm	5,62	0,78
0,42 mm	3,74	1,88
0,297 mm	2,52	1,22
0,149 mm	0,86	1,66
0,074 mm	0,31	0,55

A faixa granulométrica (Figura 3.5) resultante do ensaio realizado apresenta um material bem graduado, o que corresponde com a classificação SUCS, apresentando aproximadamente 65% de material com granulometria correspondente ao agregado graúdo e aproximadamente 35% correspondente a granulometria do agregado miúdo.

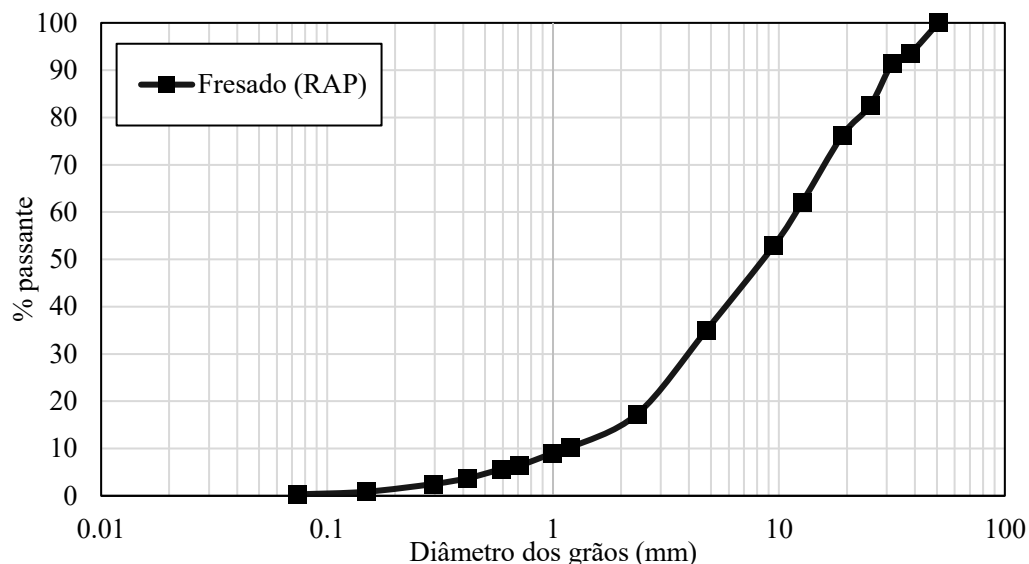


Figura 3.5 – Curva de distribuição granulométrica do RAP.

A análise das curvas granulométricas da areia e do fresado asfáltico (RAP), apresentadas na Figura 3.6, evidencia diferenças significativas na distribuição dos tamanhos dos grãos. A curva da areia apresenta uma inclinação acentuada, indicando que a maior parte do material está concentrada em uma faixa estreita de diâmetros, caracterizando um material mal graduado. Essa distribuição limitada implica em baixa variação no tamanho das partículas, o que pode comprometer sua compactação e estabilidade.

Por outro lado, a curva granulométrica do RAP é mais suave e se estende por uma faixa granulométrica mais ampla, demonstrando uma distribuição mais uniforme e uma melhor graduação. Esse comportamento indica que o RAP contém partículas de diversos tamanhos, desde frações finas até grãos mais grossos, favorecendo um melhor encaixe entre as partículas e, conseqüentemente, uma compactação mais eficiente.

Com base nessa análise, observa-se que a areia, por ser mal graduada, tende a apresentar menor capacidade de suporte e maior suscetibilidade à erosão e instabilidade, uma vez que sua distribuição granulométrica não favorece um bom imbricamento entre as partículas. Já o RAP, por possuir uma granulometria mais bem distribuída, apresenta maior potencial de compactação e estabilidade estrutural, tornando-se uma alternativa mais adequada para aplicações que exigem maior resistência mecânica e menor deformabilidade.

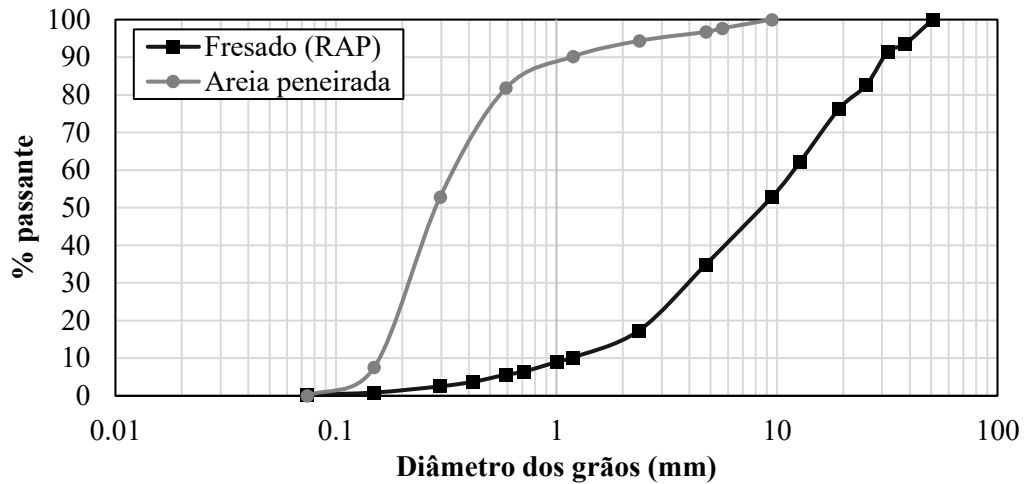


Figura 3.6 – Curvas de distribuição granulométrica da areia e do RAP.

O ensaio de teor de ligante asfáltico presente no RAP foi realizado pelo Laboratório de Asfalto do Grupo Bandeirantes, empresa que trabalha no setor de pavimentação e está localizada em São Carlos-SP. Foram realizadas extração de ligante por dois métodos diferentes, Rotarex (ASTM D2172, 2024) e forno NCAT (ASTM D6307, 2019). O resultado dos ensaios é apresentado no quadro abaixo.

Quadro 3.2 – Teor de ligante asfáltico.

Extração de ligante Rotarex – ensaio 1		Extração de ligante Rotarex – ensaio 2		Extração de ligante Forno NCAT	
Filtro (g)	25,6	Filtro (g)	29,4	Bandeja (g)	4331,9
Filtro+Amostra c/ Ligante	28,9	Filtro+Amostra c/ Ligante	30,5	Amostra (g)	936,9
Filtro+Amostra s/ Ligante	3,3	Filtro+Amostra s/ Ligante	1,1	Combinado	5268,8
Amostra c/ ligante	1060,6	Amostra c/ ligante	875,5	Peso final (g)	882,1
Amostra s/ ligante	1005,0	Amostra s/ ligante	828,4	Peso perdido (g)	54,8
Amostra s/ ligante total (g)	1008,3	Amostra s/ ligante total (g)	829,1	Peso perdido (%)	5,8
% de ligante	4,9	% de ligante	5,25	Umidade	0,00
Fator de Correção	0,00	Fator de Correção	0,00	Fator de Correção	0,00
% de ligante corrigido	4,93	% de ligante corrigido	5,25	% de ligante corrigido	5,85
Média teor de ligante (%)				5,34	

Os ensaios realizados para determinação do teor de ligante asfáltico no material fresado (RAP) resultaram em um valor médio de 5,34%, estando dentro da faixa esperada para esse tipo de material, que normalmente varia entre 4% e 6%. Essa variação ocorre devido à origem do pavimento fresado, às condições de serviço e ao envelhecimento do ligante. A análise dos resultados obtidos pelos dois métodos utilizados – Rotarex e forno NCAT – evidência pequenas diferenças entre os valores, sendo o teor de ligante determinado pelo forno NCAT ligeiramente superior ao obtido pelo método Rotarex.

Embora a média dos resultados seja uma abordagem válida para representar o teor de ligante do RAP, é necessário considerar a confiabilidade de cada método. O método Rotarex pode apresentar variações significativas, com desvios superiores a 0,3% no teor de ligante, o que pode comprometer sua precisão para controle de qualidade (Gonçalves et al., 2020)(Gonçalves et al., 2020). Já o forno NCAT, que opera pelo método de perda por ignição, é amplamente reconhecido por sua precisão e conformidade com normas técnicas internacionais, como a AASHTO T 308 e a ASTM D6307, que padronizam a determinação do teor de ligante asfáltico por ignição.

O teor médio de ligante determinado nos ensaios está dentro dos valores esperados para materiais fresados, garantindo que o RAP analisado possui um teor adequado para possível reaproveitamento em misturas asfálticas. No entanto, para maior precisão nos resultados, sugere-se a utilização preferencial do forno NCAT.

3.3. Procedimento de ensaio – ASTM D6637 – Single Rib

A norma ASTM D6637 (2023) - *Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method* descreve o procedimento de ensaio de tração para avaliar as propriedades mecânicas de geogrelhas com um ou múltiplos filamentos, que são usadas em aplicações de engenharia civil.

Para realizar o ensaio, foi usado uma prensa universal de tração axial EMIC com capacidade de 300 kN, conforme apresenta a Figura 3.7, a qual é conectada a um computador equipado com softwares específicos para captura dos esforços de tração e leitura de deslocamentos. As deformações foram medidas por um extensômetro de leitura externa tipo *clip-gauge* da marca Instron, fixado a cada corpo-de-prova de geogrelha ensaiado. Para fixação dos corpos-de-prova, foram utilizadas garras de rolete, por estarem em acordo com a norma ABNT ISO 10319 e serem considerados o método mais eficiente para prevenir danos por esmagamento nos corpos-de-prova de geogrelha.



Figura 3.7 – Equipamento do ensaio de resistência à tração de geogrelhas do Laboratório de Geotecnia da UFSCar.

Para realizar o ensaio de resistência à tração, foi adotado o método A – single rib ou elemento único – da ASTM D6637. Esse método é utilizado para determinar a resistência à tração e o alongamento de uma única nervura (rib) da geogrelha sob carregamento uniaxial, aplicando uma taxa constante de deformação de $10 \pm 3\%$ por minuto do comprimento entre as garras (200 mm). Dessa forma, a taxa de deformação adotada para o teste foi de 20 mm por minuto.

Os corpos-de-prova foram coletados de maneira a capturar toda a variabilidade da amostragem, sendo retirados de diferentes regiões do rolo. De acordo com a norma, o ensaio deve ser realizado em, no mínimo, cinco corpos-de-prova. Cada corpos-de-prova possuía aproximadamente 1,20 metro de comprimento e foi cuidadosamente recortada, isolando um único elemento longitudinal.

Conforme as especificações normativas, os corpos-de-prova ensaiados devem ter, no mínimo, 300 mm de comprimento ou conter pelo menos três junções (interseções de filamentos). Além disso, os corpos-de-prova não devem apresentar falhas superficiais e devem ser armazenadas de forma adequada para proteção contra intempéries. Outra exigência é que não sejam retiradas das bordas do rolo. Para atender a essa recomendação, os corpos-de-prova foram cortados desconsiderando 20 centímetros das bordas em ambos os lados.

No início do ensaio, é fundamental ajustar a distância entre os roletes, mantendo um afastamento de 200 mm e garantindo que pelo menos uma nervura da geogrelha esteja alinhada ao centro. Com os corpos-de-prova devidamente preparados, inicia-se a leitura do extensômetro posicionado verticalmente no centro do corpo-de-prova, permitindo a continuidade do ensaio

de resistência à tração. Por fim, a partir dos dados obtidos, é possível calcular diversas propriedades mecânicas, como resistência à tração, alongamento e rigidez à tração.

3.4. Procedimento de ensaio – ASTM D5818

A norma ASTM D5818 (2022) descreve o procedimento para avaliar o dano de instalação de geossintéticos em campo. O ensaio simula as condições de instalação típicas de geossintéticos em campo, como manipulação, lançamento de material sobre os produtos e compactação, a fim de avaliar possíveis danos. A amostra controle (não danificada) do geossintético deve ser proveniente do mesmo rolo de material que será utilizado nas seções de teste no campo.

Na presente pesquisa, o canteiro experimental foi dividido em três seções, cada uma executada com a seguinte configuração: a camada de base apresentava 10 centímetros de altura, enquanto a camada de topo possuía 20 centímetros de altura após acabada. A Figura 3.8 apresenta o layout da seção experimental. Cada seção tinha dimensões de 3,05 metros de largura e 4,55 metros de comprimento, proporcionando espaço suficiente para a instalação de oito geogrelhas amostras de por seção construída. Foram dispostas quatro geogrelhas no sentido longitudinal e quatro no sentido transversal, para cada tipo de material de aterro, areia e fresado RAP, conforme o esquema abaixo.

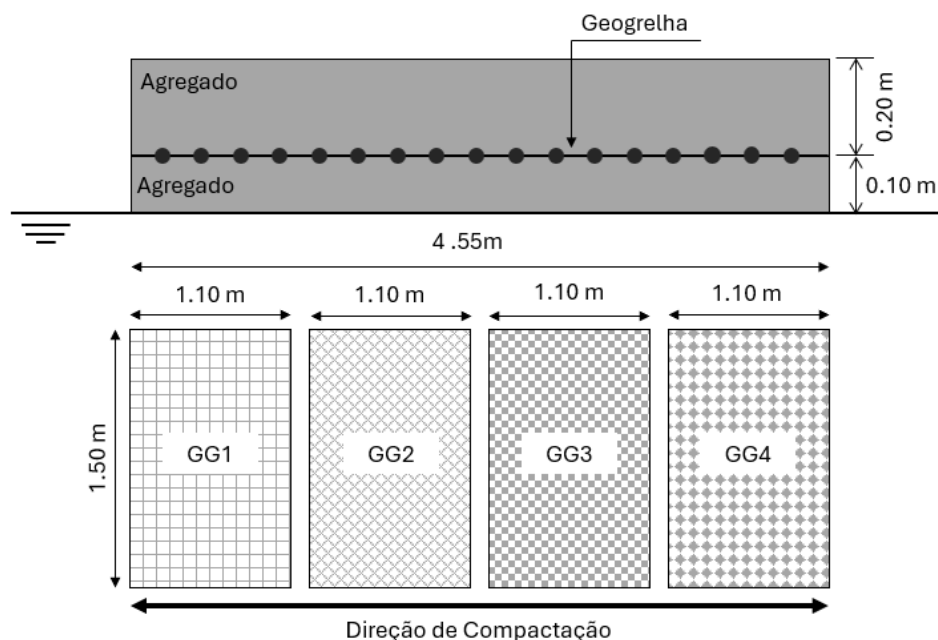


Figura 3.8 – Layout da seção experimental.

A construção do canteiro foi iniciada pelo nivelamento do solo natural com pá carregadeira, conforme é observado na Figura 3.9. Isso se fez necessário pela grande irregularidade do terreno local. Com o local nivelado, foram marcadas no terreno as dimensões

de cada seção a ser construída, facilitando o controle do despejo do material pela pá carregadeira.



Figura 3.9 – Execução do nivelamento do terreno natural.

Após o despejo dos materiais que compunham cada base de seção, foi feito o espalhamento inicial do material com a pá carregadeira, seguido de um acabamento (fino) manual com enxada, tal como apresenta na Figura 3.10. Essa camada ficou com altura aproximada de 15 centímetros para posterior compactação. Nesse momento, foram instalados os cilindros para auxiliar na medição do grau de compactação, conforme recomendação da norma (Figura 3.10b).



(a)

(b)

Figura 3.10 – Execução da camada de base e controle de compactação: (a) Aplanamento do material; (b) Cilindro para controle de compactação.

Esse processo foi repetido para a construção das três seções que compõem a base, conforme mostrado na Figura 3.11, sendo uma seção para cada tipo de material utilizado: areia e fresado RAP.



Figura 3.11 – Execução da camada de base: (a) RAP; (b) Areia.

Após o espalhamento dos materiais, o rolo compactador vibratório de 4,2 toneladas foi utilizado para compactá-los até atingir o grau de compactação desejado (Figura 3.12a e Figura 3.12b). Em seguida, os cilindros instalados anteriormente para verificar o grau de compactação foram removidos, conforme demonstrado na Figura 3.12c, e o valor obtido foi referenciado em termos de passadas do rolo compactador.



Figura 3.12 – Compactação da camada de base: (a) Camada da areia; (b) Camada do fresado; (c) Extração do cilindro para aferir o G.C.

Com a camada de base de cada seção compactada, iniciou-se o posicionamento das geogrelhas, conforme observado na Figura 3.13. Foram posicionadas quatro geogrelhas com filamentos alinhados no sentido longitudinal e quatro geogrelhas com filamentos alinhados no sentido transversal a passagem do rolo

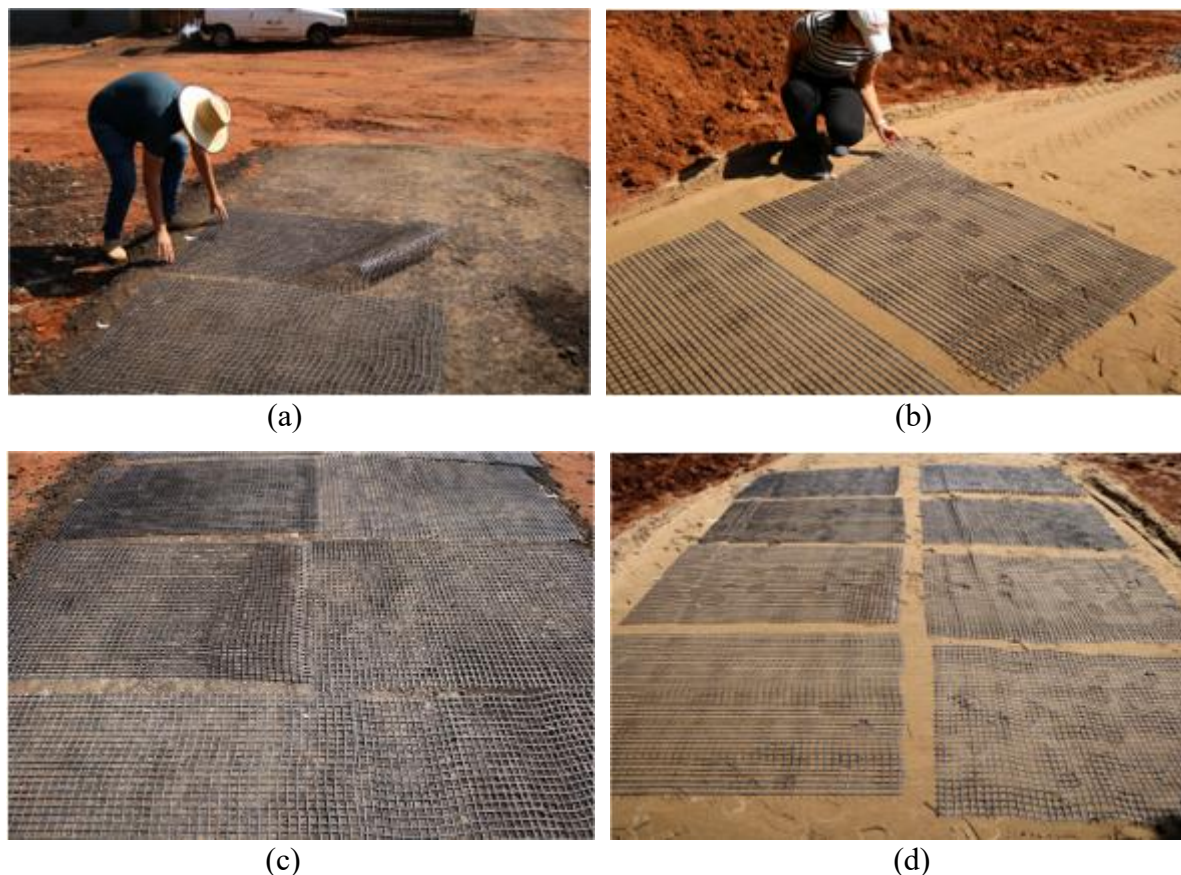


Figura 3.13 – Preparação da camada de base: (a) instalação das geogrelhas com RAP; (b) Instalação das geogrelhas com areia; (c) seção do RAP pronta; (d) Seção da areia pronta.

Com as geogrelhas posicionadas, iniciou-se à execução da camada superior das seções experimentais. Nesse processo, a pá carregadeira foi utilizada para pegar os agregados e despejá-los diretamente sobre os geossintéticos, formando pilhas de material sobre toda a superfície (Figura 3.14). Optou-se nesta pesquisa por padronizar a altura de lançamento dos agregados em 1,20 metros, considerando-a a mais comum em campo devido à experiência do operador. Vale ressaltar que essa altura é suficiente para evitar uma desagregação excessiva da fração miúda do agregado, enquanto tem altura o suficiente para realizar o tombamento da caçamba da pá carregadeira sem problemas operacionais. Em seguida, o material foi distribuído manualmente com o auxílio de uma enxada, visando evitar danos que a máquina pudesse causar às geogrelhas durante esse procedimento.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.14 – Despejo dos agregados: (a) Despejo da areia sobre geogrelhas; (b) Material sobre Geogrelhas; (c) Despejo do RAP sobre geogrelhas; (d) Material sobre Geogrelhas.

Após a distribuição completa dos agregados na camada superior, procedeu-se com a compactação dos materiais, como ilustrado na Figura 3.15. Com isso, concluiu-se a construção do canteiro experimental, visando realizar a exumação das geogrelhas danificadas dentro de um período de até 48 horas.



(a)



(b)

Figura 3.15 – Compactação da camada superior: (a) RAP; (b) Areia.

Todo o procedimento adotado para a execução deste canteiro foi o mais representativo possível das operações realizadas em campo durante uma obra de movimentação e compactação de agregados ou solos. Além disso, todos os equipamentos utilizados foram os usuais para esse tipo de trabalho, como ilustrado na Figura 3.16.



Figura 3.16 – Máquinas utilizadas: (a) Pá carregadeira; (b) Rolo liso vibratório.

3.5. Exumação das geogrelhas

Após a conclusão da construção do canteiro experimental, a exumação das geogrelhas instaladas foi realizada dentro de um período de 48 horas. De acordo com a ASTM D5818:22, há orientações específicas sobre como realizar esse processo. A norma recomenda que a exumação seja feita manualmente, de preferência sem o uso de equipamentos mecanizados, a fim de evitar danos adicionais que esses equipamentos possam causar às geogrelhas.

Para remover o material fresado compactado, utilizou-se um martelo tipo picareta (Figura 3.17). Essa ferramenta possui uma das suas pontas plana e, devido ao cabo curto, proporciona um maior controle dos movimentos e precisão nos golpes, garantindo que as geogrelhas não fossem afetadas durante o processo de exumação. Conforme o material ia se desagregando, uma colher de pedreiro era utilizada para formar pequenas pilhas, facilitando a remoção posterior. Para retirar o material miúdo (areia), não foi necessário o uso do martelo picareta, apenas a colher de pedreiro foi suficiente para desagregar o material compactado. Este processo foi muito trabalho e foram necessárias algumas horas para finalizá-lo.



Figura 3.17 – Exumação das geogrelhas: (a) Ferramenta usada; (b) Desagregação do RAP.

Quando todo o material que cobria uma amostra de geogrelha era removido e está estava completamente exposta, então era retirada do local e armazenada. Esse procedimento foi crucial para garantir que as geogrelhas não fossem danificadas por puxões ou qualquer outro tipo de manipulação, permitindo que a remoção fosse realizada somente quando as geogrelhas estivessem livres de qualquer agregado ou material sobre elas. A Figura 3.18 ilustra esse processo de exumação.

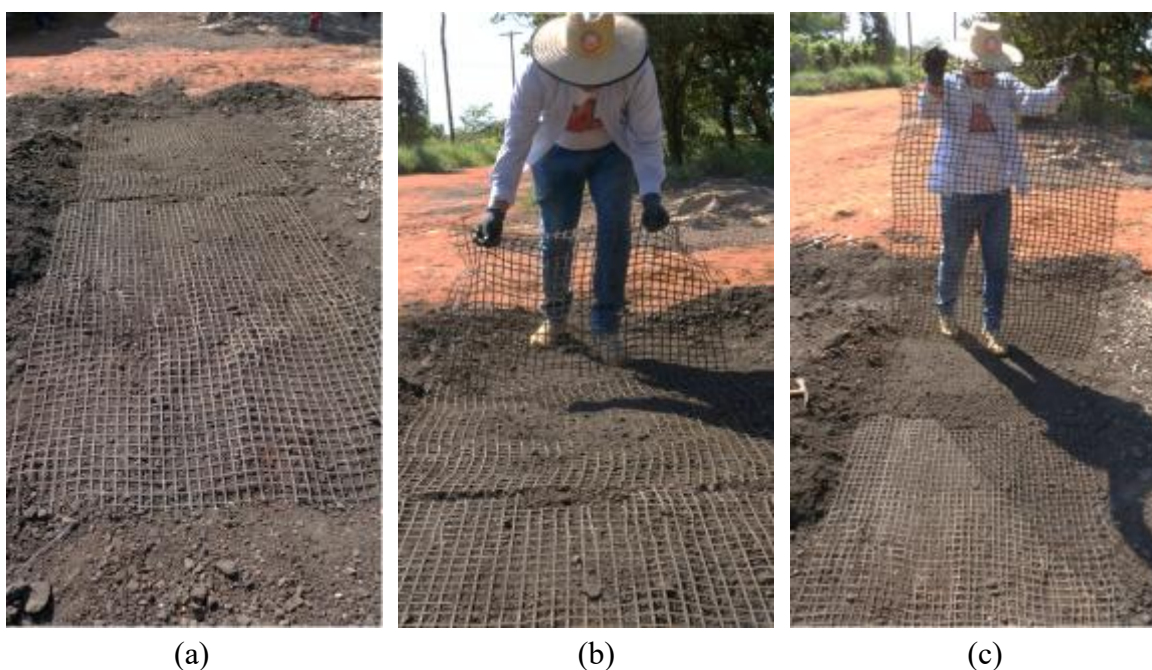


Figura 3.18 – Retirada da geogrelha: (a) Geogrelha exposta; (b) Processo de retirada; (c) Geogrelha exumada.

A exumação foi concluída garantindo que nenhuma amostra de geogrelha fosse danificada ou perdida durante o processo. A adoção de métodos manuais, conforme recomendado pela ASTM D5818:22, aliada ao uso de ferramentas adequadas, permitiu uma

remoção cuidadosa do material sem comprometer a integridade das amostras. Dessa forma, as amostras exumadas permaneceram em condições ideais para as análises subsequentes.

3.6. Grau de compactação do canteiro experimental

O controle do grau de compactação (GC) é essencial para garantir a similaridade com as condições de campo em obras estabilizadas mecanicamente com o uso de geossintéticos. Na presente pesquisa, para avaliar o grau de compactação dos diferentes materiais do canteiro experimental, foram empregados cilindros de ferro fundido de volume conhecido, estrategicamente instalados nas camadas de base de cada seção (areia e fresado RAP). Visando evitar perdas de material durante a remoção desses cilindros, foi utilizada uma geomembrana no fundo de cada um. Posteriormente seguiu-se o processo de compactação, seguido pela contagem das passadas do rolo compactador. Isso permitiu estabelecer uma relação entre o número de passadas do rolo compactador vibratório e o grau de compactação calculado. As quantidades de passadas foram definidas de acordo com as características específicas de cada material e altura de camada esperada, bem como da experiência do operador.

Como há uma diferença entre as espessuras, foi ajustado o número de passadas da camada superior afim de garantir a compactação desejada. Foram ajustadas as quantidades de passadas do rolo compactador vibratório, aumentando-se para 19 passadas na camada superior da areia e 10 passadas no fresado. Esta prática foi adotada visando atender às condições de campo.

O procedimento para calcular o grau de compactação envolveu a determinação da massa específica aparente seca do RAP e da areia em laboratório e correlação com os dados de campo. Para isso, foram utilizados dados laboratoriais previamente avaliados e de pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Geotecnia da UFSCar.

As Tabelas 3.5 e 3.6 apresentam os dados de laboratório e os dados de campo de cada material usados para calcular o grau de compactação. O número de passadas em cada camada, assim como os resultados do grau de compactação podem ser vistos na Tabela 3.7.

Tabela 3.5 – Parâmetros de compactação de campo.

Agregado	Diâmetro (m)	Altura (m)	Volume (m ³)	Massa úmida (kg)	Massa seca (kg)	Umidade (%)	Índice vazios	Massa específica aparente seca (g/cm ³)	G.C. (%)
Areia	0,1521	0,0641	0,001164	2,46	2,38	3,51	0,29	2,04	109,3
RAP	0,1521	0,0636	0,001155	2,40	2,34	2,90	0,285	2,00	102,5

Tabela 3.6 – Parâmetros de compactação de laboratório.

Agregado	Energia de compactação	Massa específica do sólido [ρ_s]	Massa específica aparente seca máx [ρ_d]	Umidade ótima
Areia	Proctor Normal	2,65 g/cm ³	1,87 g/cm ³	7,86%
RAP	Proctor Modificado	2,57 g/cm ³	1,95 g/cm ³	6,80%

Os resultados obtidos indicam que a compactação de todos os materiais atingiu um grau de compactação superior a 90%, estando em conformidade com as recomendações da norma ASTM D5818, que estabelece o mínimo a ser atingido em campo. Isso demonstra que o procedimento adotado foi eficaz para garantir a compactação adequada dos materiais estudados, refletindo condições similares às de campo e contribuindo para a confiabilidade dos resultados da pesquisa. Cabe ressaltar que os valores utilizados para o cálculo da areia foram baseados em avaliações de laboratório em Proctor Normal. Portanto, o valor de grau de compactação final da camada de areia pode estar ligeiramente superestimado.

Tabela 3.7 – Compactação e número de passadas do rolo compactador.

	Fresado (RAP)	Areia
Grau Compactação Camada controle	102,5%	109,2%
Nº passadas - base	6	12
Nº passadas - topo	10	19

3.7. Índice de forma e angulosidade dos grãos

O índice de forma foi determinado utilizando um paquímetro digital para a fração graúda do fresado RAP, conforme apresenta a Figura 3.19. Esse índice representa a relação média entre o comprimento e a espessura dos grãos, ponderada pelas proporções de cada fração granulométrica presente na amostra ensaiada. Esse parâmetro é essencial para avaliar o comportamento mecânico do material, onde a forma dos grãos influencia diretamente a compacidade e a interação entre as partículas.



Figura 3.19 – Ensaio de índice de forma: (a) comprimento; (b) espessura.

Para a realização do ensaio de índice de forma, foi separada amostra de 10 kg de fresado RAP. A amostra foi seca em estufa e as frações passantes na peneira de abertura 9,5 mm, bem como aquelas que apresentaram menos de 5% em massa, foram desprezadas. Em seguida, foram selecionados 200 grãos no total, distribuídos entre as frações granulométricas retidas. A quantidade de grãos selecionados de cada fração foi determinada utilizando a seguinte equação:

$$N_i = \frac{200}{F_1 + F_2 + F_3 \dots F_n} \times F_i \quad (3)$$

onde, N_i é o número de grãos da fração i a serem medidos; F é a soma dos percentuais de todas as frações retidas; F_i é o percentual de massa retida na fração i ; 200 é o número total de grãos necessários para o ensaio.

Após determinar a quantidade de grãos a serem medidos em cada fração, foram obtidas as médias das dimensões de espessura e comprimento de cada uma delas. Com esses valores, foi possível calcular o índice de forma médio dos agregados, conforme mostrado na tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Índice de forma do RAP.

Peneiras (mm)	9,5	12,7	19,1	25,4	38,1
Índice de forma RAP	2,61	2,57	2,98	3,38	3,61

Foi realizado ainda, um ensaio de microscopia óptica digital na fração mais fina do fresado RAP e da areia para descrever a angularidade dos grãos, conforme a norma ASTM D2488:17. Para isso, foi selecionada uma amostra passante na peneira de malha #4. A inspeção visual dos grãos, apresentada na Figura 3.20, permitiu sua classificação em duas das quatro principais categorias, com base na forma e nas características das bordas. Tanto os grãos de

areia quanto os de RAP foram predominantemente classificados como angulares a subangulares. Grãos angulares apresentam bordas afiadas, contornos irregulares e superfícies ásperas, enquanto grãos subangulares possuem bordas ligeiramente arredondadas, com sinais moderados de desgaste.



Figura 3.20 – Agregado natural e fresado passantes na peneira #4: (a) RAP; (b) Areia.

3.8. Ensaios não destrutivos - microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura

Além da inspeção visual das geogrelhas exumadas, foram realizados ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e de microscopia óptica digital (Figura 3.21). O ensaio de MEV foi conduzido no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar, utilizando o equipamento modelo MIRA, da TESCAN. As imagens foram obtidas com ampliações variando de 0 a 1000 vezes. Para o ensaio de microscopia óptica, foi utilizado um específico da ZEISS, equipado com uma câmera digital AxioCam ERc, com ampliação de 0 a 20 vezes. As amostras utilizadas no ensaio de MEV foram preparadas com revestimento de ouro, devido à excelente condutividade elétrica desse metal, que cria uma superfície condutora ideal para materiais poliméricos.

No ensaio de microscopia óptica digital, foram selecionadas amostras com grãos aderidos aos filamentos da geogrelha, com o objetivo de verificar a intensidade e a disposição desses grãos nos fios que compõem os filamentos. Para o ensaio de MEV, os filamentos foram limpos com escovas de cerdas macias, garantindo que não houvesse danos durante o processo de limpeza. Essa etapa foi necessária para garantir a exposição dos filamentos, permitindo uma visualização desobstruída dos fios, sem interferência de grãos dos materiais.

Todas as amostras foram cortadas com tesoura e tiveram suas dimensões ajustadas de acordo com os critérios dos equipamentos. Para o ensaio de MEV, as amostras mediam

aproximadamente 1 cm, e os cortes foram realizados prioritariamente nas interseções dos filamentos longitudinais e transversais (nós dos filamentos), garantindo a preservação da amarração da geogrelha. Foram selecionados pontos que apresentavam danos característicos, representativos dos observados visualmente ao longo da extensão das geogrelhas. Foram cortadas amostras das geogrelhas exumadas da areia e do fresado RAP, além de amostras intactas. Também foram incluídas amostras de geogrelhas exumadas após o ensaio de teor de ligante impregnação no RAP, que, embora não tenham sido limpas com escova, não continham resíduos de fresado devido ao solvente utilizado no processo.

As amostras para o ensaio de microscopia digital mediam aproximadamente 10 cm. Foram selecionados pontos com alta concentração de material impregnado nos filamentos e que apresentavam algum tipo de dano.



Figura 3.21 – Equipamentos usados para ensaio de MEV e microscopia digital: (a) MEV; (b) Microscopia digital.

3.9. Teor de ligante impregnado

As geogrelhas exumadas apresentaram uma significativa concentração de partículas finas de fresado impregnadas em suas estruturas. Para determinar a quantidade de material impregnado nas geogrelhas, foi aplicado o método de teste desenvolvido por Silva (2024). Essa análise teve como objetivo verificar se a área de contato das geogrelhas influencia na aderência do fresado RAP aos filamentos.

Os materiais necessários para a execução do teste incluem uma balança com capacidade e sensibilidade adequadas para pesar as amostras com precisão de 0,001 g, solvente de percloroetileno, recipiente de vidro com tampa metálica e funil de vidro. O procedimento experimental começa com a preparação dos corpos-de-prova, onde as geogrelhas são recortadas em dimensões de 60 mm × 60 mm, garantindo que os cortes sejam feitos entre os nós da malha para preservar sua conexão estrutural. Em seguida, é realizada a pesagem inicial (w_i) utilizando uma balança de precisão. Depois, a amostra é colocada em um recipiente de vidro e, com o

auxílio de um funil, adiciona-se percloroetileno até que fique completamente imersa. O recipiente é então vedado com uma tampa metálica para evitar a evaporação do solvente, permanecendo fechado por 24 horas (Figura 3.22). Após esse período, a amostra é retirada e deixada para secar em temperatura ambiente por mais 24 horas, permitindo a completa evaporação do solvente. Por fim, é feita a pesagem final (w_f) da amostra.

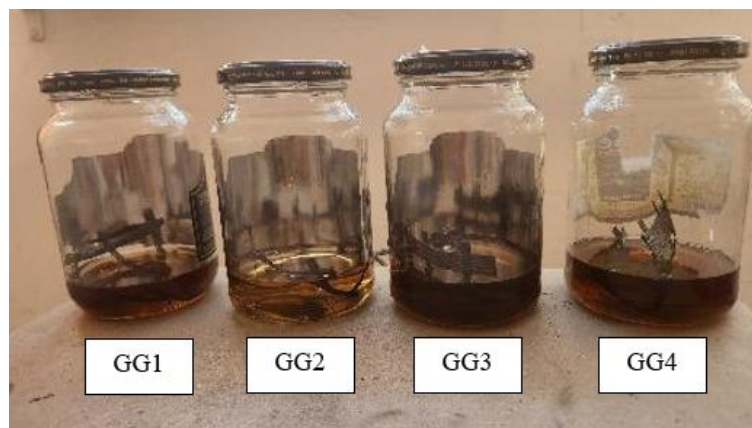


Figura 3.22 – Amostras para ensaio de Teor de RAP impregnado.

O teor de RAP impregnado (T_{RAP}) é então calculado conforme a Equação 1.

$$T_{RAP} = \frac{w_i - w_f}{w_i} * 100 \quad (4)$$

Conforme descrito por Silva (2024), o teste também foi realizado com período de 48 de imersão das geogrelhas no solvente, mas como não houve variação na massa o teste foi padronizado com o período de imersão de 24 horas. A Tabela 3.9 apresenta os valores de teor de impregnação de RAP obtidos.

Tabela 3.9 – Teor de RAP impregnado.

Teor de RAP impregnado	GG1	GG2	GG3	GG4
%	24,83	17,03	22,48	28,87

Observa-se certa variabilidade nos resultados, possivelmente relacionada às características distintas dos materiais, mas também influenciada pela precisão limitada do método de ensaio. Ainda assim, é notório que todas as amostras apresentaram presença significativa de ligante asfáltico impregnado, o que confirma a aderência do material às geogrelhas e a eficácia do procedimento para sua detecção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise visual dos danos

Durante e após o processo de exumação das geogrelhas instaladas, foi realizada uma inspeção visual afim de identificar previamente os danos sofridos pelas geogrelhas, assim como as situações ou características que pudessem explicar esses danos. Para isso, foi feito um registro fotográfico tanto no momento da exumação quanto no Laboratório de Geotecnia e Geossintéticos da UFSCar. A seguir, são apresentados os registros das geogrelhas danificadas em cada material.

4.1.1. Seção experimental – Areia

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam imagens das geogrelhas nos sentidos longitudinal e transversal após a exumação e prontas para serem removidas e armazenadas. De modo geral, essas geogrelhas não apresentaram danos visíveis à inspeção visual que despertassem grande preocupação. No entanto, vale ressaltar que todas ficaram impregnadas com material fino do agregado miúdo, o que pode ter causado micro danos à estrutura dos filamentos, não identificáveis apenas por meio da análise visual.

Uma anomalia que pôde ser identificada foi a deformação em forma de “ondulações” na geogrelha GG4, tanto no sentido longitudinal quanto no transversal, resultando em um tipo de dano conhecido na literatura como *desfilamento* do filamento (Lim & McCartney, 2013), conforme registrado nas Figuras 4.1g e 4.1h. Esse aspecto pode estar relacionado ao procedimento de compactação de uma área com curto comprimento. As geogrelhas GG4 estavam posicionadas na divisa com o material que compunha outra seção, e o rolo compactador vibratório realizava movimentos de avanço e recuo, permanecendo parado sobre essas geogrelhas para inverter o sentido de movimento, evitando compactar sobre a seção vizinha. Embora o intervalo entre os movimentos fosse breve, essa condição pode ter sido a causa do dano observado. Isso demonstra a importância de boas conexões nos nós da geogrelha, pois esta situação pode ocorrer em campo.

Os danos observados na inspeção visual das geogrelhas foram predominantemente de abrasão, com a presença de pontos desgastados ao longo de toda a extensão das amostras. Em seguida, destacou-se o dano por desfilamento, acompanhado, em algumas situações, pelo deslizamento do filamento longitudinal sobre o filamento transversal, alterando a estrutura da malha da geogrelha. Não foram observados danos por corte ou punção.

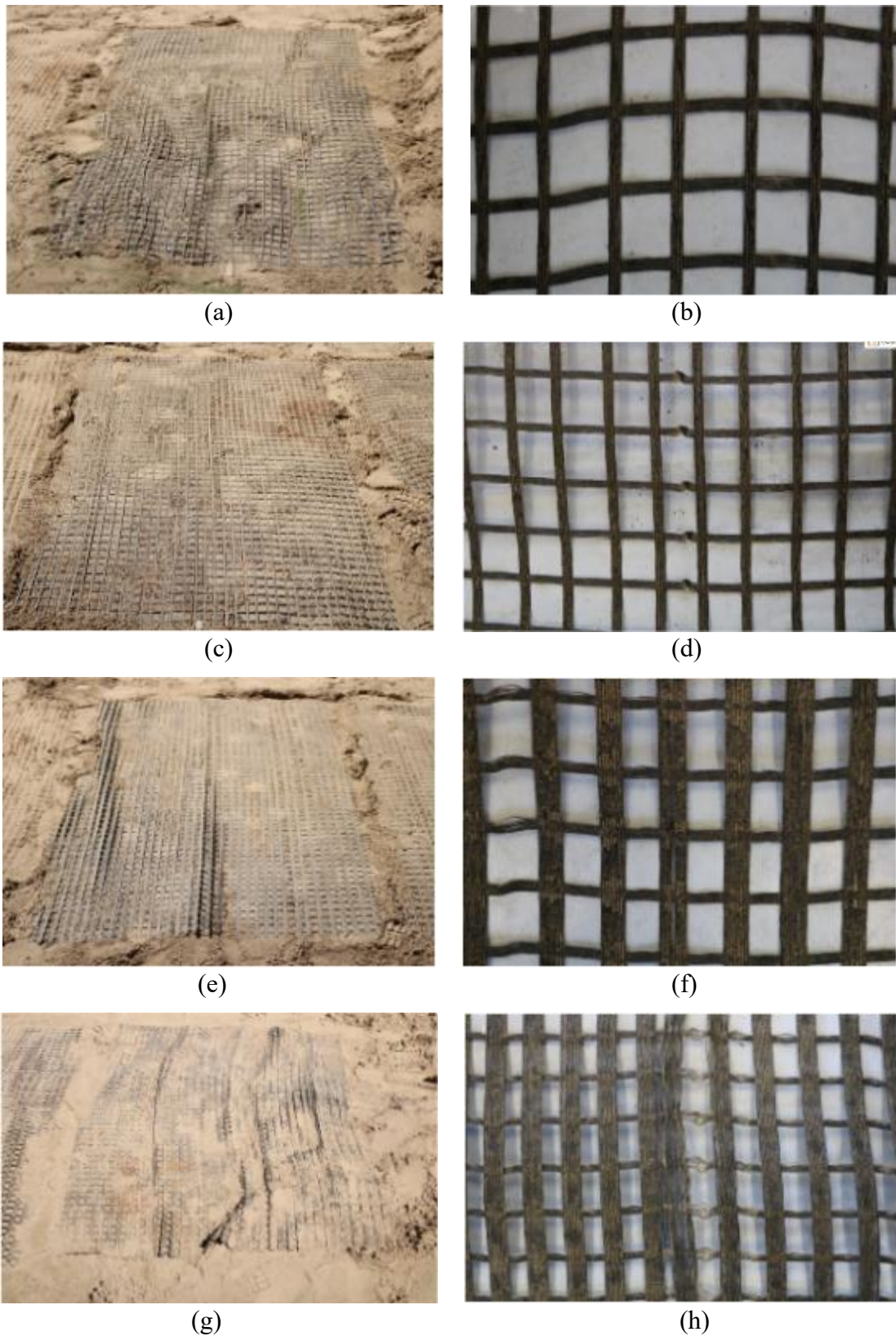


Figura 4.1 – Geogrelhas Sentido Longitudinal – areia: (a) GG1; (b) Registro do estado da Geogrelha; (c) GG2; (d) Registro do estado da Geogrelha; (e) GG3; (f) Registro do estado da Geogrelha; (g) GG4; (h) Registro do estado da Geogrelha.



(a)



(b)



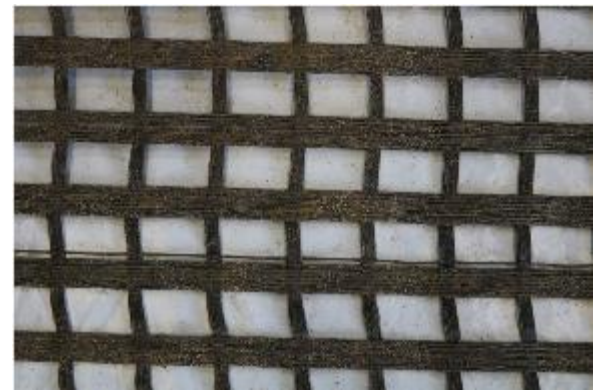
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 4.2 – Geogrelhas sentido transversal – areia: (a) GG1; (b) Registro do estado da Geogrelha; (c) GG2; (d) Registro do estado da Geogrelha; (e) GG3; (f) Registro do estado da Geogrelha; (g) GG4; (h) Registro do estado da Geogrelha.

4.1.2. Seção experimental – Fresado RAP

As geogrelhas instaladas na seção do material fresado mostraram um nível superior de danos, em comparação com aquelas instaladas na areia. Essa diferença pode ser explicada pela composição do material fresado, que consiste em uma mistura de agregados graúdos e miúdos. Os danos potenciais causados pelos agregados graúdos foram parcialmente mitigados pela presença dos agregados miúdos na mistura. Além disso, algumas geogrelhas mostraram todos os quatro tipos de danos descritos por Lim e McCartney (2013), enquanto em outras foi observada a ocorrência de um único tipo ou mais de um tipo de dano simultaneamente.

O tipo de dano mais comum e de fácil constatação visual nas geogrelhas instaladas na camada de RAP foi o dano por abrasão, que estava presente em todas as geogrelhas, variando apenas em sua intensidade. Vale ressaltar que as geogrelhas ficaram impregnadas com o material ligante presente no fresado, resultando na aderência significativa da parte fina da granulometria do fresado sobre elas. Isso foi especialmente observado nas geogrelhas de maior resistência, como a GG4, devido aos seus filamentos mais largos, resultando em uma grande quantidade de material fino aderido. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam as geogrelhas exumadas, antes de serem retiradas para serem acondicionadas de maneira adequada.

O dano constatado na geogrelha GG3 no sentido longitudinal e que pode ser visto nas Figuras 4.3, “e” e “f”, foi similar a um puncionamento do material contra a camada de base, e pode ter sido causado por algum grume maior de RAP que acabou ficando posicionado naquele ponto forçando e danificando a geogrelha naquele ponto durante a compactação.

A Figura 4.4f ilustra o dano de corte total de um filamento, embora esse tipo de dano não tenha sido comum nas geogrelhas expostas ao fresado RAP. Esse dano ocorre quando a geogrelha sofre um corte abrupto em um ponto específico, rompendo completamente o filamento. Já a Figura 4.3h mostra o dano de desfilamento nos filamentos da geogrelha exumada do RAP. Neste caso, os filamentos são afetados com a perda da estrutura de amarração, o que provoca uma perda parcial da estrutura da malha.

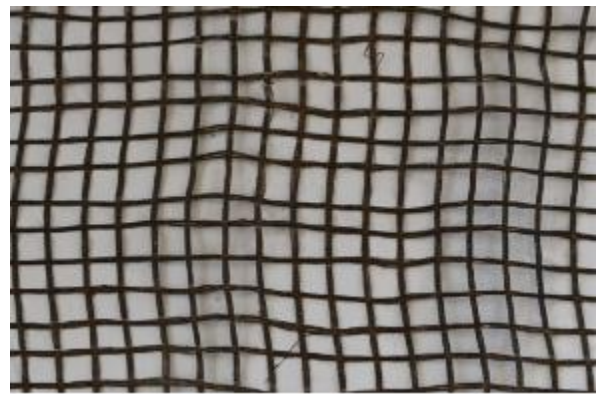
A análise visual dos danos nas geogrelhas instaladas na areia e RAP revelaram diferenças significativas nos tipos e na severidade dos danos. Na seção de areia, os danos foram predominantemente por abrasão, com algumas ocorrências pontuais de desfilamento, sem presença de cortes ou punções. Já na seção de RAP, os danos foram mais intensos, com a abrasão chegando a remover parte do revestimento de PVC e expondo as fibras dos filamentos. Além disso, foram constatados danos por corte e desfilamento, revelando um impacto mais severo desse material na integridade das geogrelhas. A presença de material ligante no RAP também resultou na aderência significativa de partículas finas às geogrelhas, especialmente nas

de maior resistência, como a GG4. Esses resultados sugerem que a composição granulométrica e a compactação do material de aterro influenciam diretamente o mecanismo e a severidade dos danos, sendo o RAP um material ocasional mais agressivo às geogrelhas do que a areia.

Embora o RAP possua uma granulometria maior do que a da areia, muitos dos danos que seriam normalmente causados pelos agregados podem ter sido minimizados pela presença do ligante asfáltico no material. Além disso, a fração fina da granulometria pode ter envolvido os grãos de maior diâmetro, desempenhando um papel importante na proteção dos filamentos contra os danos da fração mais grossa, o que contribuiu para a redução dos danos observados.



(a)



(b)



(c)



(d)



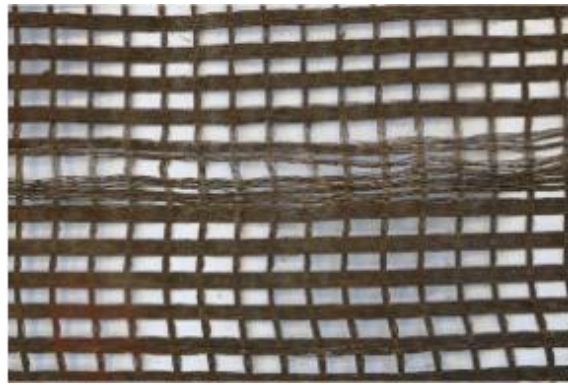
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 4.3 – Geogrelhas Sentido Longitudinal – fresado: (a) GG1; (b) Registro do estado da Geogrelha; (c) GG2; (d) Registro do estado da Geogrelha; (e) GG3; (f) Registro do estado da Geogrelha; (g) GG4; (h) Registro do estado da Geogrelha.



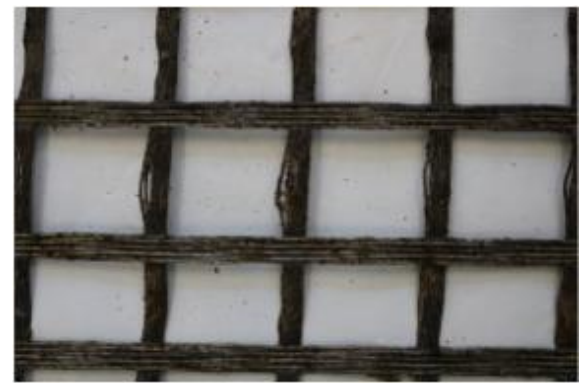
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



Figura 4.4 – Geogrelhas sentido transversal – fresado: (a) GG1; (b) Registro do estado da Geogrelha; (c) GG2; (d) Registro do estado da Geogrelha; (e) GG3; (f) Registro do estado da Geogrelha; (g) GG4; (h) Registro do estado da Geogrelha.

4.2. Análise por ensaios não destrutivos

4.2.1. Microscopia Óptica

As geogrelhas de poliéster (GG1, GG2, GG3 e GG4) apresentaram variações nos níveis de dano de acordo com o tipo de material ao qual foram expostas. No caso do fresado RAP, também foi feita a análise da geogrelha pós ensaio de teor de ligante asfáltico, por estar limpa e sem material aderido aos filamentos. A seguir, será apresentado uma análise conjunta, destacando as características comuns e as diferenças específicas observadas entre os grupos.

A Figura 4.5 apresenta as geogrelhas intactas, elas são para referenciar o estado original do material. Todas apresentam superfícies limpas e bem conservadas, com revestimento de PVC homogêneo e sem sinais de desgaste. Uma diferença sutil observada na GG1, em relação às demais, é o acúmulo de PVC nas laterais dos filamentos, o que resulta em uma leve rugosidade. No entanto, de forma geral, a integridade estrutural foi preservada em todos os casos. Foram selecionadas lentes capazes de capturar um trecho completo da região do nó das geogrelhas em cada material, utilizando as mesmas lentes para cada grupo de geogrelhas, sendo para o grupo da GG1 4x, GG2 3.2x, GG3 2x e GG4 1.6x.

Nas geogrelhas expostas à areia (Figura 4.6), observou-se um padrão de dano leve e superficial em todos os quatro grupos, com a abrasão sendo o mecanismo predominantemente. Todas apresentaram adesão de grãos de areia entre os filamentos e um desgaste leve a moderado no revestimento de PVC. Apesar disso, a estrutura principal do material permanece preservada. Nas GG1 e GG4, foram observados sinais de puncionamento nos filamentos devido à interação com os grãos de areia, o que pode indicar um nível ligeiramente mais alto de dano nesse grupo.

Nas geogrelhas expostas ao fresado RAP (Figura 4.7), os danos observados pela inspeção visual foram similares à observada nas geogrelhas da areia. Todos os grupos apresentaram abrasões leves a moderadas no revestimento e adesão de partículas do material às superfícies. No entanto, a integridade estrutural dos filamentos permaneceu preservada. Em todas as geogrelhas com superfície limpa, é possível observar abrasões mais claramente, com o desgaste do revestimento de PVC e exposição das fibras do filamento (Figura 4.8).

A inspeção visual permitiu identificar certos padrões de danos entre as geogrelhas expostas à areia e ao RAP, evidenciando a predominância de danos por abrasão em ambos os casos. A constatação da perda parcial do revestimento de PVC nas geogrelhas do RAP, expondo as fibras dos filamentos, ressalta a importância de um revestimento eficiente na resistência a danos. A remoção do PVC pode intensificar os danos, comprometendo ainda mais a integridade da geogrelha. Além disso, a presença de punção nos filamentos das GG1 e GG4 sugere que certos aspectos da interação entre os filamentos e os grãos do material podem intensificar os danos. Essas observações são essenciais para a compreensão do comportamento das geogrelhas em diferentes condições de exposição, contribuindo para a análise global da durabilidade desses materiais em campo.

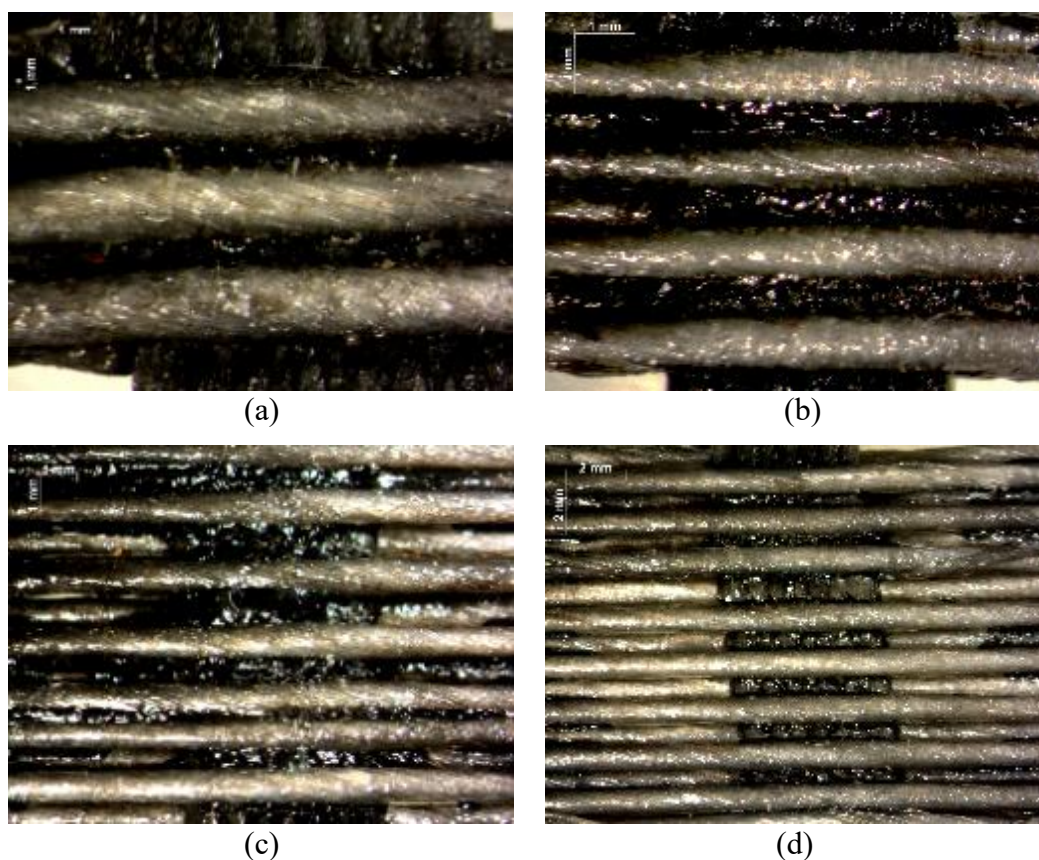


Figura 4.5 – Geogrelha intacta: (a) GG1-4X; (b) GG2-3.2X; (c) GG3-2X; (d) GG4- 1.6X.

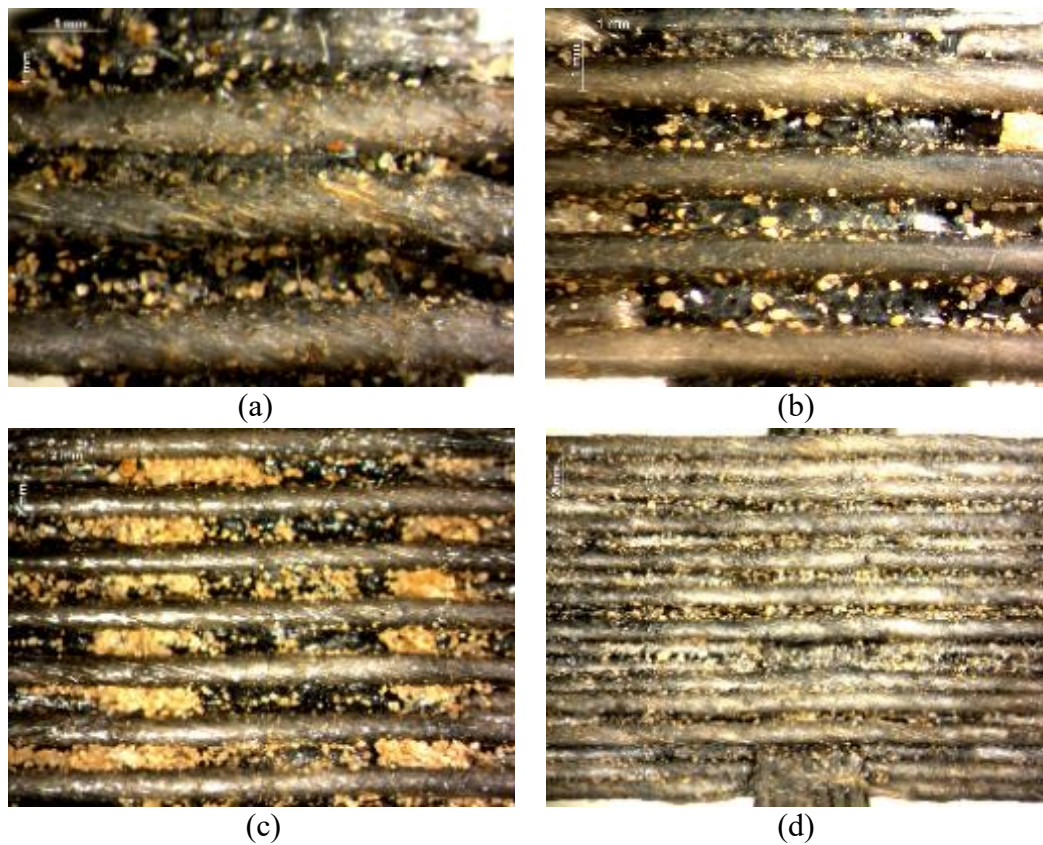


Figura 4.6 – Geogrelha da areia: (a) GG1-4X; (b) GG2-3.2X; (c) GG3-2X; (d) GG4-1.25X).

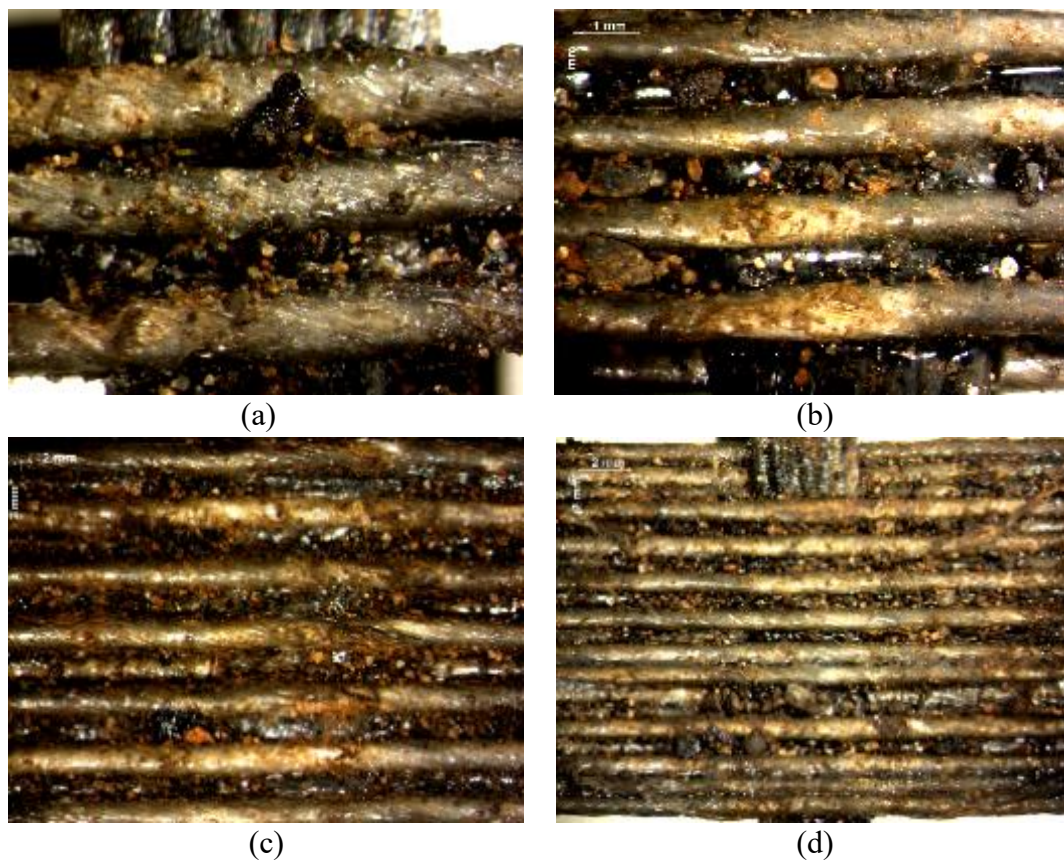


Figura 4.7 – Geogrelha do RAP: (a) GG1-4X; (b) GG2-3.2X; (c) GG3-2X; (d) GG4-1.25X.

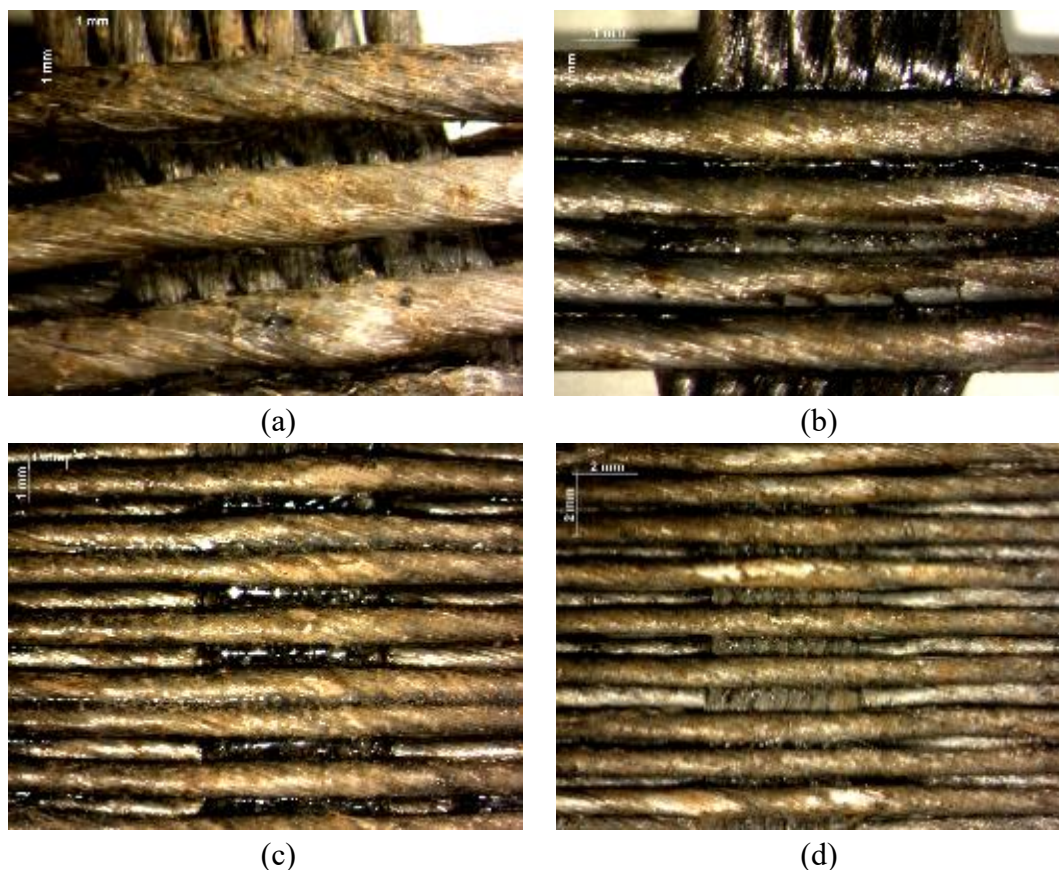


Figura 4.8 – Geogrelha limpa – pós ensaio de impregnação: (a) GG1-4X; (b) GG2-3.2X; (c) GG3-2X; (d) GG4-1.25X.

4.2.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

4.2.2.1. MEV das geogrelhas – GG1

As imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelam o estado microscópico dos danos nas geogrelhas intactas e após exposição a diferentes materiais de aterro. O grupo de imagens que compõe a Figura 4.9 corresponde à geogrelha intacta, utilizada como referência. Nessas imagens, observa-se uma superfície bem conservada, rugosa e sem sinais de desgaste. A textura da pintura de PVC, em sua maioria, encontra-se íntegra, com revestimento cobrindo todas as fibras. Contudo, é visível uma falha de cobertura no filamento central, indicando uma possível irregularidade inicial no revestimento.

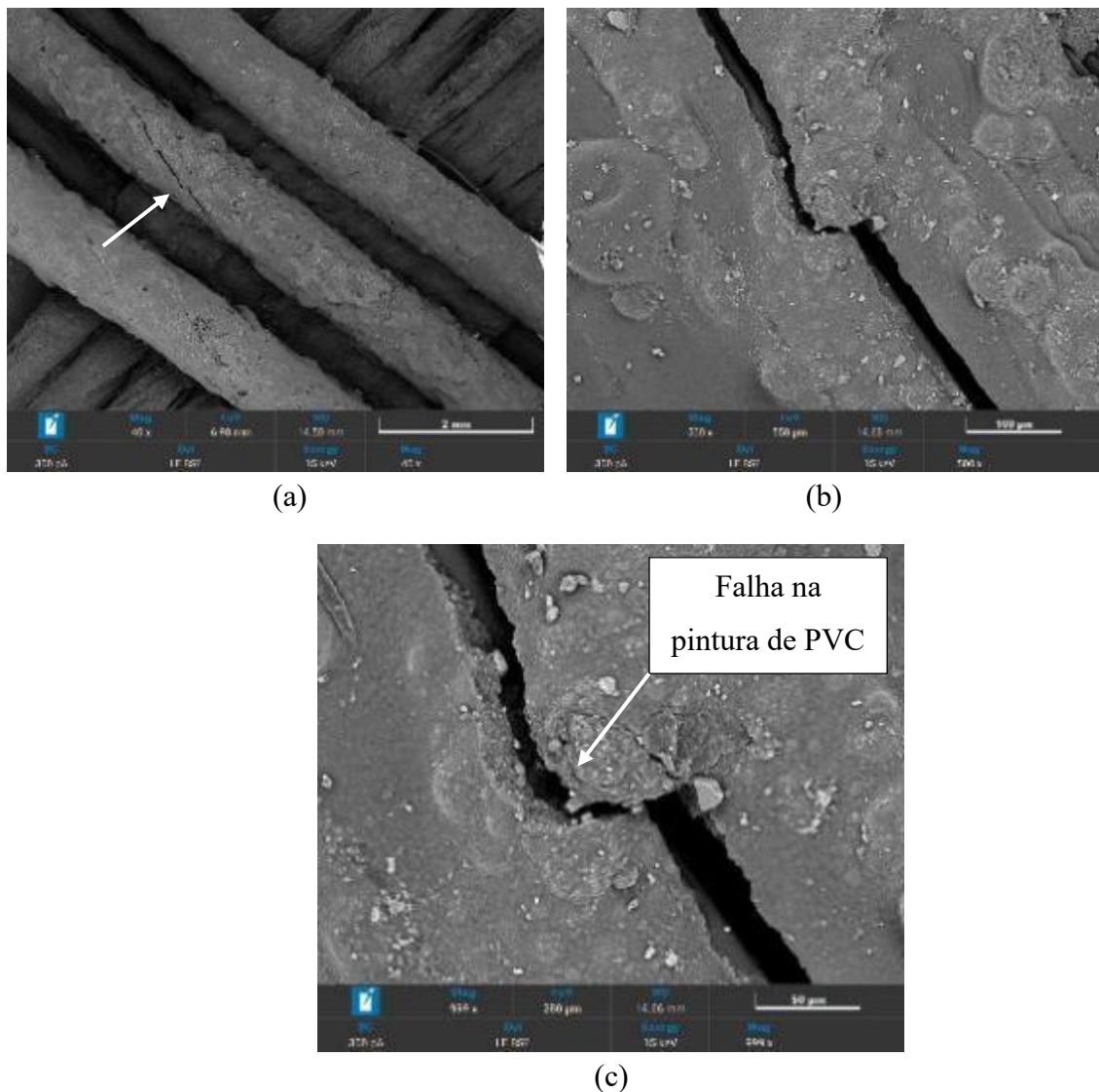


Figura 4.9 – Imagem MEV da superfície da geogrelha intacta – GG1: (a) Intacta – LE - BSE – 40X; (b) Intacta – LE – BSE – 500X; (c) Intacta – LE – BSE – 999X.

Nas imagens da geogrelha exposta à areia (Figura 4.10), são evidentes os danos causados pelo atrito dos grãos arenosos à pintura e aos filamentos de PET. A superfície apresenta sinais de abrasão moderada, com desgaste do revestimento e fibras parcialmente expostas. Além disso, os grãos de areia aderidos à superfície parecem ter puncionado as fibras, resultando em danos localizados. Apesar disso, as fibras mais profundas da estrutura do filamento permanecem preservadas, indicando que os danos são predominantemente superficiais.

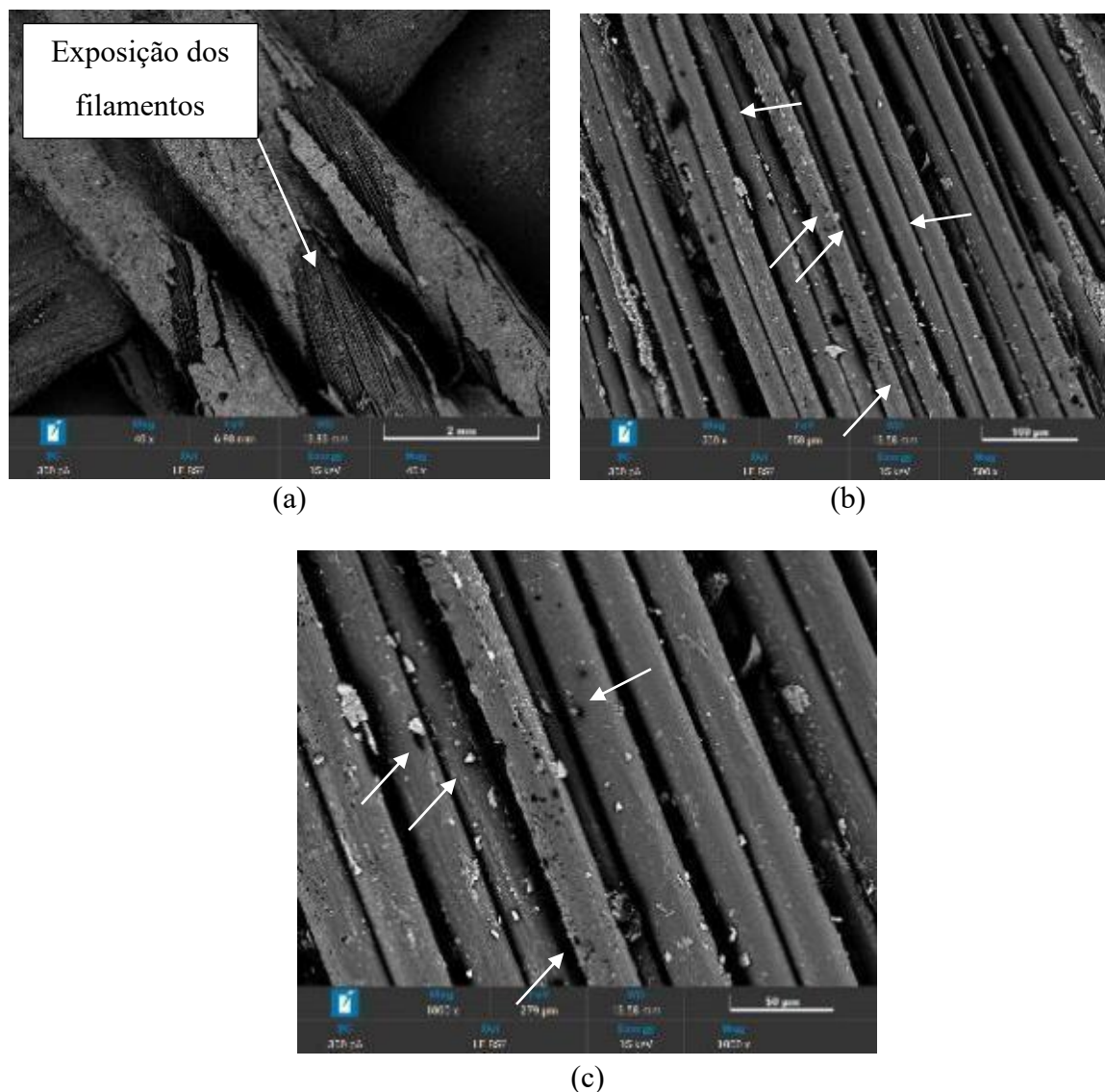


Figura 4.10 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da areia – GG1: (a) Areia – LE – BSE – 40X; (b) Areia – LE – BSE – 500X; (c) Areia – LE – BSE – 1000X.

Por fim, as imagens da geogrelha exposta ao fresado RAP (Figura 4.11) revelam um nível de dano superior em comparação às geogrelhas exumadas da areia. Observa-se abrasão superficial e exposição de algumas fibras, enquanto a estrutura principal do material permanece relativamente preservada. O revestimento de PVC foi quase totalmente removido na parte mais externa do filamento. Além disso, observe a presença de resíduos entre as fibras, que parecem ser fragmentos do revestimento de PVC degradados pelo contato com o RAP. Também são visíveis pequenos danos nas fibras mais externas.

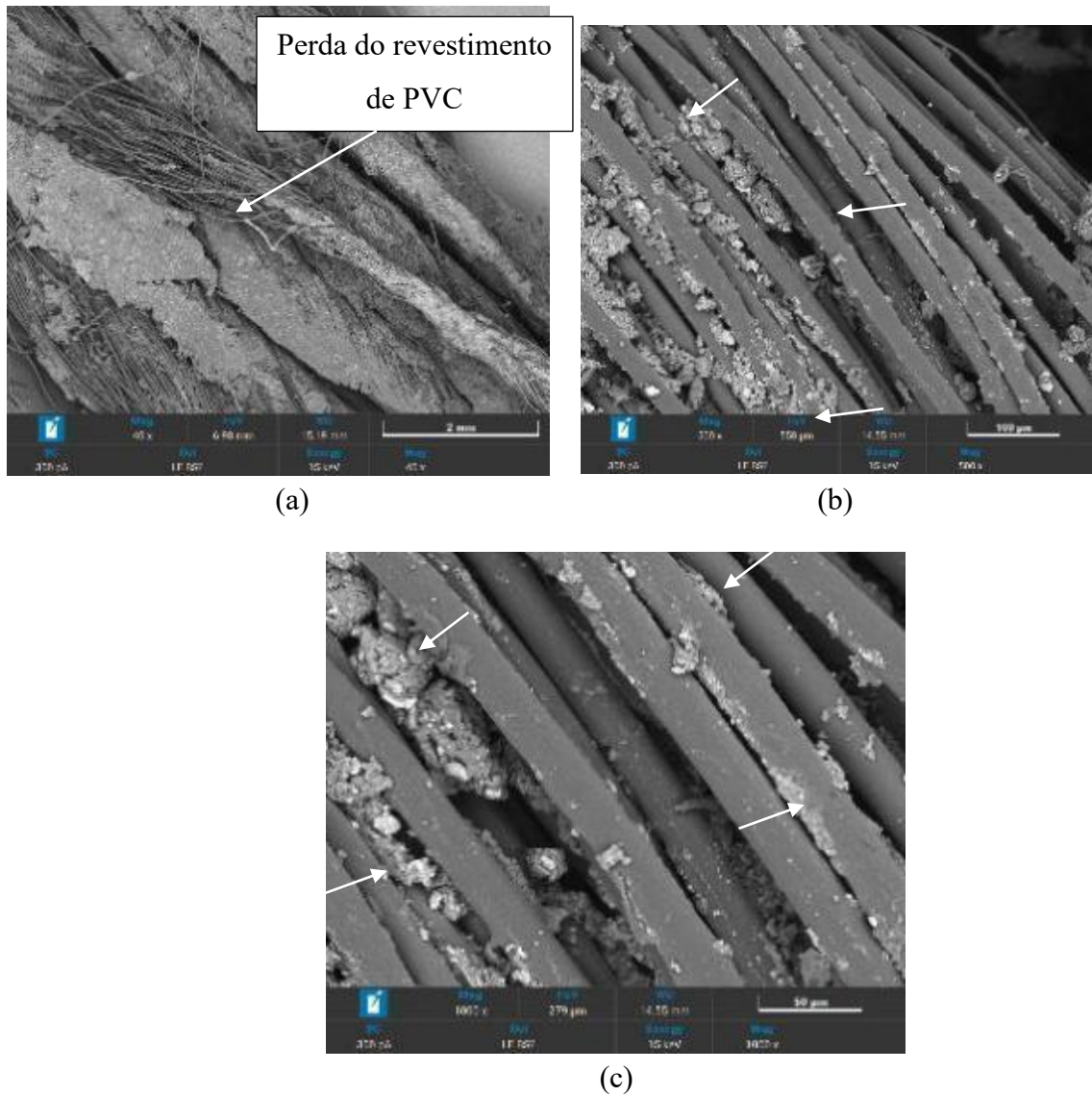


Figura 4.11 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da RAP – GG1: (a) RAP – LE - BSE – 40X; (b) RAP – LE – BSE – 500X; (c) RAP – LE – BSE – 1000X.

4.2.2.2. MEV das geogrelhas – GG2

O conjunto de imagens apresentado na Figura 4.12 corresponde à geogrelha GG2 intacta. Observa-se um revestimento de PVC sem falhas, mas destacando bem as fibras, o que pode sugerir uma camada menos espessa do material de revestimento. A marca de tonalidade mais clara visível em um dos filamentos é atribuída a resíduos do componente utilizado durante a preparação das amostras para o ensaio.

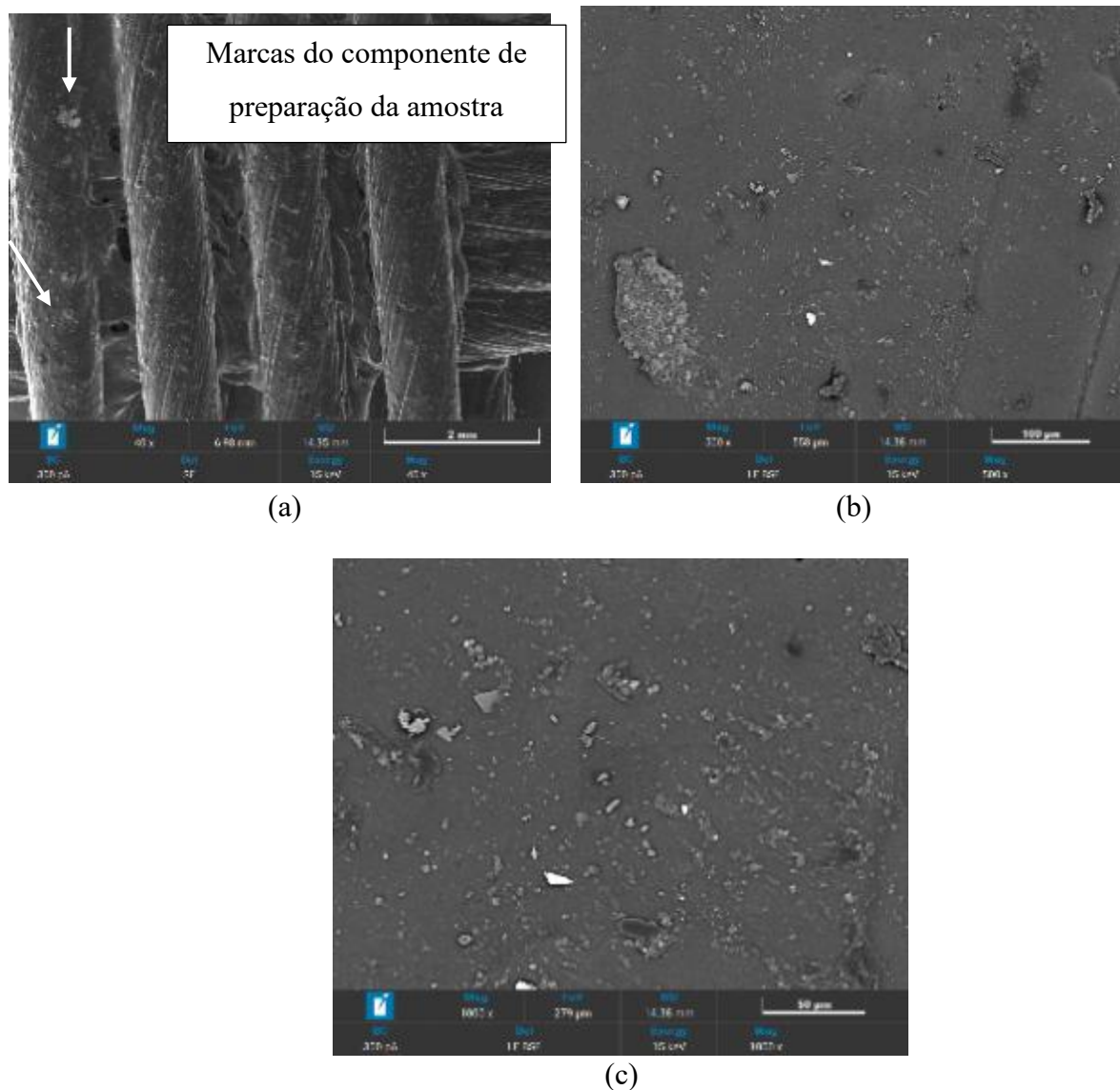


Figura 4.12 – Imagem MEV da superfície da geogrelha intacta – GG2: (a) Intacta – LE - BSE – 40X; (b) Intacta – LE – BSE – 500X; (c) Intacta – LE – BSE – 1000X.

Na Figura 4.13, referente à geogrelha exposta à areia, os danos cobrados são leves. O revestimento de PVC apresentou desgaste superficial, com poucos pontos de perfuração e danos encontrados, resultando na perda pontual do revestimento. No entanto, o dano não foi suficiente para atingir as fibras internas do filamento, embora tenha ocorrido uma perda localizada do PVC.

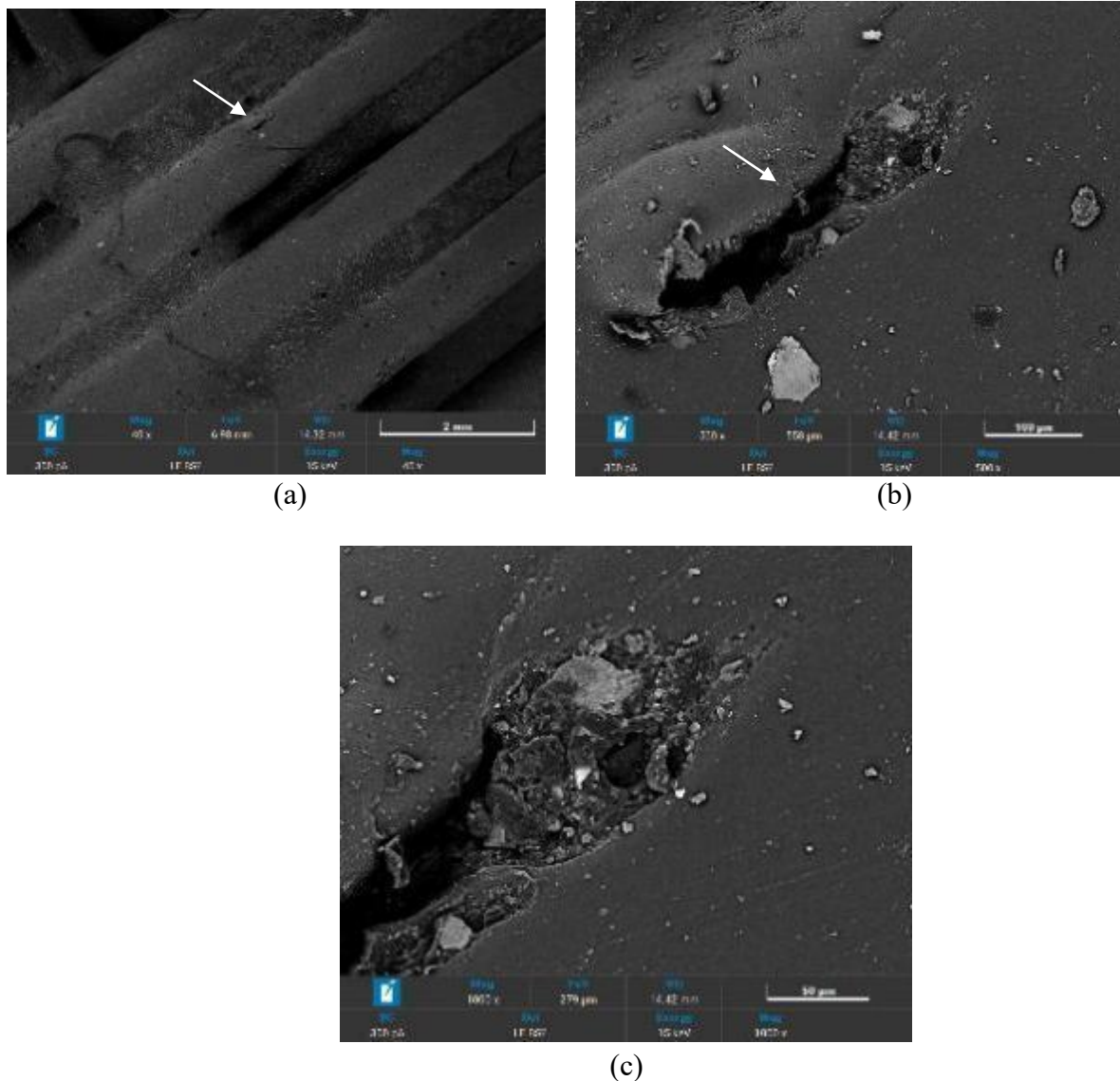


Figura 4.13 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da areia – GG2: (a) Areia – LE – BSE – 40X; (b) Areia – LE – BSE – 500X; (c) Areia – LE – BSE – 1000X.

A Figura 4.14 da geogrelha exumada do RAP revela danos pontuais mais significativos, com remoção expressiva do revestimento de PVC e exposição das fibras internas de poliéster. Observa-se um desarranjo das fibras, acompanhado de sinais de fratura e ruptura mecânica (figura 4.14a). Além disso, o material aderido à superfície do filamento aparentam ser de resíduos do revestimento de PVC degradado. Embora seja possível constatar pequenas fissuras e rupturas estruturais pontuais na geogrelha, as fibras mais internas do filamento mostram-se mais preservadas (figura 4.14b e 4.14c), indicando que os danos foram predominantemente superficiais.

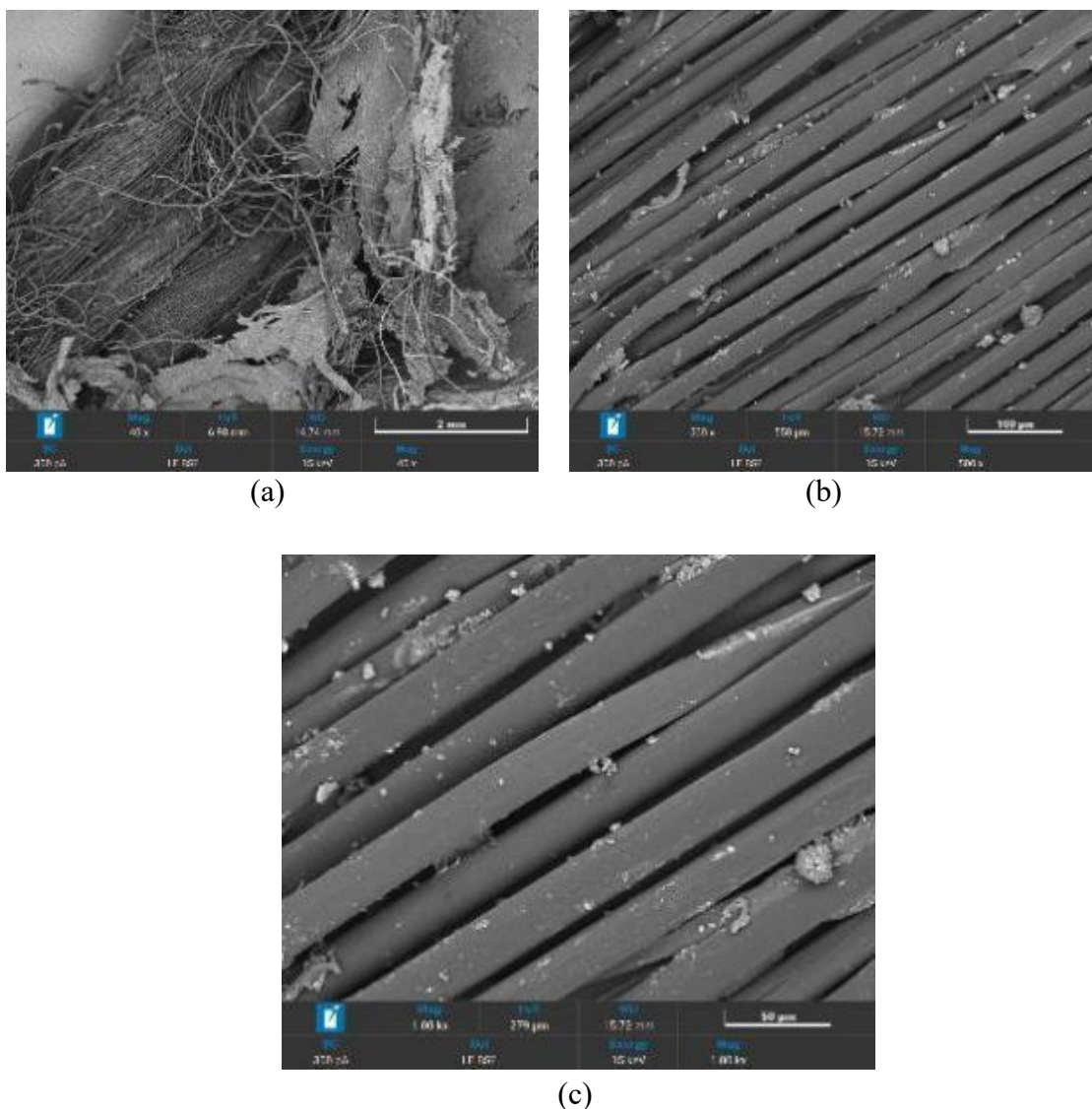


Figura 4.14 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da RAP – GG2: (a) RAP – LE - BSE – 40X; (b) RAP – LE – BSE – 500X; (c) RAP – LE – BSE – 1000X.

4.2.2.3. MEV das geogrelhas – GG3

As imagens da Figura 4.15 correspondem à geogrelha GG3 intacta. Nelas, observa-se que a geogrelha não apresenta marcas ou danos, com todas as fibras uniformemente cobertas pelo revestimento de PVC.

Na Figura 4.16, que mostra a geogrelha utilizada com areia, é visível a perda do revestimento local, na parte superior dos filamentos, além do corte de algumas fibras. Diferentemente de outras geogrelhas expostas à areia, nesta não foram identificadas marcas que possam ser atribuídas à punção.

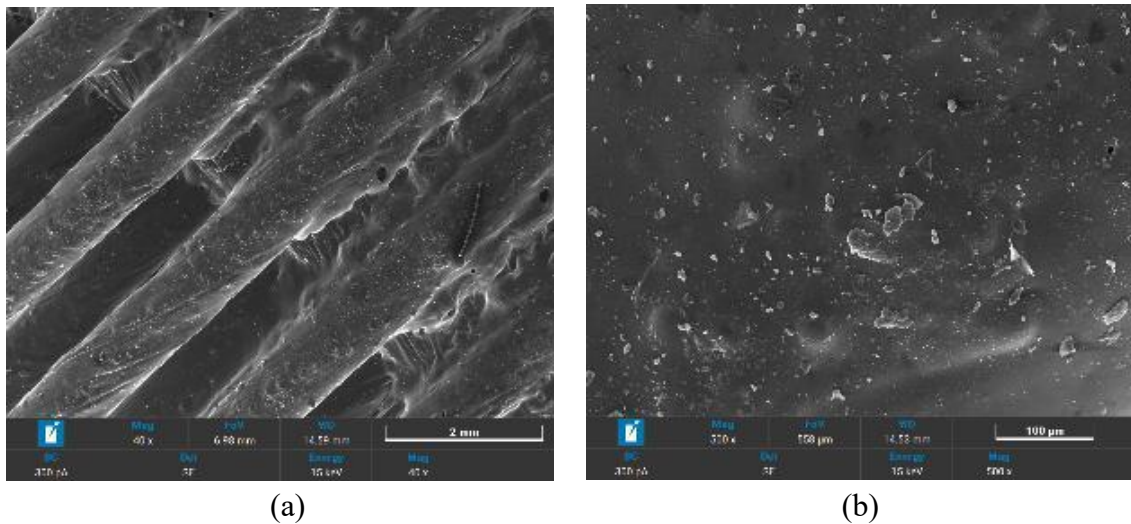


Figura 4.15 – Imagem MEV da superfície da geogrelha intacta – GG3: (a) Intacta - SE – 40X; (b) Intacta – SE – 1000X.

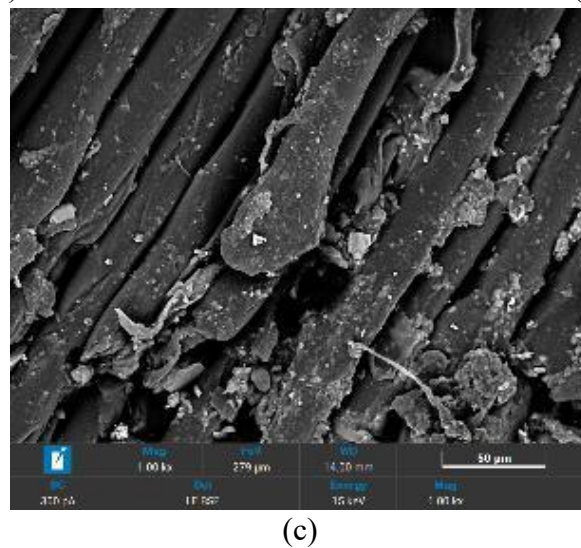
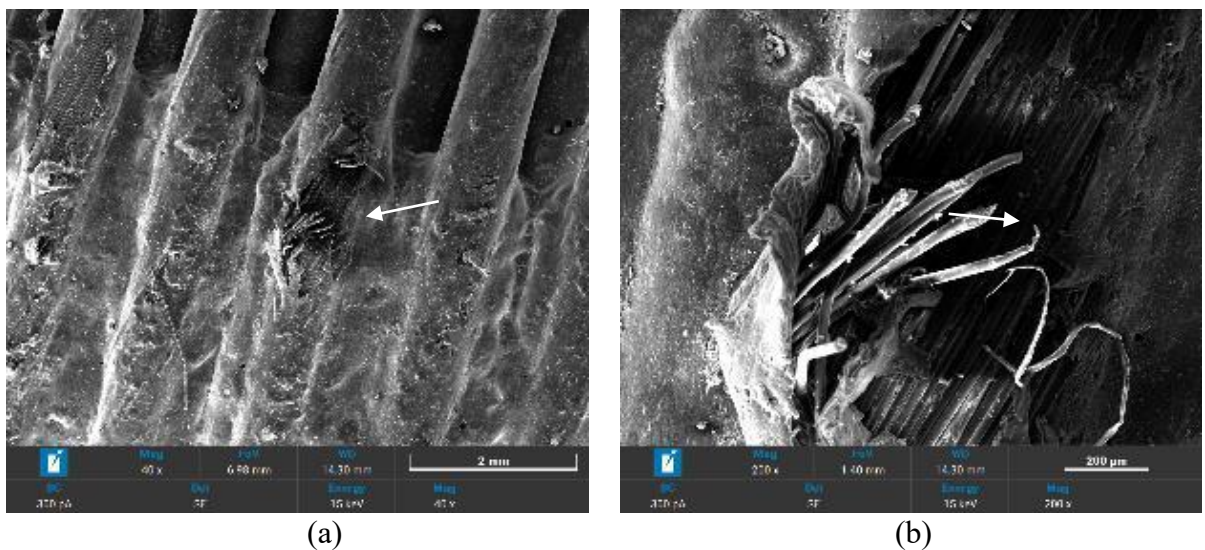


Figura 4.16 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da areia – GG3: (a) Areia - SE – 40X; (b) Areia – SE – 500X; (c) Areia – LE – BSE – 1000X.

Já nas imagens da Figura 4.17, que mostram a geogrelha exposta ao fresado RAP, é possível perceber que o dano por abrasão provocou um desgaste na camada externa do revestimento de PVC, deixando resíduos desse material de revestimento aderidos às fibras. Houve poucos cortes e quase nenhum desalinhamento das fibras, indicando que os danos estruturais foram relativamente moderados.

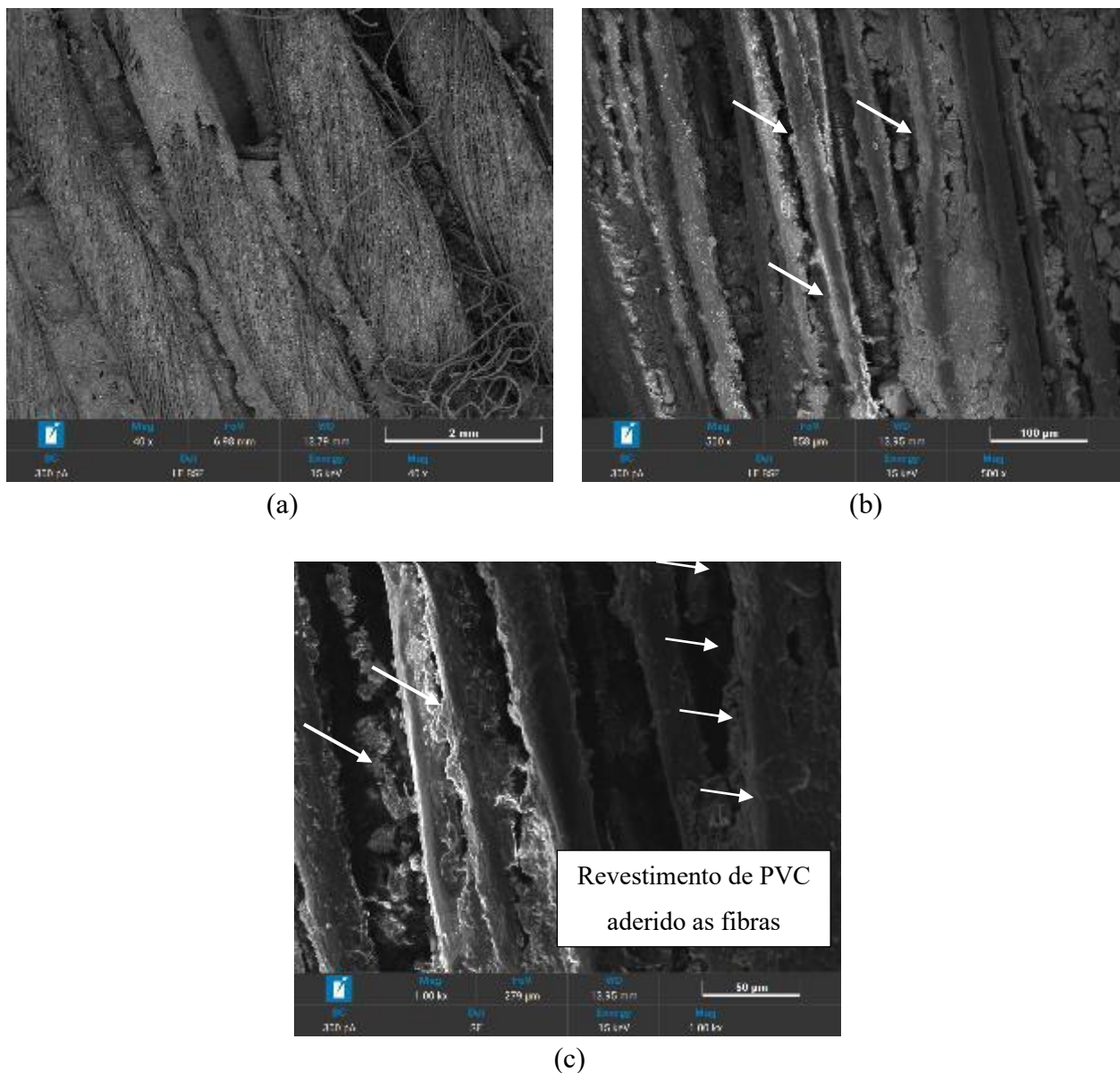


Figura 4.17 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da RAP – GG3: (a) RAP – LE - BSE – 40X; (b) RAP – LE – BSE – 500X; (c) RAP – SE – 1000X.

4.2.2.4. MEV das geogrelhas – GG4

A Figura 4.18, referente à geogrelha GG4 intacta, evidencia áreas com falhas no revestimento de PVC, locais onde é possível verificar pequenos falhas no revestimento de PVC. Apesar dessas falhas, a superfície apresenta-se mais lisa e homogênea em comparação às demais amostras de geogrelha intacta.

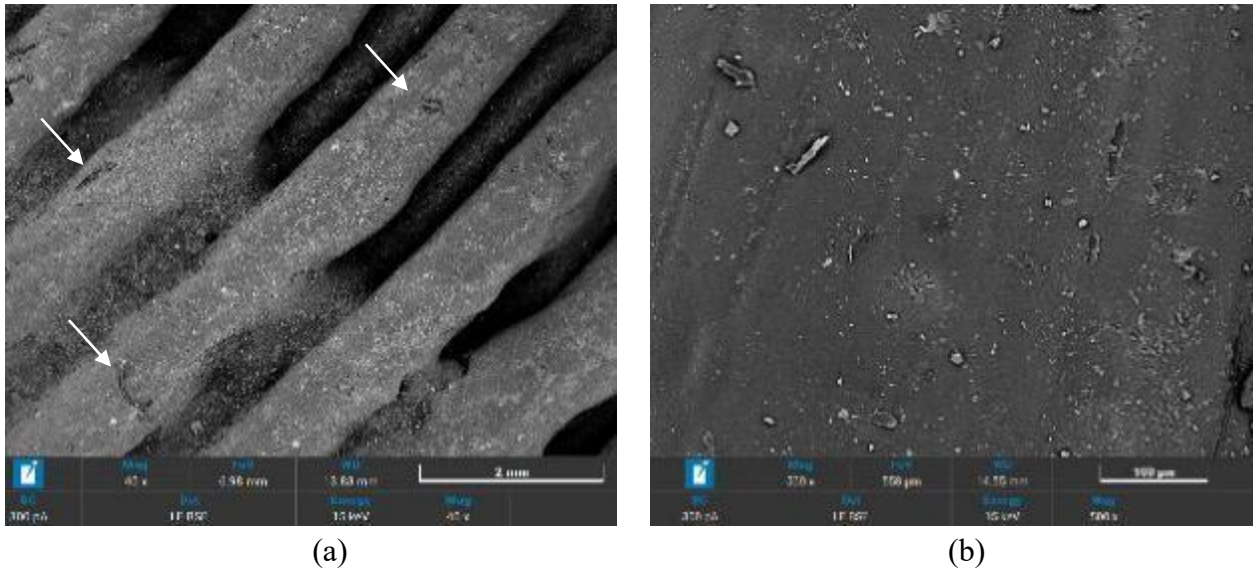
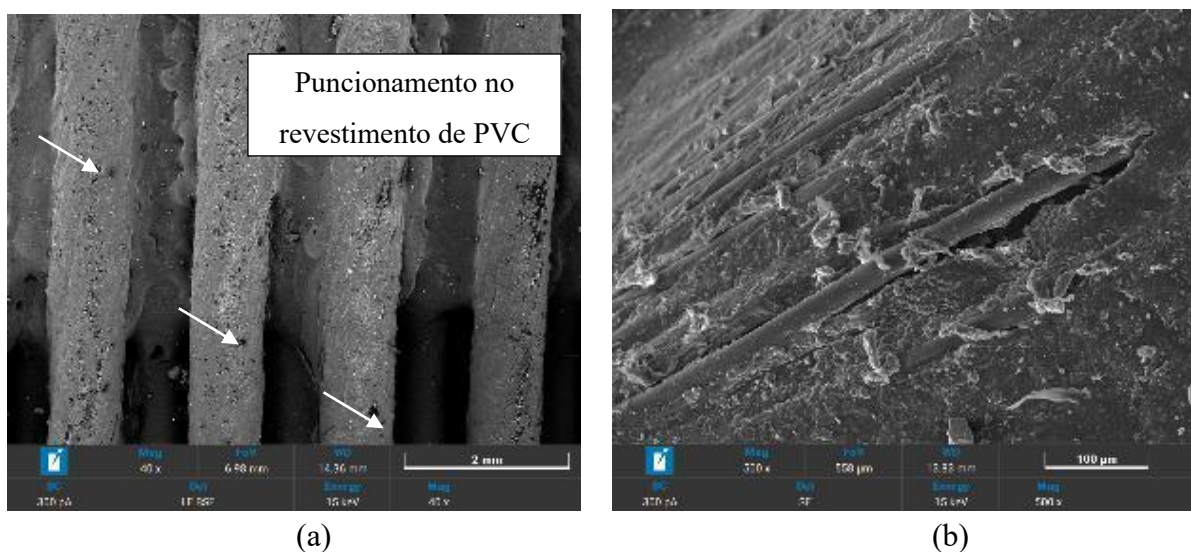
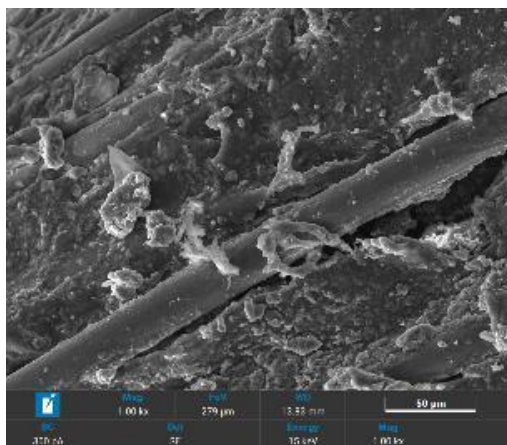


Figura 4.18 – Imagem MEV da superfície da geogrelha intacta – GG4: (a) Intacta - SE – 40X; (b) Intacta – LE – BSE – 500X.

Nas imagens da Figura 4.19, referentes à geogrelha exposta à areia, inicialmente é possível observar a integridade da pintura de PVC e pontos que sugerem punção causado pelos grãos de areia nos filamentos da geogrelha. Também é visível uma leve perda do revestimento de PVC por abrasão. Não foram identificados cortes nas fibras, que permanecem alinhadas e estruturalmente íntegras.

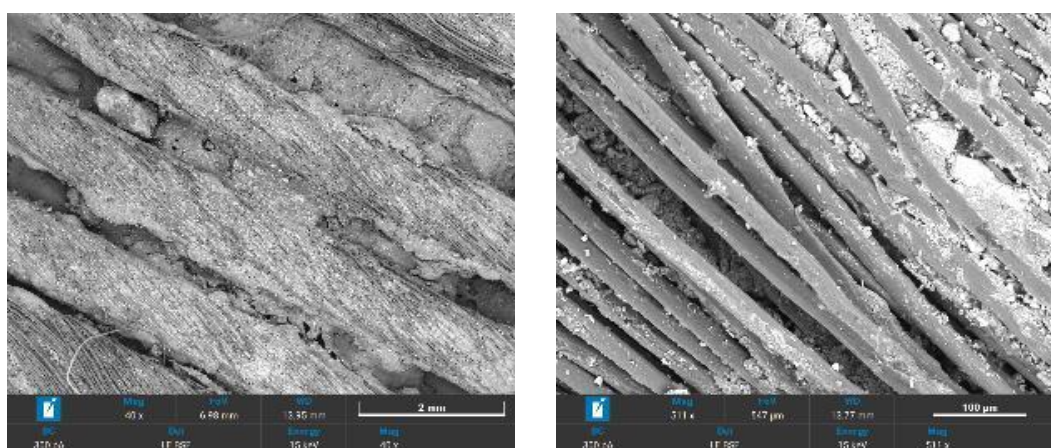




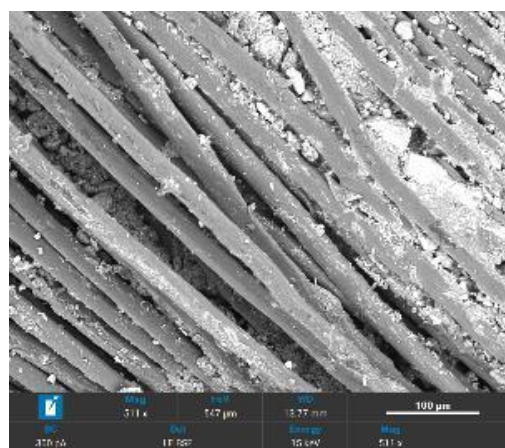
(c)

Figura 4.19 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da areia – GG4: (a) Areia – LE - BSE – 40X; (b) Areia – SE – 500X; (c) Areia – SE – 1000X.

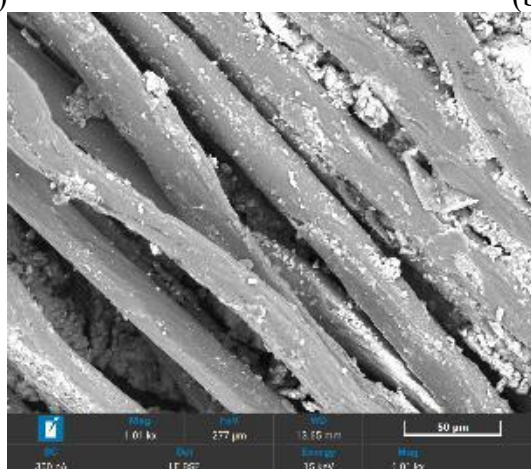
Por fim, as imagens das geogrelhas expostas ao fresado RAP (Figura 4.20) mostram uma perda severa do revestimento de PVC na camada mais externa. Apesar disso, foram observadas poucas fibras cortadas, com o arranjo e alinhamento das fibras sendo majoritariamente preservados.



(a)



(b)

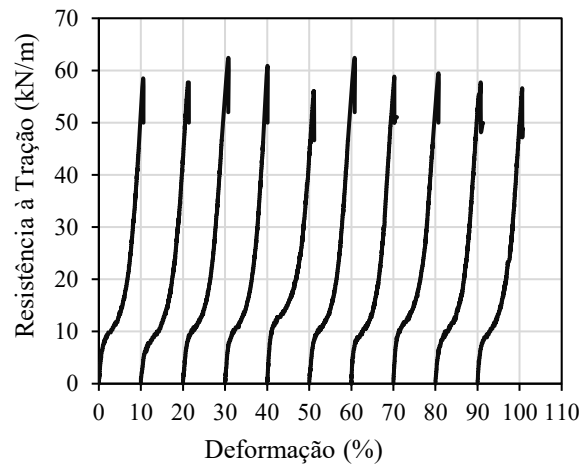


(c)

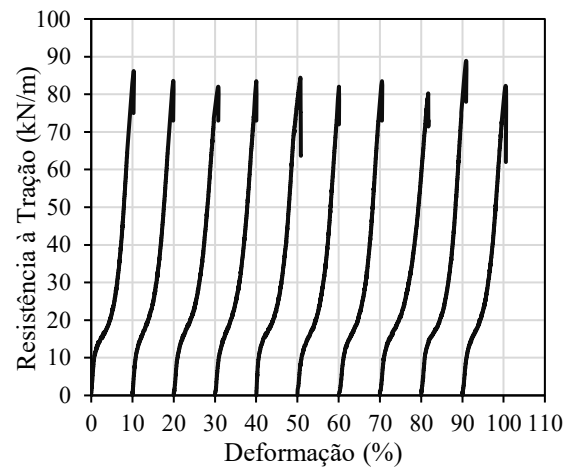
Figura 4.20 – Imagem MEV da superfície da geogrelha exumada da RAP – GG4: (a) RAP - SE – 40X; (b) RAP – LE – BSE – 500X; (c) RAP – LE – BSE – 1000X.

4.3. Resultados do ensaio de resistência à tração das geogrelhas intactas

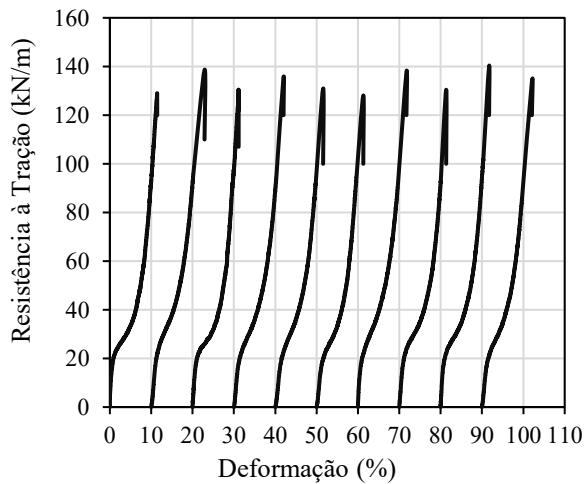
A Figura 4.21 apresenta as curvas tensão-deformação das geogrelhas intacta obtidas pelo ensaio de resistência à tração. Conforme é possível observar, o formato da curva é típico de um material polimérico de poliéster, apresentando um comportamento não linear, com perda de rigidez inicial bem definido, local onde ocorre uma inclinação na curva. Todas as geogrelhas atingiram a resistência mínima nominal de catálogo, com deformação máxima na ruptura em torno de 11%, estando abaixo dos valores descritos pelo fabricante.



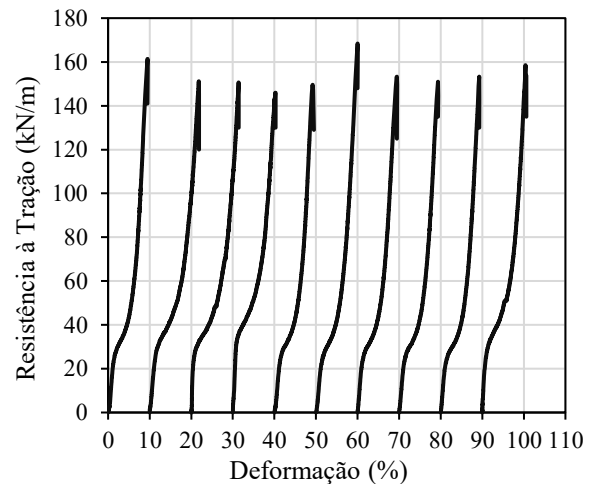
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.21 – Curva tensão-deformação: (a) GG1 longitudinal; (b) GG2 Longitudinal; (c) GG3 longitudinal; (d) GG4 Longitudinal.

A partir dos ensaios de tensão-deformação de tração das geogrelhas intactas, foram obtidos os valores de resistência à tração última, deformação na ruptura e resistência a 2% e 5% de deformação dos corpos-de-prova, parâmetros essenciais para avaliar as características mecânicas do material. Os ensaios permitiram comparar o comportamento mecânico das quatro geogrelhas estudadas com os valores especificados pelos fabricantes, confirmando que a resistência à tração máxima esteve em conformidade com os valores de catálogo. As propriedades de tração de cada geogrelha e seus respectivos corpos-de-prova são apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.4.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas da geogrelha GG1.

CP	Resistência à tração (kN/m)	Deformação na ruptura (%)	Resistência à 2% de deformação (kN/m)	Resistência à 5% de deformação (kN/m)
1	58,44	10,60	9,33	13,26
2	57,71	11,14	7,77	11,65
3	62,37	10,76	9,82	14,24
4	60,89	10,07	9,83	14,73
5	56,05	11,18	11,65	15,54
6	62,37	10,75	9,82	14,24
7	58,82	10,85	8,88	13,32
8	59,42	10,69	10,80	15,22
9	57,72	11,31	9,43	13,32
10	56,60	10,79	8,88	13,33
Média	59,04	10,81	9,62	13,88
Desvio Padrão	2,23	0,35	1,07	1,15
Coef. Var. (%)	3,77	3,25	11,12	8,26

Comparando com o valor nominal do catálogo da GG1 (55 kN/m), é possível observar que a resistência média obtida foi superior ao especificado pelo fabricante. Esse comportamento pode estar relacionado à variabilidade natural do material. O baixo coeficiente de variação (inferior a 5%) indica uma boa uniformidade nos resultados. Em relação à deformação na ruptura, a média obtida foi de 10,81%, com um coeficiente de variação de 3,25%, o que sugere pouca dispersão nos dados. O fabricante especifica um limite de <12%, e os valores experimentais estão dentro dessa faixa, confirmando a conformidade do material com as especificações técnicas.

A resistência à tração à 2% de deformação apresentou uma média de 9,62 kN/m, ligeiramente inferior ao valor especificado para o GG1 (11,3 kN/m). Além disso, o coeficiente de variação foi relativamente alto (11,12%), apresentando uma maior dispersão nos resultados.

Já na resistência à tração a 5% de deformação, o valor obtido (13,88 kN/m) também ficou um pouco abaixo do especificado pelo fabricante (15,0 kN/m). O coeficiente de variação de 8,26% sugere uma variabilidade a ser considerada na resistência a esta deformação.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas da geogrelha GG2.

CP	Resistência à tração (kN/m)	Deformação na ruptura (%)	Resistência à 2% de deformação (kN/m)	Resistência à 5% de deformação (kN/m)
1	85,94	10,26	14,24	21,61
2	83,49	9,87	15,22	25,05
3	82,01	10,80	14,73	23,08
4	83,49	10,03	14,73	24,55
5	84,38	10,88	15,53	23,29
6	82,01	10,07	13,75	22,10
7	83,49	10,50	13,26	21,61
8	80,24	11,80	13,98	21,22
9	88,89	11,89	14,73	21,12
10	82,01	10,54	14,24	22,59
Média	83,60	10,56	14,44	22,62
Desvio Padrão.	2,43	0,57	0,68	1,37
Coef. Var. (%)	2,90	5,37	4,74	6,04

Para a geogrelha GG2, o valor de resistência à tração encontrado foi superior ao especificado pelo fabricante (80 kN/m), o que indica que a geogrelha apresentou valor nominal esperado. O baixo coeficiente de variação sugere uma boa uniformidade dos resultados, indicando que o material tem um comportamento consistente.

A deformação na ruptura teve uma média de 10,56%, com um coeficiente de variação de 5,37%. Esse valor está dentro do limite especificado pelo fabricante (<12%), o que confirma a adequação do material em termos de deformabilidade.

A resistência à tração à 2% de deformação apresentou uma média de 14,44 kN/m, sendo semelhante ao especificado pelo fabricante (14,8 kN/m). O coeficiente de variação de 4,74% indica que há uma dispersão relativamente baixa nos valores obtidos.

Já a resistência à tração à 5% de deformação apresenta um valor médio de 22,62 kN/m, superior ao especificado pelo fabricante (19,0 kN/m). A taxa de variação de 6,04% sugere uma dispersão um pouco maior nos resultados. Esse comportamento pode estar relacionado ao equipamento de medida no ensaio, porém não representa uma diferença expressiva.

Em resumo, a geogrelha GG2 apresentou resistência à tração máxima superior ao valor nominal, confirmando sua conformidade com as especificações do fabricante. Já a resistência à 2% e 5% de deformação apresenta pequenas variações em relação aos valores esperados.

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas da geogrelha GG3.

CP	Resistência à tração (kN/m)	Deformação na ruptura (%)	Resistência à 2% de deformação (kN/m)	Resistência à 5% de deformação (kN/m)
1	129,01	12,07	24,85	33,45
2	138,57	12,88	25,32	37,75
3	130,45	11,14	24,37	32,01
4	135,23	11,97	23,41	35,06
5	130,92	11,57	22,94	35,84
6	128,06	11,28	21,98	32,97
7	137,61	11,72	25,80	39,18
8	130,45	11,33	24,37	34,88
9	140,00	11,70	24,85	34,40
10	133,79	10,20	22,46	34,40
Média	133,41	11,59	24,04	34,99
Desvio Padrão	4,25	0,70	1,27	2,16
Coef. Var. (%)	3,19	6,01	5,30	6,17

Para a geogrelha GG3, o valor de resistência à tração média obtida foi significativamente superior ao especificado pelo fabricante, que apresenta valor nominal do catálogo de 110 kN/m. O coeficiente de variação relativamente baixo indica uma boa uniformidade dos resultados. A deformação na ruptura apresentou uma média de 11,59%, com um coeficiente de variação de 6,01%. Esse valor está dentro do limite estipulado pelo fabricante (<12%), o que sugere que a geogrelha atende às especificações de deformabilidade.

A resistência à tração à 2% de deformação teve uma média de 24,04 kN/m, valor superior ao especificado para o GG3 (19,0 kN/m). O coeficiente de variação de 5,30% indica que, apesar da diferença em relação ao valor nominal, a dispersão dos dados foi relativamente baixa, demonstrando consistência nos resultados.

Já a resistência à tração à 5% de deformação apresentou uma média de 34,99 kN/m, um pouco acima do valor especificado pelo fabricante (26,1 kN/m). O coeficiente de variação de 6,17% indica boa uniformidade dos resultados obtidos.

Tabela 4.4 – Propriedades mecânicas da geogrelha GG4.

CP	Resistência à tração (kN/m)	Deformação na ruptura (%)	Resistência à 2% de deformação (kN/m)	Resistência à 5% de deformação (kN/m)
1	161,20	9,45	28,34	43,20
2	151,19	11,81	34,65	42,00
3	150,66	11,28	33,07	43,57
4	157,95	9,65	26,94	39,95
5	149,59	9,20	28,34	42,74
6	168,17	9,98	27,41	41,81
7	153,30	9,46	28,80	43,67
8	150,98	9,35	27,87	42,74
9	153,30	9,27	27,41	40,88
10	158,53	10,36	33,60	47,24
Média	155,49	9,98	29,64	42,78
Desvio Padrão	5,92	0,90	2,93	1,96
Coef. Var. (%)	3,81	9,05	9,87	4,59

Para a GG4, quando comparado o valor nominal do catálogo (155 kN/m) com os valores medidos no ensaio de resistência à tração, observa-se que a resistência média obtida experimentalmente está praticamente em conformidade com o especificado pelo fabricante. O coeficiente de variação relativamente baixo sugere uma boa uniformidade dos resultados, demonstrando que o material apresenta um desempenho consistente nos ensaios. A deformação na ruptura apresentou uma média de 9,98%, com um coeficiente de variação de 9,05%. Esse valor está dentro do limite estipulado pelo fabricante (<12%), o que indica conformidade com as especificações do material. No entanto, a maior dispersão nesse parâmetro sugere que pequenas variações na estrutura da geogrelha.

A resistência à tração à 2% de deformação apresentou uma média de 29,64 kN/m, um valor ligeiramente superior ao especificado pelo fabricante (27,8 kN/m). O coeficiente de variação de 9,87% indica uma baixa dispersão significativa nos resultados, o que pode ser associado a variações estruturais da geogrelha ou à metodologia do ensaio.

Já a resistência à tração à 5% de deformação apresentou uma média de 42,78 kN/m, também acima do valor especificado pelo fabricante (35,6 kN/m). O coeficiente de variação de 4,59% sugere uma dispersão relativamente baixa, indicando uma boa qualidade de fabricação.

Os resultados mostram que a resistência à tração máxima do GG4 está em conformidade com o valor nominal do fabricante, o que confirma a qualidade do material. No entanto, as resistências à 2% e 5% de deformação foram superiores às especificadas, indicando um desempenho estrutural melhor do que o esperado para pequenas deformações. Esse comportamento pode estar relacionado às características específicas do processo de fabricação ou das condições de ensaios.

4.4. Resultados do ensaio de resistência à tração das geogrelhas danificadas

Assim como foi feito para as geogrelhas na condição intacta, foram realizados ensaios de resistência à tração nas geogrelhas expostas aos danos de instalação em campo. Cabe destacar que alguns ribs apresentavam danos tão severos que impossibilitaram sua fixação adequada na prensa, motivo pelo qual foram descartados. Por essa razão, a quantidade de corpos-de-prova ensaiados variou entre as amostras. Entre os casos observados, destacam-se danos por desfilamento e corte. A partir dos ensaios realizados, foram obtidos os valores médios de resistência última à tração para todos os grupos de geogrelhas instaladas tanto na areia quanto no RAP.

4.4.1. Resistência à tração das geogrelhas exumadas da areia

A Tabela 4.5 apresenta os valores obtidos dos ensaios realizados em 34 corpos-de-prova para a geogrelha GG1, 35 corpos-de-prova para a GG2, 35 corpos-de-prova para a GG3 e 34 corpos-de-prova para a GG4. A diferença de número de corpos-de-prova ensaiados se deve a busca por uma maior representatividade nos ensaios, sendo descartados apenas aqueles filamentos que estavam com danos de desfilamento excessivo, comprometendo a estrutura do filamento e a correta instalação da amostra no equipamento de fixação para o ensaio de resistência à tração. A Tabela 4.5 apresenta os valores de resistência à tração última, com média, desvio padrão e coeficiente de variação para as quatro geogrelhas degradadas em areia.

Tabela 4.5 – Propriedades mecânicas da geogrelha exumada da areia.

CP	GG1	GG2	GG3	GG4
	Resistência à tração (kN/m)	Resistência à tração (kN/m)	Resistência à tração (kN/m)	Resistência à tração (kN/m)
1	53.04	59.91	108.94	113.35
2	48.13	64.82	87.92	110.10
3	48.62	62.37	97.48	117.53
4	41.74	66.30	89.35	114.74
5	46.16	71.70	94.13	112.89
6	45.67	55.00	102.73	108.24
7	44.20	64.34	100.82	107.31
8	43.22	60.89	117.07	98.49
9	47.15	60.89	117.07	114.28
10	43.71	64.82	97.96	96.63
11	39.29	64.82	106.56	112.89
12	50.58	63.35	98.43	96.16
13	46.16	65.32	73.58	108.71
14	41.25	69.74	89.35	107.31
15	55.00	58.44	97.00	105.92
16	53.53	56.97	72.15	104.52
17	41.25	74.16	95.09	106.85
18	48.13	60.89	99.87	97.56
19	49.11	73.17	105.12	99.41
20	43.22	72.19	102.73	115.21
21	50.09	67.28	92.70	111.96
22	44.69	64.34	90.31	115.21
23	44.69	69.25	87.44	124.50
24	48.13	57.46	111.33	107.78
25	40.27	69.25	85.05	109.17
26	45.67	58.44	109.42	101.74
27	50.09	54.02	109.90	118.93
28	44.20	71.70	102.25	95.24
29	40.27	69.74	101.78	114.28
30	45.67	62.37	102.73	119.39
31	46.16	57.46	99.87	123.11
32	42.72	58.93	102.25	114.74
33	50.58	61.39	107.99	109.63
34	55.49	66.79	112.77	----
35	----	66.30	110.85	----
Média	46.41	64.14	99.43	109.51
Desv. P.	4.24	5.39	10.67	7.71
Coef. Var. (%)	9.15	8.40	10.73	7.04

Os coeficientes de variação obtidos para as geogrelhas danificadas pela areia variaram entre 7,04% e 10,73%, determinando diferentes níveis de dispersão nos resultados de resistência à tração. A GG4 apresentou menor variabilidade (7,04%), indicando que os danos sofridos foram mais uniformes entre os corpos-de-prova.

Já a GG3 apresentou o maior coeficiente de variação (10,73%), o que indica uma dispersão mais acentuada nos valores de resistência, possivelmente devido a variações no dano causado pela interação com a areia. As geogrelhas GG1 e GG2 apresentaram coeficientes intermediários, de 9,15% e 8,40%, respectivamente, apresentando uma variabilidade moderada. Embora existam pequenas diferenças entre os coeficientes de variação, eles permaneceram dentro de uma faixa estreita, indicando que os efeitos do dano por instalação foram relativamente consistentes entre os corpos-de-prova.

Em relação as amostras virgens, a perda média de resistência à tração medida nas geogrelhas exumadas da areia foi de 21,36% para a GG1, de 23,32% para a GG2, de 25,49% para a GG3 e de 29,58% para a GG4. Observa-se uma tendência crescente na perda de resistência à tração das geogrelhas da GG1 para a GG4, mesmo estando todas sendo submetidas às mesmas condições no campo, ou seja, mesmas características construtivas e do material de aterro. A única propriedade variável entre as geogrelhas é a característica física do tamanho e do espaçamento entre os filamentos, que também pode ser expressa em termos da largura do filamento (abertura de malha). Uma maior largura está associada a um menor espaçamento, criando uma relação entre a área de contato e o dano observado, ou seja, quanto maior a área de contato, maior a perda de resistência observada.

A explicação parece estar relacionada à interação entre os danos observados, expressos pelo aumento da perda de resistência última média medida, e as características físicas da areia estudada. Por apresentar faces pontiagudas, a areia tende a intensificar os danos nas geogrelhas à medida que aumenta a largura dos filamentos. Esse comportamento pode ser atribuído à maior área de contato proporcionada pelos filamentos mais largos, que favorece o acúmulo de grãos pontiagudos nos pontos de contato, resultando em uma maior concentração de tensões e, conseqüentemente, em danos mais severos.

4.4.2. Resistência à tração das geogrelhas exumadas da RAP

A Tabela 4.6 apresenta os valores de resistência à tração última, com média, desvio padrão e coeficiente de variação para as quatro geogrelhas estudadas. Nas geogrelhas exumadas do fresado RAP, foram realizados ensaios de resistência à tração em 32 corpos-de-prova para as geogrelhas GG1 e GG4, e em 36 corpos-de-prova para as geogrelhas GG2 e GG3. A diferença no número de corpos-de-prova ensaiados ocorreu devido aos danos causados aos

filamentos, com descarte daqueles que apresentavam desfilamento excessivo, comprometendo a integridade estrutural do filamento e a correta fixação do corpo-de-prova no equipamento de ensaio de tração, além de filamentos que estavam cortados.

A perda de resistência média das geogrelhas usadas com agregado RAP foi de 37.29% para a GG1, de 28.59% para a GG2, de 26.31% para a GG3 e de 32.41% para a GG4. Nota-se que houve uma redução na perda de resistência da GG1 para a GG2 e GG3, com um aumento na perda de resistência para a GG4.

Conforme discutido anteriormente, as características físicas do material usado como aterro exerce grande influência sobre os danos de instalação. O RAP apresenta fração de grãos finos (34.92% < D:4.76mm) com proporção próxima a dos grãos grossos (65.08% > D:4.76mm), sendo um material bem graduado o que confere uma boa sinergia com as geogrelhas. As geogrelhas GG1, GG2 e GG3, tem abertura de malha superior ao diâmetro máximo de 82.59% dos grãos que compõem o agregado RAP, indicando que o mecanismo de dano para essa situação é similar ao da areia. No entanto, a GG4 apresenta abertura de malha inferior e largura de filamento (área de contato) superior as demais geogrelhas e por isso está mais suscetível à danos causados pelos agregados do RAP.

Os resultados obtidos evidenciam a relação direta entre os danos observados nas geogrelhas exumadas e a perda de resistência verificada nos ensaios de tração. Para as geogrelhas ensaiadas na areia, observou-se que a perda de resistência à tração aumentou conforme a largura (área de contato) do filamento. Já nas geogrelhas exumadas do RAP, verificou-se uma menor perda de resistência última à tração para as geogrelhas GG1, GG2 e GG3, enquanto a GG4 apresentou uma perda mais acentuada. Esse comportamento pode estar associado à presença do ligante asfáltico nos grãos e à composição granulométrica do fresado, que podem ter atenuado os danos mecânicos nas geogrelhas GG1, GG e GG3, mas afetado de forma diferenciada a GG4.

Tabela 4.6 – Propriedades mecânicas da geogrelha exumada do RAP.

CP	GG1	GG2	GG3	GG4
	Resistência à tração (kN/m)	Resistência à tração (kN/m)	Resistência à tração (kN/m)	Resistência à tração (kN/m)
1	39.29	60.41	92.70	105.46
2	41.25	61.88	82.19	96.16
3	33.89	51.57	106.08	114.28
4	34.38	64.82	109.90	110.10
5	39.78	59.91	87.44	83.16
6	37.32	48.62	102.73	96.16
7	43.71	60.41	77.89	116.60
8	32.41	56.97	95.09	97.09
9	34.38	51.07	90.79	117.53
10	39.78	58.93	81.23	81.30
11	34.38	50.58	96.04	97.56
12	44.20	59.91	102.25	134.26
13	37.32	53.04	99.39	113.35
14	34.87	64.82	119.93	123.11
15	39.29	58.44	108.47	109.63
16	33.39	60.41	99.39	84.55
17	42.72	63.84	107.03	91.52
18	33.39	53.04	101.30	96.16
19	33.39	57.95	100.34	115.68
20	31.92	55.00	107.99	99.41
21	41.25	58.93	107.03	89.66
22	36.83	56.97	87.92	111.96
23	30.94	60.89	101.30	111.96
24	38.31	58.93	96.52	126.36
25	30.94	71.21	97.48	115.68
26	33.39	62.86	78.84	95.24
27	38.80	69.74	98.43	108.24
28	33.39	57.95	86.01	101.74
29	40.76	64.34	105.12	109.17
30	43.22	59.91	99.87	103.60
31	40.27	55.98	110.38	91.05
32	36.34	69.25	97.00	116.60
33	----	66.79	102.73	----
34	-----	55.49	103.69	----
35	----	66.79	88.40	----
36	----	59.91	108.94	----
Média	37.04	59.65	98.27	105.13
Desv. P.	3.94	5.47	9.80	14.62
Coef. Var. (%)	10.64	9.17	9.97	12.30

4.5. Análise estatística – distribuição normal da amostra

A distribuição dos dados foi verificada para avaliar sua aderência a padrões normais ou assimétricos, o que é fundamental para a escolha de métodos estatísticos mais adequados a serem aplicados posteriormente para o cálculo do FR_{DI} .

Inicialmente, a estatística descritiva foi aplicada para organizar e resumir os valores de resistência à tração, incluindo a determinação de medidas de tendência central, como a média, e de dispersão, como desvio padrão e coeficiente de variação. Esses parâmetros oferecem uma base sólida para avaliar a consistência dos dados e identificar possíveis outliers que poderiam influenciar a análise.

4.5.1. Teste Shapiro-Wilk

O teste de SHAPIRO-WILK é de extrema importância para verificar se os dados seguem uma distribuição normal antes de aplicar análises paramétricas. Isso é crucial porque muitas técnicas estatísticas, como o teste *t* de Student, dependem da suposição de normalidade dos dados. Se os dados não forem normalmente distribuídos, essas técnicas podem produzir resultados distorcidos ou inválidos.

Esse teste compara os dados observados com os valores esperados sob uma distribuição normal. Por meio de um cálculo estatístico de teste baseado nas diferenças entre as classificações padronizadas dos dados e as esperadas sob a distribuição normal. Se os dados não diferirem significativamente da distribuição normal, a estatística *w* do teste será mais próxima de 1. Caso contrário, quanto menor for o valor de *w*, maior a probabilidade de os dados não seguirem uma distribuição normal. O valor *p* associado ao teste é então usado para determinar se os dados podem ser considerados normalmente distribuídos ou não. Um valor *p* menor que um nível de significância predefinido (geralmente 0,05) indica que a hipótese nula de normalidade pode ser rejeitada, sugerindo que os dados não são normalmente distribuídos. Os valores do *w* estatístico e de *p* podem ser consultados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Estatística descritiva e teste Shapiro-Wilk.

Geogrelha	Número corpos-de-prova	Média (kN/m ²)	Desvio Padrão	COV	IIQ	Erro Padrão	Shapiro-Wilk	
							W	P
GG1-I	10	59.0	2.23	3.78	2.81	0.704	0.928	0.426
GG2-I	10	83.6	2.43	2.91	2.15	0.767	0.910	0.284
GG3-I	10	133.4	4.25	3.19	6.57	1.345	0.919	0.346
GG4-I	10	155.5	5.92	3.81	7.35	1.871	0.872	0.105
GG1-RAP	32	37.0	3.94	10.64	6.51	0.696	0.945	0.102
GG2-RAP	36	59.7	5.47	9.16	6.38	0.912	0.981	0.768
GG3-RAP	36	98.3	9.80	9.96	13.14	1.633	0.966	0.329
GG4-RAP	32	105.1	12.93	12.30	18.47	2.286	0.978	0.741
GG1-Areia	34	46.4	4.24	9.15	5.64	0.728	0.970	0.459
GG2- Areia	35	64.1	5.39	8.40	7.87	0.911	0.976	0.612
GG3- Areia	35	99.4	10.67	10.73	13.85	1.804	0.959	0.212
GG4- Areia	33	109.5	7.71	7.04	8.83	1.343	0.965	0.361

Em resumo, antes de aplicar técnicas estatísticas paramétricas, como o teste t, é essencial verificar se os dados seguem uma distribuição normal usando o teste de Shapiro-Wilk para garantir a validade das análises estatísticas realizadas. A seguir estão os gráficos Q-Q (Quantil-Quantil) do conjunto amostral das resistências à tração das geogrelhas intacta (Figura 4.22), da areia (Figura 4.23) e do RAP (Figura 4.24).

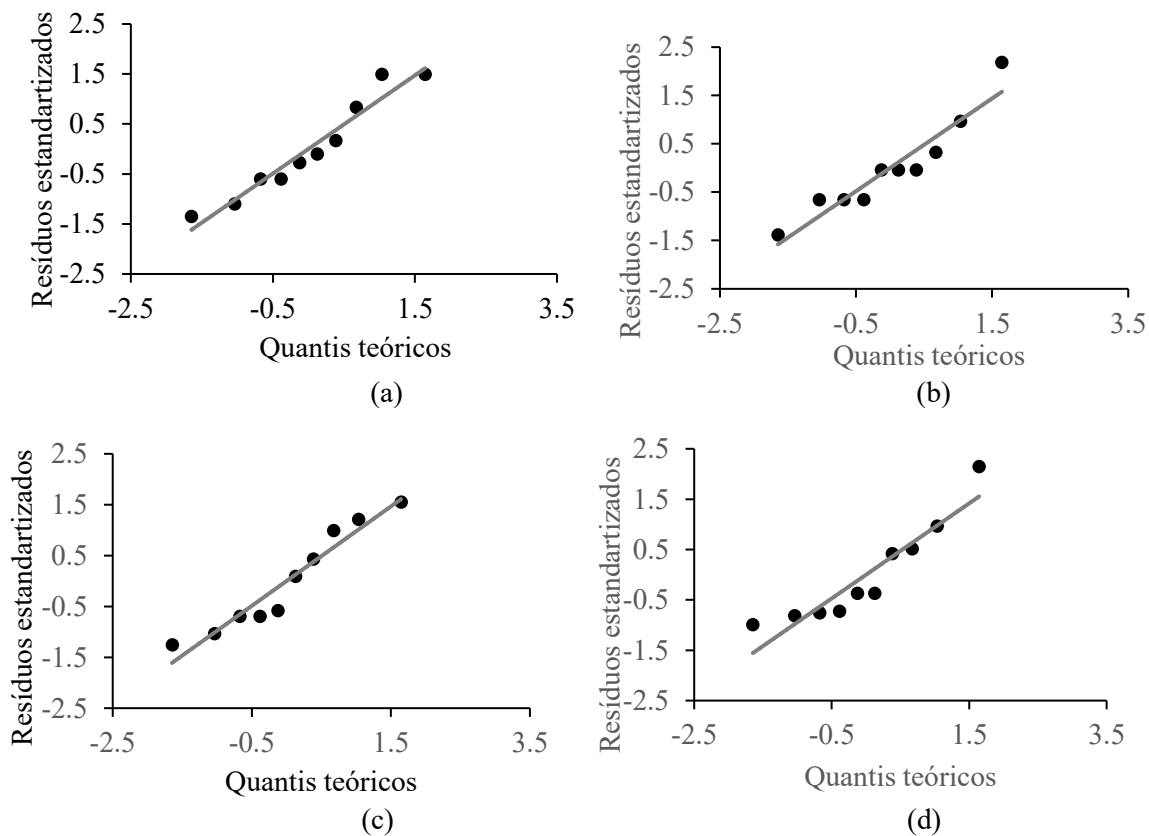
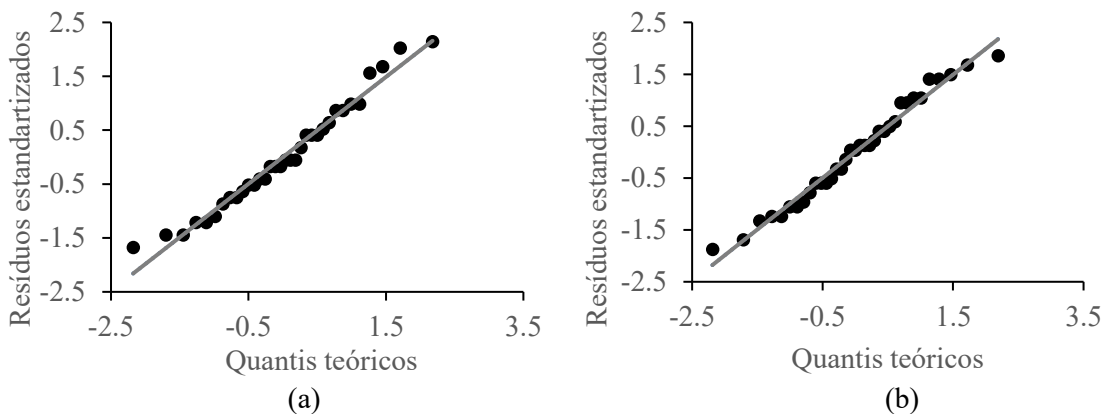


Figura 4.22 – Gráfico Q-Q da geogrelha intacta: (a) GG1; (b) GG2; (c) GG3; e (d) GG4.



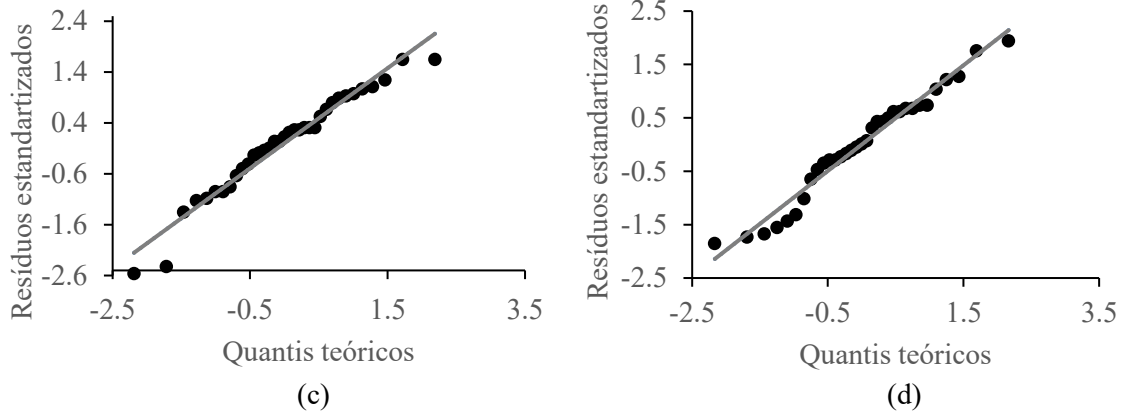


Figura 4.23 – Gráfico Q-Q da geogrelha da areia: (a) GG1; (b) GG2; (c) GG3; e (d) GG4.

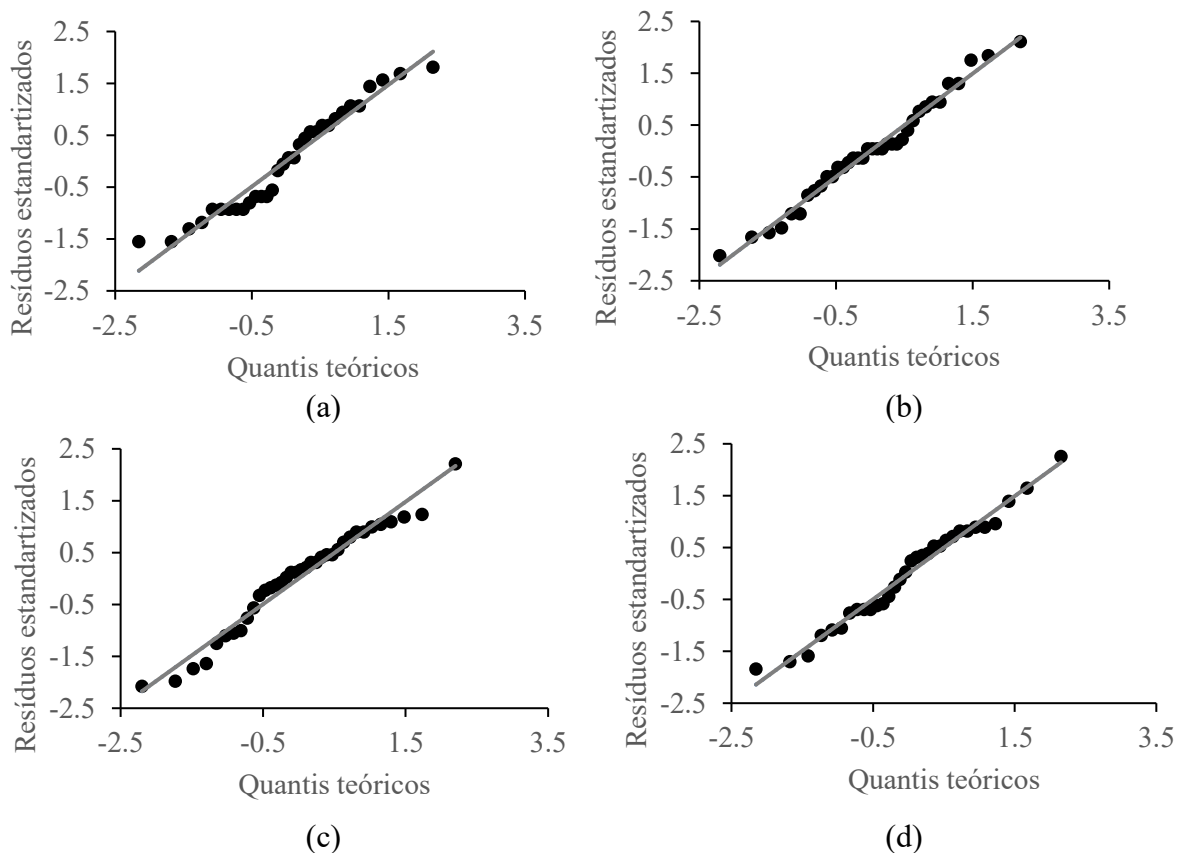


Figura 4.24 – Gráfico Q-Q da geogrelha do RAP: (a) GG1; (b) GG2; (c) GG3; e (d) GG4.

O teste à normalidade foi realizado no software Jamovi. Este é um software de análise estatística de código aberto e gratuito, e tem o objetivo de simplificar o processo de análise estatística, tornando as técnicas estatísticas acessíveis para uma ampla variedade de usuários.

Os resultados do teste de Shapiro-Wilk indicam que os dados das resistências à tração das geogrelhas não apresentam desvios da normalidade. Os valores de W variam entre 0,872 e 0,981, sendo que todos os valores de p associados são superiores a 0,05, o que significa que não há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese de normalidade. Dessa forma, pode-se

considerar que os dados seguem uma distribuição normal, permitindo a aplicação de testes paramétricos como o t de Student e análises estatísticas que assumem essa característica.

4.5.2. Outliers

Após a confirmação da normalidade da distribuição amostral, foram verificados se havia valores que se distanciavam significativamente da norma geral do conjunto de dados. Esses valores, denominados outliers, foram identificados para garantir a precisão e a confiabilidade da análise estatística, uma vez que podem variar os resultados das inferências.

Para a identificação dos outliers, utilizou-se a Regra do Intervalo Interquartil (IIQ), que considera a dispersão dos dados para determinar valores fora de um intervalo específico. O IQR é calculado pela equação:

$$\text{Intervalo 1} = Q1 - 1.5 * IIQ ; \text{Intervalo 2} = Q3 + 1.5 * IIQ \quad (5)$$

Onde, Q1 é o quartil 1, Q3 é o quartil 3 e IIQ é o intervalo interquartil. Por fim, assim que identificados os outliers do conjunto amostral, esses valores foram removidos da análise de dados a fim de manter a normalidade dos dados. Os valores dos intervalos interquartis podem ser conferidos na Tabela 4.7.

A análise de outliers, realizada por meio da Regra do Intervalo Interquartil (IIQ), permitiu garantir a precisão dos resultados. Para a areia, não foi necessário remover outliers nas geogrelhas GG1 e GG2, enquanto para a GG3 e GG4, foram excluídos 1 e 4 outliers, respectivamente. No fresado RAP, a GG1 teve 5 outliers removidos, e a GG4, 2. As geogrelhas GG2 e GG3 não apresentaram outliers. A remoção desses valores atípicos assegurou a normalidade dos dados, contribuindo para a confiabilidade da análise estatística.

4.5.3. Intervalo de confiança

O intervalo de confiança é uma medida estatística que fornece uma estimativa da faixa em que um parâmetro amostral, como a média, provavelmente se situa. Para dados normalmente distribuídos, há uma probabilidade de 95% de que os valores (nível de confiança) estejam dentro do verdadeiro parâmetro populacional. Portanto, ao calcular o intervalo de confiança para a média da resistência das geogrelhas, podemos esperar que aproximadamente 95% das

medidas de resistência estejam dentro desse intervalo, assumindo que a distribuição seja de fato normal.

Com base em todos os valores de resistência à tração última (T_{ult}) obtidos nos ensaios de tração das amostras intactas e danificadas (na areia e RAP), foi determinado o nível de confiança (NC) necessário para estabelecer um intervalo que, estatisticamente, contém todos os valores de T_{ult} dessas amostras. A partir da equação abaixo, foram calculados os limites máximos e mínimos do intervalo de confiança das medidas de resistência das geogrelhas intactas e das geogrelhas danificadas.

$$IC = \bar{X} \pm z * \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

Onde \bar{X} é a média amostral, z é o valor crítico da distribuição para o nível de confiança de 95%, SD é o desvio padrão amostral e N é o tamanho da amostra.

Este intervalo é fundamental para avaliar a confiabilidade das médias obtidas nos ensaios, pois indica a faixa na qual se espera que o valor real da resistência à tração se situe, considerando a variabilidade dos dados. A relação entre o desvio padrão e a amplitude do intervalo de confiança é evidente nos resultados: quanto maior o desvio padrão, maior a incerteza associada à média, resultando em um intervalo mais amplo.

Por exemplo, a geogrelha GG4-RAP apresentou o maior desvio padrão (12,93 kN/m²) e um intervalo de confiança mais extenso (100,5–109,8 kN/m²), indicando maior dispersão dos dados. Em contrapartida, geogrelhas com menor desvio padrão, como GG2-I (2,43 kN/m²), possuem intervalos mais estreitos (81,9–85,3 kN/m²), demonstrando maior precisão na estimativa da média.

Um intervalo de confiança mais estreito é o ideal, pois reflete menor incerteza e maior reprodutibilidade dos resultados, enquanto intervalos mais amplos indicam maior variabilidade e menor previsibilidade dos valores medidos. Assim, a análise do intervalo de confiança reforça a importância da variabilidade dos dados na interpretação dos resultados experimentais, permitindo uma avaliação mais robusta sobre a resistência à tração das geogrelhas estudadas. Os valores calculados são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 4.8 – Intervalo de confiança.

Geogrelha	Média (kN/m ²)	Tensão Mínima (kN/m ²)	Tensão Máxima (kN/m ²)	Intervalo de Confiança de 95%	
				Limite Inferior	Limite Superior

GG1-I	59.0	56.0	62.4	57.4	60.6
GG2-I	83.6	80.2	88.9	81.9	85.3
GG3-I	133.4	128.1	140.0	130.4	136.5
GG4-I	155.5	149.6	168.2	151.3	159.7
GG1-RAP	37.0	30.9	44.2	35.6	38.5
GG2-RAP	59.7	48.6	71.2	57.8	61.5
GG3-RAP	98.3	77.9	119.2	95.0	101.6
GG4-RAP	105.1	81.3	134.3	100.5	109.8
GG1-Areia	46.4	39.3	55.5	44.9	47.9
GG2- Areia	64.1	54.0	74.2	62.3	66.0
GG3- Areia	99.4	72.2	117.1	95.8	103.1
GG4- Areia	109.5	95.2	124.5	106.8	112.2

4.6. Cálculo do fator de redução de danos de instalação

Os resultados de resistência à tração última (T_{ref}) das amostras intactas e os resultados de resistência à tração última das geogrelhas danificadas (T_{exp}) na areia e RAP, foram usados para calcular o fator de redução de resistência (FR_{DI}). Todos os materiais foram testados na direção de fabricação (longitudinal). Em seguida, foi calculado o fator de redução de resistência para determinar, em média, quanto de resistência foi perdido em cada conjunto de amostras devido aos danos de instalação. Assim obteve-se os valores do fator de redução devido aos danos de instalação (FR_{DI}) utilizando a seguinte equação.

$$FR_{DI} = \frac{T_{ref}}{T_{exp}} \quad (7)$$

Onde, FR_{DI} é o fator de redução de resistência devido aos danos de instalação; T_{ref} é a resistência média de ruptura do material conforme recebido (intacto); e T_{exp} é a resistência média de ruptura do material exposto aos danos.

Com base nos resultados das resistências das geogrelhas ensaiadas, foi calculado os valores do fator de redução de danos de instalação médio. Esses resultados estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resumo dos valores de dano de instalação (FR_{DI}).

Identificação da geogrelha	Resistencia à tração média geogrelhas intactas (kN/m)	Resistencia à tração média geogrelhas danificadas (kN/m)		RF _{ID} (média)	
		(RAP)	(Areia)	(RAP)	(Areia)
GG1	59.0	37.0	46.4	1.59	1.27
GG2	83.6	59.7	64.1	1.40	1.30
GG3	133.4	98.3	99.4	1.36	1.34
GG4	155.5	105.1	109.5	1.48	1.42

Conforme demonstrado na Figura 4.25, os valores médios de resistência última à tração para geogrelhas instaladas no agregado de fresado RAP variam de 37,0 kN/m² a 105,1 kN/m² com Fator de Redução (FR_{DI}) variando de 1,36 a 1,59. O RAP utilizado consiste em uma mistura de agregados grossos e finos, com ligante asfáltico. Os valores encontrados estão significativamente abaixo dos registrados por Koerner (2024) para o agregado da AASHTO #57 (granulometria similar à brita 2), que apresentou um FR_{DI} variando de 1,4 a 1,8. Essa redução é esperada, e pode ser atribuída a presença de ligante asfáltico e a boa graduação do RAP, que por conter uma boa parcela de grãos finos aumenta a área de contato do material e distribui melhor as tensões sob a geogrelha. Além disso, a fração fina da granulometria contribui para mitigar danos por corte, envolvendo os grãos mais angulares e proporcionando uma camada protetora para as geogrelhas.

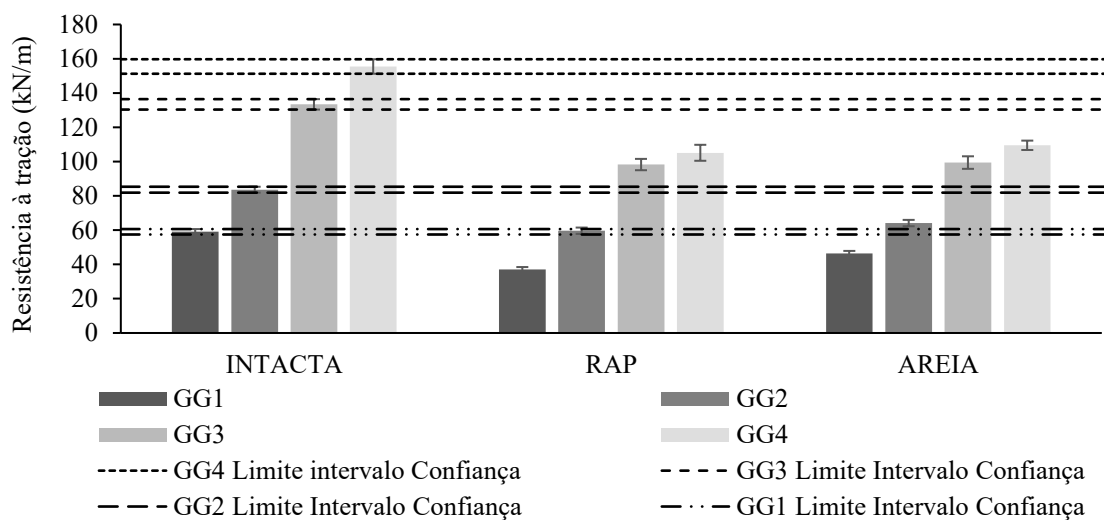


Figura 4.25 – Gráfico de barras – Resistência à tração média.

Na Figura 4.26, é apresentado o gráfico com os fatores de redução de danos de instalação e suas respectivas resistências últimas à tração. Observa-se que, para as geogrelhas na areia, a perda de resistência segue uma trajetória quase linear com o aumento da resistência. Isso pode ser atribuído ao aumento gradual da largura do filamento de uma geogrelha para outro, o que resulta em uma maior área de contato com o material de aterro, que é fino e mal graduado.

Por outro lado, no fresado de RAP, a perda de resistência inicial é elevada e diminui à medida que a abertura da malha se estreita e se aproxima do tamanho dos maiores grãos do material. Portanto, conforme a malha diminui, o dano se intensifica, pois a fração fina do RAP deixa de ser suficiente para mitigar os danos pela fração grossa do material.

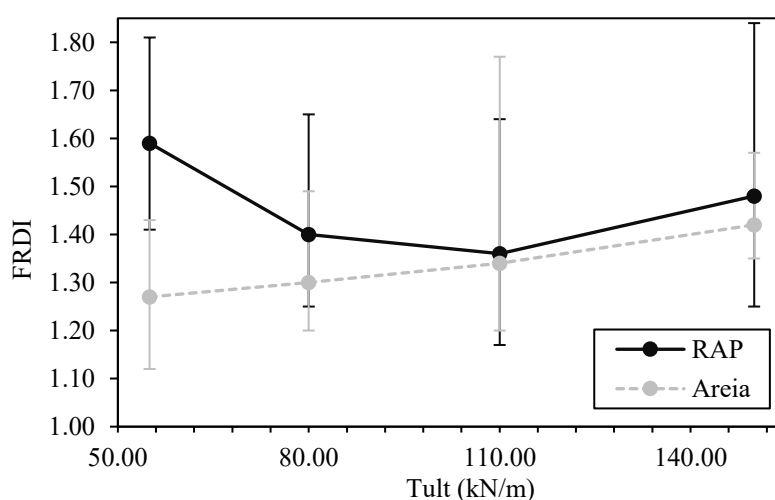


Figura 4.26 – Fator de dano de instalação (FR_{DI}) versus resistência última à tração.

Os valores de FR_{DI} para Geogrelhas em areias, estabelecidos pela norma DNIT 380/2022 variam entre 1,05 e 1,25, estando abaixo dos valores obtidos para as geogrelhas de poliéster exumadas da areia nesta pesquisa, os quais variaram de 1,27 a 1,42. No entanto, é fundamental destacar que essa norma não especifica as características físicas dos grãos nem os valores de grau de compactação atingidos, fatores que influenciam diretamente a magnitude dos danos mecânicos em geogrelhas. Já para os agregados com diâmetro < 100 mm, os valores de FR_{DI} para Geogrelhas variam entre 1,15 e 1,50, estando bastante coerentes com os valores obtidos para o RAP nesta pesquisa, os quais variaram de 1,36 a 1,59.

Além disso, o manual da FHWA sobre Projeto e Construção de Muros de Terra Estabilizada Mecanicamente e Taludes de Solo Reforçado apresenta fatores de redução de danos de instalação para materiais com diâmetro máximo de 100 mm e geogrelhas de poliéster revestidas com PVC, variando de 1,30 a 1,85, com FR_{DI} obtidos estando dentro dessa faixa de

valores. Dessa forma, os resultados encontrados neste trabalho, tanto para areia quanto para RAP, estão dentro dos intervalos estabelecidos pela literatura.

Os FR_{DI} apresentados nos catálogos técnicos sugerem uma padronização conservadora adotada pelos fabricantes, que tende a simplificar o uso dos produtos em projetos, embora nem sempre reflita as especificidades do tipo de geogrelha ou do material de aterro. Em contraste, os valores fornecidos por órgãos técnicos como o DNIT e a FHWA apresentam maior variação e são mais elevados, pois levam em consideração, de forma mais criteriosa, as características granulométricas do solo utilizado como aterro. Observa-se, por exemplo, que materiais com partículas maiores (como brita ou solos com $D < 200$ mm) estão associados a fatores de redução mais altos, indicando maior potencial de dano durante a instalação.

A análise das correlações entre os resultados das análises de imagens (microscopia e MEV) e os fatores de redução por danos de instalação (FR_{DI}) mostrou uma relação clara entre os danos observados e a perda de resistência mecânica das geogrelhas. No caso das geogrelhas instaladas em RAP, verificou-se que a abrasão foi o mecanismo de dano predominante, resultando na remoção parcial do revestimento de PVC e expondo os filamentos de poliéster. No entanto, a presença do ligante asfáltico pode ter atenuado o impacto das partículas mais grosseiras, reduzindo os danos por corte e redistribuindo melhor as tensões. Os fatores de redução por danos de instalação (FR_{DI}) obtidos no RAP variaram de 1,36 a 1,59, sendo inferiores aos valores típicos para agregados de mesma granulometria, o que reforça a hipótese do efeito mitigador do ligante betuminoso.

Para as geogrelhas instaladas em areia, a abrasão também foi um fator determinante, mas com a adição de micro-puncionamentos, especialmente nas geogrelhas GG1 e GG4. Os valores de FR_{DI} variaram entre 1,27 e 1,42, apresentando-se levemente acima dos valores usualmente encontrados para materiais de granulometria mais fina. A comparação entre os danos observados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e os fatores de redução mostrou que as geogrelhas com maior exposição de filamentos e maior intensidade de danos superficiais foram as que sofreram maiores perdas de resistência mecânica.

Entre as geogrelhas analisadas, a GG1, de menor resistência nominal, foi a que apresentou o maior fator de redução no RAP (FR_{DI} de 1,59), indicando uma maior susceptibilidade a danos mecânicos nesse material. As imagens obtidas por MEV revelaram intensa abrasão e a remoção quase completa da camada de PVC em algumas regiões, o que expôs os filamentos de poliéster ao contato direto com as partículas do fresado. Na areia, a GG1 teve um FR_{DI} de 1,27, evidenciando menor impacto quando comparado ao RAP, mas ainda assim apresentando danos significativos por puncionamento.

A relação entre os resultados de imagem e os fatores de redução destaca a importância da caracterização visual e microscópica como ferramenta complementar para a avaliação da degradação mecânica dos geossintéticos. Os dados obtidos evidenciam a necessidade de considerar fatores de redução específicos para diferentes materiais de aterro, especialmente ao utilizar materiais reciclados como o RAP. Do ponto de vista prático, os dados obtidos podem auxiliar engenheiros e projetistas na seleção de geogrelhas mais adequadas para aplicações em RAP e outros materiais reciclados.

5. CONCLUSÃO

Os ensaios realizados nesta pesquisa permitiram avaliar os danos mecânicos sofridos por diferentes geogrelhas instaladas em agregados convencionais (areia) e em material reciclado de pavimento asfáltico (RAP). O estudo envolveu a construção de um canteiro experimental para simular as condições de campo em obras estabilizadas mecanicamente com o uso de quatro geogrelhas de poliéster. Os resultados desta pesquisa proporcionaram uma compreensão aprofundada sobre os danos mecânicos sofridos por geogrelhas instaladas em diferentes materiais de aterro, especialmente na utilização de agregados reciclados, como o fresado de pavimento asfáltico (RAP).

A análise visual (macro) realizada nas geogrelhas mostram que os níveis de dano variam significativamente entre os materiais de aterro. Os resultados obtidos demonstraram que os fatores de redução por danos de instalação (FR_{DI}) variaram entre 1,36 e 1,59 no RAP e entre 1,27 e 1,42 na areia. A comparação entre os fatores de redução por dano de instalação (FR_{DI}) para geogrelhas em RAP e areia revelou que, apesar da granulometria mais grosseira do RAP, os danos mecânicos não foram substancialmente mais severos do que aqueles observados na areia. Essa constatação sugere que a presença do ligante betuminoso no RAP pode ter desempenhado um papel mitigador, reduzindo a severidade dos esforços sobre os filamentos da geogrelha. Notou-se ainda que, quanto maior a largura do filamento da geogrelha, maiores foram os microdanos ocasionados pela compactação em camadas de areia.

A análise microscópica revelou que a abrasão foi o mecanismo predominante de degradação em ambos os materiais de aterro, com variações na intensidade e na forma dos danos. No RAP, observou-se uma remoção significativa da camada de PVC de algumas geogrelhas, expondo os filamentos de poliéster, enquanto na areia, além da abrasão, ocorreram casos de puncionamento, impactando a integridade estrutural das geogrelhas. A camada de PVC desempenha, portanto, um papel fundamental na proteção das geogrelhas contra danos mecânicos durante a instalação, reduzindo a abrasão e evitando a exposição direta dos filamentos poliméricos aos agregados do aterro.

As implicações desta pesquisa vão além da simples caracterização dos danos. Os resultados reforçam a importância de revisão das diretrizes normativas para o uso de geossintéticos em materiais reciclados, especialmente considerando a crescente demanda por soluções sustentáveis na engenharia geotécnica e rodoviária. A formulação de fatores de redução específicos para diferentes materiais de aterro pode otimizar o desempenho das geogrelhas e garantir sua longevidade, contribuindo para projetos mais eficientes e econômicos.

6. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Estudos adicionais podem ser realizados para avaliar a influência das características físicas das geogrelhas, como abertura da malha e largura dos filamentos, na capacidade de resistir aos danos de instalação. Também seria relevante investigar o nível de influência das propriedades físicas do material de aterro nos danos causados às geogrelhas, considerando variações no índice de forma, angularidade dos grãos e granulometria. Esses estudos poderiam fornecer ajustes percentuais nos fatores de redução de danos de instalação usualmente aplicados para materiais naturais e reciclados, contribuindo para a otimização de projetos com geossintéticos.

Outra linha de pesquisa interessante seria determinar a altura ideal da camada de aterro para minimizar danos às geogrelhas durante o processo de compactação. Além disso, a investigação sobre como alterações na geometria planar das geogrelhas podem melhorar sua resistência aos danos de instalação pode trazer inovações ao setor, apesar de envolver desafios técnicos e industriais.

7. REFERÊNCIAS

- Allen, T. M., & Bathurst, R. J. (1994). Characterization of geosynthetic load-strain behavior after installation damage. *Geosynthetic International*.
- ASTM International. (2019). *Test Method for Asphalt Content of Asphalt Mixture by Ignition Method (ASTM D6307)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6307-19>
- ASTM International. (2022). *Practice for Exposure and Retrieval of Samples to Evaluate Installation Damage of Geosynthetics (D5818)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5818-22>
- ASTM International. (2023). *Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method (D6637)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D6637_D6637M-15R23
- ASTM International. (2024). *Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures (D2172)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D2172_D2172M-24
- Bennert, T., & Maher, A. (2005). The Development of a Performance Specification for Granular Base and Subbase Material. *Ew Jersey Department of Transportation: Ewing Township, NJ, USA*.
- Biazotto, R. P., & Avesani, J. O. N. (2018). Obtenção de Danos de Instalação em Geogrelhas a Partir de Ensaio em Campo. *Congresso Brasileiro de Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano - Cobramseg*.
- Bleakley, A. M., Cosentino, P. J., Kalajian, E. H., & Patel, M. J. (2014). Strength and Creep Characteristics of Reclaimed Asphalt Pavement–Sand Blend Backfill in Mechanically Stabilized Earth Walls. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2462(1), 18–27. <https://doi.org/10.3141/2462-03>
- Bonfim, Valmir. Pavimento Sustentável. 1 edição. São Paulo – SP, Editora: Exceção Editorial e Eventos, 2020
- Campos Fontenelle, M., Feitosa Monteiro, F., & Matos, Y. M. P. (2018). *Comparação entre Métodos de Dimensionamento de Estrutura em Solo Reforçado na Zona Costeira do Município de Fortaleza-CE*. <https://www.researchgate.net/publication/327582222>
- Carlos, D. M., Carneiro, J. R., Pinho-Lopes, M., & de Lurdes Lopes, M. (2015). Effect of Soil Grain Size Distribution on the Mechanical Damage of Nonwoven Geotextiles Under

- Repeated Loading. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0011-9>
- Castorina, F. da S. V. (2008). *MUROS E TALUDES DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS. COMPORTAMENTO SÍSMICO E METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO*, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
- César, B., Gonçalves, S., Da, D., Pereira, S., Specht, L. P., José, R., Pinheiro, B., & Soares, J. B. (n.d.). *Avaliação da centrifuga rotarex na determinação do teor de ligante e granulometria de diferentes concretos asfálticos Centrifuge rotarex evaluation in content binder and granulometry determination of different asphalt concrete*. <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i3.1841>
- Chen, K., Wang, J., Yu, B., Wu, H., & Zhang, J. (2021). Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 287). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125071>
- Cosentino, P. J., Kalajian, E. H. ., Shieh, C. S., Mathurin, W. J. K. A., Gomez, F. A., Cleary, E. D., & Treeratrakoon, A. (2003). *Developing Specifications for Using Recycled Asphalt Pavement as Base, Subbase or General Fill Materials, Phase II – Final Report*.
- Dager, C. H., Morro, R. H., Hubler, J. F., & Sample-Lord, K. M. (2023). Review of Geotechnical Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Reuse in Infrastructure. *Geotechnics*, 3(1), 21–42. <https://doi.org/10.3390/geotechnics3010003>
- Delmas, Philippe., Gourc, J. P. ., & Girard, H. . (2002). *Geosynthetics : state of the art, recent developments : proceedings of the seventh International Conference on Geosynthetics, 7 ICG-Nice 2002, France, 22-27 September 2002*. Balkema.
- FHWA. (2023). *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes-Volume I*.
- Fleury, M. P., Kamakura, G. K., Pitombo, C. S., Cunha, A. L. B. N., Ferreira, F. B., & Lins da Silva, J. (2023). Assessing and Predicting Geogrid Reduction Factors after Damage Induced by Dropping Recycled Aggregates. *Sustainability*, 15(13), 9942. <https://doi.org/10.3390/su15139942>
- Fleury, M. P., Santos, E. C. G., Lins da Silva, J., & Palmeira, E. M. (2019). Geogrid installation damage caused by recycled construction and demolition waste. *Geosynthetics International*, 26(6), 641–656. <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00050>

- Gluchowski, A., Gabryś, K., Soból, E., Šadzevičius, R., & Sas, W. (2020). Geotechnical Properties of Anthropogenic Soils in Road Engineering. *Sustainability*, 12(12), 4843. <https://doi.org/10.3390/su12124843>
- Hufenus, R., Rügger, R., Flum, D., & Sterba, I. J. (2005). Strength reduction factors due to installation damage of reinforcing geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 23(5), 401–424. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2005.02.003>
- José Orlando Avesani Neto, & Fernando Henrique Martins Portelinha. (2016). *Aspectos gerais do uso de geossintéticos em muros e taludes reforçados*. <https://doi.org/10.20906/CPS/CB-04-0117>
- José Orlando Avesani Neto, & Regis Eduardo Geroto. (2016). *Diretrizes Básicas para Concepção de Muros de Solo Reforçado de Grandes Alturas*. <https://doi.org/10.20906/CPS/CB-07-0016>
- Kibria, G., Hossain, MD. S., & Khan, M. S. (2014). Influence of Soil Reinforcement on Horizontal Displacement of MSE Wall. *International Journal of Geomechanics*, 14(1), 130–141. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000297](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000297)
- Kim, U. J., & Kim, D. S. (2020). Load sharing characteristics of rigid facing walls with geogrid reinforced railway subgrade during and after construction. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(6), 940–949. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.08.002>
- Koerner, G. R., Loux, T., Filshill, A., & Schuller, J. (2023). Geosynthetic damage due to installation stresses in ultra-light weight foamed glass aggregate versus conventional aggregate. In *Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet* (pp. 213–218). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003386889-8>
- Lim, S. Y., & McCartney, J. S. (2013). Evaluation of effect of backfill particle size on installation damage reduction factors for geogrids. *Geosynthetics International*, 20(2), 62–72. <https://doi.org/10.1680/gein.13.00002>
- Lopes, A. F. D., Savasini, K. V., Almeida, M. S. de A., & Bernucci, L. L. B. (2024). GERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO RAP NO BRASIL. *Revista ENINFRA*, 3(3), 201–217. <https://doi.org/10.70859/2764-9539.v3.n3.126>
- Lopes, M. da G., Barroso, M., & Neves, J. (Eds.). (2021). *Geossintéticos em Engenharia Civil: dimensionamento, instalação e casos de obra*. Portuguese Geotechnical Society. <https://doi.org/10.24849/spg.igs.2021.01>

- Lopes, M. J. F. de P. (2006). Estudo de coeficientes de segurança a aplicar em estruturas de controlo de erosão e de estabilização de maciços com geossintéticos. *Universidade de Porto*, 1–764. <http://hdl.handle.net/10216/13380>
- Maruyama, N., Murayama, M. & Sasaki, F. (n.d.). *Construction of a geogrid-reinforced counter-weight fill to increase the seismic stability of an existing earth dam*.
- Miyata, Y., & Bathurst, R. J. (2015). Reliability analysis of geogrid installation damage test data in Japan. *Soils and Foundations*, 55(2), 393–403. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.013>
- Morro, R. H. (2021). *Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement in Pennsylvania and Evaluation of Its Use in Geotechnical Infrastructure Applications* [Master's Thesis]. Villanova University.
- Palmeira, E. M., Araújo, G. L. S., & Santos, E. C. G. (2021). Sustainable solutions with geosynthetics and alternative construction materials—a review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su132212756>
- Paula, A. M., Lopes, M. P., De, M., & Lopes, L. (2004). *Damage during installation laboratory test. Influence of the type of granular material*. <https://www.researchgate.net/publication/277191942>
- Puppi, R., & Caron, J. (2023). Influência das superfícies sub-críticas no comprimento de reforços em estruturas de solos reforçados com geotêxteis ou geogrelhas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 39(2). <https://doi.org/10.23967/j.rimni.2023.06.001>
- Rathje, E. M., Rauch, A. F., Trejo, D., Folliard, K. J., Trejo, D., Ogalla, M., Viyanant, C., Esfellar, M., & Jain, A. (2002). Recycled Asphalt Pavement and Crushed Concrete Backfill: Results from Initial Durability and Geotechnical Tests. *Texas Department of Transportation Research and Technology: Austin, TX, USA*.
- Rathje, E., Trejo, D., & Folliard, K. (2006). *Project 0-477: Use of Recycled Asphalt Pavement and Crushed Concrete as Backfill for Mechanically Stabilized Earth Retaining Walls Potential Use of Crushed Concrete and Recycled Asphalt Pavement as Backfill for Mechanically Stabilized Earth Walls*.
- Ricardo Pereira dos SANTOS, C. (2019). *ANÁLISE DOS DANOS DE INSTALAÇÃO SOFRIDOS POR GEOGRELHAS E GEOTÊXTEIS NO USO DE REFORÇO ESTRUTURAL Analysis of installation damage suffered by geogrids and geotextiles in the use of structural reinforcement*. 15(2). <https://doi.org/10.5216/reec.V15i2.62388>

- Rowe, R. K., & Li, A. L. (2002). *Geosynthetic-reinforced embankments over soft foundations*.
- Santos, E. C. G. Dos. (2011). *Avaliação experimental de muros reforçados executados com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e solo fino*.
- Sharbaf, M., Ghafoori, N., & Dumitru, N. (2017). Geogrid in paved and unpaved road systems: A review of mechanisms and design methods. *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields - Proceedings of the 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRRRA 2017*, 1161–1168. <https://doi.org/10.1201/9781315100333-169>
- Sheikh, I. R., & Shah, M. Y. (2020). Experimental Investigation on the Reuse of Reclaimed Asphalt Pavement over Weak Subgrade. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 7(4), 634–650. <https://doi.org/10.1007/s40515-020-00115-w>
- Soleimanbeigi, A., & Likos, W. (2019). Mechanical Properties of Recycled Concrete Aggregate and Recycled Asphalt Pavement Reinforced with Geosynthetics. *Geo-Congress 2019*, 284–292. <https://doi.org/10.1061/9780784482087.026>
- Soleimanbeigi, A., Ozocak, A., Li, B., Akmaz, E., Dayioglu, A. Y., Tanyu, B. F., Aydilek, A. H., & Likos, W. J. (2022). Mechanical and hydraulic compatibility of RAP with geosynthetics used in MSE walls. *Geosynthetics International*, 29(1), 1–18. <https://doi.org/10.1680/jgein.21.00016>
- Silva, M . P. S. Shear bond and shear fatigue of geosynthetic interlayered asphalt overlays. 2024. 165 folhas. Tese de Doutorado em engenharia geotcnica. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, São Paulo.
- Tschöke, D. O., de Mattos Vidal, D., & do Carmo, C. A. T. (2023). Installation Damage of a Geogrid Employed for Stabilization in a Mining Area. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1007/s40891-022-00424-9>
- Varma, B. A., Sekhar, G. C., & Avinash, P. S. (2019). Analysis and design of mechanically stabilized reinforced earth wall. *Journal of Physics: Conference Series*, 1362(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1362/1/012122>
- Venkatachalam, M. N., & Balu, S. (2022). A review on the application of industrial waste as reinforced earth fills in mechanically stabilized earth retaining walls. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(57), 86277–86297. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17953-x>

- Wu, H., Zuo, J., Zillante, G., Wang, J., & Yuan, H. (2019). Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118163>
- Ziegler, M. (2017). Application of Geogrid Reinforced Constructions: History, Recent and Future Developments. *Procedia Engineering*, 172, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.015>