



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS

JOSÉ RODRIGO SEVALHO DA SILVA

**INVESTIGAÇÃO DO DESEMPENHO SOLO-GEOGRELHA COM ELEMENTOS DE ABS
FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA: UM ESTUDO PARA PAVIMENTOS**

Manaus
2025

JOSÉ RODRIGO SEVALHO DA SILVA

**INVESTIGAÇÃO DO DESEMPENHO SOLO-GEOGRELHA COM ELEMENTOS DE ABS
FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA: UM ESTUDO PARA PAVIMENTOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal do Amazonas como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais.

Linha de pesquisa: Propriedades físicas, mecânicas e modelagem de materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Consuelo Alves da Frota

Manaus
2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

-
- S586i Silva, José Rodrigo Sevalho da
 Investigação do desempenho solo-geogrelha com elementos de ABS
 fabricados por manufatura aditiva: um estudo para pavimentos / José
 Rodrigo Sevalho da Silva. - 2025.
 75 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Consuelo Alves da Frota.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa
 de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Manaus, 2025.
1. Pavimentação. 2. Geogrelha. 3. Impressão 3D. 4. Reforço de solo. I.
 Frota, Consuelo Alves da. II. Universidade Federal do Amazonas.
 Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. III.
 Título
-

JOSÉ RODRIGO SEVALHO DA SILVA

**INVESTIGAÇÃO DO DESEMPENHO SOLO-GEOGRELHA COM ELEMENTOS DE ABS
FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA: UM ESTUDO PARA PAVIMENTOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da UFAM.

Linha de pesquisa: Propriedades físicas, mecânicas e modelagem de materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Consuelo Alves da Frota

Banca Examinadora

Profa. Dra. Consuelo Alves da Frota
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Leandro Aparecido Pocrifka
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Lucindo Antunes Fernandes Filho
Universidade Federal do Amazonas

Manaus
2025

Todo o homem é culpado do bem que não fez.

Voltaire

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer inicialmente à Deus, pela bênção da vida e oportunidade de desenvolver esta Dissertação.

À minha família e namorada pelo apoio incondicional durante toda minha trajetória, e no decorrer deste tão almejado Mestrado.

À minha orientadora, Profa. Dra. Consuelo Alves da Frota, por todos as orientações, ensinamentos e reflexões de vida.

Ao Prof. Dr. Hidembergue Ordozgoith da Frota pelos conhecimentos transmitidos e por proporcionar novas visões sobre o comportamento dos materiais.

Ao Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), na qual a maior parte desta pesquisa foi desenvolvida.

Ao projeto financiado pela FAPEAM “Dispositivos de armazenamento de energia com base em grafeno impresso em 3D”, na qual agradeço em nome do Prof. Dr. Leandro Aparecido Pocrifka, por fornecer o material necessário para a confecção e impressão das geogrelhas.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), por permitir a realização de ensaios em suas dependências, na qual agradeço em nome do Prof. Me. Marcos Raiker Printes Ferreira que acompanhou o desenvolvimento do projeto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pelo suporte institucional e apoio para o desenvolvimento científico dos discentes por meio do Programa de Apoio à Pós-Graduação Stricto Sensu (POSGRAD) junto ao Programa Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais (PPGCEM).

E, por fim, ao PPGCEM e a UFAM, pela oportunidade oferecida, pelo ambiente e pelos recursos empregados no decorrer do Mestrado.

RESUMO

A infraestrutura rodoviária brasileira enfrenta deficiências estruturais crônicas, que demandam soluções inovadoras para mitigar seus impactos econômicos e logísticos. Diante dos elevados custos associados à reconstrução e manutenção das vias, este estudo propõe uma abordagem geotécnica alternativa, explorando o uso da impressão 3D na fabricação de geogrelhas e para preencher uma lacuna na literatura quanto à aplicação do polímero Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) nesse contexto. Consoante a esse enfoque, investigou-se o comportamento mecânico de um solo reforçado com dois modelos de geogrelhas impressas em ABS (denominadas GB1 e GB2), por meio de ensaios laboratoriais. O objetivo foi avaliar a eficiência da interação solo-geogrelha visando sua aplicação em pavimentação. Para isso, realizou-se a caracterização geotécnica do solo e comparou-se seu desempenho nas condições natural e reforçada. Os ensaios aplicados incluíram Compressão Simples, Módulo de Resiliência, Tração por Compressão Diametral e Cisalhamento Direto. Os resultados indicaram uma melhora na resistência à compressão simples do solo com a utilização da geogrelha GB1, assim como um aumento na resistência ao cisalhamento, especialmente com a aplicação da geogrelha GB2, que contribuiu para o acréscimo da coesão e do ângulo de atrito. Por outro lado, a presença de ambas as geogrelhas não exerceu influência significativa na resistência à tração, e o módulo de resiliência manteve-se inalterado. Esses resultados são fundamentais para subsidiar decisões em projetos geotécnicos e reforçam a relevância de investigações futuras sobre o uso de geogrelhas impressas em 3D.

Palavras-chaves: Pavimentação; Geogrelha; Impressão 3D; Reforço de solo.

ABSTRACT

Brazil's road infrastructure faces chronic structural deficiencies, which demand innovative solutions to mitigate their economic and logistical impacts. Given the high costs associated with road reconstruction and maintenance, this study proposes an alternative geotechnical approach, exploring the use of 3D printing in the manufacturing of geogrids and addressing a gap in the literature regarding the application of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) polymer in this context. In line with this focus, the mechanical behavior of soil reinforced with two models of ABS-printed geogrids (referred to as GB1 and GB2) was investigated through laboratory tests. The objective was to evaluate the efficiency of soil-geogrid interaction for potential application in paving. To this end, geotechnical characterization of the soil was conducted, and its performance was compared in both natural and reinforced conditions. The applied tests included Unconfined Compression, Resilient Modulus, Indirect Tensile Strength (Brazilian Test), and Direct Shear. The results indicated an improvement in the soil's unconfined compression strength with the use of geogrid GB1, as well as an increase in shear strength, particularly with the application of geogrid GB2, which contributed to higher cohesion and friction angle. On the other hand, the presence of both geogrids did not significantly influence tensile strength, and the resilient modulus remained unchanged. These findings are essential to support decision-making in geotechnical design and highlight the importance of further research into the use of 3D-printed geogrids.

Keywords: Pavement; Geogrid; 3D Printing; Soil Reinforcement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas de pavimento	18
Figura 2 – Principais geossintéticos: a) geogrelha; b) geotêxtil; c) geocélula; d) georrede; e) geomembrana	20
Figura 3 – Protótipo de parede impressa em 3D	23
Figura 4 – Fluxograma das atividades do projeto	25
Figura 5 – Granulometria: a) Solo com defloculante; b) Medições com densímetro; c) Peneiramento fino	27
Figura 6 – Ensaio de Compactação: a) Homogeneização; b) Compactação de camada; c) Pesagem	27
Figura 7 – Massa específica dos sólidos: a) Solo submerso; b) Dispersão do solo; c) Fase de Ebulição	28
Figura 8 – Limite de Liquidez: a) Homogeneização; b) Ranhura; c) União da ranhura após golpes	29
Figura 9 – Modelos de geogrelha confeccionadas: a) GB1; e b) GB2	30
Figura 10 – Modelo pronto para impressão: a) GB1; e b) GB2	31
Figura 11 – Prensa Universal Testing Machine (UTM-100)	32
Figura 12 – Prensa de cisalhamento direto	32
Figura 13 – Distribuição da geogrelha entre camadas	33
Figura 14 – Compressão simples: a) CP na UTM-100; b) CP pós-ruptura; c) Detalhamento da geogrelha no CP pós-ruptura	33
Figura 15 – Moldagem do conjunto solo geogrelha: a) vista frontal; b) detalhamento entre camadas	34
Figura 16 – Resistência à tração por compressão diametral: a) CP na UTM-100; b) detalhamento da geogrelha no CP pós-ruptura	34
Figura 17 – Geogrelha no cisalhamento direto: a) Fixado em base rígida; b) CP moldado	35
Figura 18 – Aparelho de cisalhamento para interface solo-geogrelha	35
Figura 19 – Cisalhamento direto: a) CP em teste; b) CP pós-ruptura; c) Detalhamento da geogrelha no CP pós-ruptura	35
Figura 20 – Módulo de Resiliência: a) preparação da amostra; b) realização do ensaio	36

Figura 21 – Curva Granulométrica do Solo – limites segundo a ASTM D422:2007	38
Figura 22 – Classificação do solo de acordo com a SUCS	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de compactação do solo na energia modificada	41
Gráfico 2 – Síntese dos resultados de ensaio de resistência à compressão	42
Gráfico 3 – Síntese dos resultados de ensaio de resistência à tração por compressão diametral	44
Gráfico 4 – Síntese dos resultados do ensaio de cisalhamento direto para $\sigma_n = 50$ kPa	46
Gráfico 5 – Síntese dos resultados do ensaio de cisalhamento direto para $\sigma_n = 100$ kPa	48
Gráfico 6 – Síntese dos resultados do ensaio de cisalhamento direto para $\sigma_n = 150$ kPa	50
Gráfico 7 – Tensão cisalhante x Tensão normal (parâmetros: coesão e ângulo de atrito)	52
Gráfico 8 – Síntese dos resultados de Módulo de Resiliência	55
Gráfico 9 – Limite de Liquidez 1	68
Gráfico 10 – Limite de Liquidez 2	68
Gráfico 11 – Limite de Liquidez 3	69
Gráfico 12 – Limite de Liquidez 4	69
Gráfico 13 – Limite de Liquidez 5	70
Gráfico 14 – Limite de Liquidez 6	70
Gráfico 15 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : SR ($\sigma_n = 50$ kPa)	71
Gráfico 16 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : SR ($\sigma_n = 100$ kPa)	71
Gráfico 17 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : SR ($\sigma_n = 150$ kPa)	72
Gráfico 18 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB1 ($\sigma_n = 50$ kPa)	72
Gráfico 19 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB1 ($\sigma_n = 100$ kPa)	73
Gráfico 20 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB1 ($\sigma_n = 150$ kPa)	73
Gráfico 21 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB2 ($\sigma_n = 50$ kPa)	74
Gráfico 22 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB2 ($\sigma_n = 100$ kPa)	74
Gráfico 23 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB2 ($\sigma_n = 150$ kPa)	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Definição dos principais geossintéticos	19
Quadro 2 – Função dos geossintéticos nos projetos de engenharia	20
Quadro 3 – Principais aplicações dos geossintéticos	21
Quadro 4 – Obras relevantes com geossintéticos no Brasil	21
Quadro 5 – Vantagens e desvantagens da técnica MDF	22
Quadro 6 – Filamentos para impressora 3D MDF	22
Quadro 7 – Resumo das principais características dos filamentos	23
Quadro 8 – Aplicação da impressão 3D na Geotecnia	24
Quadro 9 – Normas para caracterização do solo	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo da propriedade dos materiais	23
Tabela 2 – Propriedades físicas das geogrelhas	30
Tabela 3 – Parâmetro de impressão	30
Tabela 4 – Número de amostras por ensaio mecânico	31
Tabela 5 – Classificação do Solo de acordo com a ASTM D422:2007	38
Tabela 6 – Resultado do ensaio de Limite de Liquidez	39
Tabela 7 – Resultado do ensaio de Limite de Plasticidade	39
Tabela 8 – Classificação pelo Índice de Plasticidade	40
Tabela 9 – Índice de Plasticidade de solos representativos de Manaus	40
Tabela 10 – Resumo dos resultados de ensaio de caracterização	41
Tabela 11 – Resultados de resistência à compressão	42
Tabela 12 – ANOVA fator único: resistência à compressão	43
Tabela 13 – Teste Tukey: resistência à compressão	43
Tabela 14 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral	44
Tabela 15 – ANOVA fator único: resistência à tração por compressão diametral	44
Tabela 16 – Resumo dos resultados de cisalhamento direto para $\sigma_n = 50$ kPa	46
Tabela 17 – ANOVA fator único: cisalhamento direto para $\sigma_n = 50$ kPa	47
Tabela 18 – Teste Tukey: cisalhamento direto para $\sigma_n = 50$ kPa	47
Tabela 19 – Resumo dos resultados de cisalhamento direto para $\sigma_n = 100$ kPa	48
Tabela 20 – ANOVA fator único: cisalhamento direto para $\sigma_n = 100$ kPa	49
Tabela 21 – Teste Tukey: cisalhamento direto para $\sigma_n = 100$ kPa	49
Tabela 22 – Resumo dos resultados de cisalhamento direto para $\sigma_n = 150$ kPa	50
Tabela 23 – ANOVA fator único: cisalhamento direto para $\sigma_n = 150$ kPa	51
Tabela 24 – Teste Tukey: cisalhamento direto para $\sigma_n = 150$ kPa	51
Tabela 25 – Parâmetros do solo: coesão e ângulo de atrito	53
Tabela 26 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência	54
Tabela 27 – ANOVA fator único: Módulo de Resiliência	56
Tabela 28 – Regressão via LabFit para o Solo de Referência: Modelo Composto	58
Tabela 29 – Regressão via LabFit para o GB1: Modelo Composto	58
Tabela 30 – Regressão via LabFit para o GB2: Modelo Composto	58

Tabela 31 – Regressão via LabFit para o Solo de Referência: Modelo Universal	59
Tabela 32 – Regressão via LabFit para o GB1: Modelo Universal	59
Tabela 33 – Regressão via LabFit para o GB2: Modelo Universal	59
Tabela 34 – Coeficientes de determinação (R^2) obtidos no modelo composto	60
Tabela 35 – Coeficientes de determinação (R^2) obtidos no modelo universal	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GB1	Geogrelha biaxial 9,5 x 9,5 mm
GB2	Geogrelha biaxial 19,0 x 19,0 mm
GCE	Geocélula
GEOTEC	Grupo de Pesquisa em Geotecnia
GGR	Geogrelha
GMA	Geomanta
GNT	Georrede
GSY	Geossintético
GTX	Geotêxtil
IMACS	Integrated Multi-Axis Control System
IP	Índice de Plasticidade
ISO	International Organization for Standardization
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MDF	Modelação por Deposição Fundida
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
PETG	Polyethylene terephthalate glycol
PLA	Poliácido Láctico
SLA	Estereolitografia
SR	Solo de Referência
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solo

TPU	Thermoplastic polyurethane
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UTM	Universal Testing Machine

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Contextualização	16
1.2 Objetivos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Pavimento	18
2.2 Solo e Classificações	18
2.3 Geossintéticos	19
2.4 Impressão 3D e Aplicação na Engenharia	21
3. MATERIAS E MÉTODOS	25
3.1 Materiais	26
3.1.1 Solo	26
3.1.2 Geogrelha	29
3.2 Métodos	31
3.3 Análise Estatística	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1 Ensaios de Caracterização	38
4.2 Ensaio de Compactação	41
4.3 Compressão Simples	41
4.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral	43
4.5 Cisalhamento Direto	45
4.5.1 Resultados dos ensaios	45
4.5.2 Análise Conjunta	51
4.6 Módulo de Resiliência	54
4.6.1 Modelo Constitutivos	57
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
APÊNDICE A – Resultados individuais de Limite de Liquidez	68
APÊNDICE B – Resultados de cisalhamento direto	71

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Em se tratando do principal modal de transporte brasileiro, o rodoviário, existe um problema que acompanha o estado brasileiro ao longo de sua formação, a precariedade da infraestrutura rodoviária. Tal realidade ocasiona inúmeros impactos, não só na cadeia produtiva devido ao alto custo do transporte de carga, como também dificuldades de logística. Dados do Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019), trazem a estimativa de que seria necessário ao menos R\$ 38 bilhões para a reconstrução e restauração das rodovias, e que estas apresentam diversos trechos com algum tipo de problema. Soares (2022), segue na mesma linha ao afirmar que há baixíssimo investimento público no território brasileiro, o que afeta a construção das rodovias e sua manutenção. Se há pouco investimento para as rodovias, a pesquisa deve seguir o caminho inverso, indo de encontro na busca por novas soluções.

Em vista disso, novas soluções geotécnicas são requisitadas, seja para restaurar ou reforçar os pavimentos já existentes, sendo o uso de geogrelhas um dos principais elementos de reforço em muros de contenção, taludes e pavimentos (Venkateswarlu, Saikumar e Latha, 2023).

Neste contexto, com o crescimento das técnicas e materiais relacionados à impressão 3D, como apontado por Haeusler et al. (2017), estas se mostram como um campo a ser explorado, sobretudo, pelo potencial de larga escala que a manufatura aditiva alcançou. Tais processos podem até mesmo substituir as metodologias atuais, conforme Oliveira (2023), a fabricação de geogrelhas por impressão 3D pode substituir metodologias tradicionais

Concernente a utilização de geogrelhas fabricadas predominantemente por impressão 3D esta representa um avanço significativo, nota-se que o Políácido Láctico (PLA) é o material mais recorrente nos estudos (Venkateswarlu e Latha, 2025; Zhang et al., 2024; Venkateswarlu, Saikumar e Latha, 2023; Sreelekshmy e Aswathy, 2023; Abdi, Tabarsa e Haghgouy, 2023). Indicando assim, uma lacuna a ser investigada de forma mais aprofundada quanto ao uso de outros polímeros, como o caso do Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS).

Diante do exposto, esta pesquisa buscou compreender de que forma se comporta um solo fino em conjunto com geogrelha impressa em 3D de ABS, a fim de avaliar o comportamento mecânico do solo-geogrelha, segundo ensaios de compressão, tração por compressão diametral, cisalhamento direto e módulo de resiliência, com perspectiva de uso em pavimentação.

1.2 Objetivos

Objetivo Geral

Compreender o comportamento mecânico de um solo reforçado com geogrelhas 3D fabricadas em filamento de Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) por meio de ensaios laboratoriais, avaliando a interação solo-geogrelha para aplicação em estruturas de pavimentação.

Objetivos Específicos

- a) Caracterizar geotecnicaamente o solo utilizado no estudo;
- b) Comparar a influência da geogrelha 3D na resistência à compressão do solo natural em relação ao compósito solo-geogrelha 3D;
- c) Quantificar o Módulo de Resiliência dos materiais, avaliando o ganho de desempenho proporcionado pela inclusão da geogrelha 3D;
- d) Avaliar o incremento na resistência à tração do solo natural em função da adição da geogrelha 3D ao compósito;
- e) Determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento para quantificar o ganho de desempenho gerado pela inclusão da geogrelha 3D;
- f) Realizar a análise estatística dos resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimento

O pavimento é uma estrutura formada pelo solo natural (fundação, subleito) e, no sentido ascendente pelas camadas sub-base, base e revestimento. Destina-se a resistir e distribuir ao subleito e demais camadas os esforços oriundos do tráfego, tendo como primordial objetivo auxiliar na movimentação dos veículos com segurança e comodidade. Usualmente podem ser classificados em rígido e flexível (revestimentos asfálticos) (Brasil, 2006).

Na constituição das diversas camadas de um pavimento (Figura 1), tem-se a presença de diferentes materiais, que mostram distintas resistências e deformabilidades. Tal estrutura é projetada de modo que cada camada possua a espessura e rigidez necessária, e que o conjunto consiga atender às condições de clima e tráfego representativos da região para o qual foi concebido, assim como atender a vida útil de projeto (Brasil, 2006). As camadas constituintes do pavimento respondem pela estrutura dessa obra da engenharia, sendo necessário que sejam adequadamente dimensionadas para suprir a função para o qual foi projetado.

Figura 1 – Camadas de pavimento



Fonte: Adaptado de Anacleto, 2021.

2.2 Solo e Classificações

De acordo com Caputo (1988) e Toledo, Oliveira e Melfi (2009), os solos são materiais que resultam da ação de intemperismos, sendo eles: a) físicos, causado pela variação da temperatura, a qual provoca contração e expansão, fragmentando a rocha em grãos. De forma semelhante podem ser modificados por meio da água, ao se formar cristais de gelo dentro das fissuras de rochas, pressionando as paredes internas, como também pelas plantas e vegetais que compõe a região, ao penetrar o solo, fragmentando-o; b) químicos, sendo a presença da água como principal agente causador de reações como hidratação, oxidação, complexação (processo onde moléculas orgânicas capturam íons metálicos) e hidrólise, a raiz da vegetação troca nutrientes, liberando ácidos para solubilizar os nutrientes do solo e das rochas, levando a desagregação e transformação mineral no solo. Segundo a ABNT 6502 (2022a) e numa concepção voltada para a Geotecnia, trata-se de um material formado por um sistema trifásico,

ou seja, por minerais, água e ar, caracterizando as fase sólida, líquida e gasosa, respectivamente, originado da interação entre o clima, as rochas, e o relevo.

Os solos resultantes de tais ações de intemperismos podem ser classificados de diversas formas, uma delas é o Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS) criado por Arthur Casagrande em 1942 e amplamente utilizado, o qual é definido pela norma ASTM D-2487 (ASTM, 2025; Das e Sobhan, 2019). Outro modelo de tipificação é o sistema AASHTO também conhecido como “Sistema rodoviário de classificação dos solos”, normatizada pela ASTM D-3282 (ASTM, 2024; Das e Sobhan, 2019). Tais sistemas têm como base a textura e plasticidade do solo. Existem também diversas outras formas de classificar o solo com objetivo geotécnico, como, por exemplo, a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) (DNIT, 2023).

2.3 Geossintéticos

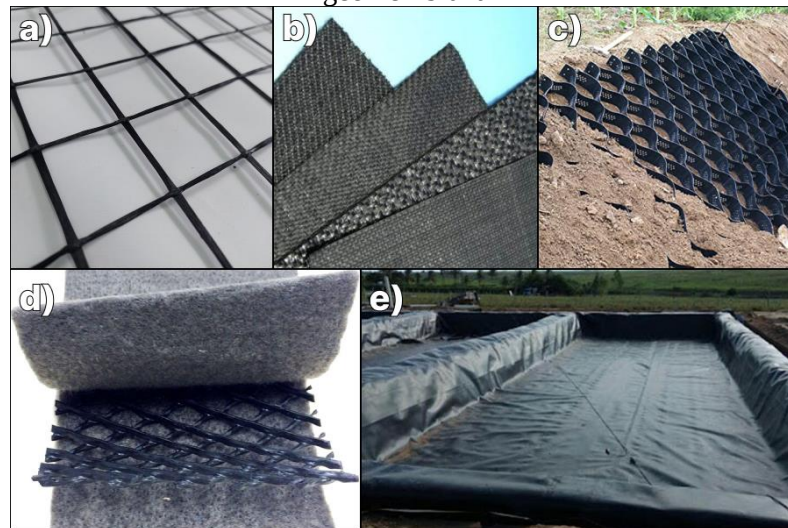
O termo geossintético refere-se genericamente a produtos que possuam em sua composição ao menos um polímero sintético ou natural, podendo ser este, em formato de manta, tira ou outra estrutura tridimensional. As aplicações dos geossintéticos são diversas, tanto nas mais distintas áreas da engenharia civil quanto nas obras geotécnicas. Podem serem usados como: reforço, filtração, impermeabilização, proteção, e separação, dentre outros. A aplicação na Geotecnia teve seu início por volta da década de 1960 (Sieira, 2003; Oliveira, 2016) As principais definições a respeito dos geossintéticos são encontradas na NBR ISO 10318 (ABNT, 2021), as quais são resumidas no Quadro 1, enquanto na Figura 2 podem ser visualizadas exemplos desses materiais.

Quadro 1 – Definição dos principais geossintéticos

Tipo de Geossintético	Definição
Geogrelha (GGR)	Estruturas poliméricas planas, que podem estar unidas por meio do processo de extrusão, solda ou mesmo entrelaçamento. Possuem aberturas maiores que os elementos que a constituem, e são caracterizadas pela malha aberta de elementos resistentes à tração.
Geotêxtil (GTX)	Materiais com formação têxtil, planos e permeáveis, geralmente utilizados em contato direto com o solo ou outros materiais de engenharia civil ou geotécnica.
Geocélula (GCE)	São produzidas com tiras de geossintéticos interligados entre si. Possui a estrutural tridimensional, permeável, com formato similar às casas de abelha.
Georrede (GNT)	Sua formação se dá por meio da junção de elementos paralelos superpostos, e conectados a outros elementos similares.
Geomanta (GMA)	Estruturas tridimensionais permeáveis e constituídas de monofilamentos poliméricos, podendo haver também outros elementos. Podem ser sintéticos ou naturais, com interligação mecânica, térmica ou mesmo química.

Fonte: ABNT, 2021.

Figura 2 – Principais geossintéticos: a) geogrelha; b) geotêxtil; c) geocélula; d) georrede; e) geomembrana



Fonte: Google Imagens, 2025.

Vertematti (2015) aponta algumas das funções em que os geossintéticos podem ser utilizados nos projetos de engenharia. No Quadro 2 são mostrados exemplos desses materiais, em que se verifica que o geotêxtil apresenta uma ampla aplicação. Sieira (2003), cita algumas finalidades de uso dos geossintéticos (Quadro 3). Ao longo dos anos diversas obras de relevância foram construídas com os geossintéticos, cujos alguns destaques estão descritos no Quadro 4.

Quadro 2 – Função dos geossintéticos nos projetos de engenharia

Geossintético	Separação	Proteção	Filtração	Drenagem	Erosão	Reforço	Impermeabilização
Geogrelha	X	-	-	-	-	X	-
Geotêxtil	X	X	X	X	X	X	X ^a
Geocélula	-	X	-	-	X	X	-
Georrede	-	X	-	X	-	-	-
Geomembrana	X	-	-	-	-	-	X

a – Quando impregnado com material asfáltico

Fonte: Adaptado de Vertematti, 2015.

Quadro 3 – Principais aplicações dos geossintéticos

Aplicação	Objetivo
Separação	Evitar que haja a mistura entre materiais granulares com características geotécnicas muito distintas.
Proteção	Redução de solicitação localizada, de forma a homogeneizar o nível de tensão para determinada superfície ou camada.
Filtração	Impedir a movimentação de partículas maiores, permitindo a passagem e coleta de fluidos.
Drenagem	Facilitação dos movimentos de fluidos no interior da estrutura.
Erosão	Proteção da superfície do terreno contra arrastes de partículas devido à ação provocada por ventos ou mesmo águas superficiais.
Reforço	Contribuir com a resistência à tração do geossintético para que haja aumento da resistência da estrutura, restringindo assim, deformações.
Impermeabilização	Evitar a migração de líquidos ou gases, de forma a conter possíveis avanços de contaminação.

Fonte: Adaptado de Sieira, 2003.

Quadro 4 – Obras relevantes com geossintéticos no Brasil

Nome da obra	Local e data	Uso do geossintético
Rodovia Rio-Santos, DNER	Angra dos Reis (RJ) / 1971	Camada de separação e reforço na BR-101, aterro sobre solo mole
Aeroportos de SP, RJ, MG, DF, PE e PR	Estados diversos / 2006 a 2012	Restauração das pistas de pouso com sistema antirreflexo de trincas
Duplicação da BR-101 – Sul, DNIT	Palhoça (SC) / 2006	Drenos verticais geossintéticos para aceleração de adensamento de solo mole
Estrada de Ferro Carajás	Carajás (MA) / 2007	Solo reforçado com geogrelhas, solo envelopado
Companhia Siderúrgica do Atlântico	Itaguaí (RJ) / 2008 a 2010	Separação, reforço, drenos verticais e colunas de areia encamisadas, com aplicação de aterro sobre solo mole.
Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Usina Hidrelétrica Santo Antônio	Porto Velho (RO) / 2010	Formas têxteis tubulares para acondicionamento e dessecação do lodo da ETE
Usina Uberaba S.A.	Uberaba (MG) / 2011	Impermeabilização de tanque de vinhaça, para controle de fluxo e drenagem
COMPERJ	Itaboraí (RJ) / 2013 e 2014	Aterros estaqueados, drenos verticais, reforços e colunas encamisadas em estradas de acesso de cargas pesadas

Fonte: Adaptado de Vertematti, 2015.

2.4 Impressão 3D e Aplicação na Engenharia

O surgimento do que se conhece hoje como impressão 3D ou manufatura aditiva remonta ao início da década de 1980, cujas primeiras técnicas foram concebidas visando a resolução de problemas do dia-dia das fábricas. Coube ao americano Charles Hull o pioneirismo, com sua técnica de estereolitografia (SLA), na qual uma resina fotoendurecedora recebe incidência das luzes ultravioletas ocasionando o enrijecimento da peça. Obtendo-se, assim, a forma tridimensional planejada, e sendo desenvolvida por meio de softwares

específicos de modelagem. Outras técnicas surgiram ao longo do tempo, entretanto, a popularização deu-se em virtude da expiração das patentes que pertenciam a Stratasys. À vista disso, impressoras 3D que utilizam a técnica de Modelação por Deposição Fundida (MDF) com custo de até cem mil reais em décadas passadas, puderam ser adquiridas na casa de dois mil reais, ou ainda, foi possível a execução de projetos domiciliares (Wishbox, 2016, 2020; Colpani, 2018).

A técnica de MDF consiste na deposição de camada por camada de material para a criação do objeto tridimensional planejado, sendo a matéria-prima derretida em altas temperaturas e depositada através de extrusores (PRINTIT3D, 2021; 3DLAB, 2023). Existem diversas vantagens e desvantagens no uso da impressão 3D por MDF, as quais estão descritas no Quadro 5, e, entre as quais se destaca a possibilidade do uso de diversos filamentos.

Quadro 5 – Vantagens e desvantagens da técnica MDF

Vantagens	Desvantagens
Área de impressão tende a ser maior relativa aos outros modelos, como o SLA.	Impressões necessitam de acabamento.
Preços acessíveis devido à expiração das patentes.	Diversidade de configurações que podem acarretar desvios na impressão.
Diversidade do uso de filamentos.	Flutuação de temperatura nos materiais.
Variedade de modelos, de baixa a alta precisão.	
Escalabilidade, podendo ser dimensionada para qualquer tamanho.	Espessura predefinida pelo bico, sendo necessário ajustes ou substituições.
Alto custo-benefício.	

Fonte: Adaptado de PRINTIT3D (2021) e 3DLAB (2023).

As impressoras 3D MDF, na atualidade, têm seu uso diversificado, especialmente pela possibilidade do emprego de variados tipos de filamento, os quais são aplicados levando-se em consideração as características as quais se almeja obter na peça tridimensional final. Alguns destes filamentos tem suas características descritas no Quadro 6 e resumidas no Quadro 7.

Quadro 6 – Filamentos para impressora 3D MDF

Filamento	Características
Thermoplastic polyurethane (TPU)	Material flexível e elástico, utilizado em projetos que exijam tal flexibilidade. Ex.: calçados e capas para celular.
Poliácido Láctico (PLA)	Fácil de usar e de baixo custo, geralmente é usado para objetos decorativos ou mesmo protótipos não funcionais, devido a pouca resistência à flexão.
Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	Resistente e durável, empregado em peças funcionais, com ampla aplicação na indústria.
Polyethylene terephthalate glycol (PETG)	Combina a resistência do ABS com a facilidade de aplicação do ABS. Aplicado em objetos decorativos.

Fonte: Adaptado de 3DLAB (2023) e FILAMENT2PRINT (2021).

Quadro 7 – Resumo das principais características dos filamentos

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS						
	Flexibilidade	Elasticidade	Resistência à impacto	Leveza	Resistência à água	Resistência aquecimento	Resistência à fadiga
TPU	X	X	-	X	-	-	X
PLA	-	-	-	-	-	-	-
ABS	-	-	X	-	-	X	-
PET-G	-	-	-	-	X	-	X

Fonte: Traduzido e adaptado de Filament, 2024.

Tais filamentos, por muito tempo, já vêm sendo estudados, sobretudo, em relação aos principais pontos de atenção quando se trata de impressão 3D, quais sejam: a resistência do material, a rigidez ou flexibilidade da peça, e sua durabilidade, as quais estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo da propriedade dos materiais

Material	Resistência à tração (MPa)	Rigidez	Durabilidade	Densidade (g/cm³)	Custo
TPU	26 a 43	Baixa	Alta	1,19 a 1,23	Médio
PLA	65	Média-Alta	Baixa-Média	1,24	Alto
ABS	40	Média	Alta	1,04	Médio-alto
PET-G	53	Média	Alta	1,23	Alto

Fonte: Traduzido e adaptado de Filament, 2024.

Com as devidas adaptações, outros tipos de filamento foram possíveis de serem utilizados nos distintos campos da engenharia civil, possibilitando construções como:

1) Protótipo de paredes (Figura 3) - produzida com o “filamento” de argila e fibra de arroz, na qual a parede possuía 40 cm de espessura, sendo necessário 40 horas para a produção final (Chiusoli, 2019).

Figura 3 – Protótipo de parede impressa em 3D



Fonte: Chiusoli, 2019.

2) Na área da Geotecnia, há diversas aplicações como as expostas no Quadro 8, que interpassam por todas as etapas da engenharia, como: novos agregados (miúdos e graúdos), reforços como fibras e geogrelhas, sendo este último, o foco do presente trabalho.

Quadro 8 – Aplicação da impressão 3D na Geotecnia

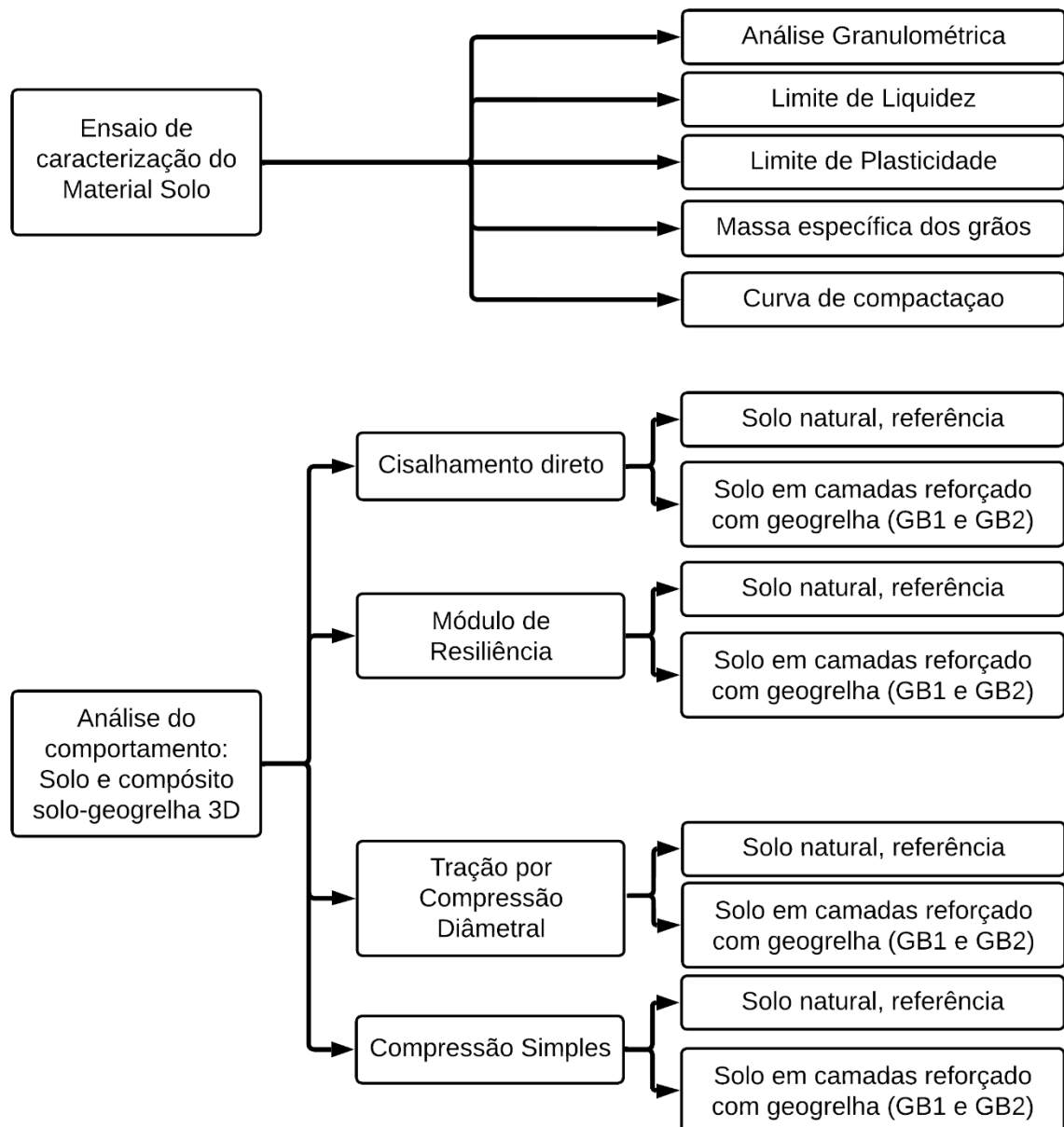
Resumo da aplicação	Fonte
Fabricação 3D de geogrelhas texturizadas em PLA a fim de avaliar o seu desempenho na interface através de ensaios de cisalhamento direto em grande escala e análise PIV para quantificar os benefícios da textura.	Venkateswarlu e Latha (2025)
Fabricação 3D de geogrelhas em PLA, incorporando polímero condutor para monitoramento distribuído de deformação, validado por experimentos de carga-descarga e simulação numérica.	Zhang et al. (2024)
Uso de geogrelha 3D em PLA para verificar a resposta de cisalhamento direto da interface com areia	Venkateswarlu, Saikumar e Latha (2023)
Impressão 3D de Geogrelhas em PLA em formato de favo de mel a fim de comparar resistência através de carga em placa com areia.	Sreelekshmy e Aswathy (2023)
Impressão 3D de geogrelhas com PLA, tendo como finalidade avaliar o impacto de modificações geométricas da geogrelha.	Abdi, Tabarsa e Haghgouy (2023)
Análise do comportamento a compressão triaxial de areias angulares e arredondadas impressas em 3D, a partir de polímeros rígidos à base de acrilato.	Ahmed e Martinez (2021)
Impressão 3D de solo granular transparente a fim de simular a areia natural, e verificar suas propriedades mecânicas por meio de testes de compressão unidimensional, cisalhamento direto e compressão triaxial.	LI et al. (2021)
Fabricação de fibras sintéticas por impressão em MDF com PET-G para analisar as propriedades mecânicas de solos reforçado com fibra.	Chalmovsky, Koudela e Mica (2020)
Uso de rochas brandas ou sólidos porosos impressos tridimensionalmente para investigações fundamentais sobre porosidade, permeabilidade e resistência	Ozelim e Cavalcante (2019)
	Song et al. (2018)

Fonte: Elaboração Própria (2025)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia empregados no estudo, incluindo, entre outros aspectos, os equipamentos utilizados e os procedimentos adotados na confecção dos corpos de prova e na realização dos experimentos. A Figura 4 ilustra o fluxograma das atividades desenvolvidas.

Figura 4 – Fluxograma das atividades do projeto



Fonte: Elaboração Própria (2025)

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

O solo utilizado nesta Dissertação foi obtido por meio de doação, proveniente da zona leste da cidade de Manaus/AM, da região do Ramal Brasileirinho. Sua caracterização ocorreu por meio da determinação da massa específica dos grãos, limites de Atterberg, curva granulométrica, e os parâmetros de compactação, umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, sendo estes verificados segundo as normas especificadas no Quadro 9. Tais ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC/UFAM).

Quadro 9 – Normas para caracterização do solo

Parâmetros	Normativa
Limites de Atterberg - Limite de Liquidez (LL) - Limite de Plasticidade (LP) - Índice de Plasticidade (IP)	NBR 6459 (ABNT, 2016a) NBR 7180 (ABNT, 2016b)
Granulometria - Curva Granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2025a)
Umidade Ótima (w_{ot}) e o Peso Específico Aparente Seco Máximo ($\gamma_{d,máx}$) - Curva de Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2025b)
Massa específica dos grãos (ρ_s)	NBR 17212 (ABNT, 2025c)

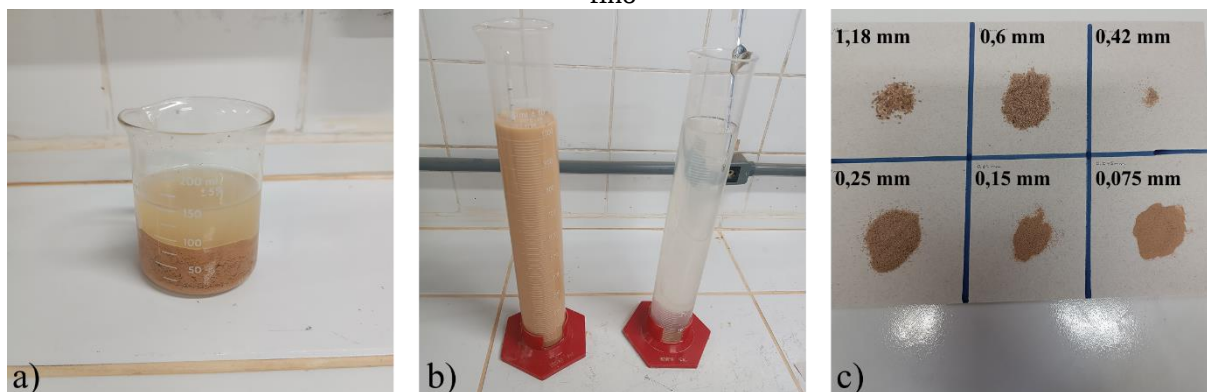
Fonte: Elaboração Própria (2025)

Para a realização dos mencionados ensaios, se fez necessário preparar as amostras. Nesta etapa levou-se em consideração os preceitos da NBR 6457 (ABNT, 2024). De forma resumida, a normativa estabelece que para os testes de caracterização e compactação a amostra deve secar ao ar, até que esteja próxima da umidade higroscópica, os torrões devem ser desmanchados e, na sequência, deve ser repartida de forma a obter adequado quantitativo. Após o preparo, cada respectivo experimento foi executado segundo às normas vigentes, e resumidamente a seguir apresentados.

Análise Granulométrica (ABNT, 2025a): O ensaio permite determinar a distribuição dos tamanhos das partículas que compõem um solo ou agregado, revelando a porcentagem de cada fração granulométrica presente. Conforme Souza (2018), essa caracterização é essencial para classificar o material e prever seu comportamento em diversas aplicações. No contexto da pavimentação, a granulometria influencia diretamente propriedades cruciais como a permeabilidade, a capacidade de compactação, a resistência ao cisalhamento e a estabilidade volumétrica das camadas do pavimento. Materiais com granulometria inadequada podem levar

a problemas como deformações permanentes, fissuras e perda de capacidade de suporte, comprometendo a durabilidade da estrutura, sendo um elemento essencial para o desempenho da estrutura (Cunha, 2020). Algumas etapas realizadas no ensaio estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Granulometria: a) Solo com defloculante; b) Medições com densímetro; c) Peneiramento fino



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Ensaio de Compactação (ABNT, 2025b): Tem como objetivo determinar as condições ótimas de umidade e energia para que um solo ou agregado atinja sua máxima densidade seca. Essa densidade, uma vez alcançada em campo, confere ao material características de desempenho superiores, como maior capacidade de suporte e menor permeabilidade. A densidade e umidade ótimas obtidas em laboratório servem como parâmetros de controle para a execução em obra, garantindo que as propriedades mecânicas desejadas sejam atingidas (Souza, 2018; Cunha, 2020). Na Figura 6 é apresentada algumas etapas do ensaio realizado nesta Dissertação.

Figura 6 – Ensaio de Compactação: a) Homogeneização; b) Compactação de camada; c) Pesagem



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Massa Específica dos Sólidos (ABNT, 2025c): Também conhecido como peso específico real dos grãos, representa a relação entre a massa de uma amostra de solo ou agregado seco e o volume de suas partículas sólidas, excluindo os vazios. Conforme Souza (2018), o

conhecimento preciso da massa específica dos sólidos é determinante para o cálculo de índices de vazios, grau de saturação e outras propriedades volumétricas de extrema importância em projetos geotécnicos e de pavimentação. Ele permite quantificar o espaço ocupado pelas partículas sólidas dentro da matriz do material, influenciando diretamente o comportamento mecânico e hidráulico. Erros na determinação da massa específica dos sólidos podem levar a cálculos imprecisos de compactação e estabilidade, comprometendo a performance e a vida útil da estrutura do pavimento (Cunha, 2020). Algumas das etapas realizadas neste ensaio estão apresentadas na Figura 7.

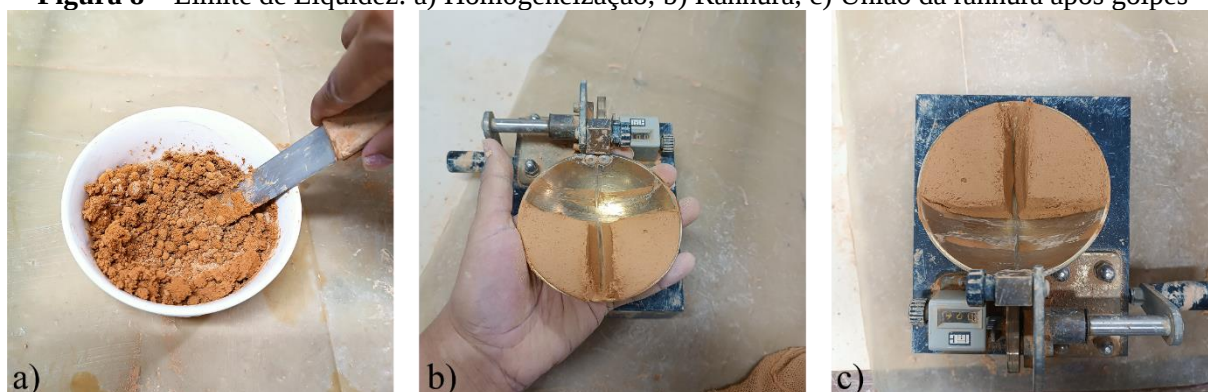
Figura 7 – Massa específica dos sólidos: a) Solo submerso; b) Dispersão do solo; c) Fase de Ebulição



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Limite de Liquidez (ABNT, 2016a): ensaio fundamental para a caracterização de solos finos, sendo um dos limites de Atterberg, o qual define a transição do estado plástico para o estado líquido de um solo. Este ensaio determina o teor de umidade no qual um solo passa de um comportamento plástico para um estado quase líquido, perdendo sua capacidade de suportar cargas. Conforme Souza (2018), o LL é decisivo para a classificação e avaliação da plasticidade dos solos, oferecendo maior entendimento sobre sua trabalhabilidade e comportamento sob variações de umidade. Cunha (2020) enfatiza que solos com alto Limite de Liquidez tendem a ser mais compressíveis e menos estáveis quando saturados, podendo levar a deformações excessivas e falhas no pavimento. Assim, a correta determinação do LL permite a seleção de materiais adequados e o dimensionamento apropriado das camadas, minimizando riscos de patologias e garantindo funcionalidade esperada. Na Figura 8 é possível visualizar as etapas do ensaio realizado.

Figura 8 – Limite de Liquidez: a) Homogeneização; b) Ranhura; c) União da ranhura após golpes



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Limite de Plasticidade (ABNT, 2016b): Sendo um dos ensaios de Atterberg, este é fundamental para a caracterização de solos finos, definindo o teor de umidade no qual um solo passa do estado semissólido para o estado plástico. Este ponto representa a menor umidade em que o solo ainda pode ser moldado sem fissurar. Para Souza (2018), a determinação do LP é fundamental para avaliar a plasticidade e, conseqüentemente, a trabalhabilidade e o comportamento de compressibilidade e expansão de argilas e siltes. Cunha (2020) ressalta que um LP elevado pode indicar solos com grande potencial de deformação e baixa resistência quando úmidos, assim, a correta execução e interpretação do ensaio de Limite de Plasticidade são indispensáveis para a seleção de materiais adequados e o dimensionamento.

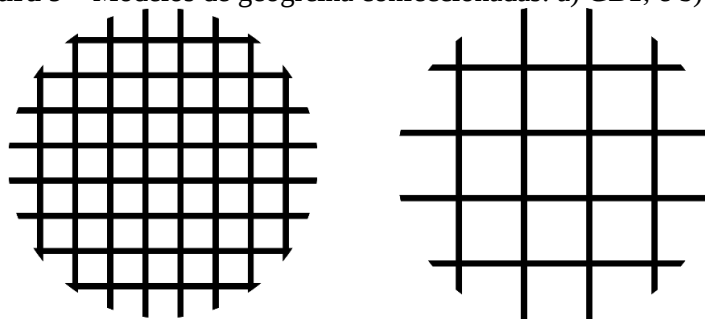
3.1.2 Geogrelha

As peças de geogrelha utilizadas no estudo foram produzidas por meio da técnica de impressão 3D de Modelação por Deposição Fundida (MDF), a qual consiste no aquecimento de filamento de materiais termoplástico, os quais são, na sequência, depositados camada por camada para formar o objeto tridimensional desejado (3DLAB, 2023). A confecção das mesmas foi feita na impressora 3D da Creality, modelo “Ender-3 S1 Pro”, a qual tem capacidade de produzir peças com até 220 x 220 x 270 mm, e possui suporte para o filamento de ABS, material constituinte das geogrelhas deste projeto. Este material foi adquirido com recursos do projeto “Dispositivos de armazenamento de energia com base em grafeno impresso em 3D” financiado pela FAPEAM, no qual a orientadora desse trabalho participou como pesquisadora

Os modelos idealizados e confeccionados reproduzem a geometria de uma geogrelha biaxial (direções transversal e longitudinal) em formato circular de diâmetro aproximado de 10 cm, sendo dois modelos de malha quadrada, o primeiro com abertura de malha com dimensão de 9,5 mm e espessura 2,0 mm, e a segunda com abertura de 19,0 mm e espessura de 2,0 mm, os quais serão tratadas nesta Dissertação como “GB1” e “GB2”, respectivamente. A Figura 9

apresenta o desenho das geogrelhas com as diferentes aberturas de malha, em seu formato circular, enquanto o resumo das características físicas destas geogrelhas consta na Tabela 2.

Figura 9 – Modelos de geogrelha confeccionadas: a) GB1; e b) GB2



a) Geogrelha Biaxial
9,5 mm x 9,5 mm (GB1)

b) Geogrelha Biaxial
19,0 mm x 19,0 mm (GB2)

Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 2 – Propriedades físicas das geogrelhas

Parâmetro	GB1	GB2
Abertura da malha (mm)	9,5	19,0
Largura das nervuras (mm)	2,0	2,0
Espessura das nervuras (mm)	2,0	2,0
Volume (cm ³)	4,89	2,77
Massa (g)	4,70	2,69
Densidade aparente (g/cm ³)	1,04	1,03
Material	ABS	

Fonte: Elaboração própria (2025)

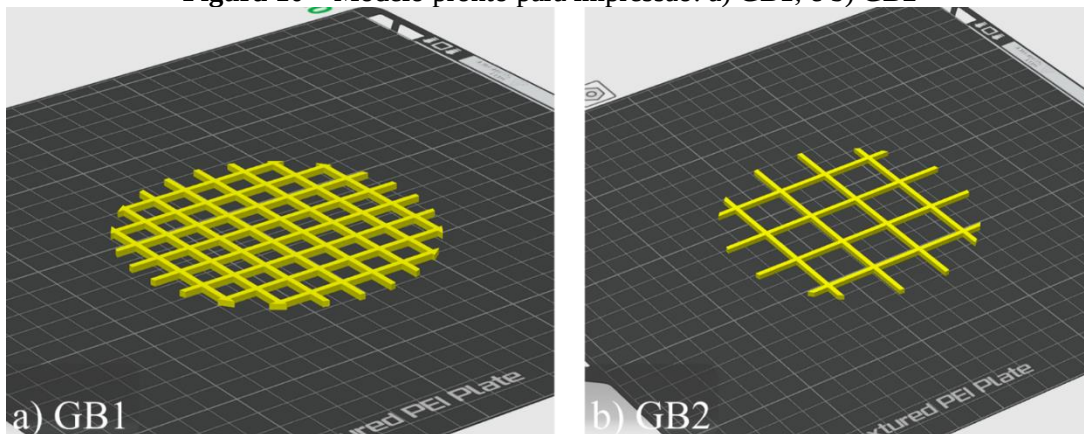
Para a produção, foram definidos alguns parâmetros de impressão de modo que houvesse padronização, sendo estes inseridos nas configurações antes de cada confecção, tais parâmetros estão descritos na Tabela 3. Para a criação do modelo digital 3D, utilizou-se de ferramentas como: a) MakerWorld para criar o modelo de arquivo, e b) Bambu Studio para aperfeiçoar as configurações e dimensões da geogrelha, resultando nos modelos vistos na Figura 10.

Tabela 3 – Parâmetro de impressão

Parâmetro	Ajuste
Altura da camada (mm)	0,2
Velocidade de impressão (mm/s)	35
Densidade de preenchimento (%)	100
Tipo de preenchimento	Linha
Temperatura de impressão (°C)	230
Temperatura da base/mesa de impressão (°C)	110
Camadas de topo (unidade)	3
Camadas de base (unidade)	3

Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 10 – Modelo pronto para impressão: a) GB1; e b) GB2



Fonte: Elaboração própria (2025)

3.2 Métodos

Na avaliação do comportamento mecânico do conjunto solo-geogrelha e da amostra de Solo de Referência (SR) confeccionados, realizaram-se os seguintes ensaios: Compressão Simples (CS), Resistência à Tração Por Compressão Diametral (RT), Cisalhamento Direto e Módulo de Resiliência (MR). O quantitativo de corpos de prova destinado a cada experimento consta na Tabela 4.

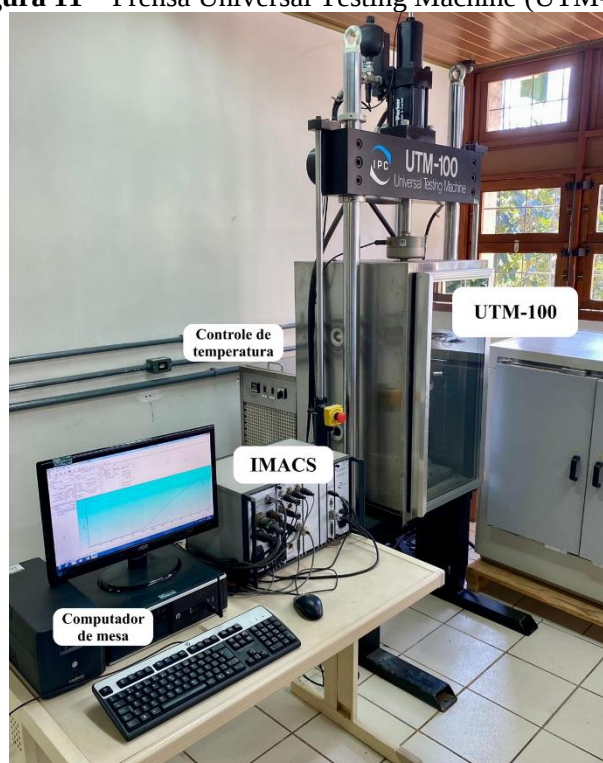
Tabela 4 – Número de amostras por ensaio mecânico

Ensaio	Qtd. de corpo de prova (CP's)
Compressão simples	6
Resistência à tração por compressão diametral	5
Cisalhamento direto	7
Módulo de resiliência	6

Fonte: Elaboração própria (2025)

Na realização dos testes de Compressão Simples, Módulo de Resiliência, Tração por Compressão Diametral, fez-se uso da prensa hidráulica Universal Testing Machine (UTM-100), mostrada na Figura 11, da IPC Global, pertencente ao Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC) da UFAM. O citado equipamento dispõe de uma célula de carga de ± 100 kN, uma cabine com controle de temperatura que pode variar entre -15 °C à 60 °C, e, funciona interligada à um computador de mesa por meio do sistema de controle e aquisição de dados IMACS (Integrated Multi-Axis Control System).

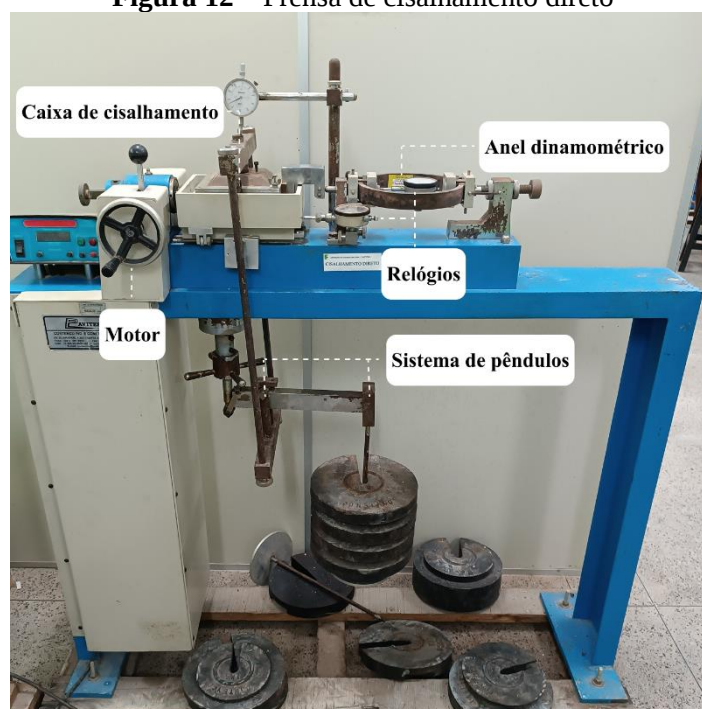
Figura 11 – Prensa Universal Testing Machine (UTM-100)



Fonte: Elaboração própria (2025)

No caso do ensaio de cisalhamento direto (Figura 12), foi executado no Laboratório de Mecânicos dos Solos do IFAM, a qual conta com anel dinamométrico, relógios comparadores para deslocamento vertical e horizontal, com possibilidade de taxa de cisalhamento entre 0,0001 mm/min a 2,0000 mm/min.

Figura 12 – Prensa de cisalhamento direto

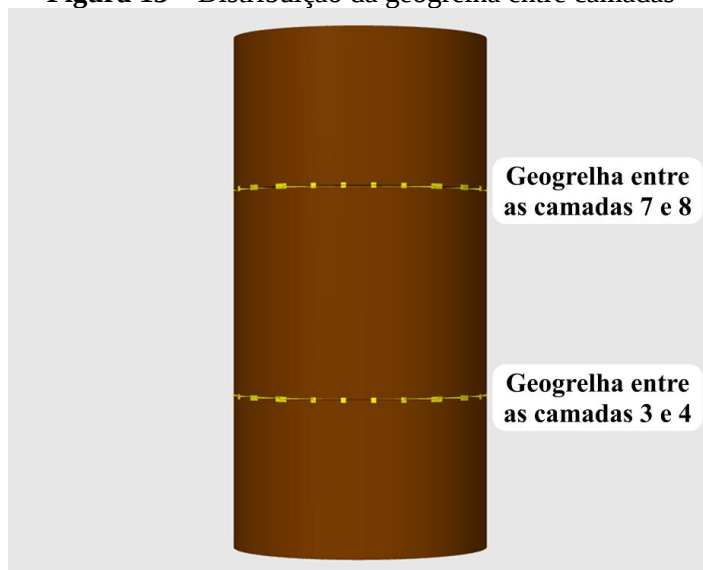


Fonte: Elaboração própria (2025)

A metodologia aplicada para a execução dos ensaios mecânicos, acompanhou as normativas descritas a seguir.

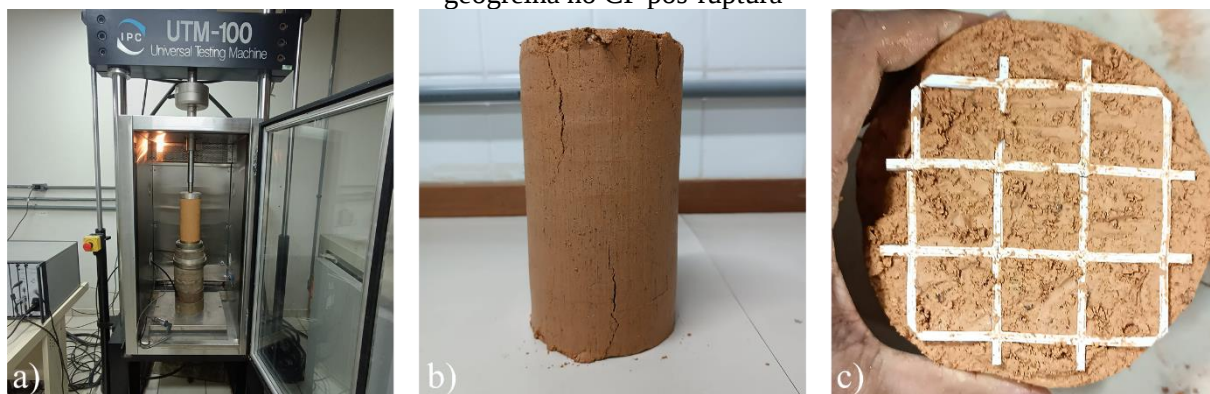
Compressão Simples (ABNT, 2022b): A preparação do corpo de prova consiste em uma amostra compactada na energia modificada, de diâmetro e altura aproximados de 10 cm e 20 cm, respectivamente, com teor de umidade e massa específica aparente de acordo com o obtido na curva de compactação, sendo composto por 10 camadas de 2 cm cada. No caso do conjunto solo-geogrelha presente no GB1 e GB2, a moldagem inicia-se com a compactação das três primeiras camadas, e posterior inserção da geogrelha produzida entre as camadas 3 e 4, seguido da compactação das camadas quatro a sete, e, inserção de nova geogrelha entre as camadas 7 e 8, por fim, a compactação das camadas oito a dez. A representação gráfica desta moldagem pode ser vista na Figura 13. O ensaio é realizado aplicando o carregamento de forma constante por meio da prensa UTM-100 (Figura 14) até haja a ruptura.

Figura 13 – Distribuição da geogrelha entre camadas



Fonte: Elaboração própria (2025)

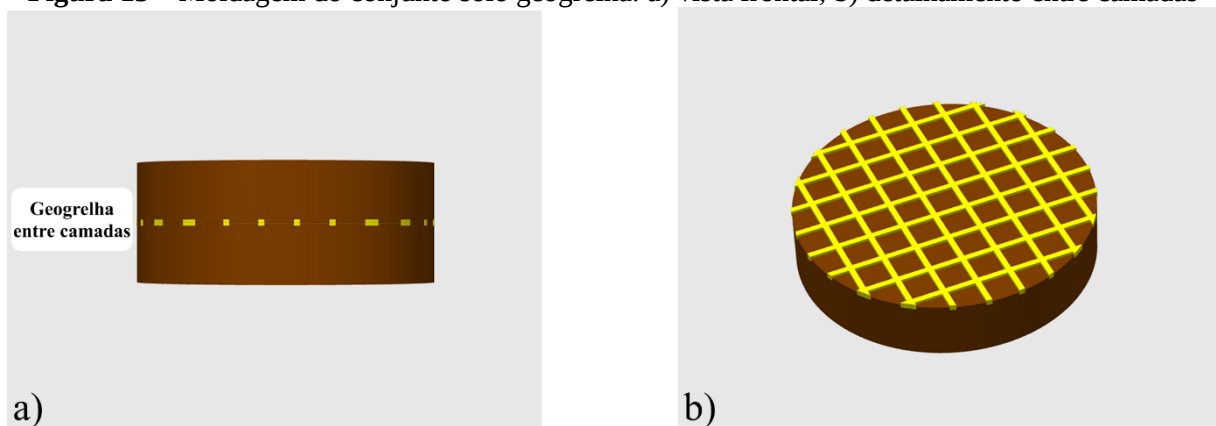
Figura 14 – Compressão simples: a) CP na UTM-100; b) CP pós-ruptura; c) Detalhamento da geogrelha no CP pós-ruptura



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Resistência à tração por compressão diametral (ASTM, 2023b): A preparação do corpo de prova se assemelha à resistência à compressão simples, com exceção de que a altura terá aproximadamente 4 cm, com duas camadas de 2 cm cada. Para o conjunto solo-geogrelha (Figura 15), compacta-se a primeira camada, em seguida, insere-se o modelo de geogrelha a ser testado entre as duas camadas, e finaliza compactando a segunda camada de solo. Para a execução do ensaio, segue-se o preconizado pelo denominado “ensaio brasileiro”, desenvolvido pelo engenheiro Lobo Carneiro, e que é normatizado pela ASTM D3967:2023, com a corpo de prova posto de forma horizontal na prensa (Figura 16), e, com aplicação de carga até a ruptura.

Figura 15 – Moldagem do conjunto solo geogrelha: a) vista frontal; b) detalhamento entre camadas



Fonte: Elaboração Própria (2025)

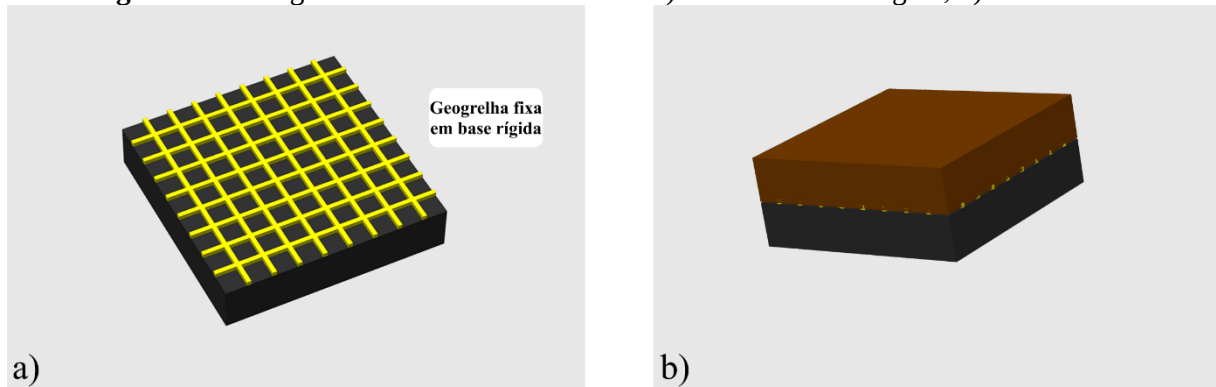
Figura 16 – Resistência à tração por compressão diametral: a) CP na UTM-100; b) detalhamento da geogrelha no CP pós-ruptura



Fonte: Elaboração Própria (2025)

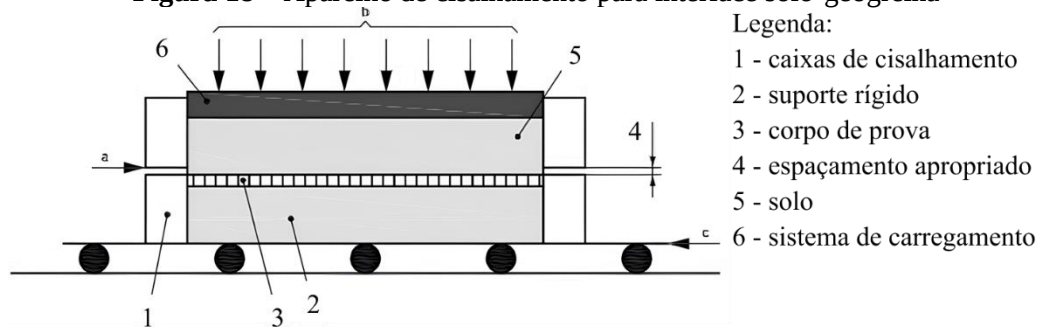
Cisalhamento Direto (ABNT, 2022c; ASTM, 2023a): Para a amostra do Solo de Referência, segue-se os preceitos da ASTM D3080:2023, com o corpo de prova confeccionado em laboratório com dimensões de aproximadas de 10 cm de largura, 10 cm de comprimento e 2 cm de altura. Enquanto para o conjunto solo-geogrelha, segue-se as recomendações da NBR ISO 12957-1:2022, com a geogrelha fixada sobre um suporte de madeira (Figura 17a), e na interface o Solo de Referência (Figura 17b), sendo a aparelhagem descrita na Figura 18.

Figura 17 – Geogrelha no cisalhamento direto: a) Fixado em base rígida; b) CP moldado



Fonte: Elaboração Própria (2025)

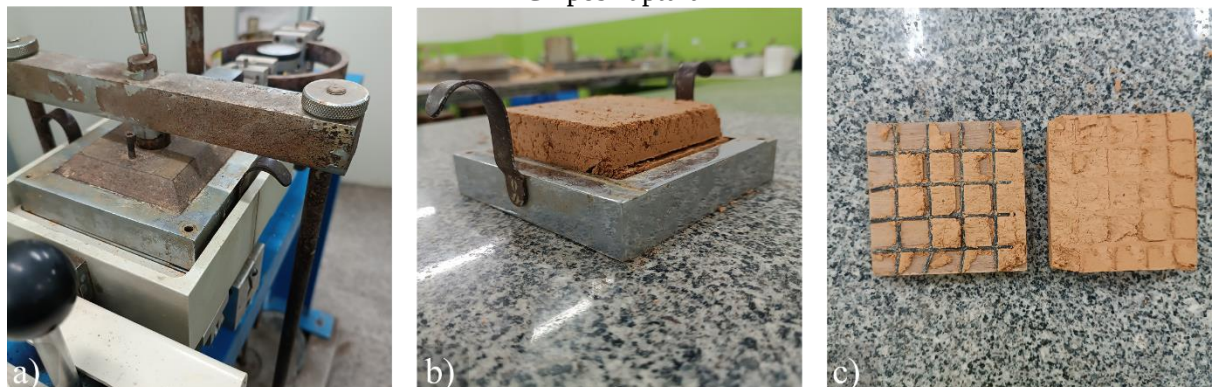
Figura 18 – Aparelho de cisalhamento para interface solo-geogrelha



Fonte: Adaptado de ABNT (2022b)

A execução do ensaio de cisalhamento para ambos os casos, consistiu na colocação do corpo de prova na caixa de cisalhamento, com o sistema de pêndulo carregado com pesos suficientes para exercer a tensão normal exigida (50 kPa, 100 kPa e 150 kPa foram as tensões utilizadas nesta Dissertação), velocidade de cisalhamento de 1,0000 mm/min, e ao longo do ensaio registra-se o deslocamento horizontal relativo da caixa em conjunto com a deformação registrada no anel dinamométrico, sendo este anel previamente calibrado. Detalhes do ensaio para o conjunto solo-geogrelha podem ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Cisalhamento direto: a) CP em teste; b) CP pós-ruptura; c) Detalhamento da geogrelha no CP pós-ruptura



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Módulo de Resiliência (AASHTO, 2021; DNIT, 2018): Definido como a razão entre a tensão desviadora cíclica aplicada e a deformação axial específica resiliente (recuperável), o Módulo de Resiliência é um dado de entrada fundamental em métodos de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos, especialmente para camadas de base, sub-base granulares e solos de subleito, constitui assim, um procedimento laboratorial fundamental para a caracterização do comportamento elástico de solos de subleito e materiais granulares não cimentados. Este método busca simular as condições de tensão induzidas pelo tráfego veicular por meio da aplicação de carregamentos cíclicos. Inicia-se com a preparação de corpos de prova moldados em laboratório de acordo com as especificações de umidade e peso específico (Figura 13 e 20). Subsequentemente, o corpo de prova é posicionado em uma câmara triaxial e submetido a uma fase de condicionamento (Figura 20b), que consiste na aplicação de um número predeterminado de ciclos de uma tensão de desvio específica sob uma pressão confinante constante, com o intuito de minimizar as deformações permanentes iniciais e garantir a acomodação do sistema de ensaio. Após o condicionamento, executa-se a sequência de ensaio propriamente dita, que envolve a aplicação de múltiplos estágios de carregamento, variando-se sistematicamente a pressão confinante (σ_3) e a amplitude da tensão de desvio cíclica (σ_d). Em cada estágio, um número específico de ciclos de carga é aplicado, e as deformações axiais resilientes (ϵ_r) são mensuradas por meio de transdutores de deslocamento variáveis lineares (LVDTs). O módulo de resiliência (M_r) para cada combinação de tensões é, então, determinado como a razão entre a tensão de desvio cíclica e a correspondente deformação axial resiliente ($M_r = \sigma_d/\epsilon_r$), fornecendo parâmetros indispensáveis para a modelagem do comportamento do material e o dimensionamento mecanístico de estruturas de pavimento.

Figura 20 – Módulo de Resiliência: a) preparação da amostra; b) realização do ensaio



Fonte: Elaboração Própria (2025)

3.3 Análise Estatística

A análise estatística desempenha um papel fundamental na pesquisa científica, permitindo a interpretação objetiva dos dados coletados e a transformação de observações brutas em conclusões significativas. Por meio de métodos estatísticos apropriados, é possível identificar padrões e testar hipótese, garantindo maior rigor e validade às descobertas do estudo (Marconi e Lakatos, 2017; Creswell e Creswell, 2021). A correta aplicação dessas ferramentas é essencial para responder às questões de pesquisa e contribuir de forma robusta para o avanço do conhecimento na área.

Nesta Dissertação, a fim de avaliar estatisticamente os resultados, estes serão submetidos a Análise de Variância (ANOVA) de fator único, o qual tem por objetivo avaliar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as médias de três ou mais grupos independentes, uma vez que neste trabalho tem-se o uso de amostras compostas por: a) Solo de Referência; b) em conjunto com a geogrelha Biaxial GB1 de 9,5 x 9,5 mm de abertura, e; c) com a geogrelha biaxial GB2 de 19,0 mm x 19,0 mm de abertura, constituindo assim, três grupos independentes.

A citada análise compara a variância entre os grupos com a variância dentro dos grupos. A hipótese nula da ANOVA de fator único postula que não há diferença entre as médias dos grupos, enquanto a hipótese alternativa sugere que pelo menos uma das médias difere das demais. A decisão de rejeitar ou não a hipótese nula será baseada no valor-p obtido, considerando um nível de significância (α) pré-estabelecido, nesta Dissertação, o valor de α será de 10% ou 0,10 (Lima, Nuvolini e Oliveira, 2021; Teste, 2024).

Posteriormente a verificação do ANOVA de fator único, caso este indique uma diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos (ou seja, rejeição da hipótese nula), será aplicado o teste de Tukey como um procedimento post hoc. Este teste realiza comparações múltiplas par a par entre todas as médias dos grupos, identificando especificamente quais delas diferem significativamente entre si. O teste de Tukey é apropriado quando se deseja comparar todos os pares de médias após um resultado significativo na ANOVA (Teste, 2024; Teste 2021).

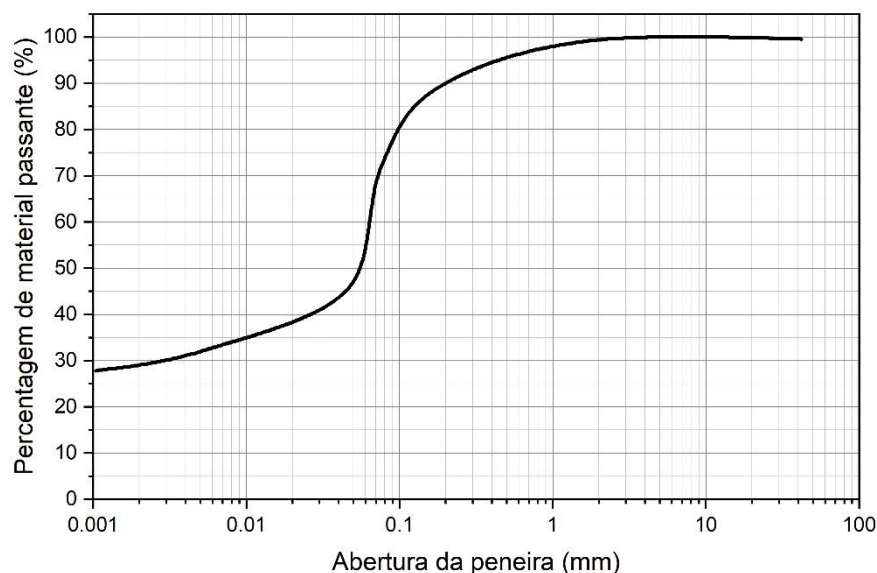
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização, compactação e quanto ao comportamento mecânico. Os experimentos realizaram-se acompanhando a metodologia explicada no capítulo anterior.

4.1 Ensaios de Caracterização

A curva granulométrica obteve-se por meio do ensaio de granulometria com sedimentação, a fim de que pudesse ser observado o percentual de grãos finos presentes no solo. O resultado pode visto na Figura 21, com as percentagens de cada faixa segundo à D422-63 (ASTM, 2007) apresentadas de forma resumida na Tabela 5.

Figura 21 – Curva Granulométrica do Solo



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 5 – Classificação do Solo de acordo com à ASTM D422:2007

Classificação	Percentual por faixa (%)
Pedregulho	0
Areia	14
Silte	54
Argila	32

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Por meio dos dados obtidos na granulometria, nota-se que o solo é composto em sua maioria por material fino igual a 86%, tipificando o material como um silte argilo arenoso.

Consoante aos Limites de Atterberg, realizou-se uma série de ensaios, de forma a representar o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade visando possibilitar uma análise estatística, que totalizou 6 conjuntos para cada um dos citados testes. Os gráficos gerados nesta etapa podem ser visualizados no Apêndice A. Os resultados alusivos ao Limite de Liquidez e Plasticidade estão dispostos na Tabela 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6 – Resultado dos ensaios de Limite de Liquidez

Conjunto	LL
1	79%
2	76%
3	80%
4	83%
5	82%
6	78%
Média (LL)	80%
Desvio-Padrão	2,6%
Coeficiente de Variação	3,2%

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 7 – Resultado do ensaio de Limite de Plasticidade

Conjunto	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
1	46%	51%	52%	50%
2	52%	47%	51%	50%
3	46%	51%	54%	50%
4	49%	54%	50%	51%
5	50%	52%	49%	50%
6	48%	51%	47%	49%
MÉDIA DAS MÉDIAS (LP)				50%
Desvio-Padrão				0,63%
Coeficiente de Variação				1,26%

Fonte: Elaboração Própria (2025)

A partir dos Limites de Atterberg, pode-se, baseado na literatura, entender o comportamento do solo, como mostra a classificação exibida na Tabela 8. Assim, para o solo trabalhado no presente estudo, o Índice de Plasticidade obtido igual a 30%, o classifica como de plasticidade alta, resultado semelhante encontrado na literatura com outros solos naturais estudados da cidade de Manaus (Tabela 9).

Tabela 8 – Classificação pelo Índice de Plasticidade

IP (%)	Descrição
0	Sem plasticidade
1-5	Plasticidade leve
5-10	Plasticidade baixa
10-20	Plasticidade média
20-40	Plasticidade alta
> 40	Plasticidade muito alta

Fonte: Das e Sobhan, 2019

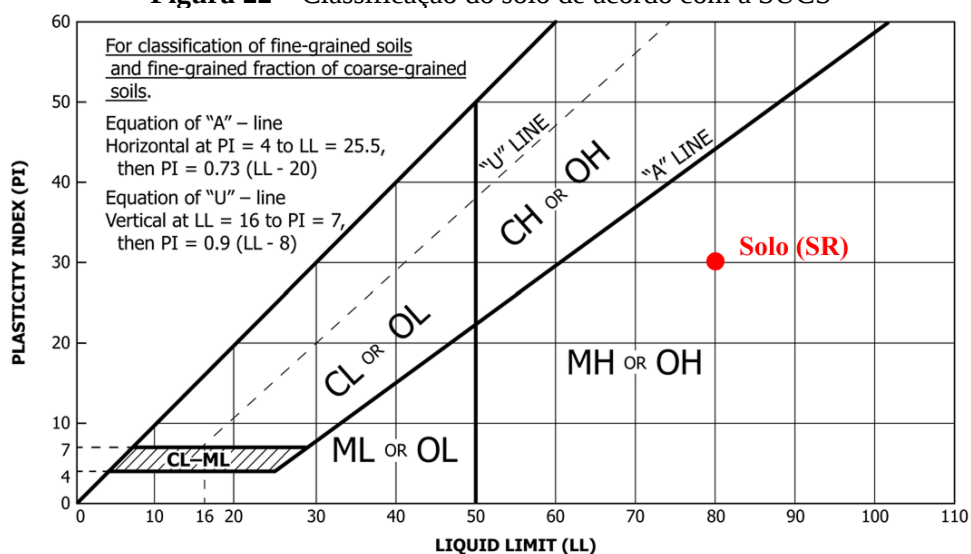
Tabela 9 – Índice de Plasticidade de solos representativos de Manaus

IP (%)	Autor
41	Da Rocha et al. (2020)
40	Ferreira et al. (2019)
21	Huss (2018)
20	De Simas et al. (2013)

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Baseado nos dados da granulometria e dos Limites de Atterberg, é possível tipificar o solo. De acordo com AASHTO, devido ao solo apresentar boa parte do material passante na 0,075 mm e acima de 35% o limite de liquidez, classifica-o como pertencente ao grupo A-7-5, no qual estão presentes os materiais que podem ser altamente elásticos, além de sujeitos variações de volume consideráveis. No sistema SUCS (ASTM, 2025), tendo em vista o percentual acima de 50% de material passante na faixa de 0,075 mm, o limite de liquidez superior a 50%, e por meio do gráfico de Plasticidade (Figura 22), pode-se definir o solo como do grupo MH, ou seja, silte de alta plasticidade.

Figura 22 – Classificação do solo de acordo com a SUCS



Fonte: Adaptado de ASTM (2025).

Na determinação da massa específica, realizou-se três ensaios. O resumo dos resultados obtidos para a Massa Específica, os Limites de Atterberg, e a classificação do solo segundo o

Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS) e o Sistema de Classificação do Solo (AASHTO), encontra-se na Tabela 10.

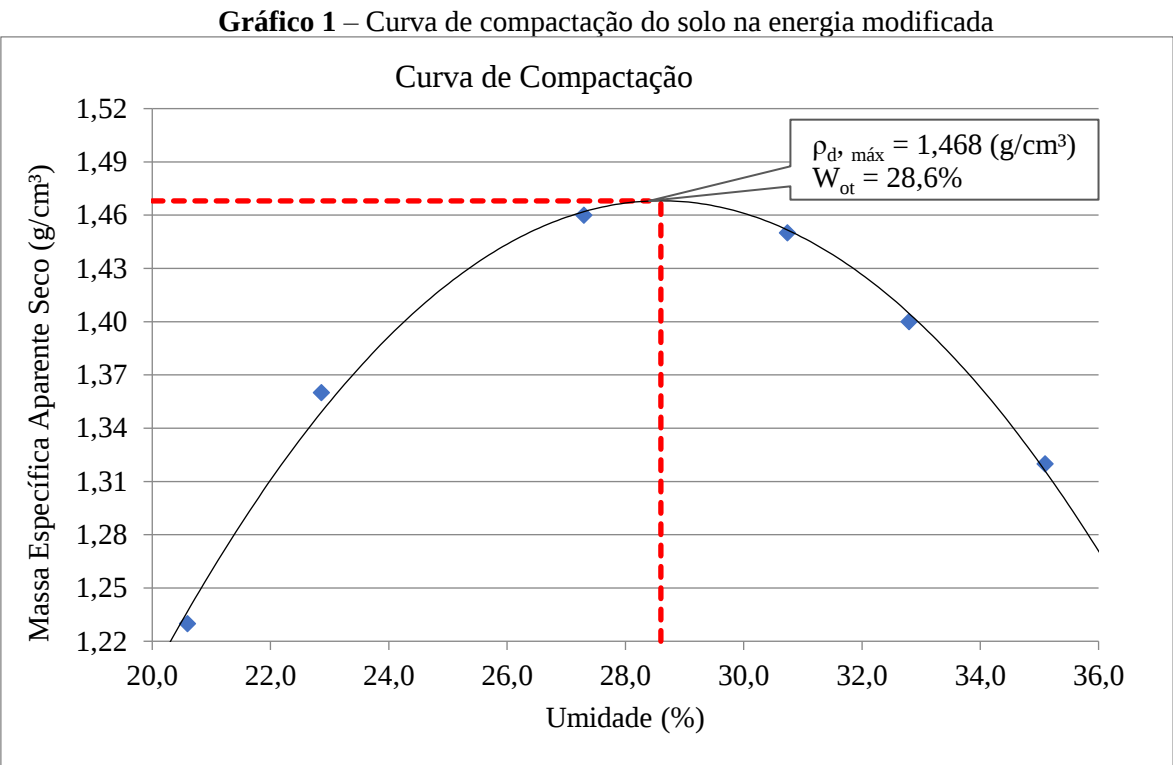
Tabela 10 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização

Parâmetro	Resultado
Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,63
Limite de Liquidez (%)	80
Limite de Plasticidade (%)	50
Índice de Plasticidade (%)	30
Classificação SUCS (ASTM D2487:2025)	MH
Classificação AASHTO (ASTM D3282:2024)	A-7-5 (35)

Fonte: Elaboração Própria (2025)

4.2 Ensaio de Compactação

A curva de compactação na energia modificada, formada por 6 pontos, pode ser vista no Gráfico 1, em que se obteve a úmida ótima e massa específica aparente seca máxima, dados estes utilizados nas moldagens de corpo de prova para os testes de compressão, tração por compressão diametral, módulo de resiliência e cisalhamento direto.



Fonte: Elaboração Própria (2025)

4.3 Resistência à Compressão Simples

Realizaram-se seis ensaios de resistência à compressão simples, visando avaliar o desempenho mecânico e as análises estatísticas. Na Tabela 11 encontra-se a síntese dos dados,

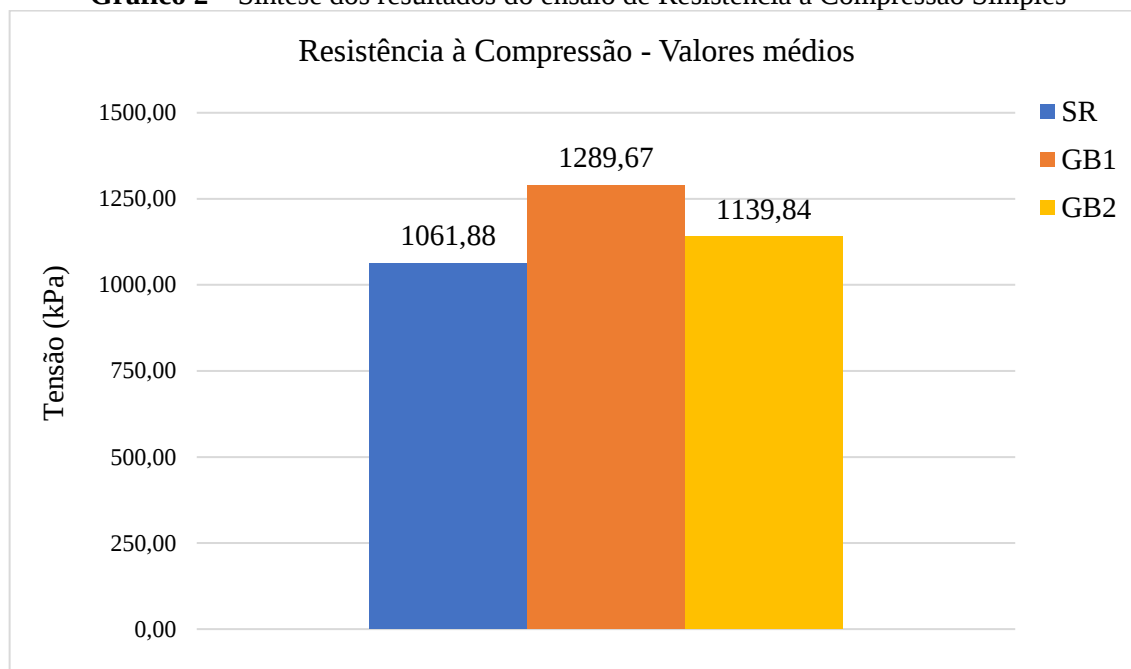
e, em particular, a resistência à compressão máxima para cada corpo de prova. O Gráfico 2 apresenta o sumário dos resultados, com os valores médios obtidos para cada modelo ensaiado, sendo eles o solo referência (SR), solo-geogrelha biaxial 9,5 x 9,5 (GB1) e geogrelha biaxial 19,0 x 19,0 (GB2), com visível superioridade do GB1, a qual apresenta menor abertura de malha entre as geogrelhas.

Tabela 11 – Resultados da Resistência à Compressão Simples

Amostra	Tensão, máx (kPa)		
	SR	GB1	GB2
#1	986,04	1049,86	945,53
#2	1119,83	1033,99	961,65
#3	999,41	1450,70	1249,36
#4	1045,75	1387,55	1401,51
#5	1110,92	1301,19	1044,40
#6	1109,33	1514,74	1236,56
Média	1061,88	1289,67	1139,84
Desvio-Padrão	59,88	204,54	183,54
Coefficiente de Variação	0,06	0,16	0,16
% de acréscimo de desempenho médio em relação ao SR	-	21,45%	7,34%

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Gráfico 2 – Síntese dos resultados do ensaio de Resistência à Compressão Simples



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Concernente a análise estatística utilizou-se o “ANOVA de fator único” a fim de verificar se a diferença entre as médias se mostrava “estatisticamente significativa”, cujos resultado pode ser vista na Tabela 12.

Tabela 12 – ANOVA fator único - Resistência à Compressão Simples

Fonte da variação	Soma dos quadrados	gl	F	valor – P	F _{cri}
Entre grupos	160834,1	2	3,0496	0,077392	2,6952
Dentro dos grupos	395547,9	15			
Total	556382	17			

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Por meio do resultado observado na Tabela 12, com a variância entre grupos ($F = 3,0496$) superior ao valor crítico ($F_{cri} = 2,6952$), pode-se afirmar, com intervalo de confiança de 90%, que há diferença estatisticamente significativa entre as amostras do Solo de Referência (SR), a GB1 e a GB2. Para identificar tais diferenças, é necessário aplicar o teste de Tukey, descrito na Tabela 13.

Tabela 13 – Teste Tukey - Resistência à Compressão Simples

Comparação	Diferença entre Médias	Valor-p Ajustado	Significativo a $\alpha=0.10$?
SR x GB1	- 227.79	0,0657	Sim
SR x GB2	- 77.96	0,6376	Não
GB1 x GB2	149.83	0,2900	Não

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Com base no exposto, observa-se que a geogrelha GB1 promoveu um aumento estatisticamente significativo na Resistência à Compressão Simples relativo ao solo de referência (SR). Este acréscimo médio de desempenho foi de 21,45%. Por outro lado, embora o conjunto solo-geogrelha GB2 tenha mostrado um aumento médio de 7,34% na RCS relativo ao solo natural SR, essa diferença não foi considerada estatisticamente significativa, considerando o nível de significância adotado ($\alpha = 0,10$). Consoante a análise de variância verificou-se, de forma geral, uma diferença estatisticamente significativa entre os três grupos (SR, GB1 e GB2). No entanto, o teste de Tukey (Tabela 13) mostrou que a distinção significativa se concentra, principalmente, entre SR e GB1, sem evidência de diferença estatística relevante entre GB1 e GB2, bem como entre SR e GB2.

4.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Analisa-se no presente item a influência da presença da geogrelha na resistência à tração indireta. A Tabela 14 resume os resultados obtidos nos cinco experimentos, com foco na resistência máxima à tração para cada corpo de prova. O Gráfico 3 apresenta a síntese dos dados, exibindo os valores médios para os modelos ensaiados — SR, GB1 e GB2. Em relação

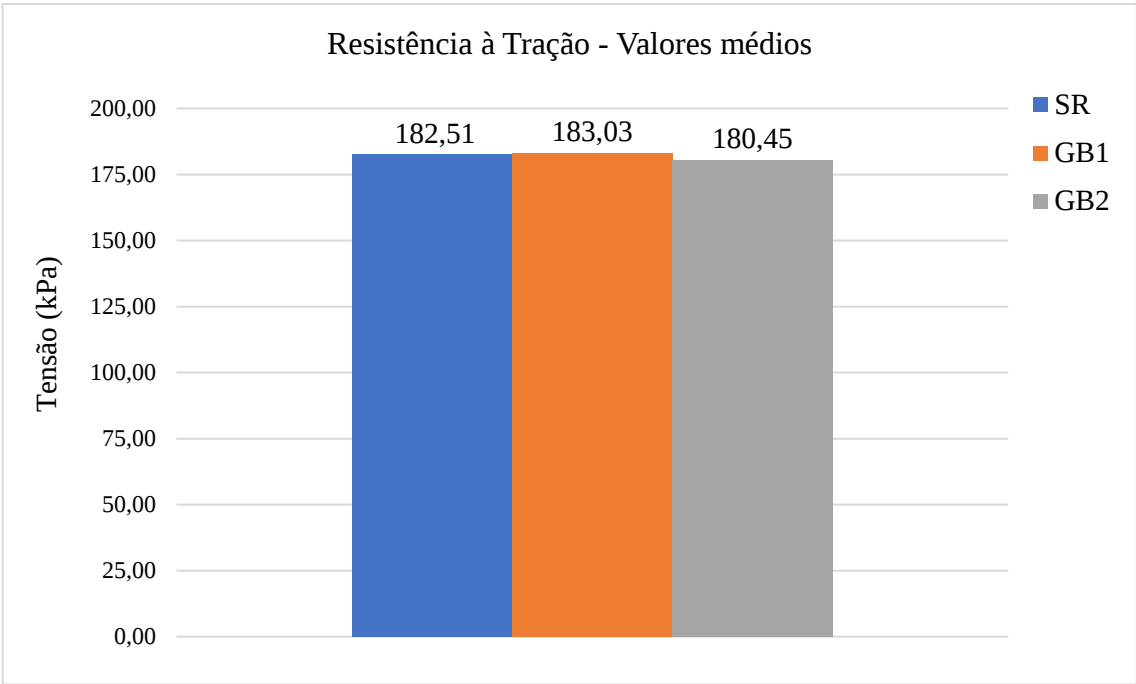
à análise estatística, utilizando a metodologia de ANOVA de fator único, os resultados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 14 – Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Amostra	Tensão, máx (kPa)		
	SR	GB1	GB2
#1	160,50	193,10	204,41
#2	224,57	225,07	189,05
#3	167,60	175,87	183,46
#4	188,62	151,36	163,66
#5	171,26	169,75	161,68
Média	182,51	183,03	180,45
Desvio-Padrão	25,69	27,84	17,97
Coefficiente de Variação	0,14	0,15	0,10
% de acréscimo de desempenho médio em relação ao SR	-	0,29%	- 1,13%

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Gráfico 3 – Síntese dos resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 15 – ANOVA fator único - Resistência à Tração por Compressão Diametral

Fonte da variação	Soma dos quadrados	gl	F	valor – P	Fcri
Entre grupos	18,59	2	0,0159	0,9843	2,8068
Dentro dos grupos	7030,38	12			
Total	7048,97	14			

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Em distinção aos dados obtidos para a Resistência à Compressão Simples, os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral indicaram que a inclusão das geogrelhas GB1 e GB2 não teve impacto estatisticamente significativo na Resistência à Tração. As médias de resistência à tração dos três grupos (SR, GB1 e GB2) apresentaram valores muito próximos, com variações percentuais mínimas: 0,29% para GB1 e -1,13% para GB2 em relação ao SR. Quanto à análise de variância, esta confirmou a inexistência de diferenças significativas entre os grupos, com um valor-p de 0,9843, sugerindo que a presença das geogrelhas não influenciou a Resistência à Tração do material nas condições testadas. Como não foram observadas diferenças entre os grupos, a aplicação do teste de Tukey não se justificou.

4.5 Cisalhamento Direto

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto referente ao Solo de Referência (SR), e aos conjuntos solo-geogrelha GB1 e GB2. As amostras foram confeccionadas com dimensões de 10,0 cm de largura por 9,9 cm de comprimento, apresentando altura média de 21 mm para o solo de referência e 26 mm para os corpos de prova com as geogrelhas. Para cada tensão normal aplicada — 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa — foram moldadas sete amostras, totalizando 24 experimentos. As curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, bem como tensão cisalhante versus deslocamento vertical do “top cap”, constam nos Apêndices B, C e D, tanto para o Solo de Referência (SR) quanto para os corpos de prova com geogrelhas (GB1 e GB2).

4.5.1 Resultados dos Ensaios

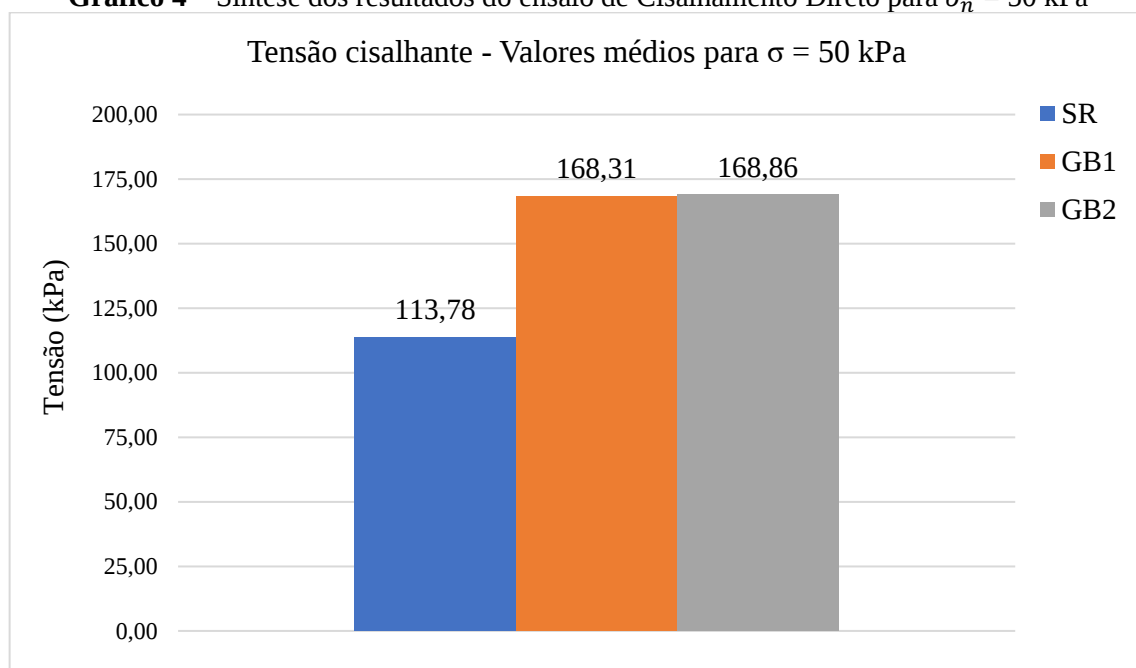
A Tabela 16 apresenta os resultados da tensão cisalhante de ruptura para três diferentes configurações submetidas a uma tensão normal de 50 kPa, seja para o solo de referência (SR) quanto para as duas amostras de solo reforçado com geogrelhas distintas (GB1 e GB2).

Tabela 16 – Resumo dos resultados de Cisalhamento Direto para $\sigma_n = 50$ kPa

Identificação da Amostra	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa) para $\sigma_n = 50$ kPa		
	SR	GB1	GB2
#1	95,24	165,42	180,56
#2	117,5	169,13	166,86
#3	114,02	154,73	184,79
#4	124,9	169,54	151,62
#5	124,14	153,89	150,88
#6	103,75	189,01	160,95
#7	116,88	176,48	186,37
Média	113,78	168,31	168,86
Desvio-Padrão	10,79	12,23	15,19
Coefficiente de Variação	0,09	0,07	0,09
% de acréscimo de desempenho médio em relação ao SR	-	47,92%	48,42%

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Com base nos dados apresentados (Tabela, 16) foi elaborado o Gráfico 4, que sintetiza os resultados por meio dos valores médios obtidos para cada modelo ensaiado. Nota-se, de forma destacada, que os valores médios dos modelos com as geogrelhas (GB1 e GB2) são significativamente superiores aos do corpo de prova sem geogrelha (SR). Além disso, os resultados entre GB1 e GB2 apresentam-se bastante próximos entre si.

Gráfico 4 – Síntese dos resultados do ensaio de Cisalhamento Direto para $\sigma_n = 50$ kPa

Fonte: Elaboração Própria (2025)

A fim de analisar estatisticamente as possíveis diferenças entre as médias calculadas, aplicou-se o ANOVA de fator único nos dados constantes da Tabela 16 para a tensão normal de 50 kPa, cujos resultados podem ser examinados na Tabela 17. Os resultados indicam que a variância entre os grupos, representada pelo valor de F, excede o valor crítico (F_{cri}), evidenciando diferença estatisticamente significativa entre as amostras do Solo de Referência, GB1 e GB2. Para identificar entre quais grupos essa diferença ocorre, foi aplicado o teste de Tukey (Tabela 18).

Tabela 17 – ANOVA fator único - Cisalhamento Direto para $\sigma_n = 50$ kPa

Fonte da variação	Soma dos quadrados	gl	F	valor – P	F_{cri}
Entre grupos	14021,45	2	42,3286	0,0000	2,6239
Dentro dos grupos	2981,27	18			
Total	17002,72	20			

Fonte: Elaboração Própria (2025)

O teste de Tukey foi empregado para comparar as médias de tensão cisalhante entre os três grupos analisados (SR, GB1 e GB2) sob uma tensão normal de 50 kPa, adotando um nível de significância de $\alpha = 0,10$. Os resultados demonstraram que as diferenças entre as médias do solo de referência (SR) e os compósitos reforçados com geogrelha (GB1 e GB2) são estatisticamente significativas (valor-p ajustado = 0), evidenciando que ambos os reforços proporcionaram ganhos de resistência em relação ao SR. Entretanto, a discrepância entre GB1 e GB2 (-0,54 kPa) não se mostrou significativa (valor-p ajustado = 0,9931), indicando que, para o nível de confiança estabelecido, os dois modelos de reforço apresentaram eficácia equivalente na melhoria do comportamento cisalhante do solo.

Tabela 18 – Teste Tukey - Cisalhamento Direto para $\sigma_n = 50$ kPa

Comparação	Diferença entre Médias	Valor-p Ajustado	Significativo a $\alpha=0.10$?
SR x GB1	54,54	0,0000	Sim
SR x GB2	55,09	0,0000	Sim
GB1 x GB2	- 0,54	0,9931	Não

Fonte: Elaboração Própria (2025)

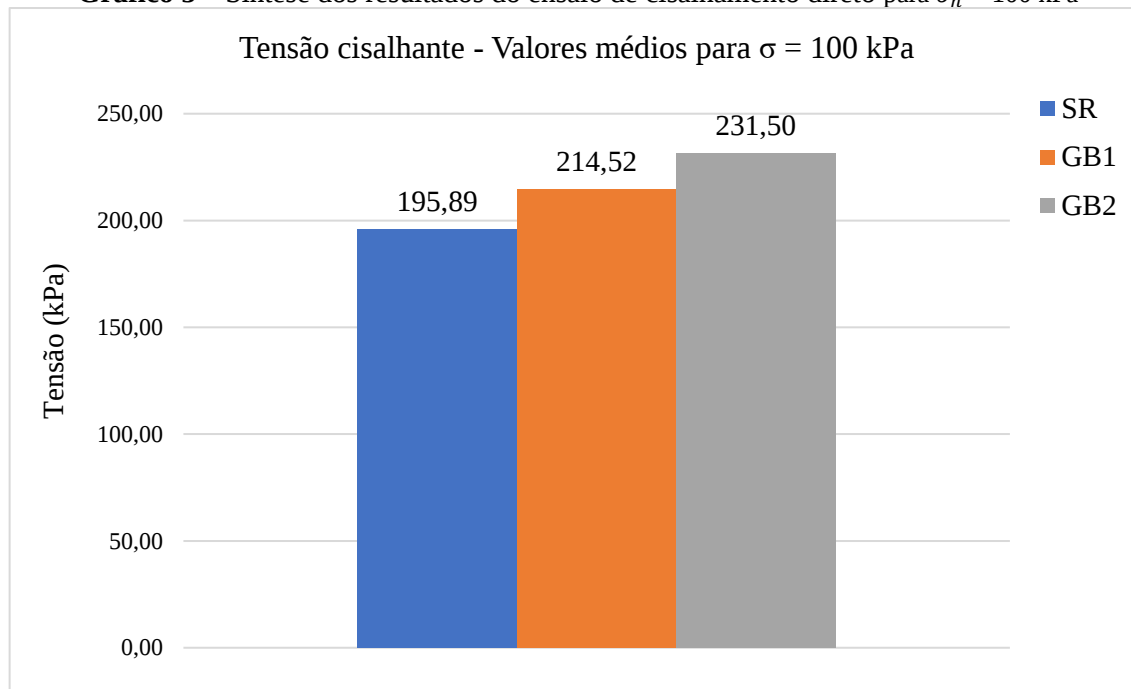
A investigação avançou com a realização de ensaios de cisalhamento direto sob uma tensão normal de 100 kPa. A Tabela 19 exhibe os valores de tensão cisalhante de ruptura para o solo de referência (SR) e para as formulações reforçadas com geogrelhas (GB1 e GB2) nesta condição de carregamento. O quadro também inclui os valores médios, o desvio-padrão e o incremento de desempenho comparado ao material não reforçado.

Tabela 19 – Resumo dos resultados do Cisalhamento Direto para $\sigma_n = 100$ kPa

Identificação da Amostra	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa) para $\sigma_n = 100$ kPa		
	SR	GB1	GB2
#8	216,74	210,51	233,32
#9	187,69	205,27	229,86
#10	198,53	202,97	239,95
#11	189,2	214,18	230,49
#12	183,83	218,63	234,74
#13	207,86	224,46	216,45
#14	187,36	225,65	235,69
Média	195,89	214,52	231,50
Desvio-Padrão	12,35	8,90	7,45
Coefficiente de Variação	0,06	0,04	0,03
% de acréscimo de desempenho médio em relação ao SR	-	9,51%	18,18%

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Para facilitar a comparação do comportamento médio dos materiais sob tensão normal de 100 kPa, o Gráfico 5 apresenta visualmente os valores médios de resistência ao cisalhamento. A representação gráfica evidencia as diferenças entre os três sistemas analisados: o solo natural (SR) e os dois compósitos reforçados (GB1 e GB2).

Gráfico 5 – Síntese dos resultados do ensaio de cisalhamento direto para $\sigma_n = 100$ kPa

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Complementando a análise, realizou-se um teste ANOVA unifatorial para avaliar a significância estatística das diferenças observadas nas médias de resistência ao cisalhamento entre os grupos (SR, GB1 e GB2) sob 100 kPa. Este procedimento testou a hipótese nula de igualdade entre as médias dos grupos versus a hipótese alternativa de diferença em pelo menos um dos casos. Os resultados, constantes na Tabela 20, incluem os parâmetros essenciais para inferência estatística: soma dos quadrados, graus de liberdade, estatística F e valor-p correspondente.

Tabela 20 – ANOVA fator único - Cisalhamento Direto para $\sigma_n = 100$ kPa

Fonte da variação	Soma dos quadrados	gl	F	valor – P	F _{cri}
Entre grupos	4442,18	2	23,2050	0,0000	2,6239
Dentro dos grupos	1722,89	18			
Total	6165,07	20			

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tendo a ANOVA detectado diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos grupos ($F > F_{crit}$), procedeu-se à aplicação do teste de Tukey para comparações múltiplas, visando identificar as diferenças específicas entre pares. Mantendo o nível de significância em $\alpha = 0,10$, os resultados obtidos para os ensaios sob 100 kPa encontram-se detalhados na Tabela 21.

Tabela 21 – Teste Tukey - Cisalhamento Direto para $\sigma_n = 100$ kPa

Comparação	Diferença entre Médias	Valor-p Ajustado	Significativo a $\alpha=0.10$?
SR x GB1	17,12	0,0096	Sim
SR x GB2	32,86	0,0001	Sim
GB1 x GB2	15,74	0,0155	Sim

Fonte: Elaboração Própria (2025)

A análise de Tukey ($\alpha = 0,10$) demonstrou diferenças significativas em todas as comparações pareadas. Os reforços GB1 e GB2 apresentaram ganhos significativos em relação ao SR, com incrementos médios de 17,12 kPa ($p = 0,0096$) e 32,86 kPa ($p = 0,0001$), respectivamente. Particularmente relevante foi a superioridade estatística do GB2 sobre o GB1, com diferença de 15,74 kPa ($p = 0,0155$) sob 100 kPa de tensão normal.

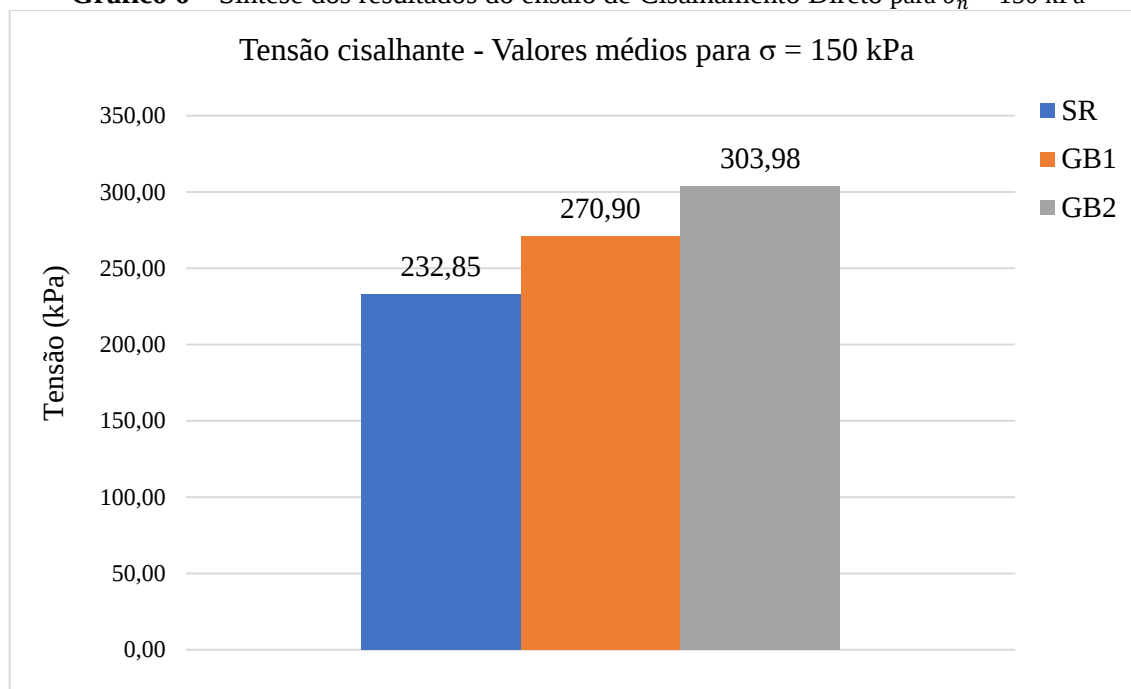
O estudo foi estendido para 150 kPa de tensão normal, com a Tabela 22 sintetizando três aspectos fundamentais: a resistência ao cisalhamento de cada material (SR, GB1, GB2), as estatísticas descritivas (médias e variabilidade) e os ganhos de desempenho em relação à condição não reforçada.

Tabela 22 – Resumo dos resultados do Cisalhamento Direto para $\sigma_n = 150$ kPa

Identificação da Amostra	$\tau_{máx}$ (kPa) para $\sigma_n = 150$ kPa		
	SR	GB1	GB2
#15	210,61	281,77	291,13
#16	227,49	278,04	300,12
#17	256,31	269,19	305,79
#18	228,36	276,9	308,04
#19	241,78	263,04	309,79
#20	230,6	265,98	311,53
#21	234,77	261,37	301,46
Média	232,85	270,90	303,98
Desvio-Padrão	14,04	8,01	7,03
Coefficiente de Variação	0,06	0,03	0,02
% de acréscimo de desempenho médio em relação ao SR	-	16,34%	30,55%

Fonte: Elaboração Própria (2025)

O Gráfico 6 apresenta de forma comparativa os valores médios da resistência ao cisalhamento das três modelos sob a tensão de 150 kPa. A visualização gráfica permite identificar claramente a hierarquia de desempenho, destacando-se a superioridade do compósito GB2 em relação às demais configurações.

Gráfico 6 – Síntese dos resultados do ensaio de Cisalhamento Direto para $\sigma_n = 150$ kPa

Fonte: Elaboração Própria (2025)

A significância estatística das diferenças observadas entre os grupos (SR, GB1, GB2) sob 150 kPa foi avaliada mediante análise ANOVA. Os resultados (Tabela 23) revelaram uma

diferença altamente significativa ($F = 85,64 > F_{crit} = 2,62$), justificando a aplicação na sequência do teste de Tukey, cujos resultados detalhados constam na Tabela 24.

Tabela 23 – ANOVA fator único - Cisalhamento Direto para $\sigma_n = 150$ kPa

Fonte da variação	Soma dos quadrados	gl	F	valor – P	F _{cri}
Entre grupos	17739,14	2	85,6443	0,0000	2,6239
Dentro dos grupos	1864,13	18			
Total	19603,27	20			

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 24 – Teste Tukey - Cisalhamento Direto para $\sigma_n = 150$ kPa

Comparação	Diferença entre Médias	Valor-p Ajustado	Significativo a $\alpha=0.10$?
SR x GB1	- 38,06	0,0000	Sim
SR x GB2	- 71,14	0,0000	Sim
GB1 x GB2	33,07	0,0000	Sim

Fonte: Elaboração Própria (2025)

O teste de Tukey ($\alpha = 0,10$) detectou diferenças significativas em todas as comparações pareadas (valor-p ajustado = 0 para todos os pares). Especificamente: ambos os compósitos reforçados (GB1 e GB2) superaram significativamente o SR e o sistema GB2 apresentou desempenho superior ao GB1.

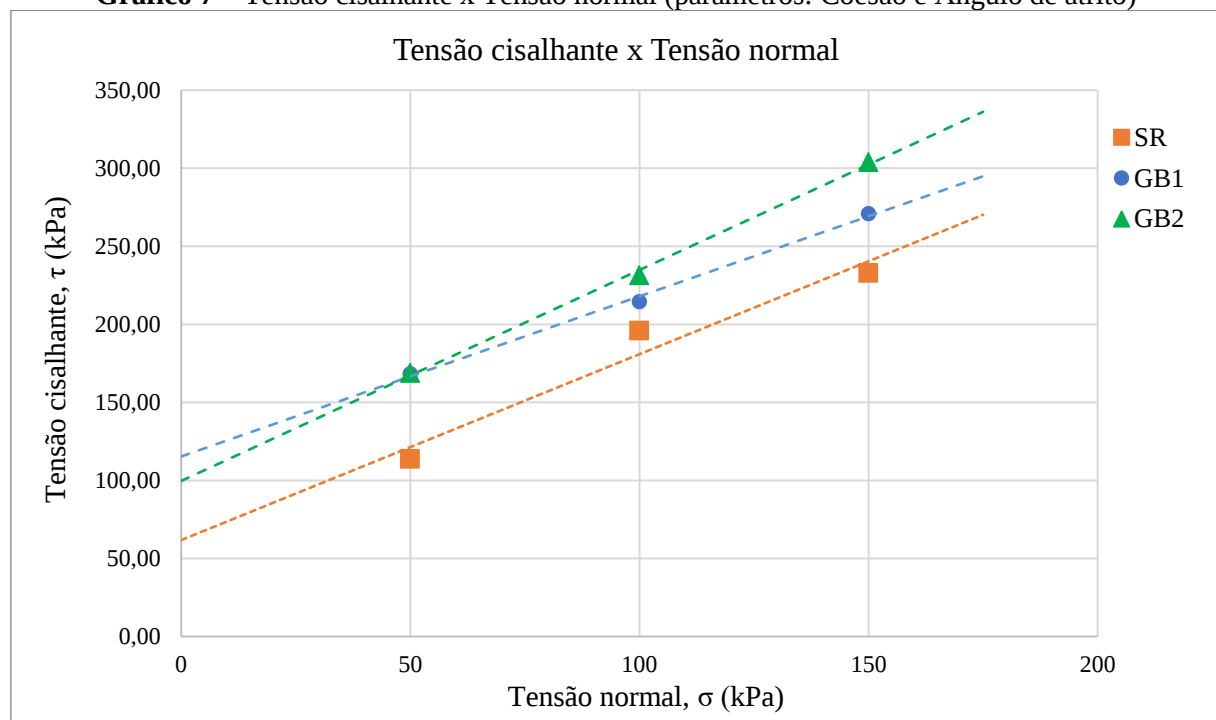
4.5.2 Análise Conjunta

A avaliação integrada dos ensaios de cisalhamento direto demonstrou que os compósitos GB1 e GB2 apresentaram desempenho significativamente superior ao solo natural (SR) em todas as condições de tensão analisadas (50, 100 e 150 kPa). Sob 50 kPa, ambos os reforços exibiram valores similares (GB1=168,31 kPa; GB2=168,86 kPa), representando um incremento de aproximadamente 48% em relação ao SR (113,78 kPa), sem diferença estatisticamente significativa entre si ($p>0,05$). Entretanto, à medida que a tensão normal aumentou, tem-se uma clara distinção: a 100 kPa, o GB2 (231,50 kPa) superou o GB1 (214,52 kPa) em 7,9% ($p<0,05$), vantagem que se ampliou para 12,2% a 150 kPa (GB2=303,98 kPa vs GB1=270,90 kPa, $p<0,01$). Esses resultados evidenciam que o sistema GB2 apresenta maior eficácia sob condições de elevado confinamento, sugerindo que seu mecanismo de reforço é particularmente sensível ao aumento da tensão normal, enquanto o GB1 mostra limitações progressivas em tensões mais altas.

A progressão dos valores da estatística F nos testes ANOVA - de 23,2 (100 kPa) para 85,6 (150 kPa) - confirma o aumento da diferenciação entre os grupos com a elevação da tensão normal. Paralelamente, os baixos coeficientes de variação observados, particularmente para o GB2 em tensões elevadas (0,03 a 100 kPa e 0,02 a 150 kPa), atestam a robustez dos resultados. Conclui-se que, embora ambos os sistemas de reforço apresentem eficácia, o compósito GB2 demonstra vantagem mecânica crescente e estatisticamente significativa sob maiores níveis de confinamento. Este comportamento sugere: (a) uma interação solo-reforço mais eficiente, ou (b) a ativação otimizada de seu mecanismo de reforço em condições de maior tensão.

Para consolidar a análise do comportamento de resistência ao cisalhamento Das formulações estudados, foi elaborado o Gráfico 7, que relaciona a tensão cisalhante com a tensão normal, utilizando os valores médios obtidos para cada modelo (SR, GB1 e GB2) sob tensões normais de 50, 100 e 150 kPa. Essa representação gráfica é essencial, pois mostra as envoltórias de resistência de Coulomb para cada condição. A partir dessas curvas, é possível determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento, como o ângulo de atrito interno (ϕ) e a coesão (c), fundamentais para análises geotécnicas. Além disso, o gráfico permite uma comparação visual direta da influência dos reforços GB1 e GB2 no comportamento do solo, cujos resultados estão resumidos na Tabela 25.

Gráfico 7 – Tensão cisalhante x Tensão normal (parâmetros: Coesão e Ângulo de atrito)



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 25 – Parâmetros do solo: coesão e ângulo de atrito

Parâmetro	REF	GB1	GB2
Coesão (kPa)	61,766	99,662	115,328
Ângulo de atrito (°)	45,73	49,98	53,5

Fonte: Elaboração Própria (2025)

A partir das envoltórias de resistência de Coulomb, ajustadas aos dados experimentais obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, foram determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento – coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) – para o solo de referência (REF) e para os solos reforçados com as geogrelhas GB1 e GB2. Estes parâmetros são essenciais para a caracterização geotécnica quantitativa, definindo a mobilização da resistência do material sob diferentes estados de tensão. O solo de referência (REF) apresentou uma coesão de 61,766 kPa e um ângulo de atrito interno de 45,73°. A incorporação das geogrelhas nos modelos GB1 e GB2 resultou em incrementos notáveis em ambos os parâmetros. Especificamente, para o modelo GB2, a coesão determinada foi de 115,328 kPa e o ângulo de atrito interno alcançou 53,5°. De forma análoga, o modelo GB1 registrou uma coesão de 99,662 kPa e um ângulo de atrito interno de 49,98°.

Nesse contexto, os resultados demonstraram que a incorporação das geogrelhas aumentou tanto a parcela de resistência independente da tensão (coesão) quanto a dependente do confinamento (atrito). O significativo incremento da coesão, especialmente no compósito GB2, indica uma melhoria na integridade do sistema solo-reforço, proporcionando maior resistência mesmo sob baixas tensões normais. Além disso, a elevação do ângulo de atrito interno nos solos reforçados sugere um aprimoramento do intertravamento entre as partículas do solo e a geogrelha, bem como uma mudança no mecanismo de ruptura, que passa a mobilizar maior contribuição friccional sob tensões normais mais altas. Em comparação ao GB1, o modelo GB2 apresentou valores superiores tanto para coesão quanto para ângulo de atrito, indicando, conforme o critério de Coulomb, um desempenho globalmente superior na resistência ao cisalhamento. Essa caracterização paramétrica é essencial para a aplicação desses materiais em modelos constitutivos e análises de estabilidade em projetos geotécnicos.

A melhoria no desempenho proporcionada pela geogrelha pode ser explicada por estudos que associam a eficiência da interface solo-reforço ao aumento da adesão entre os materiais (Krishna e Latha, 2024). Para isso, é fundamental definir adequadamente as dimensões da geogrelha, especialmente em relação ao tamanho das partículas do solo. Conforme Venkateswarlu, Saikumar e Latha (2023), a razão ideal entre a abertura da geogrelha biaxial e o diâmetro das partículas deve variar entre 2 e 11,29 – faixa respeitada neste estudo. -

Sob esta perspectiva, a geogrelha com maior abertura apresentou resultados mais significativos em comparação ao solo não reforçado, diferentemente de pesquisas com geogrelhas 3D impressas em PLA, nas quais o aumento da abertura levou à redução de desempenho (Abdi, Tabarsa e Haghgouy, 2023). Essa divergência pode estar relacionada a outros fatores, como espessura, geometria das nervuras e, principalmente, o material de fabricação.

Quanto ao formato da geogrelha, Venkateswarlu, Saikumar e Latha (2023) destacam que a geometria das aberturas influencia significativamente a resistência ao cisalhamento, indicando a necessidade de estudos adicionais para explorar diferentes configurações de aberturas e seus efeitos no comportamento do solo reforçado.

4.6 Módulo de Resiliência

Esta seção apresenta os resultados do Módulo de Resiliência (MR), parâmetro fundamental para a engenharia de pavimentos, pois quantifica a rigidez elástica dos materiais submetidos a carregamentos cíclicos, simulando as solicitações impostas pelo tráfego (DNIT, 2018). Os valores obtidos para o solo de referência (SR) e para os compósitos reforçados com geogrelha (GB1, GB2) estão consolidados na Tabela 26, incluindo: as médias representativas, análise de variabilidade, e percentuais de acréscimo de desempenho em relação ao solo não reforçado.

Tabela 26 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência			
Identificação da Amostra	MR (MPa)		
	SR	GB1	GB2
#1	*	*	27,42
#2	22,39	22,79	24,81
#3	18,55	29,93	27,73
#4	27,64	24,07	29,05
#5	25,41	22,50	19,88
#6	23,80	22,50	*
Média	23,56	24,36	25,78
Desvio-Padrão	3,41	3,18	3,64
Coefficiente de Variação	0,14	0,13	0,14
% de acréscimo de desempenho médio em relação ao SR	-	3,40%	9,42%

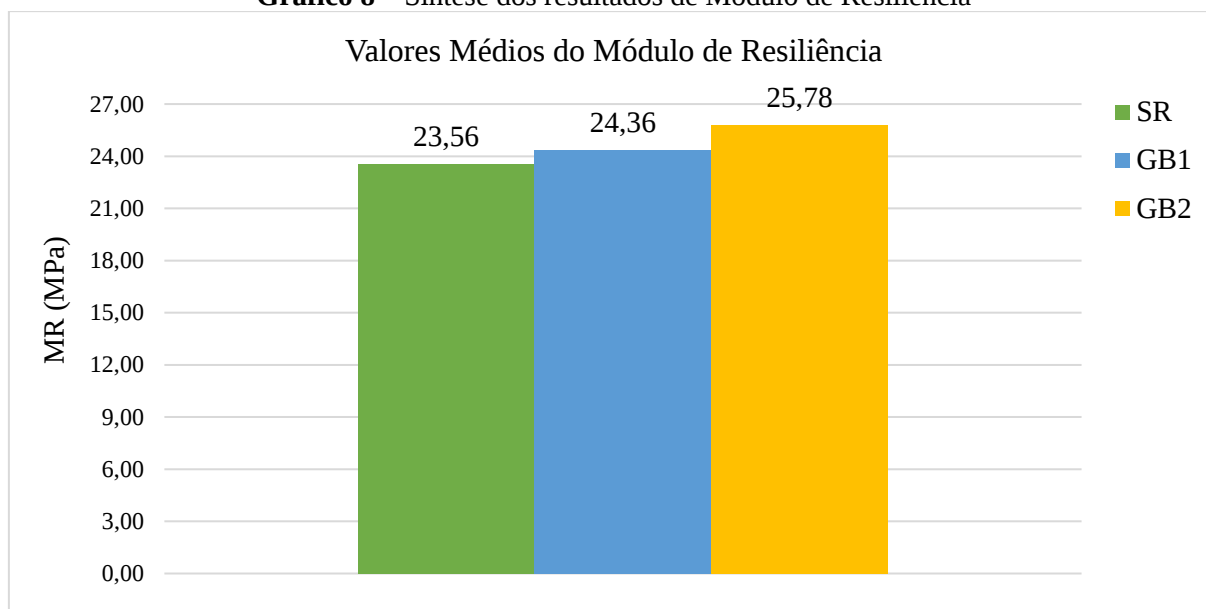
* valores desconsiderados devido à discrepância

Fonte: Elaboração Própria (2025)

A análise do Módulo de Resiliência (MR) demonstrou o efeito positivo da incorporação de geogrelhas no comportamento dos materiais sob carregamento dinâmico. O solo de referência (SR) apresentou um valor médio de MR de 23,56 MPa, enquanto os compósitos reforçados mostraram incrementos significativos: a geogrelha GB1 elevou o MR para 24,36 MPa (aumento de 3,40%), e a GB2 alcançou o melhor desempenho com 25,78 MPa (incremento de 9,42%). A consistência dos dados foi confirmada pelos coeficientes de variação similares (entre 0,13 e 0,14) para todos os materiais, indicando uma dispersão equivalente nos resultados. Esses dados evidenciam claramente a vantagem do uso de geogrelhas, particularmente da configuração GB2, para o reforço de solos em aplicações de pavimentação, com melhoria na capacidade da resposta elástica sob cargas dinâmicas.

Tais resultados estão sintetizados no Gráfico 8, que permite uma visualização comparativa do desempenho dos diferentes materiais. Para avaliar a significância estatística dos incrementos observados no Módulo de Resiliência, realizou-se uma análise ANOVA unifatorial, cujos resultados estão detalhados na Tabela 27. Este procedimento estatístico objetivou verificar as diferenças de desempenho entre os materiais (SR, GB1 e GB2) e se representam variações significativas ou estão dentro da margem de variabilidade experimental.

Gráfico 8 – Síntese dos resultados de Módulo de Resiliência



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 27 – ANOVA fator único: Módulo de Resiliência

Fonte da variação	Soma dos quadrados	gl	F	valor – P	F_{cri}
Entre grupos	12,64	2	0,5416	0,5954	2,8068
Dentro dos grupos	140,00	12			
Total	152,64	14			

Fonte: Elaboração Própria (2025)

A análise ANOVA, conduzida com nível de significância $\alpha = 0,10$, revelou que as diferenças observadas nos valores de MR não são estatisticamente significativas. Esta conclusão é sustentada por dois indicadores concordantes: o valor-P de 0,5954 (superior ao nível de significância adotado) e a estatística F calculada (0,5416) inferior ao F crítico (2,8068). Tais resultados demonstram que as variações nas médias de MR entre os grupos SR, GB1 e GB2 podem ser atribuídas à variabilidade aleatória dos dados. Diante da ausência de significância estatística global, optou-se por não proceder com testes de comparações múltiplas (como o teste de Tukey), uma vez que não se justifica investigar diferenças específicas entre pares de médias quando a análise global não revelou padrões significativos.

Os resultados desta pesquisa corroboram as conclusões de Kaluder et al. (2022), que constatarem que a presença de geogrelhas não gera diferenças significativas no módulo de resiliência (MR). Essa similaridade de comportamento foi observada mesmo com a utilização de duas geogrelhas distribuídas no corpo de prova, reforçando que esse tipo de reforço não exerce influência relevante sobre o MR. Tal comportamento pode ser explicado pelo próprio conceito do módulo de resiliência, que está associado à capacidade de absorção de energia sob deformação elástica (Callister, 2016). Como o volume ocupado pela geogrelha é relativamente pequeno em relação à matriz do solo, sua contribuição para essa absorção de energia torna-se desprezível.

Adicionalmente, considerando a escassa literatura disponível sobre a interação entre geogrelhas impressas em 3D e o módulo de resiliência, os resultados obtidos reforçam a conclusão de que a presença desses reforços não promove melhorias significativas no MR dos corpos de prova. Essa constatação é relevante para orientar futuros projetos de pesquisa e aplicações práticas, destacando que, embora as geogrelhas possam melhorar outros parâmetros geotécnicos (como resistência ao cisalhamento), seu efeito no módulo de resiliência é limitado

4.6.1 Modelos Constitutivos

Dada a natureza tensão-dependente do MR, particularmente em materiais granulares e solos finos (foco desta dissertação), sua caracterização integral requer análises sob múltiplas combinações de tensões confinantes e desviadoras. Para representar matematicamente essa relação complexa e viabilizar a previsão do MR em distintos cenários de carregamento, utilizam-se modelos constitutivos. Dentre esses, destacam-se o modelo composto (comumente denominado modelo de tensão global) e as formulações universais (Medina e Motta, 2005).

O Modelo Composto, expresso pela equação $MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_t^{k_3}$, caracteriza o material em função de duas variáveis tensoriais principais: a tensão confinante efetiva (σ_3) e a tensão desviadora cíclica (σ_t). Os coeficientes k_1 , k_2 e k_3 , determinados por regressão a partir de ensaios triaxiais de carga repetida (MR), representam as propriedades intrínsecas do material. Este modelo descreve o comportamento não linear da rigidez em materiais de pavimentação, em que o expoente k_2 reflete o efeito de endurecimento associado ao aumento da tensão confinante, enquanto k_3 quantifica a influência da tensão desviadora – a qual pode resultar tanto em aumento quanto em redução da rigidez, dependendo das características do material e da magnitude do carregamento. Sua aplicação é fundamental para prever a resposta da rigidez diante dos diferentes estados de tensão presentes nas camadas de pavimento (Bonzanini, 2011).

Em contrapartida, os modelos universais, como o proposto pelo Guia de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos (MEPDG), expresso por $MR = K_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{K_2} (\sigma_d p_a)^{K_3}$, proporcionam uma representação mais abrangente ao considerar simultaneamente a tensão global (θ) e a tensão desviadora (σ_d). Essas formulações são essenciais para uma caracterização mais precisa da resposta não linear dos materiais, pois incorporam tanto os efeitos de endurecimento causados pelo confinamento quanto os possíveis amolecimentos decorrentes de tensões desviadoras excessivas. Desta forma, tais modelos tornam-se instrumentos indispensáveis para o dimensionamento e avaliações de desempenho nos pavimentos (Pelisson et al., 2015).

Ambas as abordagens de modelagem têm como objetivo final fornecer valores representativos do Módulo de Resiliência para as distintas condições de carregamento e profundidade encontradas em estruturas dos pavimentos ao longo de sua vida útil. Nesta pesquisa, a calibração dos parâmetros dos modelos de MR foi realizada mediante análises de regressão. Para tal procedimento, empregou-se o software especializado LabFit, cujos resultados para o Modelo Composto encontram-se detalhados nas Tabelas 28, 29 e 30, correspondentes aos materiais SR, GB1 e GB2, respectivamente.

Tabela 28 – Regressão pelo LabFit para o Solo de Referência - Modelo Composto

Identificação da Amostra	MR	Modelo Composto			
		R ²	k ₁	k ₂	k ₃
#1	*	0,57	453,90	1,30	0,13
#2	22,39	0,97	557,20	-0,11	0,43
#3	18,55	0,73	243,56	-0,29	0,51
#4	27,64	0,77	453,56	-0,41	0,21
#5	25,41	0,63	174,19	-0,29	0,20
#6	23,80	0,67	314,93	-0,18	0,15

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 29 – Regressão pelo LabFit para o GB1- Modelo Composto

Identificação da Amostra	MR	Modelo Composto			
		R ²	k ₁	k ₂	k ₃
#1	*	0,91	317,76	0,31	-0,42
#2	22,79	0,67	327,85	-0,14	0,35
#3	29,93	0,70	440,60	0,40	0,11
#4	24,07	0,99	592,92	0,29	0,38
#5	22,50	0,99	600,63	0,03	0,46
#6	22,50	0,99	702,30	-0,34	0,57

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 30 – Regressão pelo LabFit para o GB2 - Modelo Composto

Identificação da Amostra	MR	Modelo Composto			
		R ²	k ₁	k ₂	k ₃
#1	27,42	0,31	295,07	0,95	-0,78
#2	24,81	0,48	259,28	1,03	-1,13
#3	27,73	0,86	513,90	0,76	0,17
#4	29,05	0,91	466,12	-0,01	0,21
#5	19,88	0,83	426,69	0,51	0,27
#6	*	0,79	0,00	32,55	-18,51

Fonte: Elaboração Própria (2025)

No Modelo Composto, o coeficiente k_1 atua como fator de escala para o MR, representando a magnitude base da rigidez. Os resultados demonstram que os valores para GB1 são consistentemente mais elevados em comparação com os demais materiais, embora a análise de variância tenha indicado que esta diferença não é estatisticamente significativa. O expoente k_2 expressa a dependência do MR em relação à tensão confinante (σ_3), onde valores positivos - como os observados neste estudo - indicam que o material apresenta endurecimento progressivo com o aumento da tensão confinante, comportamento característico de materiais granulares. De forma análoga, o expoente k_3 descreve a influência da tensão desviadora (σ_d) no MR, sendo que para muitos materiais granulares este parâmetro assume valores negativos, indicando redução da rigidez sob tensões desviadoras crescentes, embora alguns materiais possam apresentar

comportamento inverso (k_3 positivo), conforme documentado por Bonzanini (2011). Os resultados obtidos para o Modelo Universal por meio do software LabFit encontram-se apresentados nas Tabelas 31 (SR), 32 (GB1) e 33 (GB2), mostrando tendências similares às observadas no Modelo Composto.

Tabela 31 – Regressão pelo LabFit para o Solo de Referência - Modelo Universal

Identificação da Amostra	MR	Modelo Universal			
		R ²	k1	k2	k3
#1	*	0,58	1718,21	0,17	2,82
#2	22,39	0,99	1308,76	0,22	1,09
#3	18,55	0,89	1264,98	-0,47	1,89
#4	27,64	0,94	2039,89	-0,33	0,82
#5	25,41	0,78	2413,13	-0,47	1,21
#6	23,80	0,83	1937,94	-0,47	0,55

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 32 – Regressão pelo LabFit para o GB1 - Modelo Universal

Identificação da Amostra	MR	Modelo Universal			
		R ²	k1	k2	k3
#1	*	0,86	5175,09	0,31	-1,69
#2	22,79	0,89	5846,51	0,36	-1,87
#3	29,93	0,86	5355,73	0,34	-1,80
#4	24,07	0,88	5929,06	0,38	-1,95
#5	22,50	0,88	6082,63	0,37	-1,96
#6	22,50	0,86	5960,23	0,37	-1,90

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 33 – Regressão pelo LabFit para o GB2 - Modelo Universal

Identificação da Amostra	MR	Modelo Universal			
		R ²	k1	k2	k3
#1	27,42	0,74	2865,94	0,17	-5,92
#2	24,81	0,55	2635,94	0,17	-6,08
#3	27,73	0,93	2020,47	0,94	5,20
#4	29,05	0,98	2191,60	0,03	6,23
#5	19,88	0,92	1313,18	0,53	8,33
#6	*	0,99	91,92	0,50	1,37

Fonte: Elaboração Própria (2025)

No Modelo Universal, o parâmetro k_1 atua como fator de escala da rigidez, com os resultados indicando maior magnitude para o material GB2 em relação aos demais. O coeficiente k_2 expressa a sensibilidade do MR às variações da tensão confinante/global, sendo que valores positivos - como os observados neste estudo - caracterizam o típico comportamento de endurecimento sob aumento de confinamento. Já o parâmetro k_3 descreve a resposta à tensão

desviadora, onde valores negativos (frequentes em materiais granulares) denotam redução da rigidez, enquanto valores positivos indicam o efeito contrário de endurecimento adicional.

A avaliação comparativa dos modelos foi realizada mediante análise do coeficiente de determinação (R^2) para cada amostra, cujos resultados foram sistematizados nas Tabelas 34 e 35, organizadas conforme o tipo de modelo empregado.

Tabela 34 – Coeficientes de determinação (R^2) obtidos no modelo composto

Identificação da amostra	R^2		
	SR	GB1	GB2
#1	-	-	0,31
#2	0,97	0,67	0,48
#3	0,73	0,70	0,86
#4	0,77	0,99	0,91
#5	0,63	0,99	0,83
#6	0,67	0,99	-

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Tabela 35 – Coeficientes de determinação (R^2) obtidos no modelo universal

Identificação da amostra	R^2		
	SR	GB1	GB2
#1	-	-	0,74
#2	0,99	0,89	0,55
#3	0,89	0,86	0,93
#4	0,94	0,88	0,98
#5	0,78	0,88	0,92
#6	0,83	0,86	-

Fonte: Elaboração Própria (2025)

Na análise comparativa dos modelos, observou-se que o Modelo Universal apresentou coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,70 em 14 dos 15 casos analisados, demonstrando excelente aderência aos dados experimentais. Em contraste, o Modelo Composto alcançou esse patamar em apenas 9 das 15 avaliações. Esses resultados evidenciam que o Modelo Universal se mostrou estatisticamente mais consistente e, por conseguinte, mais adequado para representar o comportamento dos materiais estudados nesta investigação, configurando-se como a abordagem mais assertiva para os objetivos desta Dissertação.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os ensaios de compressão simples e de resistência à tração por compressão diametral indicaram que a geogrelha GB1 foi eficaz no aumento da resistência à compressão do solo, enquanto a GB2 não apresentou diferença significativa. No entanto, nenhuma das duas influenciou a resistência à tração, sugerindo que seus efeitos positivos se restringem, principalmente, a carregamentos compressivos, especialmente no caso da GB1, cuja abertura é menor.

Nos ensaios de cisalhamento direto, ambas as geogrelhas melhoraram a resistência do solo em todos os níveis de tensão aplicados (50 kPa, 100 kPa e 150 kPa), resultando em ganhos tanto na coesão quanto no ângulo de atrito interno. A GB2 apresentou desempenho superior, sobretudo sob tensões mais elevadas (100 kPa e 150 kPa), mostrando-se mais eficiente que a GB1 nessas condições. Esses resultados indicam que a escolha do tipo de geogrelha deve considerar a faixa de tensões esperada no projeto: enquanto ambas são eficazes sob tensões moderadas (até 100 kPa), a GB2 é mais indicada para aplicações com cargas elevadas.

Quanto ao Módulo de Resiliência, a adição das geogrelhas não promoveu melhorias significativas, possivelmente devido à baixa proporção de reforço em relação à massa total da amostra. Esse resultado aponta para a necessidade de investigações futuras sobre o impacto da espessura das geogrelhas no desempenho resiliente. Ademais, este estudo contribui para uma área ainda pouco explorada, como a interação entre reforços tridimensionais e propriedades resilientes, abrindo caminho para pesquisas com diferentes geometrias e materiais.

Por fim, este trabalho se destaca por abordar o uso de geogrelhas impressas em 3D em solos finos, contrastando com a maioria dos estudos da literatura, que priorizam solos granulares. Para o avanço nessa linha de pesquisa, recomenda-se investigar o uso de outros polímeros (inclusive aqueles contendo resíduos), diferentes tipos de solo, realizar ensaios triaxiais, testar espessuras e formatos variados de abertura das geogrelhas, além de aplicar modelagem numérica para simular o comportamento do solo reforçado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDI, Mahmood Reza; TABARSA, Alireza; HAGHGOUY, Parastou. Evaluation of Soil–Geometrically Modified Geogrid Interaction in Direct Shear Mode. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 9, n. 5, p. 60, 2023.
- AASHTO. **T 307-99**: Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. 2021.
- ABNT. **NBR 6457**: Solo – Amostras de Solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro. 2024.
- ABNT. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 2016a.
- ABNT. **NBR 6502**: Solos e Rochas - Terminologia. Rio de Janeiro. 2022a.
- ABNT. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 2016b.
- ABNT. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro. 2025a.
- ABNT. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro. 2025b.
- ABNT. **NBR 12770**: Solo - Determinação da Resistência à Compressão Não Confinada de Solo Coesivo. Rio de Janeiro. 2022b.
- ABNT. **NBR 17212**: Solos - Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm. Rio de Janeiro. 2025c.
- ABNT. **NBR ISO 10318**: Geossintéticos - Parte 1: Termos e Definições. Rio de Janeiro. 2021.
- ABNT. **NBR ISO 12957**: Geossintéticos – Determinação das características de atrito - Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto. Rio de Janeiro. 2022c.
- ANACLETO, Bruno. Como é feito o pavimento? **Triunfo**. 04 de jul. de 2021. Disponível em: <<https://duplicacaobr153sp.com.br/como-e-feito-o-pavimento/>>. Acesso em 27 de junho de 2024.
- ASTM. **D422**: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. 2007.
- ASTM. **D2487**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). 2025.

ASTM. **D3080/D3080M**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. 2023a.

ASTM. **D3282**: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. 2024.

ASTM. **D3967**: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens with Flat Loading Platens. 2023b.

AHMED, Sheikh Sharif; MARTINEZ, Alejandro. Triaxial compression behavior of 3D printed and natural sands. **Granular Matter**, v. 23, p. 1-21, 2021.

BONZANINI, João Augusto Fraga. **Estudo dos efeitos do tamanho de corpos-de-prova no módulo de resiliência de quatro solos**. 2011.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. 274p.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais**. 2016.

CHIUSOLI, Alberto. 3D printed earth wall with embedded staircase. **WASP**, 16 de mar. de 2019. Disponível em :< <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-wall/>>. Acesso em: 01 de jun. de 2024.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília-DF, 2019.

COLPANI, Janaína. Uma história de sucesso – descubra como surgiu a impressora 3D. **Printway**, 30 de jul. de 2018. Disponível em: <<https://printwayy.com/blog/uma-historia-de-sucesso-descubra-como-surgiu-a-impressora-3d/>>. Acesso em: 17 de maio de 2024.

CRESWELL, John W.; CRESWELL, J. David. **Projeto de Pesquisa: Métodos Qualitativo, Quantitativo e Misto**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021.

CUNHA, F. M. B. G. **Pavimentação: conceitos básicos e aplicação**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2020.

DA ROCHA, Licia Liz Bastos Garcês et al. Avaliação do Comportamento Mecânico de Solo Típico de Manaus/AM Estabilizado com Resíduo de Louça Sanitária./Evaluation of the

Mechanical Behavior of Typical Soil in Manaus/AM Stabilized with Waste Sanitary Ware. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 22617-22627, 2020.

DE SIMAS, Lídici Pomin et al. **Uso de Passivos Ambientais para a Pavimentação de Vias Urbanas em Manaus**, AM. 2013.

DNIT – **IPR 134/2018**: Pavimentação – solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Versão corrigida 2023. Rio de Janeiro, 2018.

DNIT – **IPR 259/2023**: Solos - Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura - Classificação. Rio de Janeiro, 2023.

FERREIRA, Letícia Pena et al. **Estabilização de solo argiloso com resíduo de rochas provenientes do Distrito de Moura** (Barcelos–AM). 2019.

FILAMENT Properties Table. **Simplify 3D**. 2024. Disponível em: <<https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/>>. Acesso em: 12 de junho de 2024.

HAEUSLER, Matthias et al. Furniture design using custom-optimised structural nodes. In: Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia 2017-Protocols, Flows and Glitches. **The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia**, 2017. p. 841-851.

HUSS, Fábio de Oliveira. **Estabilização Química de Solos para fins Rodoviários**. 2018.

IMPRESSÃO 3D FDM: confira o guia completo! **3DLAB**, 26 de set. de 2023. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/impresao-3d-fdm-confira-o-guia-completo/>>. Acesso em: 17 de maio de 2024.

KALUDER, J. et al. Resilient modulus of crushed stone material reinforced with geogrids. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **IOP Publishing**, 2022. p. 012011.

LI, Yingzhen et al. Geotechnical properties of 3D-printed transparent granular soil. **Acta Geotechnica**, v. 16, p. 1789-1800, 2021.

LIMA, Rodrigo de Oliveira; NUVOLONI, Fernando Mestriner; OLIVEIRA, Samuel de Assis. **Análise de Dados Experimentais e Verificação dos Pressupostos da ANOVA – Uma**

Abordagem Prática Utilizando o Software R. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 2176-5095; 504). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1137716/1/DOCUMENTOS-504.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica.** 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MEDINA, J. MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos.** 2 ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005, 570 p

OLIVEIRA, Gabriel Marchi de. **Comportamento de Camadas de Agregado Reforçadas na Base com Geogrelhas.** Tese de (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade da Beira Interior. 2023. Disponível em: < <https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/13420/1/TD.Gabriel%20Oliveira.pdf> >. Acesso em: 18 de maio de 2024.

OLIVEIRA, Mariane Sisdelli de. **Avaliação do uso de reforço geossintético em pavimentos flexíveis.** 2016. xii, 43 f., il. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: < https://bdm.unb.br/bitstream/10483/17066/1/2016_MarianeSisdelliDeOliveira_tcc.pdf >. Acesso em: 20 de maio de 2024.

OZELIM, Luan C. de SM; CAVALCANTE, André LB. Combining microtomography, 3D printing, and numerical simulations to study scale effects on the permeability of porous media. **International Journal of Geomechanics**, v. 19, n. 2, p. 04018194, 2019.

PELISSON, Nayara Donelli et al. Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis. **Journal of Transport Literature**, v. 9, p. 20-24, 2015.

PRINTIT3D. Impressão 3D FDM vs SLA - Vantagens e desvantagens de cada um. **Print It 3D**, 3 de jan. de 2021. Disponível em: < <https://www.printit3d.com.br/post/impress%C3%A3o-3d-fdm-vs-sla-vantagens-e-desvantagens-de-cada-um> >. Acesso em: 25 de maio de 2024.

SIEIRA, Ana Cristina Castro Fontenla. **Estudo experimental dos mecanismos de interação solo-geogrelha.** 2003.

SOARES, Anna Beatriz Barbosa de Aragão. **Uso de resíduos em pavimentação rodoviária**. 2022.

SONG, Leibo et al. Feasibility investigation of 3D printing technology for geotechnical physical models: study of tunnels. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 51, p. 2617-2637, 2018.

SOUZA, P. C. **Caracterização de solos para fins de engenharia**. 2. ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2018.

SREELEKSHMY, R.; SASIKUMAR, Aswathy. Soil reinforcement using 3D printed honeycomb structures. **IJRTI**. Vol 8. 2023

TESTE de Tukey para Comparações Múltiplas. **Statplace**, 2021. Disponível em: <https://statplace.com.br/blog/comparacoes-multiplas-teste-de-tukey/>. Acesso em: 4 abr. 2025.

TESTE Post Hoc ANOVA: Aprenda a analisar conjuntos de dados. **Mind the Graph**, 2024. Disponível em: <https://mindthegraph.com/blog/pt/teste-post-hoc-anova/>. Acesso em: 4 abr. 2025.

TOLEDO, Maria Cristina Motta de; OLIVEIRA, Sonia Maria Barros de; MELFI, Adolpho José. **Da rocha ao solo: intemperismo e pedogênese**. Decifrando a Terra. Tradução . São Paulo: Editora Nacional, 2009.

VENKATESWARLU, Hasthi; LATHA, G. Madhavi. Unveiling the reinforcement benefits of innovative textured geogrids. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 53, n. 1, p. 21-40, 2025.

VENKATESWARLU, Hasthi; SAIKUMAR, Allam; LATHA, G. Madhavi. Sand-geogrid interfacial shear response revisited through additive manufacturing. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 51, n. 4, p. 95-107, 2023.

VERTEMATTI, José Carlos. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2ª ed. Blucher. 2015

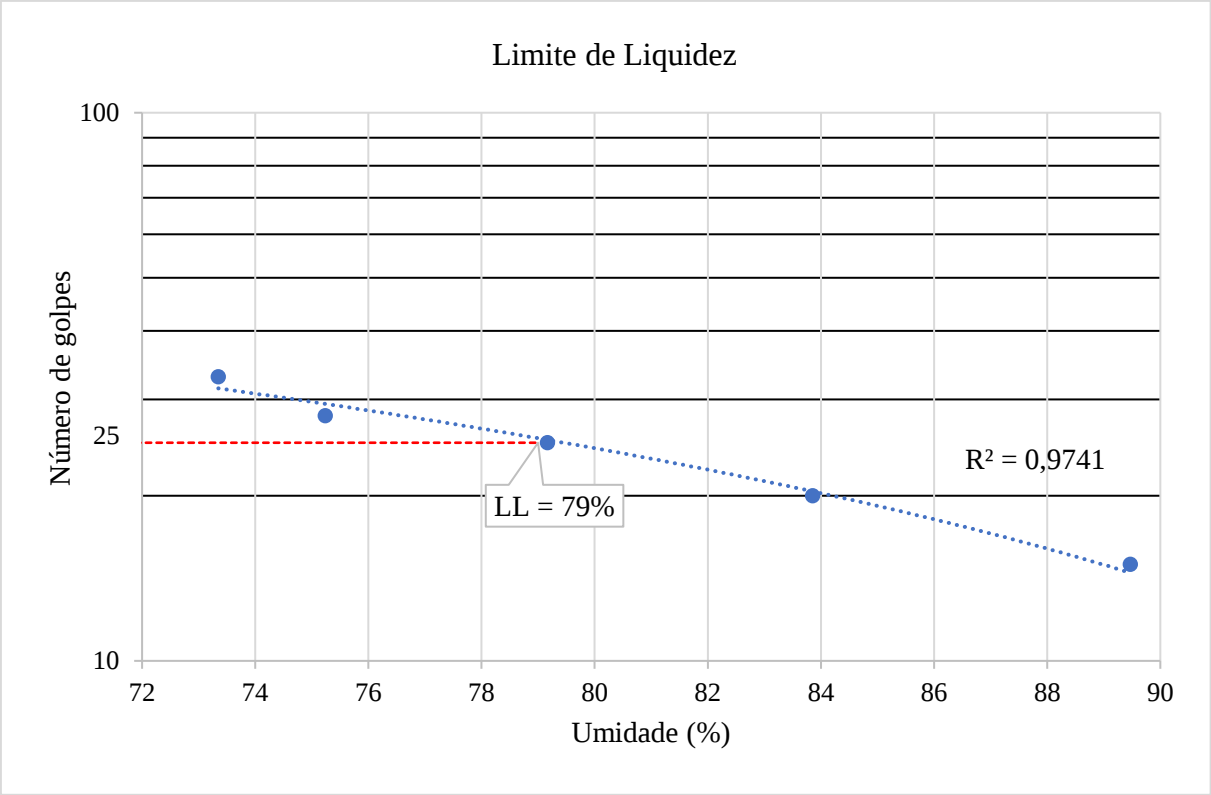
WISHBOX. Conheça Chuck Hull: o criador da impressora 3D. **Wishbox**, 16 de maio de 2016. Disponível em: <<https://www.wishbox.net.br/blog/chuck-hull/>>. Acesso em: 17 de maio de 2024.

WISHBOX. Estereolitografia: Como funciona uma impressora 3D SLA?. **Wishbox**. 26 de ago de 2020. Disponível em: <<https://www.wishbox.net.br/blog/estereolitografia/>>. Acesso em: 17 de maio de 2024.

ZHANG, Jiong et al. Development and test of geogrid with distributed deformation monitoring function. **Materials**, v. 17, n. 2, p. 331, 2024.

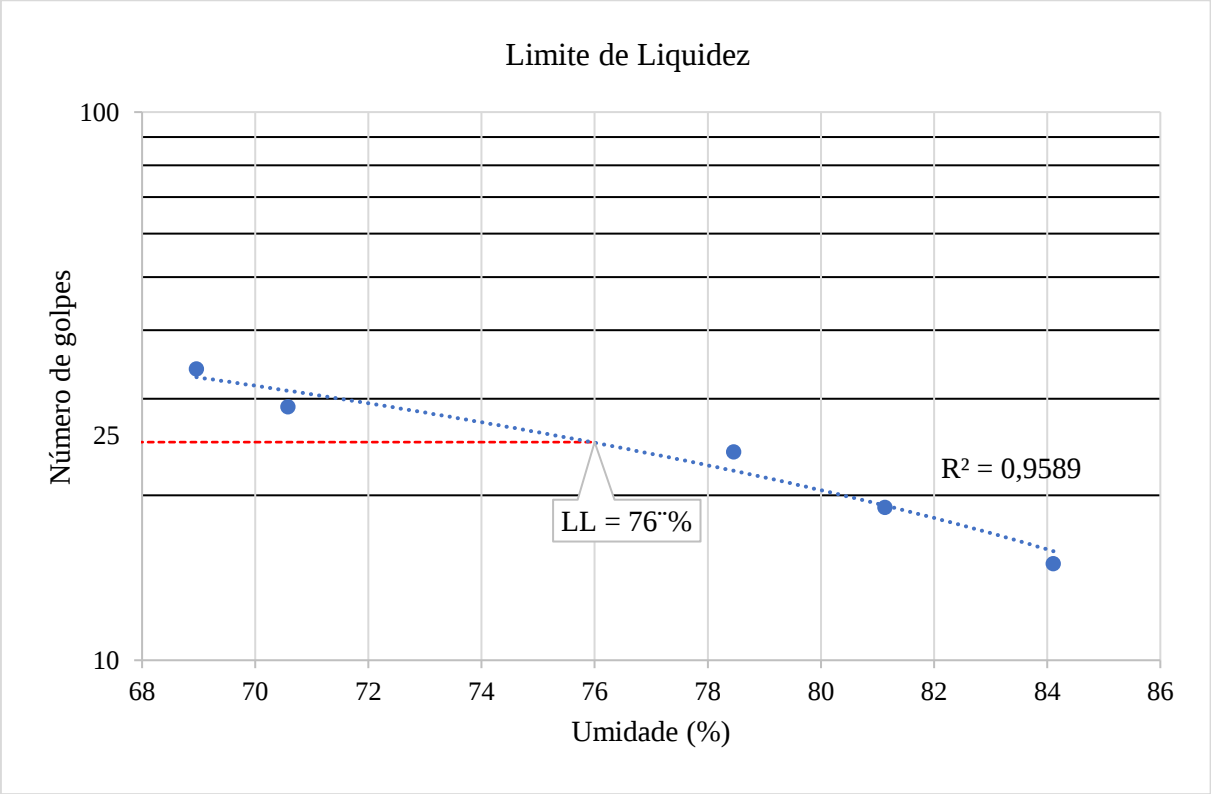
APÊNDICE A – Resultados individuais de Limite de Liquidez

Gráfico 9 – Limite de Liquidez 1



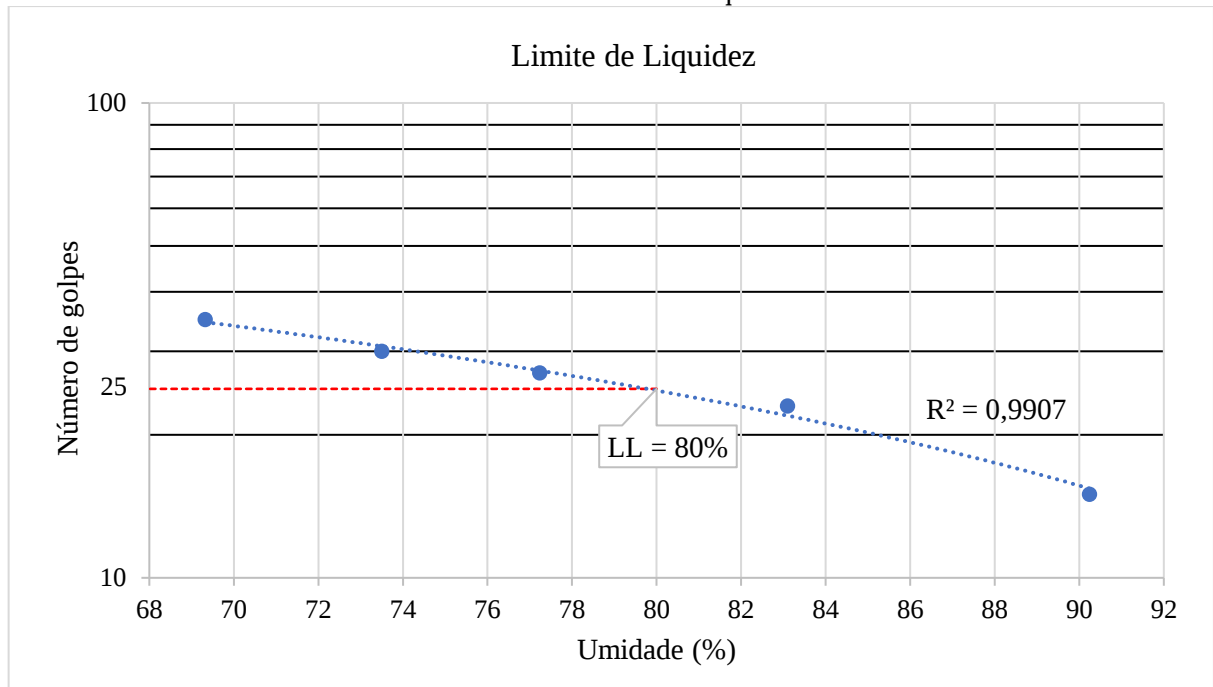
Fonte: Elaboração Própria (2025)

Gráfico 10 – Limite de Liquidez 2



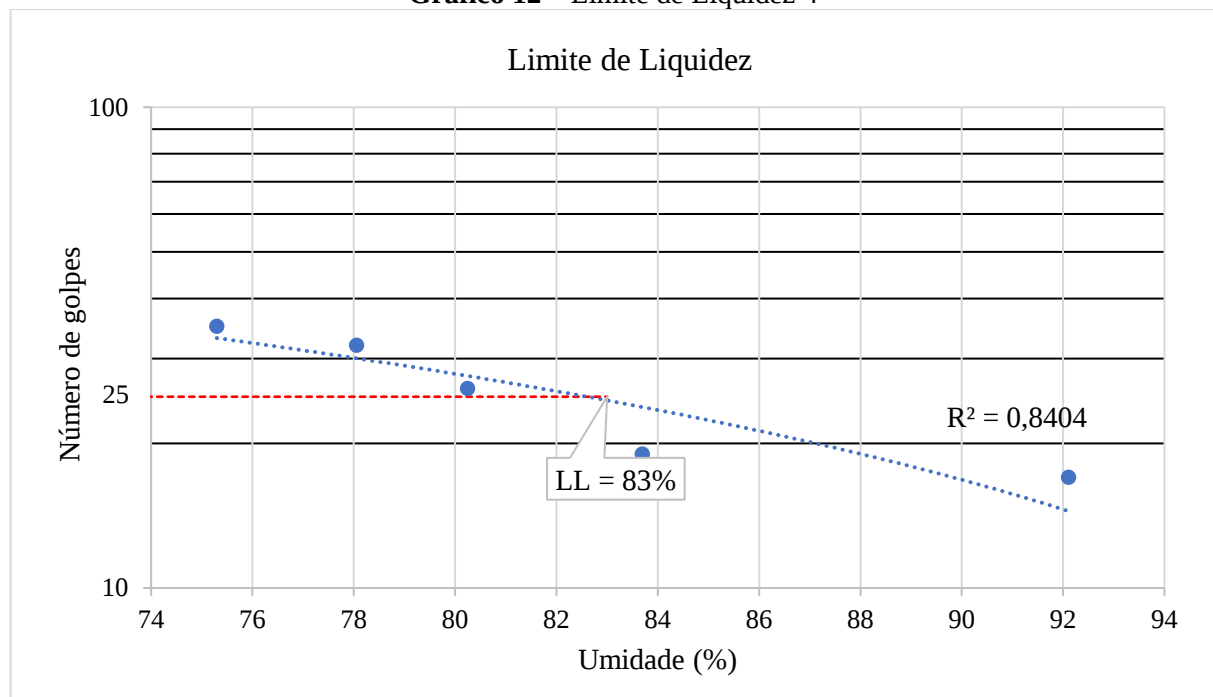
Fonte: Elaboração Própria (2025)

Gráfico 11 – Limite de Liquidez 3



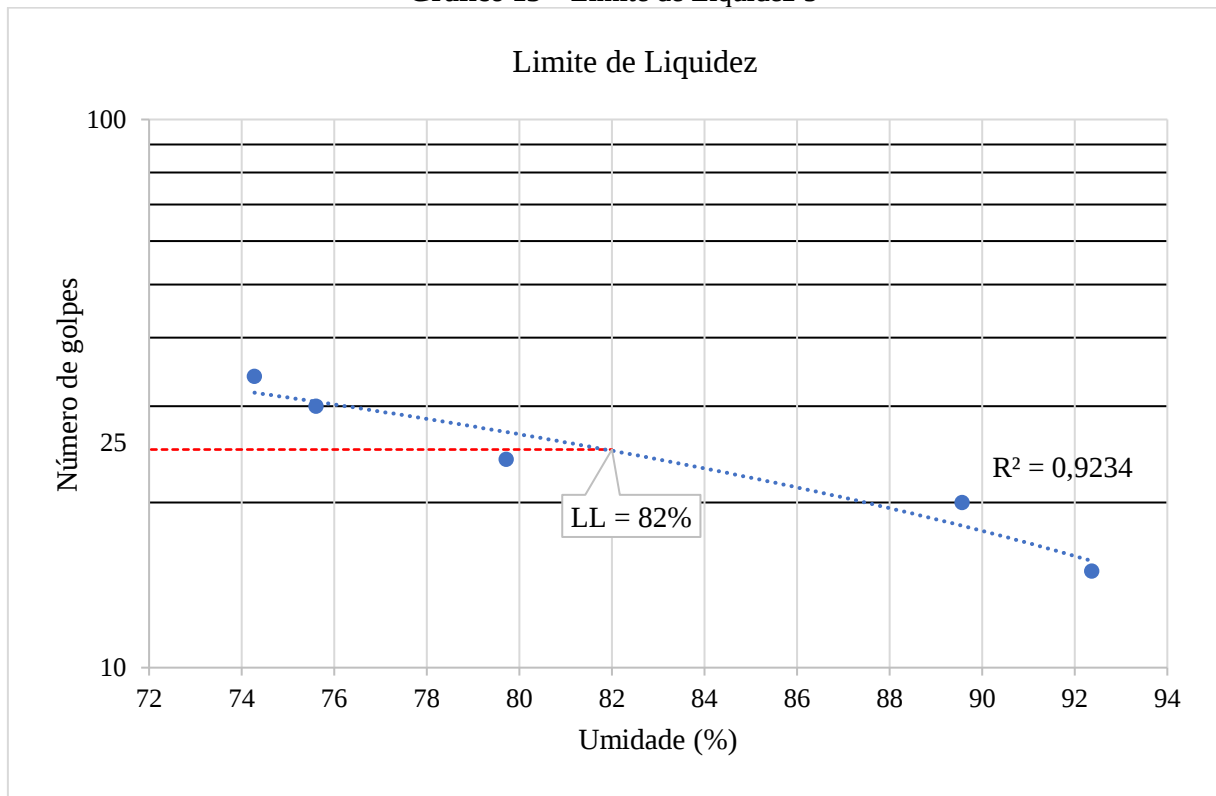
Fonte: Elaboração Própria (2025)

Gráfico 12 – Limite de Liquidez 4



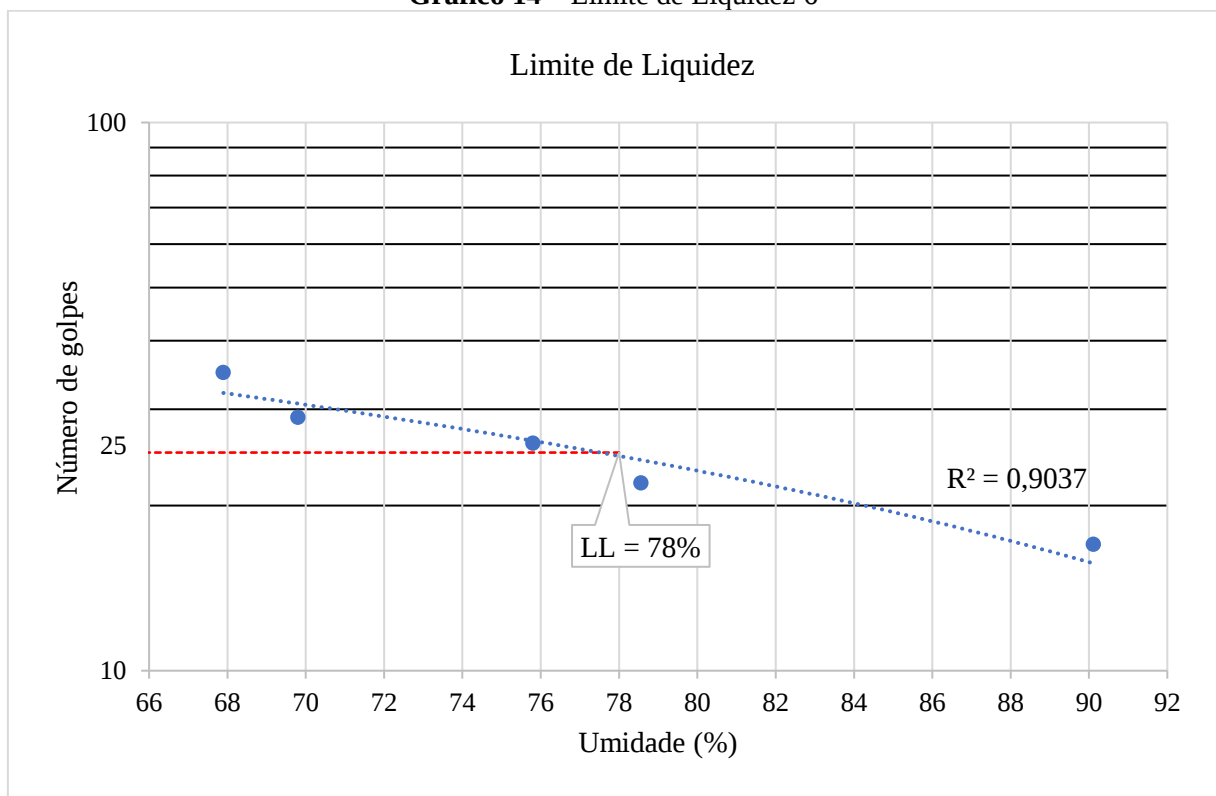
Fonte: Elaboração Própria (2025)

Gráfico 13 – Limite de Liquidez 5



Fonte: Elaboração Própria (2025)

Gráfico 14 – Limite de Liquidez 6



Fonte: Elaboração Própria (2025)

APÊNDICE B – Resultados de cisalhamento direto

Gráfico 15 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : SR ($\sigma_n = 50$ kPa)

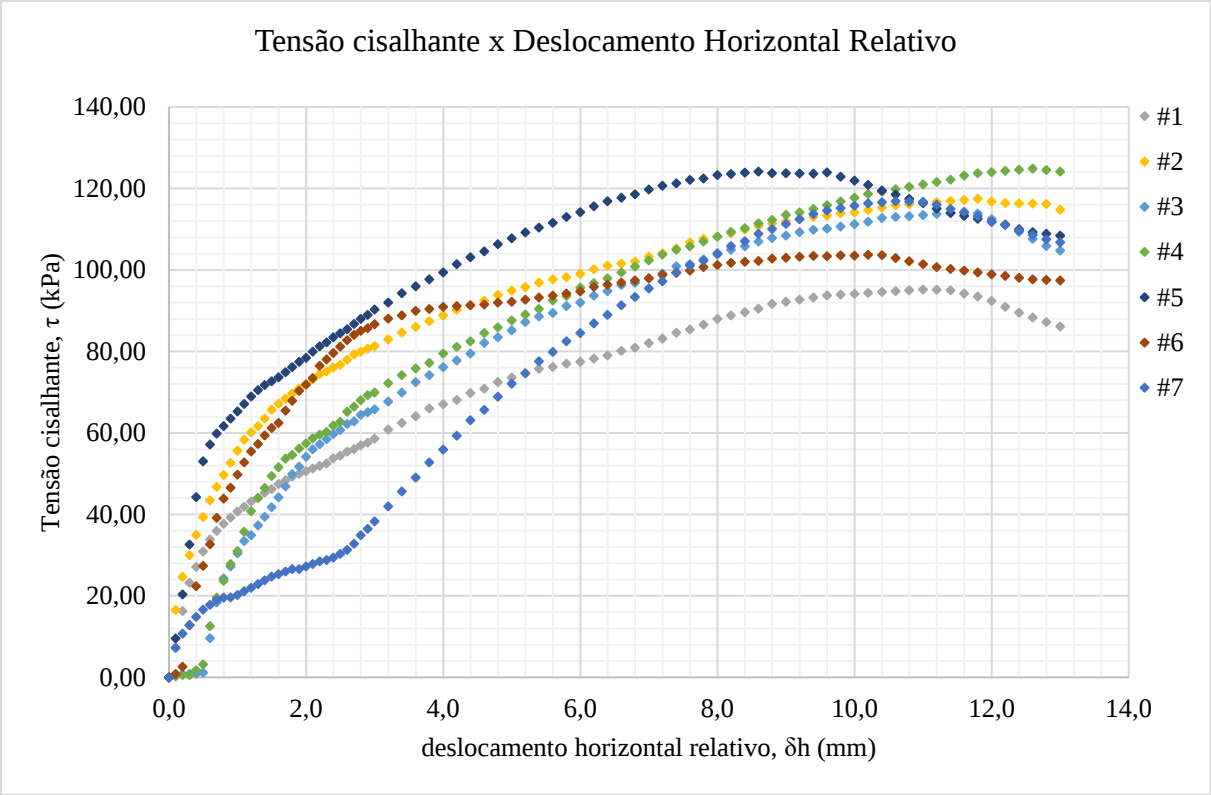


Gráfico 16 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : SR ($\sigma_n = 100$ kPa)

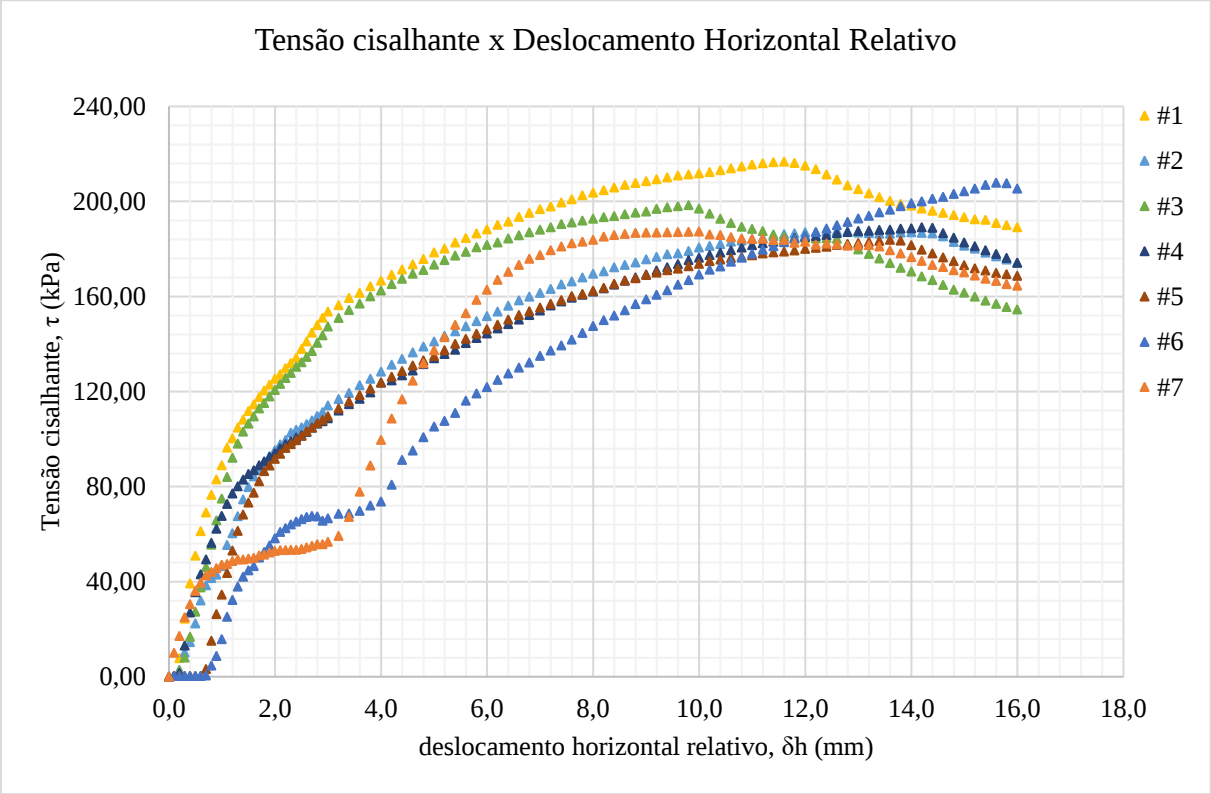


Gráfico 17 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : SR ($\sigma_n = 150$ kPa)

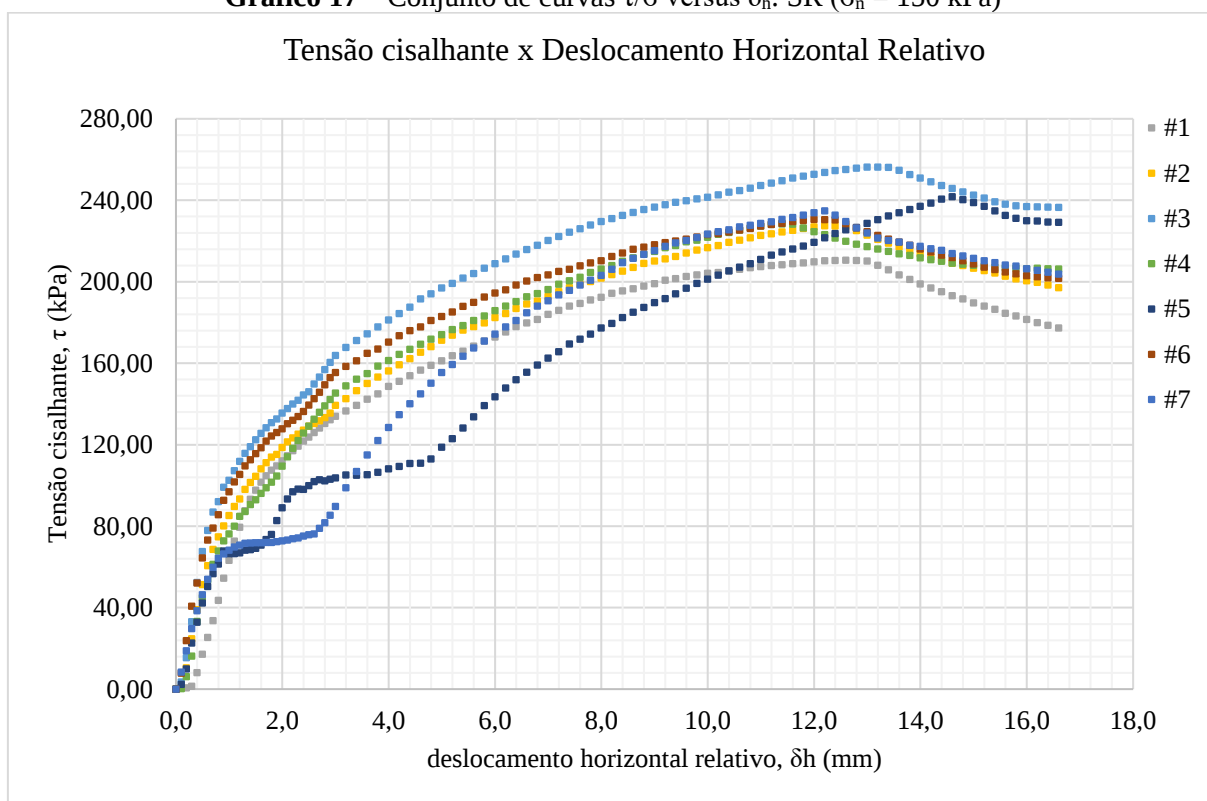


Gráfico 18 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB1 ($\sigma_n = 50$ kPa)

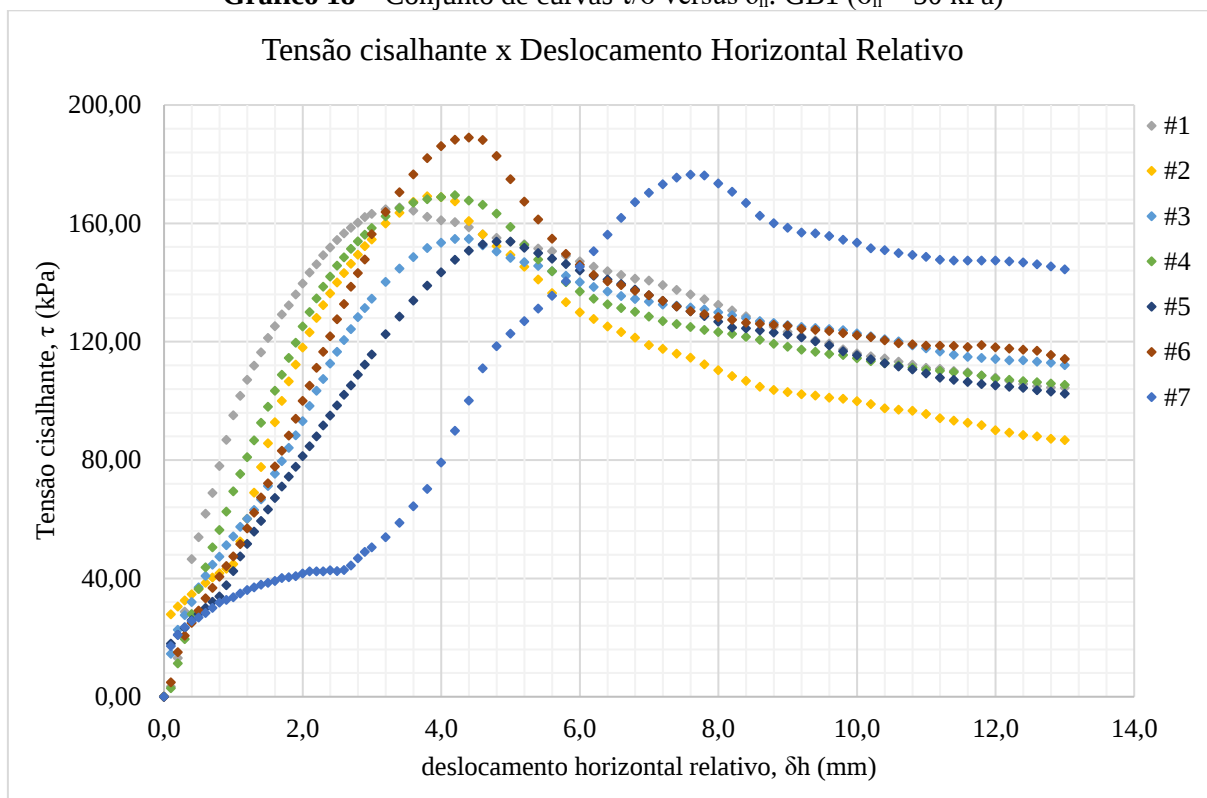


Gráfico 19 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB1 ($\sigma_n = 100$ kPa)

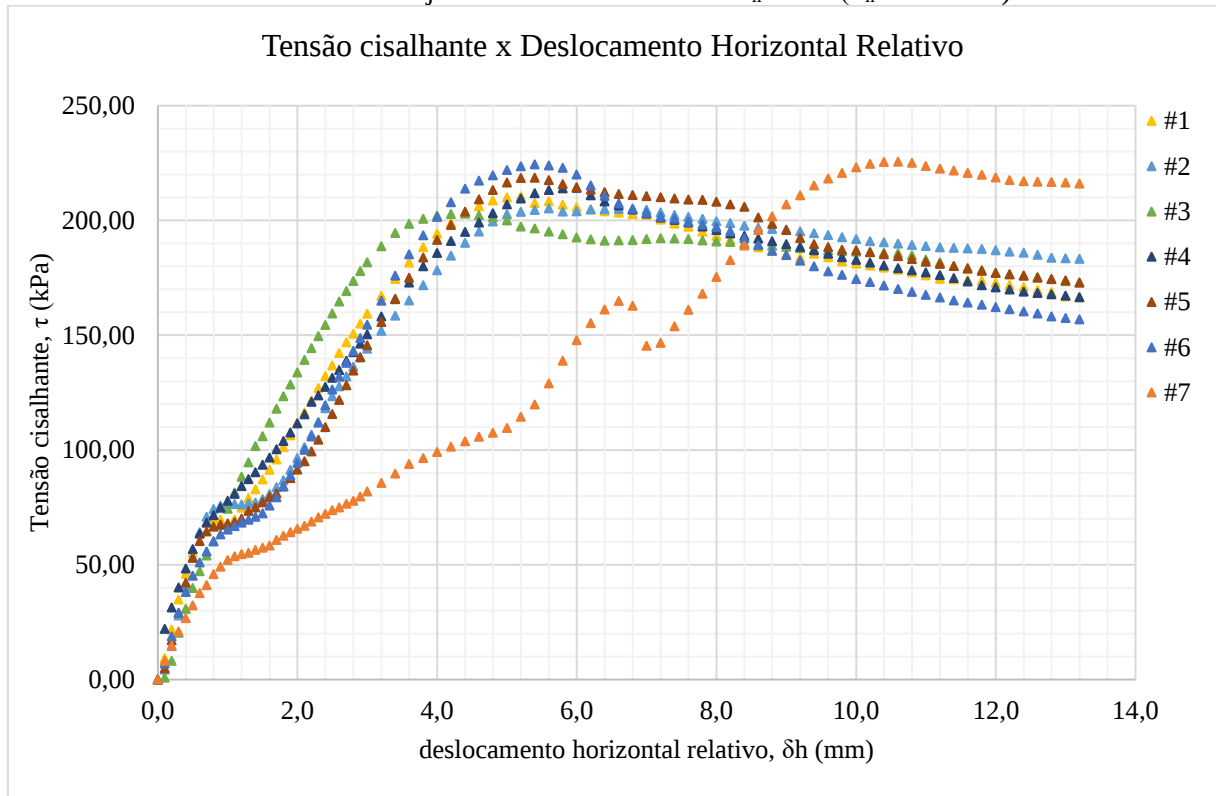


Gráfico 20 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB1 ($\sigma_n = 150$ kPa)

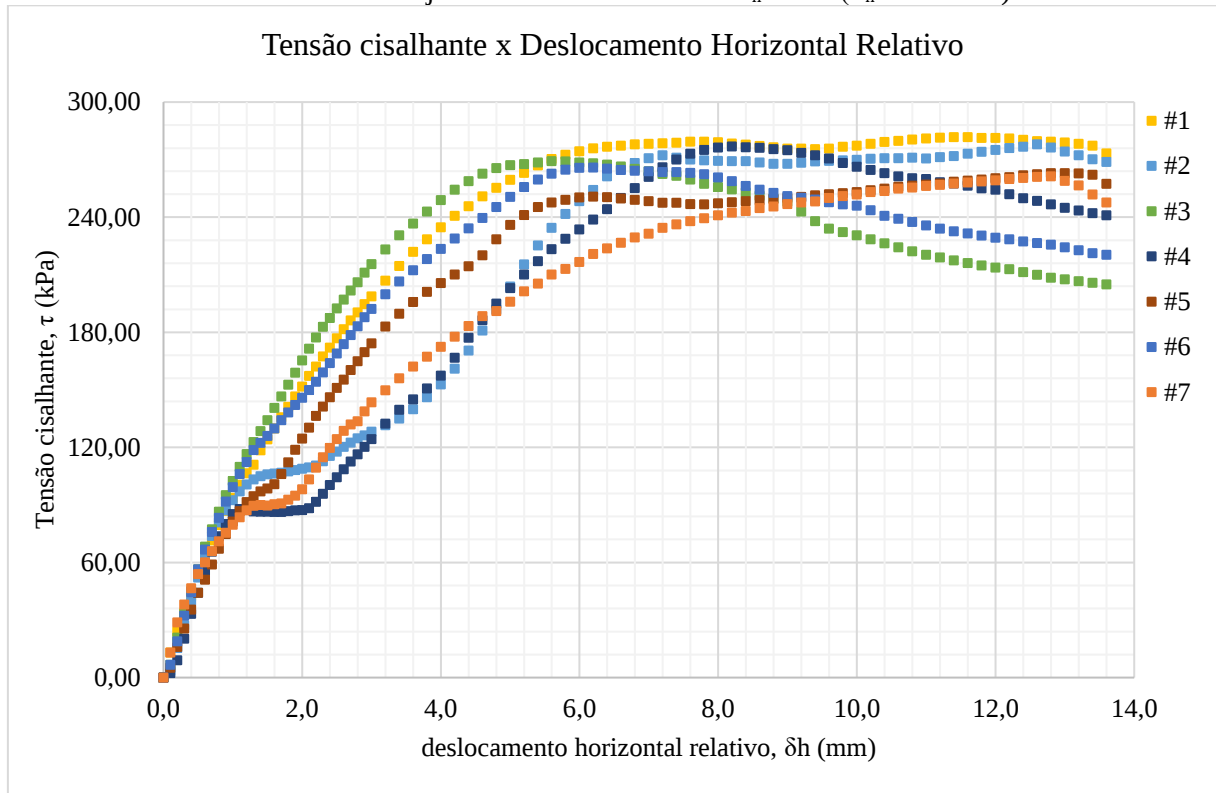


Gráfico 21 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB2 ($\sigma_n = 50$ kPa)

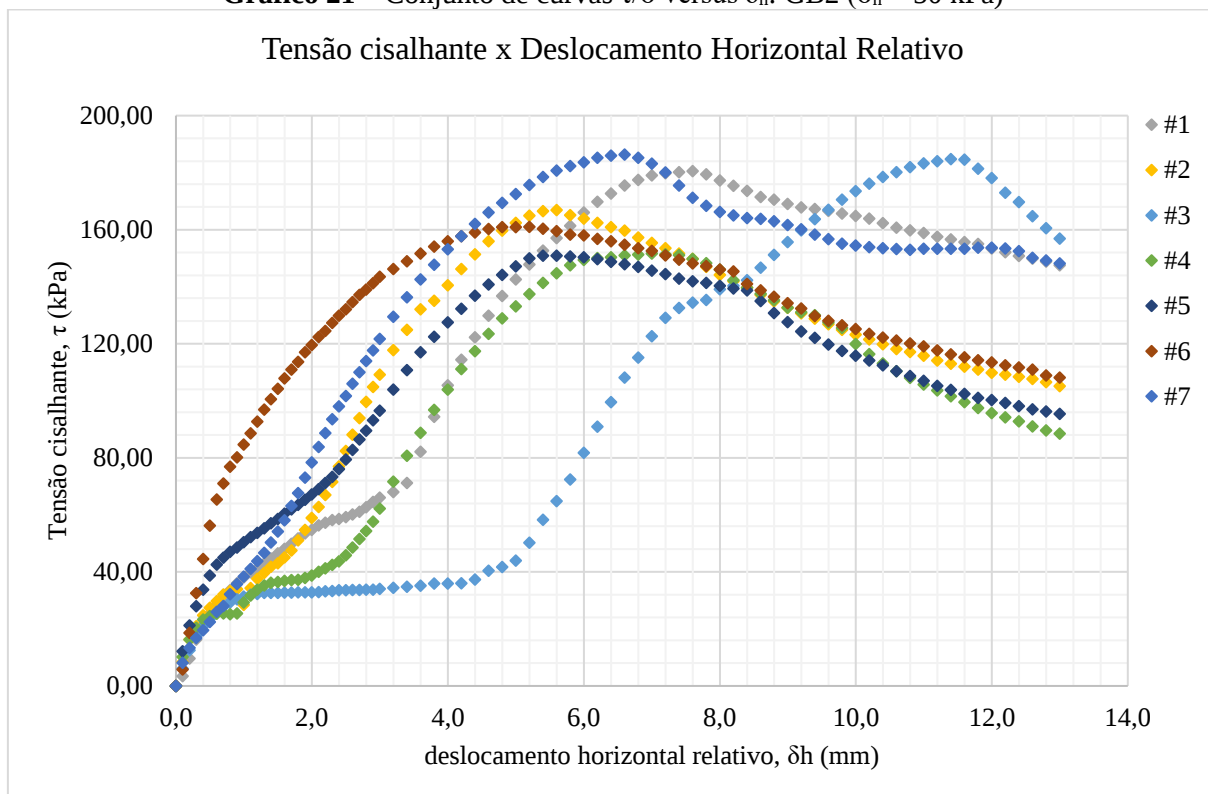


Gráfico 22 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB2 ($\sigma_n = 100$ kPa)

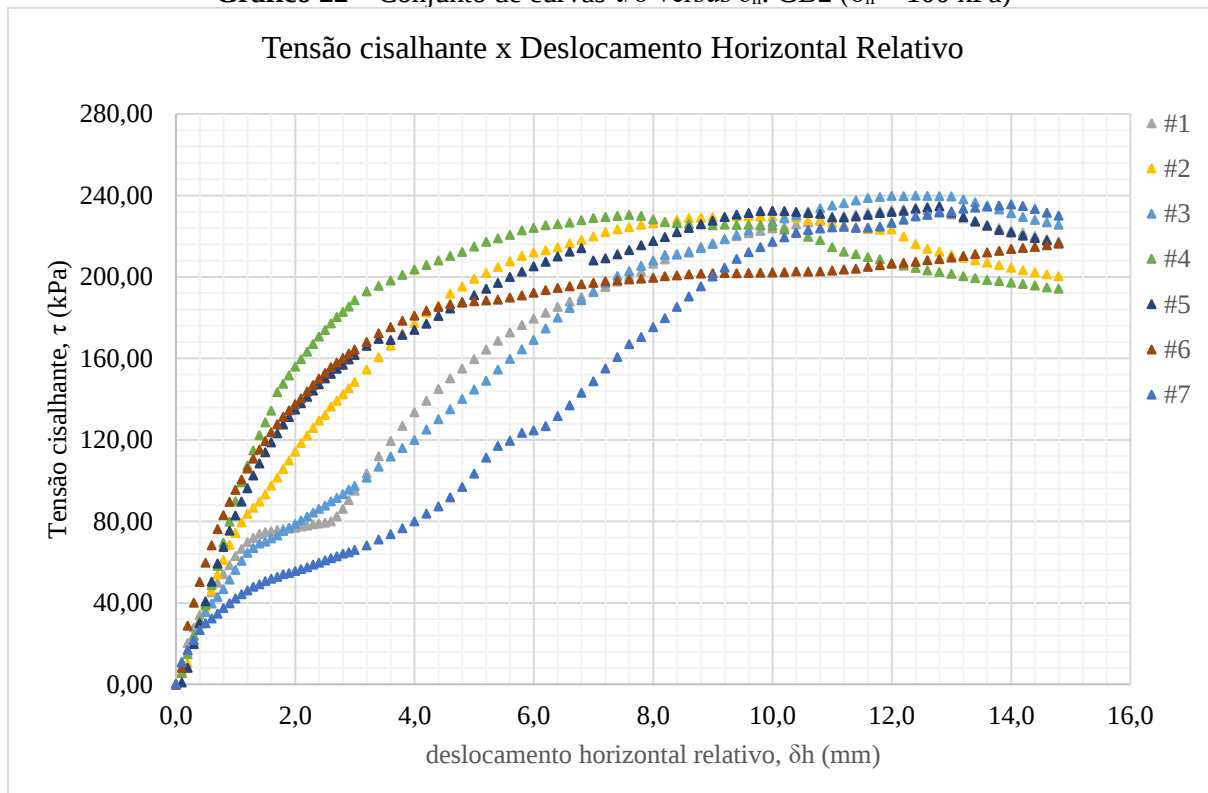
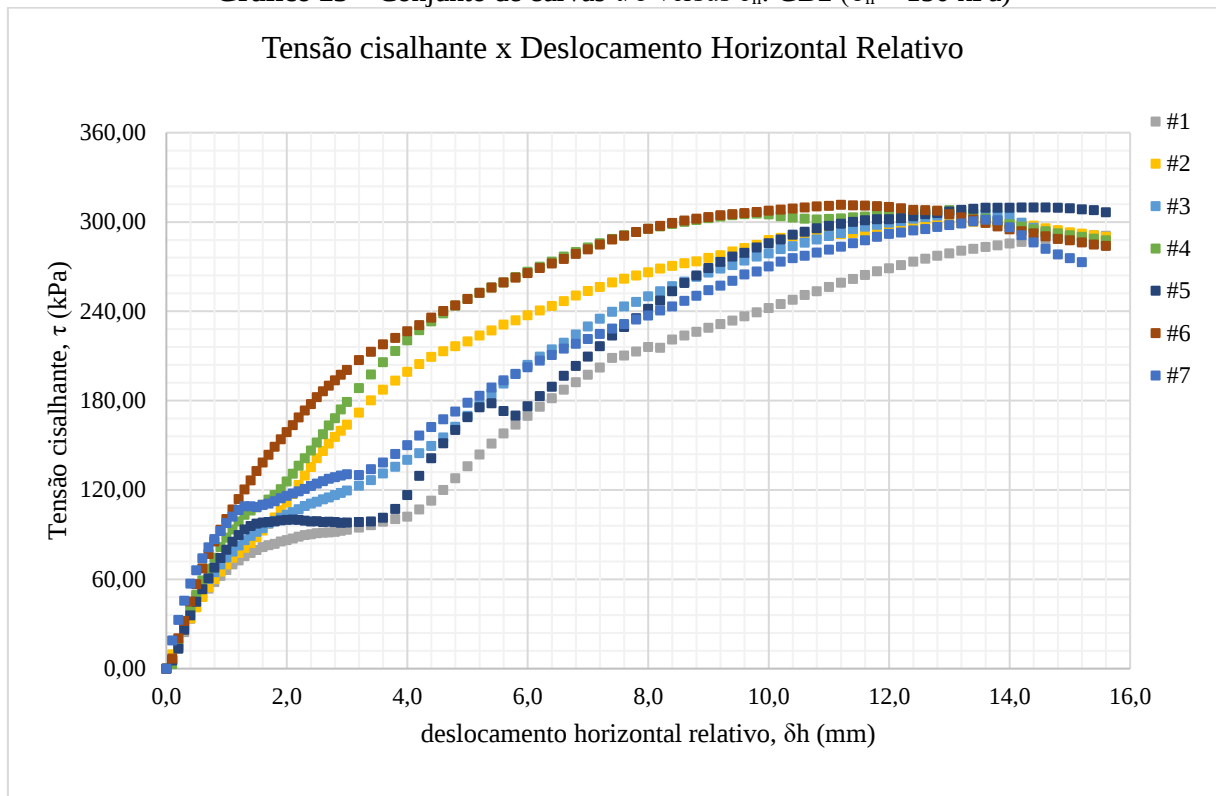


Gráfico 23 – Conjunto de curvas τ/σ versus δ_h : GB2 ($\sigma_n = 150$ kPa)



Fonte: Elaboração Própria (2025)