



INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS

CAMPUS MACEIÓ

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

CARLOS EDUARDO DE LIMA PRADO

ISABELLY FARIAS GAMA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO
UTILIZANDO GEOSSINTÉTICO COMO REFORÇO**

MACEIÓ, AL

2025

CARLOS EDUARDO DE LIMA PRADO

ISABELLY FARIAS GAMA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO
UTILIZANDO GEOSSINTÉTICO COMO REFORÇO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Instituto Federal de Alagoas Maceió como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Taise Monique de Oliveira Carvalho

MACEIÓ, AL

2025



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
Campus Maceió
Biblioteca Benevides Monte

620

P896a Prado, Carlos Eduardo de Lima.

Avaliação da resistência à compreensão simples de um solo utilizando geossintético como reforço [recurso eletrônico] : relato de uma experiência de ensino-aprendizagem / Carlos Eduardo de Lima Prado, Isabelly Farias Gama. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 5,13 MB). – 2025.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: Internet.

Orientação: Profa. Dra. Taise Monique de Oliveira Carvalho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*, Maceió, 2025.

1. Engenharia Civil. 2. Geossintéticos – Geogrelha. 3. Solo – Compressão simples. I. Gama, Isabelly Farias. II. Título.

CARLOS EDUARDO DE LIMA PRADO

ISABELLY FARIAS GAMA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO
UTILIZANDO GEOSSINTÉTICO COMO REFORÇO**

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado à
Banca do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do
Instituto Federal de Alagoas – Campus Maceió.

Aprovado em: 16 / 07 / 2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Taíse Monique de Oliveira Carvalho (Orientador)
Instituto Federal de Alagoas – IFAL

Profª. MSc. Celene Alves da Silva
Instituto Federal de Alagoas – IFAL

MSc. João Marcos Ferreira dos Santos
ALTA Geotecnia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Por Carlos Eduardo de Lima Prado,

À minha família, em especial meus pais, Carlos Eduardo e Poliana, agradeço a credibilidade no meu potencial, apoio constante, paciência e incentivo. A base e a inspiração que vocês me proporcionaram foram essenciais para superar os desafios e alcançar este objetivo.

Aos meus amigos de graduação pela parceria e apoio constante. A Empro Jr, Empresa Júnior de Engenharia Civil do Instituto Federal de Alagoas – IFAL, pela oportunidade de vivenciar a prática da engenharia, desenvolver habilidades profissionais e de liderança, e pela rede de contatos e aprendizado que tanto contribuíram para minha formação e para a conclusão deste trabalho.

À professora orientadora Taise, pela confiança em nosso potencial, pela valiosa orientação, paciência, dedicação e por compartilhar seu vasto conhecimento. Sua experiência e incentivo foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Solos do Instituto Federal de Alagoas (IFAL), em especial ao Sheldon e equipe de estagiários, pela disponibilidade, pelo auxílio técnico inestimável na condução dos ensaios, pela paciência e por todo o suporte oferecido. Sem o apoio de vocês, a etapa experimental não teria sido concretizada com sucesso.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste projeto, o meu sincero muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Por Isabelly Farias Gama,

À minha mãe, pelo apoio e amor incondicional durante todos esses anos de graduação. Por ter sido minha maior inspiração e fonte inesgotável de força e coragem. Por ter tornado tudo mais fácil, mesmo quando eu acreditava que não era possível. Tudo que sou é o reflexo de tudo aquilo que ela é para mim, e minha jornada durante esses anos não seria possível sem ela.

À minha família, por sempre ter acreditado no meu potencial, em especial a minha irmã Bianca, com quem sempre dividi o meu dia a dia durante minha graduação e a minha avó Ana.

Aos meus amigos, que foram essenciais ao longo de todos esses anos, com eles pude compartilhar todas as minhas experiências da graduação.

E, aos professores do curso de Engenharia, principalmente a nossa orientadora Taise, por todos os ensinamentos, toda paciência e por ter aceitado fazer parte deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar a resistência à compressão simples de um solo argiloso (SC) da região de Maceió-AL, Brasil, quando reforçado com geossintéticos, especificamente geogrelha unidirecional e geotêxtil do tipo MacGrid Net®. Para tanto, foi realizada a caracterização física do solo, a determinação da curva de compactação, e a avaliação comparativa da resistência à compressão do solo não reforçado e reforçado. A metodologia compreendeu ensaios de limites de consistência (LL de 24,46% e LP de 13,76%), análise granulométrica, e ensaios de compactação, que determinaram uma massa específica seca máxima de 1,84 g/cm³ e umidade ótima de 13,8%. A etapa principal envolveu ensaios de compressão simples em corpos de prova de solo não reforçado (CP-S), solo reforçado com geogrelha (CP-GGR) e solo reforçado com geotêxtil (CP-GTX), seguindo a ABNT (NBR 12770, 2022). Os resultados demonstraram que a geogrelha aumentou a resistência à compressão simples em aproximadamente 36,75%, enquanto o geotêxtil proporcionou um ganho de 8,54%. Para pequenas deformações (2% de deformação axial), a resistência aumentou em cerca de 52% com a geogrelha e 64% com o geotêxtil, em comparação com o solo não reforçado. Perspectivas futuras incluem o estudo de diferentes tipos de geossintéticos, variações de layout, ensaios triaxiais, e estudos em escala de campo para validação técnica e econômica.

Palavras-chave: geossintéticos; resistência; solo reforçado; compressão; geogrelha.

ABSTRACT

This study aimed to investigate the unconfined compressive strength behavior of a clayey sand (SC) soil from the Maceió-AL region, Brazil, when reinforced with geosynthetics, specifically a unidirectional geogrid and a MACGRID NET® geotextile. To achieve this, the physical characterization of the soil was performed, along with the determination of its compaction curve, and a comparative evaluation of the compressive strength of unreinforced and reinforced soil. The methodology included consistency limit tests (LL of 24.46% and LP of 13.76%), grain size analysis, and compaction tests, which determined a maximum dry specific weight of 1.84 g/cm³ and an optimum moisture content of 13.8%. The main phase involved unconfined compression tests on unreinforced soil specimens (CP-S), geogrid-reinforced soil (CP-GGR), and geotextile-reinforced soil (CP-GTX), following ABNT (NBR 12770, 2022). The results demonstrated that the geogrid increased the unconfined compressive strength by approximately 36.75%, while the geotextile provided a gain of 8.54%. For small deformations (2% axial deformation), the resistance increased by about 52% with the geogrid and 64% with the geotextile, compared to the unreinforced soil. Future perspectives include the study of different types of geosynthetics, layout variations, triaxial tests, and field-scale studies for technical and economic validation.

Keywords: geosynthetics; strength; reinforced soil; compressive; geogrid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos de geogrelha	20
Figura 2 – Arranjo estrutural dos geotêxteis.....	21
Figura 3 – Aplicação de Solo Reforçado	23
Figura 4 – Custos de construção para várias soluções de contenção	24
Figura 5 – Elemento de solo não reforçado	25
Figura 6 – Efeito do reforço em um elemento de solo reforçado.....	25
Figura 7 – Mapa de Localização do Município de Maceió – AL	26
Figura 8 – Mapa de geologia para Maceió e para a área de projeto.....	27
Figura 9 – Fluxograma dos ensaios realizados	28
Figura 10 – Vista aérea da região da retirada da amostra	29
Figura 11 – Amostra de solo	30
Figura 12 – Equipamentos para destorroamento	31
Figura 13 – Limite de consistência.....	31
Figura 14 – Aparelho de Casagrande	32
Figura 15 – Aspecto da ranhura	33
Figura 16 – Arranjos experimentais gerais.....	35
Figura 17 – Material retido na peneira de 2,0mm.....	37
Figura 18 – Peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5, 4,8 e 2,0 mm	38
Figura 19 – Amostra de solo com defloculante e material defloculante	39
Figura 20 – Aparelho dispersor e amostra de solo com defloculante.....	40
Figura 21 – Peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,3, 0,15 e 0,075 mm	41
Figura 22 – Arranjos experimentais gerais e amostra de solo com 3kg	43
Figura 23 – Geotêxtil Macgrid Net.....	45
Figura 24 – Geogrelha unidirecional utilizada	46
Figura 25 – Disposição dos geossintéticos entre as camadas.....	47
Figura 26 – Posicionamento do geossintético entre as camadas.....	48
Figura 27 – Posicionamento do corpo de prova na prensa	49
Figura 28 – Corpo de prova reforçado com geogrelha, sem aderência entre as camadas.....	50

Figura 29 – Corpo de prova reforçado com geogrelha, sem aderência entre as camadas.....	51
Figura 30 – Corpo de prova reforçado com geotêxtil, sem aderência entre as camadas.....	52
Figura 31 – Formação do “anel de contato” entre as camadas	53
Figura 32 – Limite de liquidez.....	55
Figura 33 – Curva granulométrica	58
Figura 34 – Curva de Compactação.....	59
Figura 35 – Curva de Tensão x Deformação (CP-S).....	60
Figura 36 – Curva de Tensão x Deformação (CP-GGR).....	61
Figura 37 – Curva de Tensão x Deformação (CP-GTX).....	62
Figura 38 – Curva de Tensão x Deformação de todos os CPs ensaiados	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns tipos de geossintéticos e principais funções.....	19
Tabela 2 – Quantidades de amostra a serem utilizadas	43
Tabela 3 – Energias de compactação	44
Tabela 4 – Propriedades físicas do MacGrid NET	46
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do MacGrid NET	46
Tabela 6 – Dados do ensaio de limite de liquidez	54
Tabela 7 – Dados do ensaio de limite de plasticidade	55
Tabela 8 – Umidade higroscópica do solo natural.....	56
Tabela 9 – Composição granulométrica do solo	57
Tabela 10 – Resultados dos Ensaio (CP-S).....	59
Tabela 11 – Resultados dos Ensaio (CP-GGR)	60
Tabela 12 – Resultados dos Ensaio (CP-GTX).	61
Tabela 13 – Resultados dos Ensaio.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
BSI	<i>British Standards Institution</i>
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
LC	Limite de Contração
PP	Polipropileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Poliéster
CP	Corpo de Prova

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	GEOSSINTÉTICOS.....	18
3.1.1	Geogrelhas	20
3.1.2	Geotêxteis	21
3.2	SOLO REFORÇADO.....	22
3.3	ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS DE MACEIÓ .	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1	COLETA DAS AMOSTRAS.....	29
4.2	PREPARO DAS AMOSTRAS.....	30
4.3	CARACTERIZAÇÃO SOLO.....	31
4.3.1	Limite de Consistência	31
4.3.2	Limite de Liquidez	32
4.3.3	Limite de Plasticidade	34
4.3.4	Índice de Plasticidade	36
4.3.5	Análise Granulométrica	36
4.4	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	42
4.5	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DOS GEOSSINTÉTICOS	45
4.5.1	MacGrid Net	45
4.5.2	Geogrelha unidirecional	46
4.6	ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1	ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ	54
5.2	ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE.....	55
5.3	ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	56
5.4	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	58
5.5	ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES.....	59

5.5.1	Corpos de Prova de Solo Não Reforçado (CP-S).....	59
5.5.2	Corpos de Prova de Solo Reforçado com Geogrelha (CP-GGR)...	60
5.5.3	Corpo de Prova de Solo Reforçado com Geotêxtil (CP-GTX).....	61
5.5.4	Considerações e Comparação dos Resultados.....	62
6	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia, diversas técnicas são empregadas cotidianamente para melhorar a resistência do solo em obras geotécnicas. Tais métodos consistem em promover uma melhora nas características mecânicas do maciço, possibilitando que o solo seja capaz de resistir aos esforços submetidos por diversos fatores e permitindo com que cada obra tenha suas necessidades atendidas.

Em algumas construções da antiga civilização, como os zigurates e a muralha da China, o método do reforço do solo, conforme Terzaghi, Peck e Mesri (1996), já era aplicado, visto que os zigurates, eram constituídos por camadas de solos argilosos fortalecidos com a utilização de galhos e juncos, e a muralha da China, utilizando-se de fibras naturais em suas parcelas de argila e cascalho.

Com o desenvolvimento dos polímeros, as indústrias têxteis ampliaram a produção dos materiais sintéticos para a utilização em reforços de solo. Foi na década de 1960 que se iniciou a utilização de georredes em obras de aterro sobre solos moles no Japão, evento que, segundo Koerner (2012), resultou na posterior produção e disseminação da geogrelha, objeto de estudo do presente trabalho.

No Brasil, a utilização de geossintéticos para reforço do solo seguiu o avanço internacional e ganhou notoriedade a partir da década de 1970, sendo utilizados inicialmente em obras rodoviárias (Carvalho; Pedrosa; Wolle, 1986). A ABNT (NBR 10318-1, 2021) define diversas funções para esses materiais, como drenagem, filtração, reforço, separação e proteção. Além disso, essas normativas são essenciais para caracterizá-los e garantir o emprego correto em diferentes tipologias de obras.

No cenário atual da engenharia civil, a busca por soluções inovadoras e economicamente viáveis para o reforço de solos é constante, especialmente em regiões com características geotécnicas desafiadoras, como as encontradas em Maceió, AL. A instabilidade de taludes e a baixa capacidade de suporte de solos são problemas comuns que demandam técnicas eficientes e de baixo custo. Nesse contexto, a utilização de geossintéticos, em particular as geogrelhas e geotêxteis, surge como uma alternativa promissora devido à sua capacidade de aumentar a resistência mecânica do solo e otimizar projetos geotécnicos. Essa abordagem é frequentemente destacada por autores como Palmeira (2009) e Koerner (2012) ao abordarem a evolução e as vantagens dos geossintéticos em obras geotécnicas.

Diante deste cenário, o presente trabalho consiste em avaliar o comportamento de um solo da região de Maceió com o uso de geogrelha e geotêxtil, aplicados separadamente, comparando os parâmetros de resistência à compressão simples do solo com e sem o uso dos materiais propostos, a fim de que se contribua para a aplicação eficiente de geossintéticos em obras geotécnicas locais e ampliar o conhecimento sobre o desempenho desses materiais em solos com características regionais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a resistência à compressão simples de um solo da região de Maceió, com e sem reforço, utilizando geogrelha e geotêxtil aplicados separadamente, por meio de ensaios laboratoriais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar fisicamente o solo natural, por meio de ensaios de laboratório;
- b) Determinar a curva de compactação do solo para definição da energia de compactação.
- c) Avaliar, por meio de ensaios de compressão simples, o desempenho do solo sem reforço e do solo reforçado com geogrelha e geotêxtil, comparando-os.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GEOSSINTÉTICOS

Segundo a “American Society for Testing and Materials – ASTM”, na D4439:2020, define geossintéticos como:

Um produto plano fabricado a partir de material polimérico utilizado com solo, rocha, terra ou outros materiais geotécnicos. Material relacionado à engenharia como parte integrante de um projeto, estrutura ou sistema feito pelo homem.

O geotêxtil foi o primeiro tipo de geossintético utilizado sistemicamente em obras de geotecnia. Nos Estados Unidos, o seu emprego teve início na década de 50, sendo usado como elemento de drenagem, separação e controle de erosão. Seu uso na Europa iniciou-se nos anos de 1960, com a utilização de geotêxtil em diversas aplicações, com o reforço de estradas não pavimentadas, sob lastro de ferrovias e em barragens de terra. Inicialmente as suas principais funções eram de separação e reforço (Palmeira, 2009).

No Brasil, os geossintéticos têm sido empregados desde o início de 1970. Embora existam registros de aplicação empíricas de geotêxtis na estabilização de talude desde essa época, somente em 1986 é que se teve um projeto racional e de grande porte de muro de solo reforçado na rodovia que liga Taubaté a Campos do Jordão (Carvalho; Pedrosa; Wolle, 1986).

Segundo a ABNT (NBR 10318-1, 2021), pode-se classificar os geossintéticos segundo suas propriedades e funções, nas quais destacam-se: drenagem, filtração, proteção, reforço, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial. A Tabela 1 apresenta um resumo de alguns tipos de geossintéticos e suas funções correspondentes.

Tabela 1 – Alguns tipos de geossintéticos e principais funções

Geossintético	Função				
	Separação	Reforço	Filtração	Drenagem	Barreira Impermeável
Geotêxtil	1 ou 2	1 ou 2	1 ou 2	1 ou 2	1
Geogrelha	2	1	n/a	n/a	n/a
Geomalha	2	n/a	n/a	1	n/a
Geomembrana	2	n/a	n/a	n/a	1
Geocomposto	1 ou 2	1 ou 2	1 ou 2	1 ou 2	1 ou 2

Fonte: Adaptado Koemer (2012).

Notas: 1= Função principal;
2= Função secundária;
n/a= Não se aplica.

Observa-se na Tabela 1 que os principais geossintéticos para reforço de solos são geotêxteis, geogrelhas e geocompostos. Nos últimos anos esses tipos de geossintéticos vem sendo utilizados em diversas obras de contenção como elementos de reforço, técnica que tem se difundido devido ao baixo custo quando comparado a outras estruturas de contenção e da sua facilidade construtiva.

No Brasil, o mercado de geossintético vem apresentando grande crescimento e, segundo Teixeira (2003), os principais fatores para a alavancagem dessa indústria são:

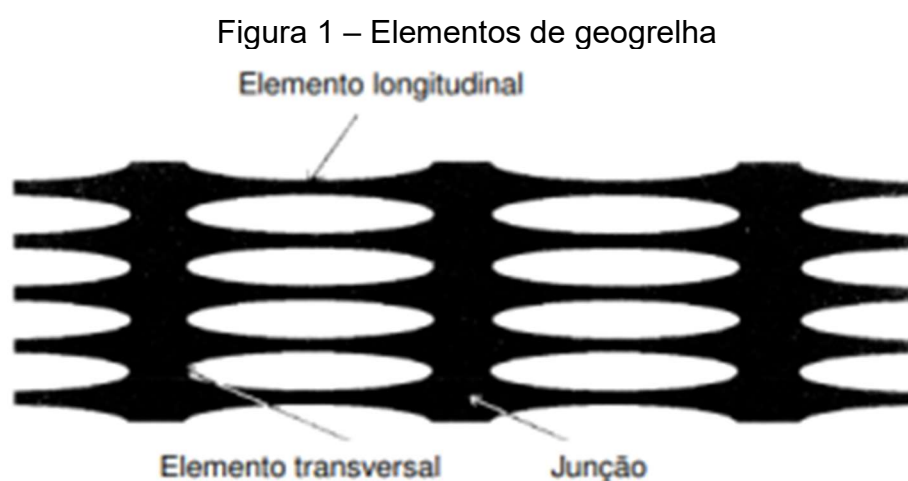
- Em geral, substitui materiais de obtenção mais difícil, como materiais naturais nobres;
- Sua instalação é, na maioria das vezes, rápida e simples;
- Facilita ou, até mesmo, viabiliza a execução de uma obra;
- Em alguns casos, sua utilização é exigida por lei.

A fim de se padronizar uma terminologia para classificar os geossintéticos, a ABNT (NBR 10318-1, 2021) especificou as seguintes terminologias:

- GSY – Geossintético;
- GGR – Geogrelha;
- GTX – Geotêxtil;
- GTX-NW – Geotêxtil não tecido;
- GTX-K – Geotêxtil Tricotado;
- GTX-W – Geotêxtil tecido.

3.1.1 Geogrelhas

Segundo Koerner (2012), as geogrelhas são materiais geossintéticos amplamente utilizados na engenharia civil para reforço e estabilização de solos. Elas são geralmente constituídas por polímeros, como polipropileno (PP), poliéster (PET) ou polietileno de alta densidade (PEAD), e possuem uma estrutura aberta em forma de malha, com aberturas regulares que permitem a interação eficiente com o solo, conforme Figura 1.



Fonte: Sieira (2003).

As geogrelhas podem ser produzidas por diferentes processos de fabricação, dependendo do tipo de material utilizado e da aplicação desejada. Dois dos métodos mais comuns, conforme Sieira (2003) e Koerner (2012), são a extrusão e o estiramento, nos quais uma chapa contínua de polímero, como PEAD ou PP, é inicialmente extrudada e perfurada para formar uma malha. Em seguida, a estrutura passa por um processo de estiramento uniaxial ou biaxial, que orienta as moléculas do material, aumentando sua resistência e rigidez. Além disso, as geogrelhas podem ser fabricadas também a partir da tecelagem de fios poliméricos envolvidas em PVC para formar uma malha estruturada ou ainda com tiras poliméricas soldadas em pontos de interseção (Koerner, 2012).

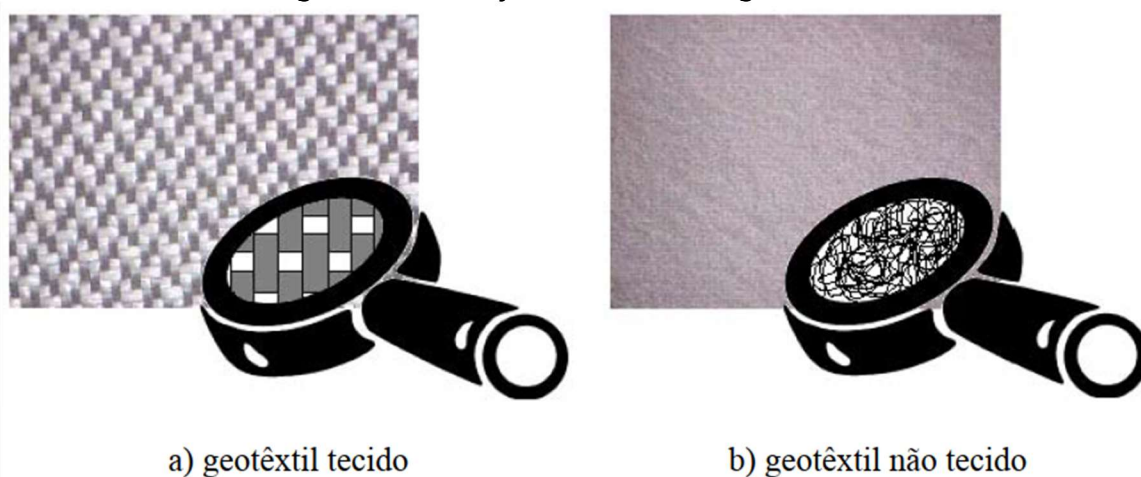
Em geral, as geogrelhas resultantes desses processos apresentam aberturas variadas de 1 a 10cm, nos formatos de elipses alongadas, quadradas ou retângulos com cantos arredondados (Sieira, 2003). As principais aplicações das geogrelhas são:

- Melhorar a capacidade de suporte do solo em fundações superficiais, reduzindo recalques diferenciais;
- Utilizadas em rodovias, ferrovias e aeroportos para aumentar a resistência à deformação;
- Ajudam a estabilizar encostas, evitando deslizamentos;
- Reduzem o deslocamento de partículas de solo em áreas sujeitas à erosão;
- Melhoram a capacidade de carga em solos de baixa resistência, como solos moles.

3.1.2 Geotêxteis

Segundo Palmeira (2009), os geotêxteis representam uma tecnologia consolidada e em constante evolução, contribuindo significativamente para a sustentabilidade e eficiência das obras de infraestrutura. Eles podem ser classificados como produtos têxteis, flexíveis e porosos. Segundo Benjamim (2006), existem dois tipos de geotêxteis, tecidos e não tecidos, classificados conforme o arranjo estrutural de suas fibras (Figura 2).

Figura 2 – Arranjo estrutural dos geotêxteis



Fonte: Benjamim (2006).

Os geotêxteis tecidos são produzidos a partir dos entrelaçamentos de fios ou filamentos geralmente em um padrão ortogonal (trama e urdidura), por meio de processos similares aos da indústria têxtil tradicional. Esse tipo de técnica confere ao

material uma elevada resistência mecânica, principalmente à tração, indicada para situações que exigem reforço estrutural (Koerner, 2012).

Os não tecido são fabricados por processos de agulhamento (agulhado), calandragem térmica (termoligado), ligação química de fibras curtas ou filamentos contínuos (resinado) ou por reforço (reforçado), resultando em uma manta aleatória. Embora apresentem menor resistência à tração em comparação com os tecidos, os geotêxteis não tecidos possuem melhor comportamento à punção e ao fluxo transversal, características desejáveis em diversas aplicações hidráulicas, além de custo de produção inferior (Palmeira, 2009).

3.2 SOLO REFORÇADO

O solo reforçado é uma técnica amplamente utilizada na engenharia geotécnica para melhorar as propriedades mecânicas do solo, aumentando sua resistência e estabilidade. Segundo a ABNT (NBR 16920-1, 2021), define solo reforçado:

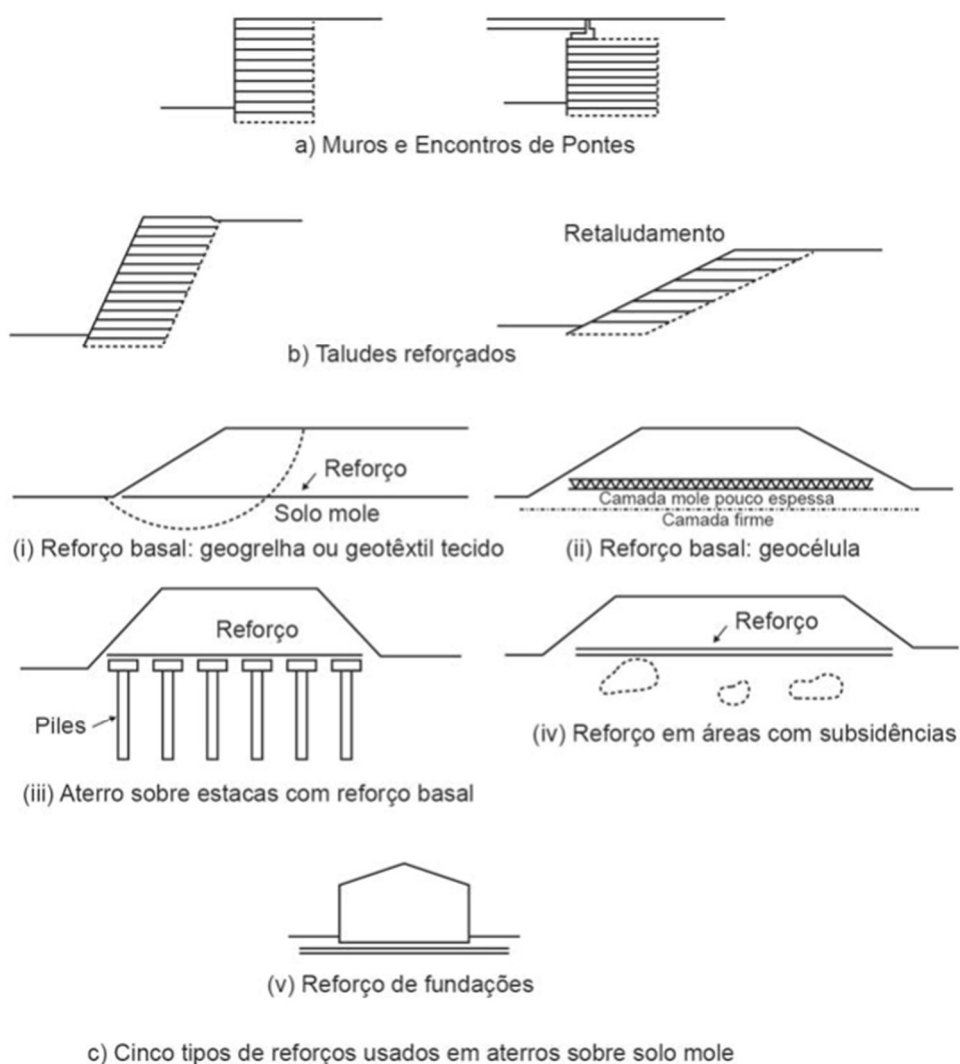
O termo solo reforçado se refere à aplicação de reforços resistentes à tração em maciços terrosos, de forma a se obter um compósito com melhores características mecânicas. O sistema é formado por três elementos de reforço (inclusões) e elementos de face (paramento). Esta técnica considera a inclusão de elementos de reforço metálicos ou geossintéticos. A inclusão de elementos metálicos ou geossintéticos no maciço confere aos muros e taludes em solos reforçado as condições de resistência interna e estabilidade geral necessárias, limitando os deslocamentos.

Civilizações antigas como os egípcios, já utilizavam esse princípio misturando palha com barro para aumentar a resistência de tijolos de adobe, enquanto os romanos aplicavam camadas compactadas com diferentes materiais na construção de estradas e vias, a fim de garantir durabilidade em suas estruturas (Terzaghi, Peck & Mesri, 1996).

Com os avanços da engenharia geotécnica, surgiram novos materiais e técnicas para reforço do solo. O desenvolvimento dos geossintéticos, como geogrelhas e geotêxteis, revolucionou a estabilização de solos, melhorando a resistência mecânica e reduzindo deformações, assim permitindo maior controle sobre assentamentos e deslizamentos (Koerner, 2012).

O reforço de solo com o uso de geossintéticos é um sistema construtivo que utiliza uma série de camadas alternadas de solo e um geossintético, constituindo um maciço ou estrutura reforçada, a Figura 3 mostra algumas de suas aplicações.

Figura 3 – Aplicação de Solo Reforçado

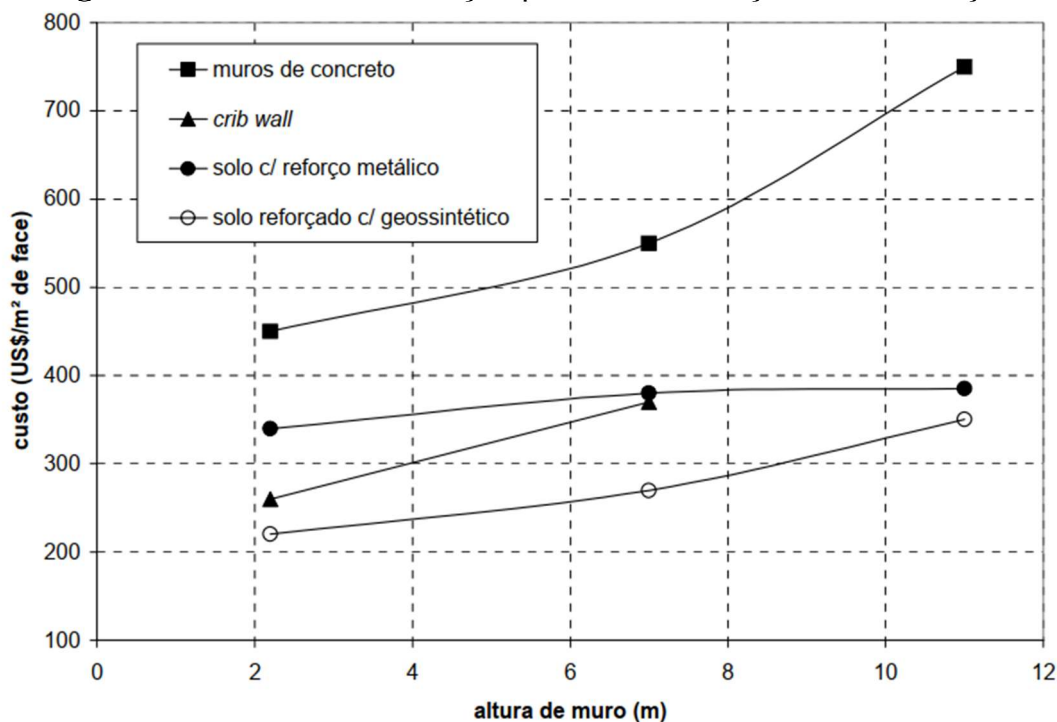


Fonte: British Standards Institution (BSI, 2010).

Além de diversas formas de aplicação dessa técnica, pode-se citar outras vantagens, como: apresenta método simplificado de cálculo; ajuda a reduzir o tempo de execução da obra; não exige mão de obra qualificada; flexibilidade da estrutura e de acabamento da face, sendo assim de fácil locação em espaços urbanos e rurais, em que a vegetação cresce na face da estrutura, como no sistema terramesh verde.

Para além dessas vantagens, os custos relacionados à implementação dessa técnica apresentam-se menores quando comparados a outros tipos de contenção, no geral a economia aumenta com a altura da estrutura, conforme a Figura 4.

Figura 4 – Custos de construção para várias soluções de contenção

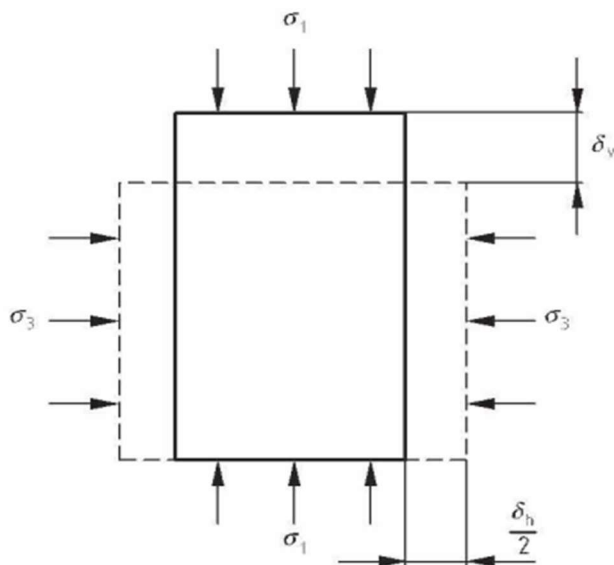


Fonte: Elias et al. (2001).

O solo tem uma resistência à tração inerentemente baixa, mas uma alta resistência à compressão que é limitada apenas pela capacidade do solo de resistir a tensões de cisalhamento aplicadas. O objetivo da incorporação de reforço do solo é absorver as cargas de tração ou cisalhamento, reduzindo assim as cargas que de outra forma poderiam causar a falha do solo, levando ao cisalhamento ou à deformação excessiva (BSI, 2010).

Embora o solo sofra um regime de estresse compressivo, tensões de tração podem surgir dentro da massa de solo (BSI, 2010). Na Figura 5 e Figura 6, é apresentada uma amostra de solo seca confinada por uma tensão compressiva. Na Figura 5, a amostra não reforçada sofrerá uma expansão lateral, essa expansão se dá devido às deformações laterais de tração no interior do solo.

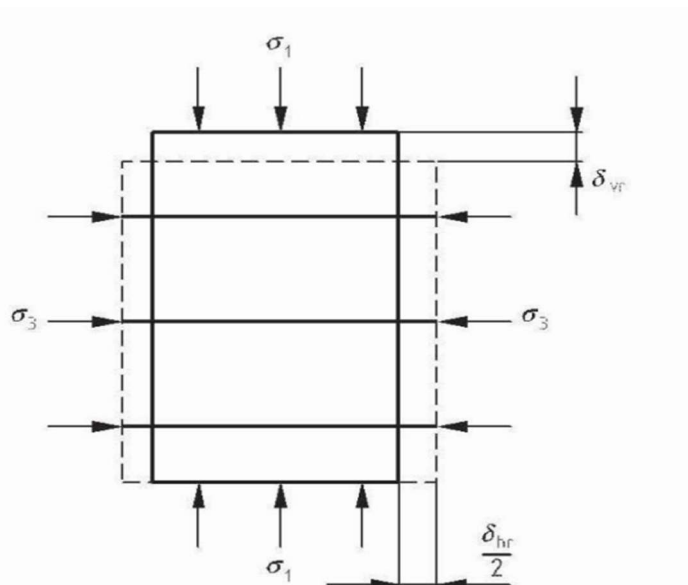
Figura 5 – Elemento de solo não reforçado



Fonte: BSI (2010).

Já na amostra reforçada (Figura 6), considerando o mesmo tipo de solo e as mesmas cargas externas, as deformações resultantes sofrerão uma redução, devido à tensão de confinamento adicional gerada pela interação interna entre solo e reforço.

Figura 6 – Efeito do reforço em um elemento de solo reforçado

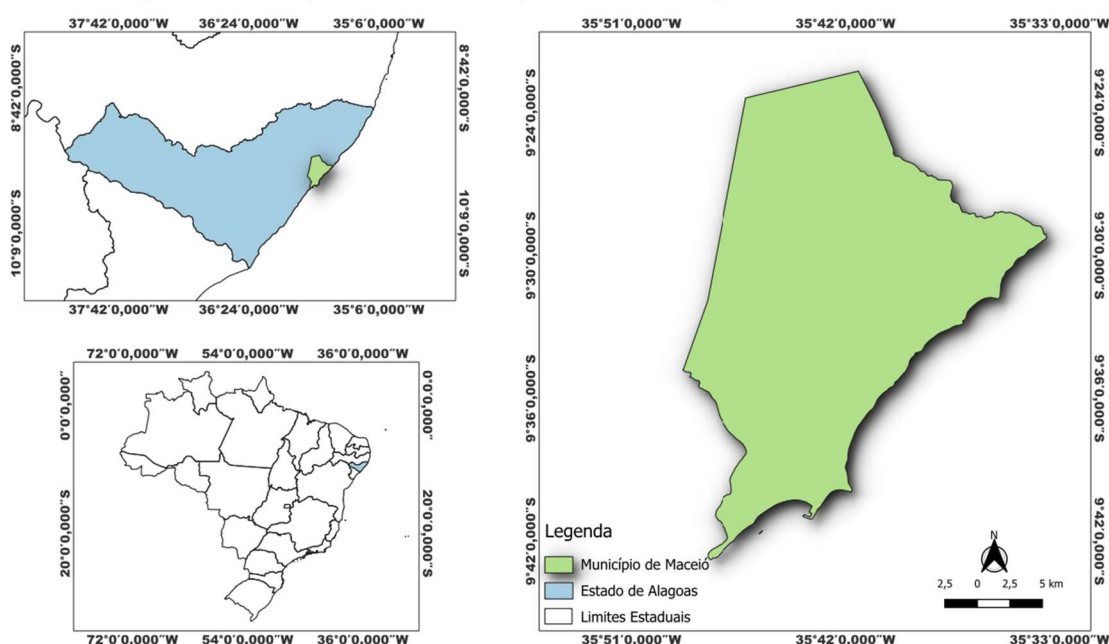


Fonte: BSI (2010).

3.3 ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS DE MACEIÓ

O presente estudo utilizou no desenvolvimento do seu trabalho o solo proveniente de Maceió, capital do estado de Alagoas, cuja localização é apresentada na Figura 7 (IBGE, 2024). A região localiza-se sobre terrenos sedimentares neocenozóicos (formação barreiras) e quaternários, caracterizado por tabuleiros costeiros, planícies fluviomarinhas e formações recifais (Costa; Ramos, 2004).

Figura 7 – Mapa de Localização do Município de Maceió – AL



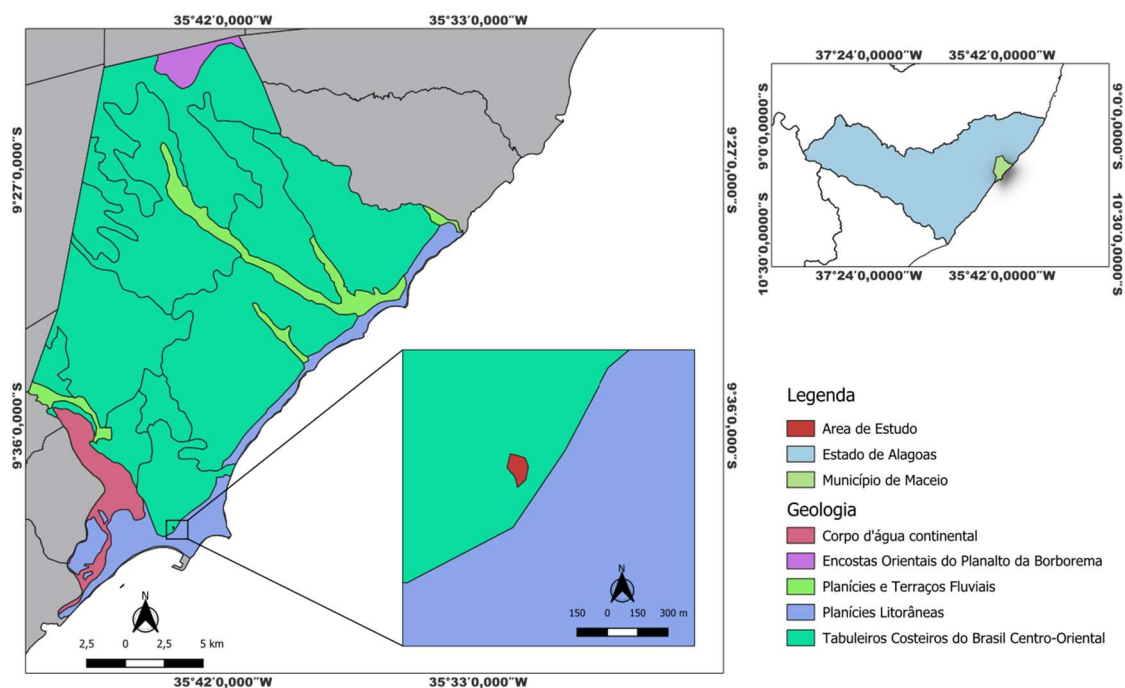
Fonte: Autores (2025).

Segundo Oliveira (2004), a região possui geomorfologicamente duas formas específicas de paisagem física: a planície marinho-lagunar e o planalto sedimentar do tabuleiro. A planície litorânea é constituída de praias, restinga, terraços, recifes, dunas, mangues e rios, estando situada a cinco metros do nível do mar.

De acordo com Silva e Ferreira (2017), a cidade de Maceió, informalmente, pode ser setorizada em duas porções bem distintas, a “cidade baixa”, distribuída sobre os depósitos sedimentares quaternários e distribuídas de frente para o mar, e a “cidade alta”, estruturada sobre os tabuleiros costeiros desenvolvidos sobre os sedimentos da formação barreiras. Entre essas “duas cidades”, existe uma sequência de taludes abruptos, com declividade que podem chegar próximos aos 90°.

A Figura 8 apresenta o mapa da geologia de Maceió, segundo a base cartográfica contínua ao milionésimo (IBGE, 2023), com destaque para a área de estudo.

Figura 8 – Mapa de geologia para Maceió e para a área de projeto.



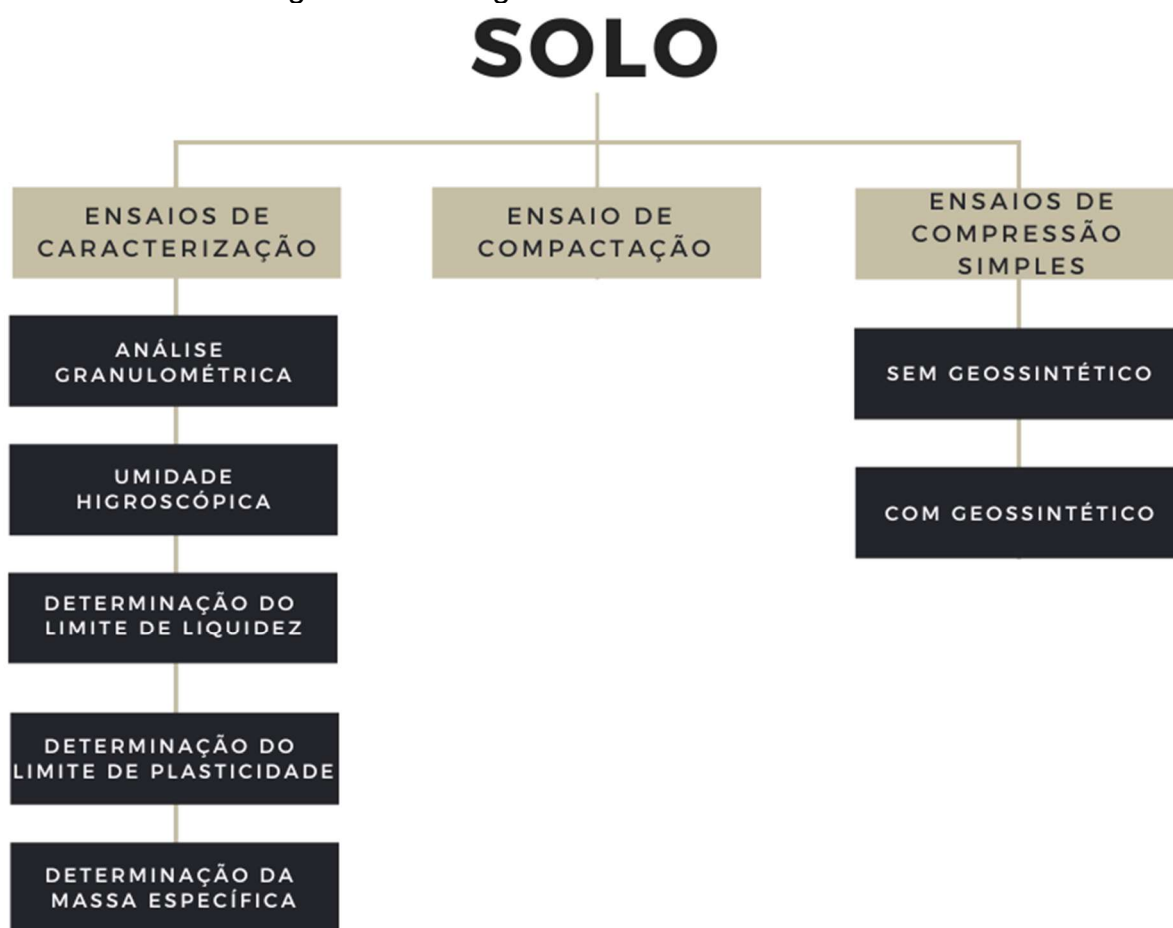
Fonte: Autores (2025).

De acordo com o mapa exploratório de reconhecimento de solos do estado de Alagoas, elaborado pela EMBRAPA junto à SUDENE no estudo "Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado de Alagoas" (1975), a área de estudo está localizada na unidade de mapeamento de solos: AMD1 (associação de areias quartzosas marinhas).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, seguida da escolha do solo e caracterização geomorfológica da área em que o mesmo está inserido. Posteriormente, foram realizados os ensaios de caracterização física do solo, os ensaios de compactação e a seleção dos geossintéticos, para assim, realizar os ensaios de compressão simples no solo compactado com e sem o uso do material proposto, como esquematizado na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma dos ensaios realizados

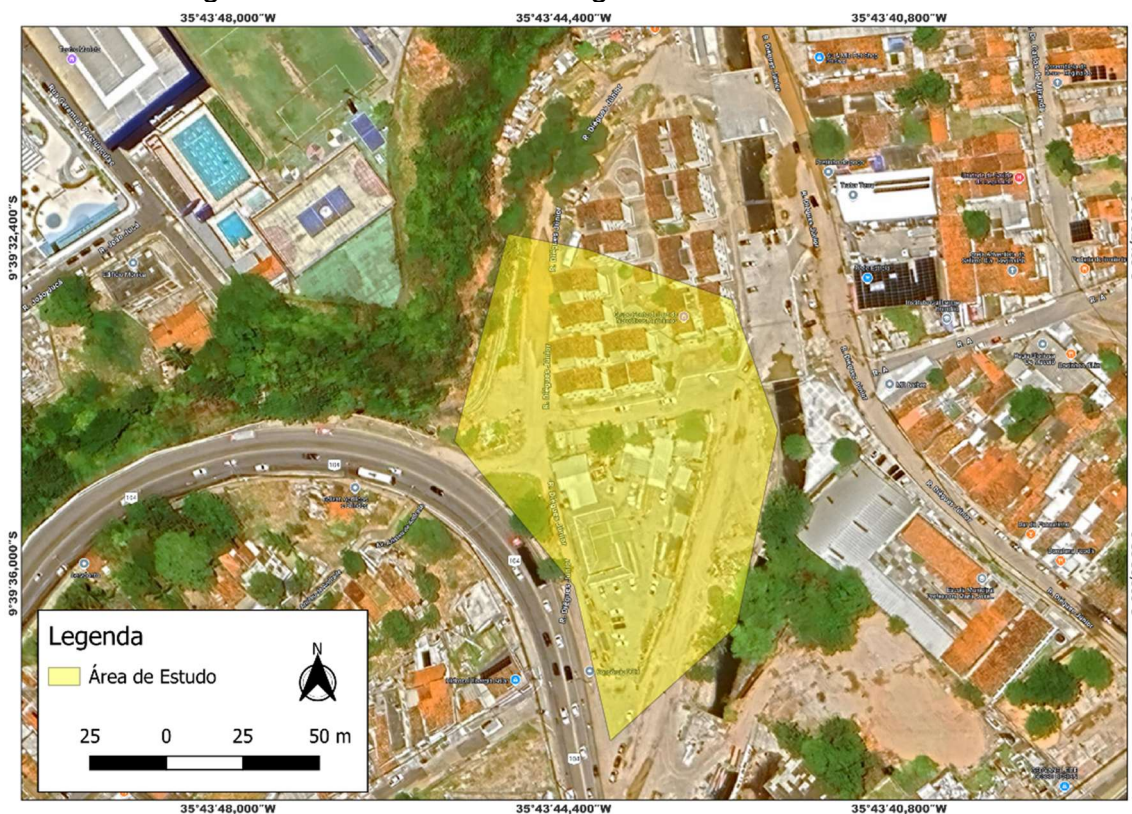


Fonte: Autores (2025).

4.1 COLETA DAS AMOSTRAS

As amostras de solo foram coletadas próximo à Rua Diégues Júnior, nas imediações entre o bairro do Vale do Reginaldo com a ladeira Dr. Geraldo Melo dos Santos, Farol, em Maceió – AL. A Figura 10 ilustra a região da coleta.

Figura 10 – Vista aérea da região da retirada da amostra



Fonte: Autores (2025).

A escolha do ponto de coleta além de levar em consideração fatores como acessibilidade e condições geotécnicas do terreno foi orientada pela necessidade de representar solos característicos da região de Maceió, frequentemente afetada por instabilidades de encostas e problemas estruturais decorrentes da baixa capacidade de suporte dos solos.

A retirada aconteceu com o auxílio de ferramentas manuais. Durante todo o processo foram adotadas medidas para evitar qualquer tipo de contaminação, assegurando a integridade do material coletado e a confiabilidade dos resultados obtidos, conforme recomendações da ABNT (NBR 9604, 2016). Para preservar suas características naturais, as amostras foram transportadas em sacos de náilon e baldes

até o Laboratório de Solos do Instituto Federal de Alagoas (IFAL), onde foram conduzidos os ensaios laboratoriais.

4.2 PREPARO DAS AMOSTRAS

Antes de iniciar os ensaios de caracterização e compactação do solo, foi necessário fazer o preparo adequado das amostras, conforme a ABNT (NBR 6457, 2016). A primeira operação foi secar a amostra ao ar livre até próximo da umidade higroscópica, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Amostra de solo



Fonte: Autores (2025).

Em seguida, foi realizado o destorroamento do solo (Figura 12), evitando quebra de grãos e homogeneizar a amostra. Com o auxílio do quarteador obteve-se uma amostra representativa e quantidade suficiente para a realização dos ensaios.

Figura 12 – Equipamentos para destorroamento



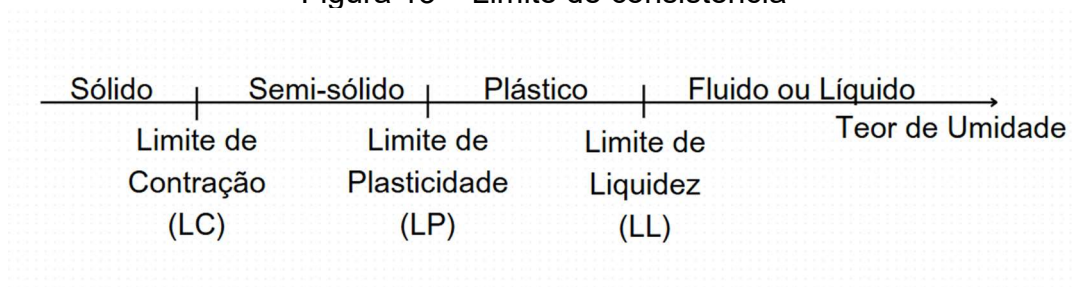
Fonte: Autores (2025).

4.3 CARACTERIZAÇÃO SOLO

4.3.1 Limite de Consistência

O limite de consistência refere-se às propriedades físicas dos solos relacionadas a sua capacidade de deformação e resistência em diferentes teores de umidade. Esses limites foram estabelecidos por Atterberg e posteriormente aprimorados por Casagrande, que classificam o solo em diferentes estados de consistência, representadas na Figura 13 (Pinto, 2006).

Figura 13 – Limite de consistência



Fonte: Adaptado Souza Pinto, (2006).

4.3.2 Limite de Liquidez

O limite de liquidez (LL) é um dos índices de consistência dos solos, definido como o teor de umidade no qual um solo coesivo passa do estado plástico para o estado líquido (Pinto, 2006). Conforme a ABNT (NBR 6459, 2016), o limite de liquidez é determinado por meio de um ensaio padronizado, onde uma amostra de solo é submetida a golpes sucessivos em um aparelho normalizado (aparelho de Casagrande), até que uma ranhura de 1cm previamente feita na amostra se feche após 25 golpes. A Figura 14 apresenta o aparelho de Casagrande.

Figura 14 – Aparelho de Casagrande



Fonte: Autores (2025).

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

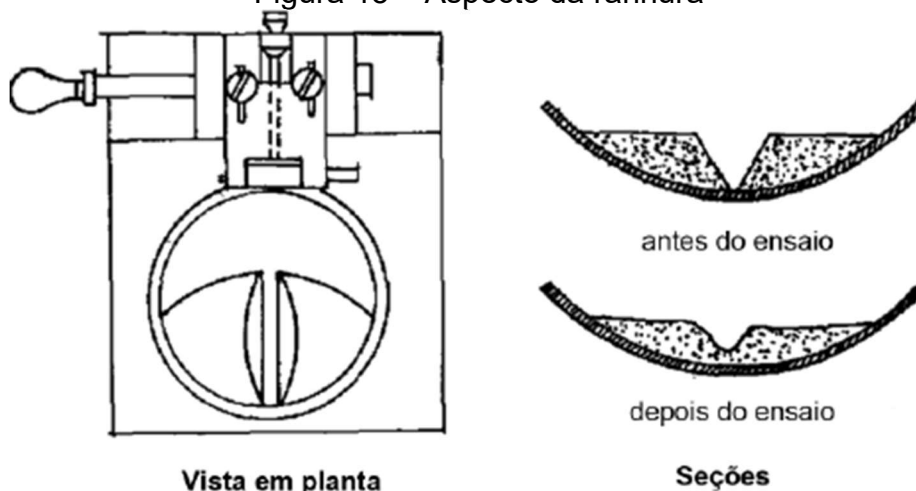
- a) estufa capaz de manter a temperatura de 60 °C a 65 °C e 105 °C a 110 °C;
- b) cápsula de porcelana com aproximadamente 120mm de diâmetro;

- c) espátula de lâmina flexível com aproximadamente 80mm de comprimento e 20mm de largura;
- d) aparelho de Casagrande;
- e) cinzel com as características normalizadas;
- f) recipientes adequados (pares de vidros de relógio com grampo), que evitem a perda de umidade da amostra;
- g) balança com resolução de 0,01g e sensibilidade compatível;
- h) gabarito para verificação da altura de queda da concha;
- i) esfera de aço com 8mm de diâmetro.

Antes de iniciar, foi necessário fazer a inspeção e a calibração do aparelho, conforme a ABNT (NBR 6459, 2016). Em seguida, a fração da amostra ensaiada foi obtida após passar o solo na peneira de 0,42 mm, com massa mensurada de 100g de solo.

Durante o ensaio, foi adicionada a amostra água destilada em pequenos incrementos, misturando com o auxílio da espátula, de forma a obter uma pasta homogênea. Para cada teor de umidade, o solo foi transferido para o aparelho de Casagrande e o ensaio foi executado, com a massa de solo úmido sendo dividida em duas partes com o auxílio do cinzel, de maneira a abrir uma ranhura na parte central, conforme a Figura 15. Em seguida, girava-se a manivela do aparelho de forma a deixar a concha cair em queda livre, golpeando contra a base. Verificou-se o número de golpes necessários para que as bordas inferiores da ranhura se unissem para cada teor de umidade, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Aspecto da ranhura



Fonte: NBR 6459 (2016).

Para determinação da umidade em cada ponto do ensaio foi utilizada a seguinte equação (1):

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

- a) h – Teor de umidade, em porcentagem;
- b) P_h - Peso do material úmida;
- c) P_s - Peso do seco em estufa.

Com os resultados, obteve-se um gráfico em escala logarítmica e uma reta com os pontos ensaiados para obter o teor de umidade correspondente a 25 golpes, que é o limite de liquidez do solo, conforme a ABNT (NBR 6459,2016).

4.3.3 Limite de Plasticidade

O limite de plasticidade (LP) é o teor de umidade no qual um solo coesivo deixa de ser plástico e passa a um estado semissólido. Em outras palavras, é o menor teor de umidade no qual o solo pode ser moldado sem se romper. De acordo com a ABNT (NBR 7180, 2016), o limite de plasticidade é o teor de umidade em que o solo se rompe quando é amassado e roloado manualmente sobre uma superfície plana até formar fios com aproximadamente 3 mm de diâmetro.

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) estufa capaz de manter a temperatura de 60° - 65°C e de 105° - 110°C;
- b) cápsula de porcelana com aproximadamente 120mm de diâmetro;
- c) espátula de lâmina flexível, com aproximadamente 80mm de comprimento e 20mm de largura;
- d) recipientes adequados (pares de vidros de relógio com grampo), que evitem a perda de umidade da amostra;
- e) balança que permita pesar nominalmente 200g, com resolução de 0,01g;
- f) gabarito cilíndrico para comparação, com 3mm de diâmetro e 100mm de comprimento;
- g) placa de vidro de superfície esmerilhada, com cerca de 30cm de lado.

Figura 16 – Arranjos experimentais gerais



Fonte: Autores (2025).

A fração da amostra ensaiada foi obtida após passar na peneira de 0,42 mm, com massa mensurada de 50g de solo. Foi adicionado ao solo água destilada em pequenos incrementos, misturando-as com o auxílio da espátula, de forma a obter uma pasta homogênea. Com isso, foi separada uma porção de material e formando-se uma pequena bola, que foi rolada contra a placa de vidro com pressão suficiente para lhe dar uma forma de cilindro.

Com o cilindro de solo com diâmetro de 3mm e comprimento de 100mm, aproximadamente, foi colocado nos pares de vidros de relógio com grampo para determinação de umidade, conforme a ABNT (NBR 6457, 2024). Repetiu-se a operação de forma a se obter cinco valores de umidade.

O cálculo do teor de umidade foi realizado da mesma forma que no ensaio de Limite de Liquidez.

Para o cálculo do limite de plasticidade, calculou-se a média aritmética dos valores da umidade de cada ensaio, comparando cada umidade com a umidade média. Para diferenças que se desviassem de 5% da média, descartou-se o valor da umidade e recalculou-se uma nova umidade

4.3.4 Índice de Plasticidade

Obteve-se o índice de plasticidade dos solos por meio da equação (2):

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

Onde:

- a) IP – Índice de Plasticidade;
- b) LL – Limite de Liquidez;
- c) LP – Limite de Plasticidade.

Segundo Jenkins, citado por Caputo (2015), os solos classificam-se quanto à plasticidade como:

- a) Solos não plástico, $IP = 0$;
- b) Solo de baixa plasticidade, $1 < IP < 7$;
- c) Solo de plasticidade média, $7 < IP < 15$;
- d) Solo de alta plasticidade, $IP > 15$.

4.3.5 Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria tem o objetivo de determinar a distribuição das partículas do solo em diferentes faixas de tamanho, permitindo classificá-lo de acordo com sua composição granulométrica, de acordo com a ABNT (NBR 7181, 2025).

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Estufa capaz de manter a temperatura entre 105° e 110°C;
- b) Balanças que permitam pesar 10 kg e 200g, resoluções de 1g e 0,01g respectivamente;
- c) Recipientes adequados, como dessecadores, que permitam guardar amostras sem variação de umidade;
- d) Aparelho de dispersão;
- e) Peneiras com aberturas de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,8 mm, 2,0 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm.
- f) Escova com cerdas metálicas;

Uma amostra de massa total de 1kg foi passada na peneira de 2,0mm, de forma a assegurar que a retenção do material na peneira seja somente dos grãos maiores que a abertura da malha. Em seguida, o material retido foi lavado em água corrente e levado a estufa, conforme Figura 17.

Figura 17 – Material retido na peneira de 2,0mm



Fonte: Autores (2025).

Em seguida, o material retido na peneira 2,0mm passou pelo peneiramento grosso, passando nas peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5 e 4,8 mm, anotando as massas retidas em cada peneira, conforme a Figura 18.

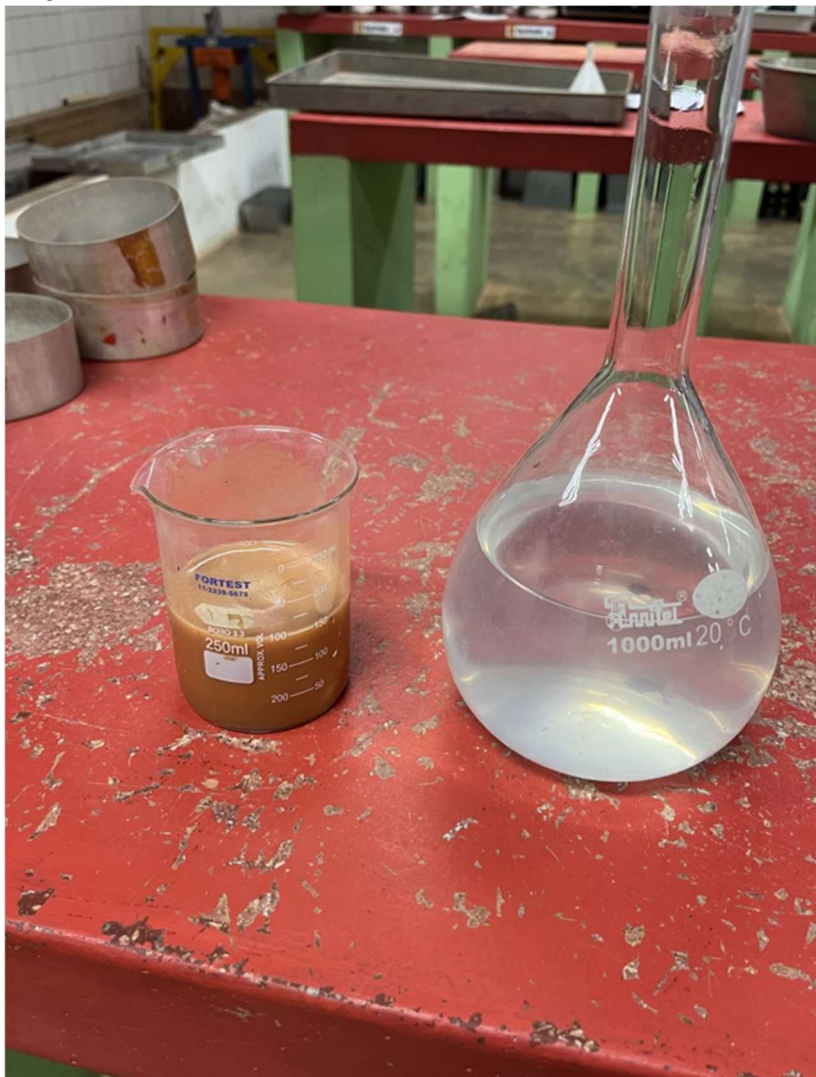
Figura 18 – Peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5, 4,8 e 2,0 mm



Fonte: Autores (2025).

Com o material passante da peneira de 2,0mm, tomou-se cerca de 150g para três determinações da umidade higroscópica. Inicialmente, pegou-se 70g de solo, conforme a ABNT (NBR 7181, 2025) para solos siltosos ou argiloso, o material foi transferido para um béquer e juntou-se com o defloculante, 125cm³ de solução de hexametáfosfato de sódio com a concentração de 45,7g do sal por 1.000cm³ de solução, e em seguida deixou-se em repouso por mais de 12 horas (ver Figura 19).

Figura 19 – Amostra de solo com defloculante e material defloculante



Fonte: Autores (2025).

Depois do repouso, o material foi removido do béquer com o auxílio de água destilado para o aparelho dispersor, em seguida, adicionou-se mais água desliada até que seu nível fique 5cm abaixo das bordas do aparelho dispersor e foi submetido à ação por cerca de 15 minutos, conforme Figura 20.

Figura 20 – Aparelho dispersor e amostra de solo com defloculante



Fonte: Autores (2025).

Por fim, o material passado no dispersor foi lavado na peneira de 0,075 mm e o que ficou retido na peneira foi levado para a estufa. Com o material devidamente seco, passando nas peneiras de 1,2; 0,6; 0,42; 0,3; 0,15 e 0,075 mm, anotando as massas retidas acumuladas em cada peneira, conforme a Figura 21.

Figura 21 – Peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,3, 0,15 e 0,075 mm



Fonte: Autores, (2025).

Para o cálculo da amostra total seca, utilizou-se a equação (3):

$$M_s = \frac{(M_t - M_g)}{(100 + h)} \times 100 + M_g \quad (3)$$

Onde:

- M_s = Massa total da amostra seca;
- M_t = Massa da amostra seca ao ar;
- M_g = Massa do material seco retido acumulado na peneira de 2,0mm;
- h = Umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0mm.

Calcular as porcentagens do material que passam nas peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5 e 4,8 mm, utilizou-se a equação (4):

$$M_s = \frac{(M_t - M_g)}{(100 + h)} \times 100 + M_g \quad (4)$$

Onde,

- Q_g = Porcentagem de material passado em cada peneira;
- M_s = Massa total da amostra seca;
- M_i = Massa do material retido acumulado em cada peneira.

Para calcular as porcentagens do material que passam nas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,3, 0,15 e 0,075 mm, utilizou-se a equação (5):

$$Q_f = \frac{M_h \times 100 - M_i(100 + h)}{M_h \times 100} \times N \quad (5)$$

Onde,

- a) Q_f = Porcentagem de material passado em cada peneira;
- b) M_h = Massa do material úmido submetido ao peneiramento fino;
- c) h = Umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0mm;
- d) M_i = Massa do material retido acumulado em cada peneira;
- e) N = Porcentagem de material que passa na peneira de 2,0mm.

4.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O Ensaio de compactação foi executado conforme a ABNT (NBR 7182, 2016), que tem como objetivo determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica seca do solo, identificando o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima para um determinado esforço de compactação.

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Balanças que permitam pesar 10 kg e 200g, resoluções de 1g e 0,01g respectivamente;
- b) Peneiras de 19 e 4,8 mm;
- c) Estufa capaz de manter a temperatura entre 105° e 110°C;
- d) Cápsulas metálicas, com tampa, para determinação de umidade;
- e) Bandejas metálicas;
- f) Régua de aço biselada com comprimento de 30cm;
- g) Espátulas de lâmina flexível, com 10cm e 2cm de largura e 12cm de comprimento;
- h) Cilindro metálico pequeno (cilindro de Proctor), composto de base e colarinho, com as dimensões especificadas pela ABNT (NBR 7182, 2016);
- i) Soquete pequeno – com massa de 2500 ± 10g e altura de queda de 305 ± 2mm;
- j) Extrator de corpo de prova;
- k) Conchas metálicas com capacidade de 1000cm³ e 500cm³;
- l) Base rígida;

m) Papel filtro com diâmetro igual ao do molde empregado.

Figura 22 – Arranjos experimentais gerais e amostra de solo com 3kg



Fonte: Autores (2025).

As amostras deformadas utilizadas nos ensaios foram secas ao ar livre, destorroadas e não apresentaram torrões superiores de 4,8mm, conforme indicado pela ABNT (NBR 6457, 2016). Posteriormente, conforme indicado na Tabela 2, o ensaio foi realizado com reuso de material, cilindro pequeno e energia de compactação proctor normal, assim, faz-se uso de 3kg de material devidamente homogeneizado.

Tabela 2 – Quantidades de amostra a serem utilizadas

Ensaio de compactação	A amostra preparada passa integralmente na peneira (mm)	Cilindro a ser utilizado no ensaio	Quantidade de amostra (em massa seca) a ser utilizada (kg)
Com reuso de material	4,8	Pequeno	3
		Grande	7
Sem reuso de material	19,1	Grande	7
		Pequeno	15
		Grande	35
	19,1	Grande	35

Fonte: NBR 6457 (2016).

Após a adição de água destilada em 3kg de solo, prestando-se atenção à homogeneização da mistura, compactou-se parte da amostra no molde cilíndrico

pequeno em três camadas iguais de solo por meio de 26 golpes do soquete pequeno por camada, conforme a Tabela 3. A compactação de cada camada foi precedida de escarificação superficial do material, a fim de garantir uma melhor ligação entre as camadas.

Tabela 3 – Energias de compactação

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
Pequeno	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27

Fonte: NBR 7182 (2016).

Após a compactação da última camada, o colarinho foi removido e o material em excesso de solo compactado acima do molde foi removido e rasado com o auxílio de régua biselada. Em seguida, o corpo de prova compactado foi removido do molde com o auxílio do extrator de amostra. O corpo de prova foi pesado e do seu centro retirado amostras representativas para determinação da umidade na estufa.

O corpo de prova foi desmanchado e todo o procedimento foi repetido até se obter cinco pontos para determinar a curva de compactação.

Para o cálculo da massa específica seca, utilizou-se a equação (6):

$$\gamma_s = \frac{P_h \times 100}{V (100 + h)} \quad (6)$$

Onde:

- a) γ_s = Massa específica aparente seca, em g/cm³;
- b) P_h = Peso úmido do solo compactado, em g;
- c) V = Volume útil do molde cilíndrico, em cm³;
- d) h = Teor de umidade do solo compactado, em %.

4.5 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DOS GEOSSINTÉTICOS

Para os ensaios de compressão simples, foram utilizados dois tipos de geossintéticos visando avaliar o impacto de diferentes produtos na resistência à compressão simples do solo.

4.5.1 MacGrid Net

Um dos geossintéticos empregado foi o MacGrid Net®, conforme a Figura 23, fabricado pela empresa Maccaferri. A malha é classificada como tecido técnico, sendo produzida a partir de filamentos de poliéster de alta tenacidade e revestidos com PVC, possibilitando proteção contra possíveis danos químicos, biológicos e ambientais, além de proporcionar elevada resistência à tração (Maccaferri, 2019). Nas Tabela 4 e Tabela 5 é possível verificar as especificações técnicas apresentadas pela fabricante.

Figura 23 – Geotêxtil Macgrid Net



Fonte: Autores (2025).

Tabela 4 – Propriedades físicas do MacGrid NET

Propriedades físicas			
Gramatura	EN ISSO 2286	g/m ²	300 ± 21
Espessura	EN ISSO 2286	mm	0,6 ± 0,05

Fonte: Adaptado Maccaferri (2019).

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do MacGrid NET

Propriedades mecânicas			
Resistência à tração longitudinal (min)	ASTM D6637	kN/m	45
Resistência à tração transversal (min)	ASTM D6637	kN/m	45
Alongamento (máx)	ASTM D6637	%	15

Fonte: Adaptado Maccaferri (2019).

4.5.2 Geogrelha unidirecional

O outro material empregado foi uma geogrelha unidirecional de alta resistência, conforme a Figura 24, desenvolvida para aplicações que exigem elevadas capacidades de carga em uma direção específica. Este tipo de geogrelha é fabricado com filamentos de poliéster de alta tenacidade, possui uma resistência à tração característica de 400 kN/m e abertura de malha de 1,5 cm. Sua estrutura unidirecional concentra as fibras de alta resistência em uma única direção, otimizando o desempenho em projetos onde a tensão principal é predominantemente uniaxial.

Figura 24 – Geogrelha unidirecional utilizada



Fonte: Autores (2025).

4.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

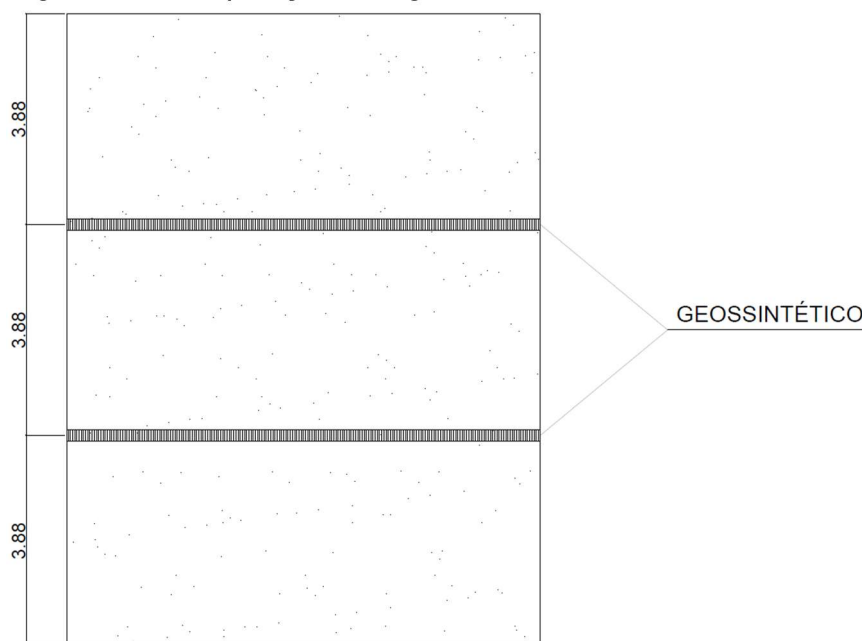
O ensaio de compressão foi executado conforme a ABNT (NBR 12770, 2022), cujo objetivo é determinar a resistência à compressão, sendo não confinada ou simples, de corpos de prova formados por solos coesivos, por meio da aplicação de uma carga axial.

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Prensa hidráulica automática com capacidade de controle de velocidade de deformação axial constante;
- b) Balança que permite pesar 10 kg e 200g, resoluções de 1g e 0,01g respectivamente;
- c) Estufa capaz de manter a temperatura entre 105° e 110°C;
- d) Cápsulas metálicas, com tampa, para determinação de umidade;
- e) Paquímetro analógico;

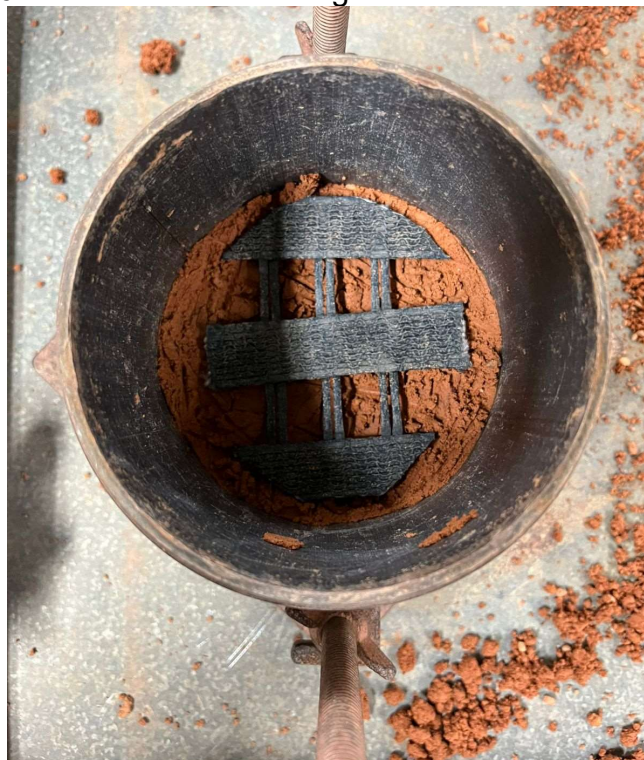
Para o ensaio, foram utilizados corpos de prova compactados em cilindros metálicos pequenos, nos quais as dimensões são especificadas pela ABNT (NBR 7182, 2016), adotando o teor de umidade ótima. Os ensaios foram executados com corpos de prova produzidos apenas com solo e adicionando-se geossintéticos entre as camadas compactadas, conforme as Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 – Disposição dos geossintéticos entre as camadas



Fonte: Autores (2025).

Figura 26 – Posicionamento do geossintético entre as camadas



Fonte: Autores (2025).

Após a compactação das amostras de solo, cada corpo de prova foi individualmente centralizado na prensa, com a utilização de pratos inferiores para que encostassem no pistão antes do início da aplicação do carregamento, conforme a Figura 27. Depois de posicionado, o corpo de prova foi submetido a uma carga com uma velocidade de deformação axial específica constante, com valores entre 0,5% H/min e 2% H/min. Em seguida, foram documentados os dados de carga, deslocamento e tempo, a fim de gerar a curva de tensão-deformação.

Figura 27 – Posicionamento do corpo de prova na prensa



Fonte: Autores (2025).

Após o ensaio de compressão, foram retiradas pequenas amostras do centro do corpo de prova para a determinação do teor de umidade do solo.

Para o cálculo da deformação axial específica ϵ , utilizou-se a equação (7):

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad (7)$$

Onde,

- a) ϵ = deformação axial específica, em porcentagem (%);
- b) ΔH = variação de altura do corpo de prova, em milímetros (mm);
- c) H = altura inicial do corpo de prova, em milímetros (mm).

Para o cálculo da área da seção transversal média, A , utilizou-se a equação (8):

$$A = \frac{(100 \times A_i)}{(100 - \epsilon)} \quad (8)$$

Onde,

- a) A_i = área da seção transversal média inicial, em metros quadrados (m^2);
- b) ϵ = deformação axial específica, em porcentagem (%).

Para o cálculo da tensão de compressão, q_u , utilizou-se a equação (9):

$$q_u = \frac{P}{A} \quad (9)$$

Onde,

- a) P = carga aplicada, em quilonewtons (kN);
- b) A = área da seção transversal média, em metros quadrados (m^2).

Durante a etapa de produção de corpos de prova com geossintéticos, duas amostras foram descartadas para os ensaios de compressão simples devido a dificuldades na sua preparação. Uma dessas ocorrências se deu com a fabricação das amostras reforçadas com geogrelha. Observou-se uma não aderência entre as camadas de solo, possivelmente devido à malha da geogrelha possuir um diâmetro maior que o diâmetro interno do cilindro de compactação. Essa incompatibilidade dimensional resultou em atrito excessivo entre as paredes do cilindro e a geogrelha durante a compactação, o que causou o levantamento da camada de solo previamente adensada, conforme ilustrado na Figura 28 e Figura 29.

Figura 28 – Corpo de prova reforçado com geogrelha, sem aderência entre as camadas



Fonte: Autores (2025).

Figura 29 – Corpo de prova reforçado com geogrelha, sem aderência entre as camadas



Fonte: Autores (2025).

De forma similar, observou-se baixa aderência entre as camadas nas amostras reforçadas com geotêxtil. Inicialmente, o geotêxtil foi cortado com 100 mm de diâmetro, aproximadamente equivalente ao diâmetro interno do cilindro de compactação. Contudo, devido às aberturas (malhas) significativamente menores em comparação com as geogrelhas, essa configuração resultou em uma interface com baixa aderência entre as camadas de solo, comprometendo a integridade do corpo de prova, como mostra a Figura 30.

Figura 30 – Corpo de prova reforçado com geotêxtil, sem aderência entre as camadas



Fonte: Autores (2025).

Para contornar essa dificuldade e permitir o prosseguimento dos ensaios, foi necessário reduzir o diâmetro do geotêxtil para 80 mm. Essa alteração dimensional criou um anel de contato direto entre as camadas de solo na periferia do corpo de prova, facilitando a aderência e a compactação homogênea, como pode ser observado na Figura 31.

Figura 31 – Formação do “anel de contato” entre as camadas



Fonte: Autores (2025).

Os ensaios de compressão simples foram realizados em corpos de prova de solo nas condições não reforçada (CP-S), reforçada com geogrelha (CP-GGR) e reforçada com geotêxtil (CP-GTX), conforme a Quadro 1. O objetivo foi determinar a resistência à compressão simples e o comportamento tensão-deformação de cada tipo de amostra. As dimensões iniciais dos corpos de prova foram padronizadas, com diâmetro de aproximadamente 100 mm e altura de aproximadamente 110 mm. O teor de umidade dos corpos de prova foi controlado, buscando a umidade ótima determinada no ensaio de compactação (13,8%).

Quadro 1 – Lista de corpos de prova para o ensaio de compressão simples

Solo	Geogrelha	Geotêxtil
CP-S-01	CP-GGR-01	CP-GTX-01
CP-S-02	CP-GGR-02	CP-GTX-02*
CP-S-03	CP-GGR-03*	

Fonte: Autores (2025).

Nota: * Amostras descartadas

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ

No ensaio de Casagrande, foram utilizados seis pontos com diferentes teores de umidade, listados na Tabela 6. Com os presentes dados, foi possível construir o gráfico de Teor de umidade (%) x Número de golpes, Figura 32. A partir do gráfico, obteve-se o limite de liquidez de 24,46% correspondente a 25 golpes, utilizando extrapolação linear, conforme indicado na ABNT (NBR 6459, 2016).

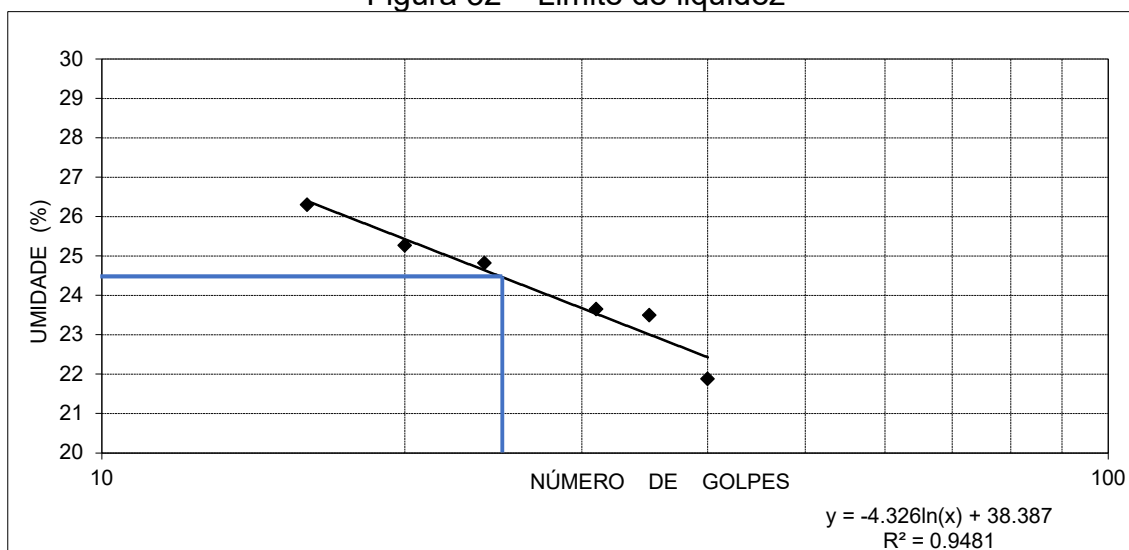
Tabela 6 – Dados do ensaio de limite de liquidez

Cápsula nº	Peso bruto úmido (g)	Peso bruto seco (g)	Peso da cápsula (g)	Peso da água (g)
339	48,86	47,74	42,62	1,12
353	45,36	44,03	38,37	1,33
112	47,55	46,19	40,44	1,36
204	44,99	43,60	38,00	1,39
63	44,74	43,32	37,70	1,42
244	45,93	44,82	40,60	1,11

Cápsula nº	Peso do solo seco (g)	Umidade (%)	Número de pancadas
339	5,12	21,87	40
353	5,66	23,50	35
112	5,75	23,65	31
204	5,60	24,82	24
63	5,62	25,27	20
244	4,22	26,30	16

Fonte: Autores (2025).

Figura 32 – Limite de liquidez



Fonte: Autores (2025).

5.2 ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE

Para definir o limite de plasticidade, foram ensaiadas cinco amostras, por recomendação da ABNT (NBR 7180, 2016), a amostra da cápsula número 301 foi descartada, pois apresentou umidade maior que 5% da média. Com o restante das amostras, chegou-se ao limite de plasticidade de 13,76%. Os dados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados do ensaio de limite de plasticidade

(continua)

Cápsula nº	Peso bruto úmido (g)	Peso bruto seco (g)	Peso da cápsula (g)	Peso da água (g)
241	39,91	39,66	37,86	0,25
301*	42,66	42,37	40,39	0,29
157	42,14	41,85	39,84	0,29
202	40,42	40,19	38,47	0,23
114	42,35	42,13	40,48	0,22

Tabela 7 – Dados do ensaio de limite de plasticidade

(conclusão)

Cápsula nº	Peso do solo seco (g)	Umidade (%)	Limite de plasticidade (%)
241	1,80	13,89	
301*	1,98	14,65	
157	2,01	14,43	13,76
202	1,72	13,37	
114	1,65	13,33	

Fonte: Autores (2025).

Nota: * Amostra descartada devido a desviar mais que 5% da média de umidade

O valor obtido para o limite de plasticidade foi de 13,76%, o que, em conjunto com o limite de liquidez previamente determinado, resulta em um índice de plasticidade de 10,71%, caracterizando um solo de plasticidade média, conforme a classificação da ABNT.

5.3 ENSAIO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A determinação da umidade higroscópica do solo natural foi obtida através de três amostras do solo ensaiado, obtendo um valor médio de 0,69%, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Umidade higroscópica do solo natural

(continua)

Cápsula nº	Peso bruto úmido (g)	Peso bruto seco (g)	Peso da cápsula (g)	Peso da água (g)
79377	75,72	75,36	23,74	0,36
799977	70,06	69,71	18,54	0,35
79393	70,25	69,90	19,08	0,35

Tabela 8 – Umidade higroscópica do solo natural

(conclusão)

Cápsula nº	Peso do solo seco (g)	Umidade (%)	Limite de plasticidade (%)
79377	51,62	0,70	
799977	51,17	0,68	0,69
79393	50,82	0,69	

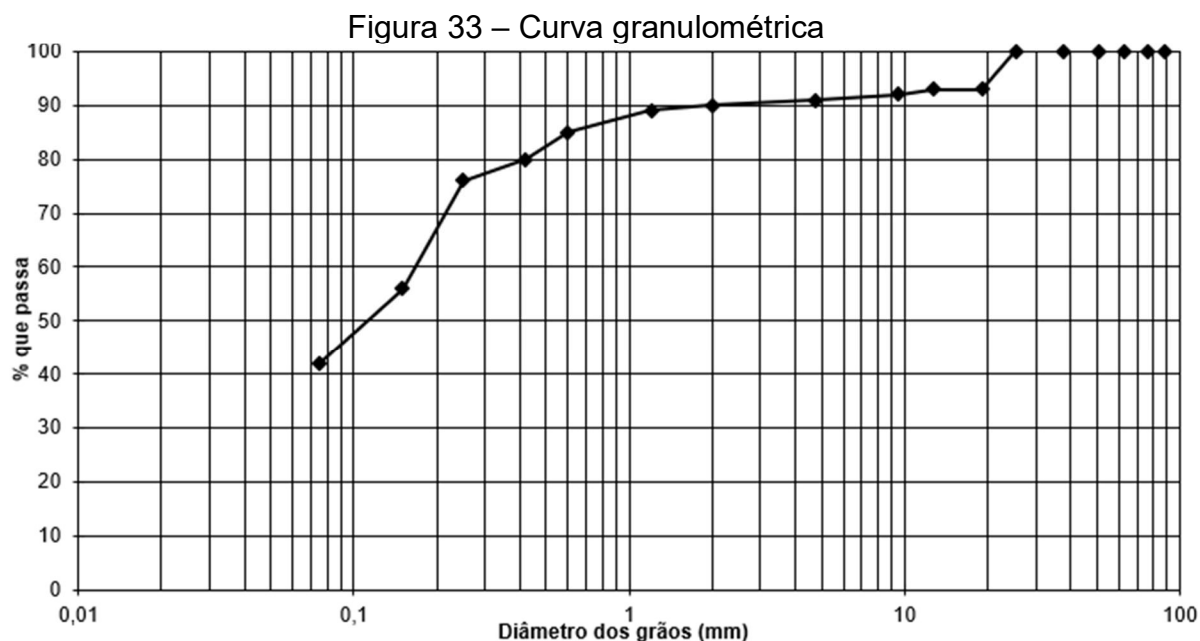
Fonte: Autores (2025).

Com o objetivo de determinar a curva granulométrica, foi realizado o ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação seguindo os procedimentos dispostos na ABNT (NBR 7181, 2025). Com o resultado do peneiramento grosso e fino foi possível traçar a curva granulométrica, apresentadas na Tabela 9 e Figura 33.

Tabela 9 – Composição granulométrica do solo
Composição granulométrica (%) ABNT

Pedregulho	9
Areia grossa	1
Areia média	10
Areia fina	38
Silte+Argila	42

Fonte: Autores (2025).



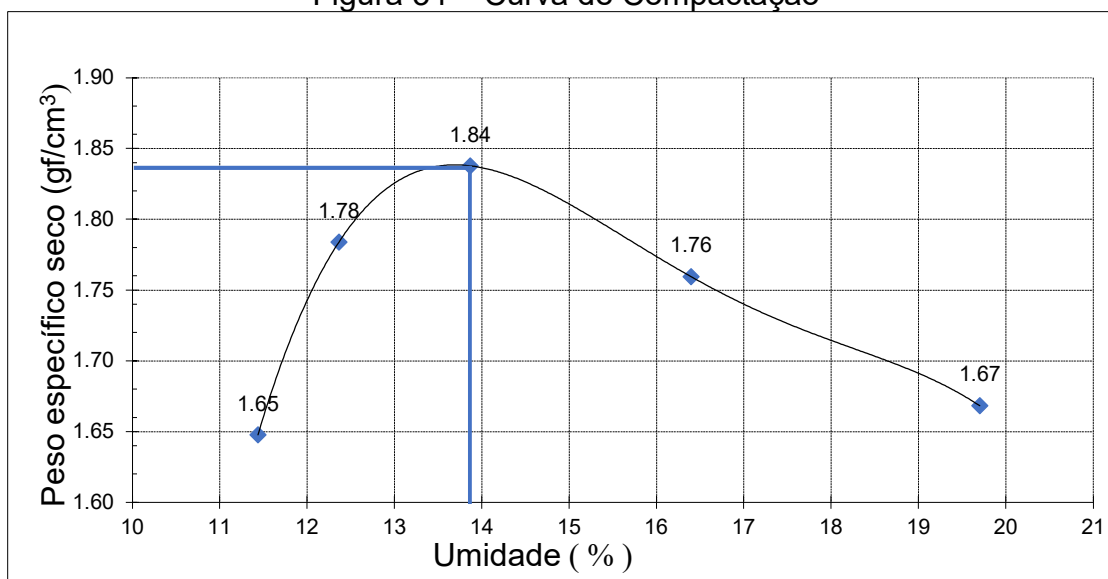
Fonte: Autores (2025).

Através da análise da curva e como base a classificação de solos do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), foi possível observar que o solo ensaiado pertence ao grupo SC classificado como areia argilosa.

5.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

A curva de compactação foi realizada conforme a ABNT (NBR 7182, 2016) e com energia de compactação proctor normal. A Figura 34 representa o gráfico dos pontos coletados com relação ao peso específico aparente seco e a umidade. Com isso, observa-se que o solo apresenta massa específica seca máxima de 1,84 g/cm³ e umidade ótima de 13,8%.

Figura 34 – Curva de Compactação



Fonte: Autores (2025).

5.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

5.5.1 Corpos de Prova de Solo Não Reforçado (CP-S)

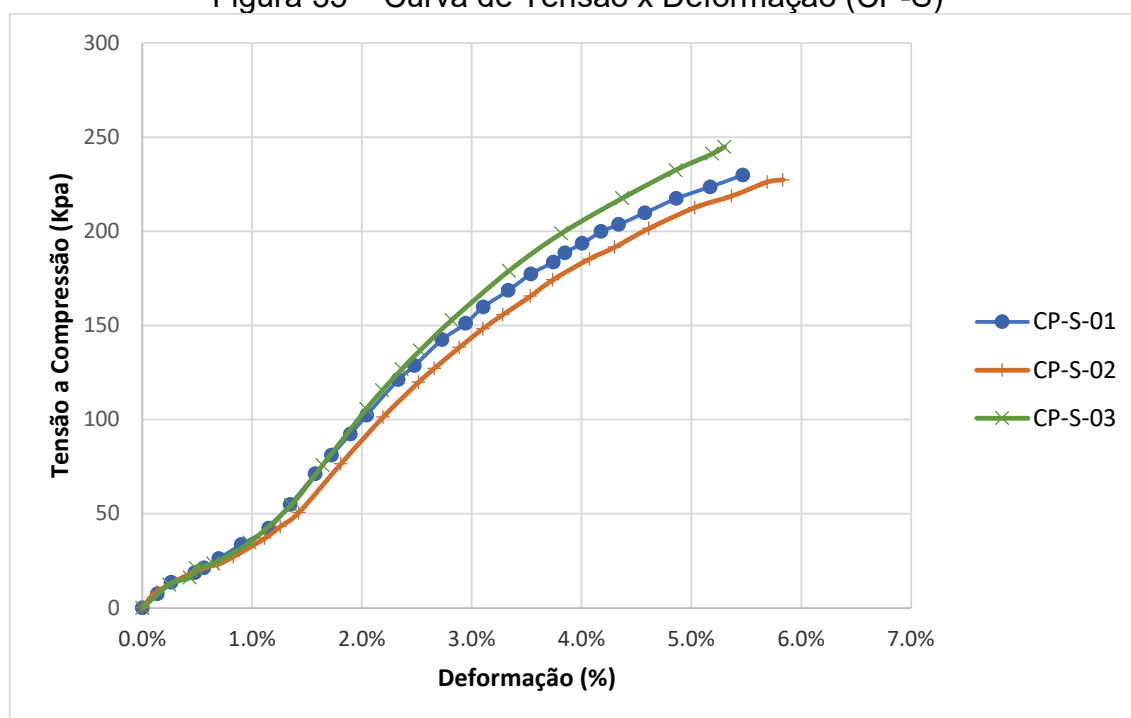
Foram ensaiados três corpos de prova de solo sem qualquer tipo de reforço (CP-S-01, CP-S-02 e CP-S-03). Os resultados individuais de resistência à compressão simples (Q_u), deformação na ruptura e umidade para cada um desses corpos de prova são apresentados na Tabela 10. As curvas de tensão-deformação correspondentes são mostradas na Figura 35, ilustrando o comportamento mecânico do solo natural sob carregamento axial.

Tabela 10 – Resultados dos Ensaio (CP-S)

Amostras	Q_u (kPa)	Deformação na ruptura (%)	γ (g/cm ³)	w (%)	Índice de vazios	Grau de saturação (%)
CP-S-01	230	5,5	1,83	13,85	0,48	78,23
CP-S-02	227	5,8	1,80	14,10	0,50	76,68
CP-S-03	245	5,3	1,72	11,59	0,57	54,50

Fonte: Autores (2025).

Figura 35 – Curva de Tensão x Deformação (CP-S)



Fonte: Autores (2025).

5.5.2 Corpos de Prova de Solo Reforçado com Geogrelha (CP-GGR)

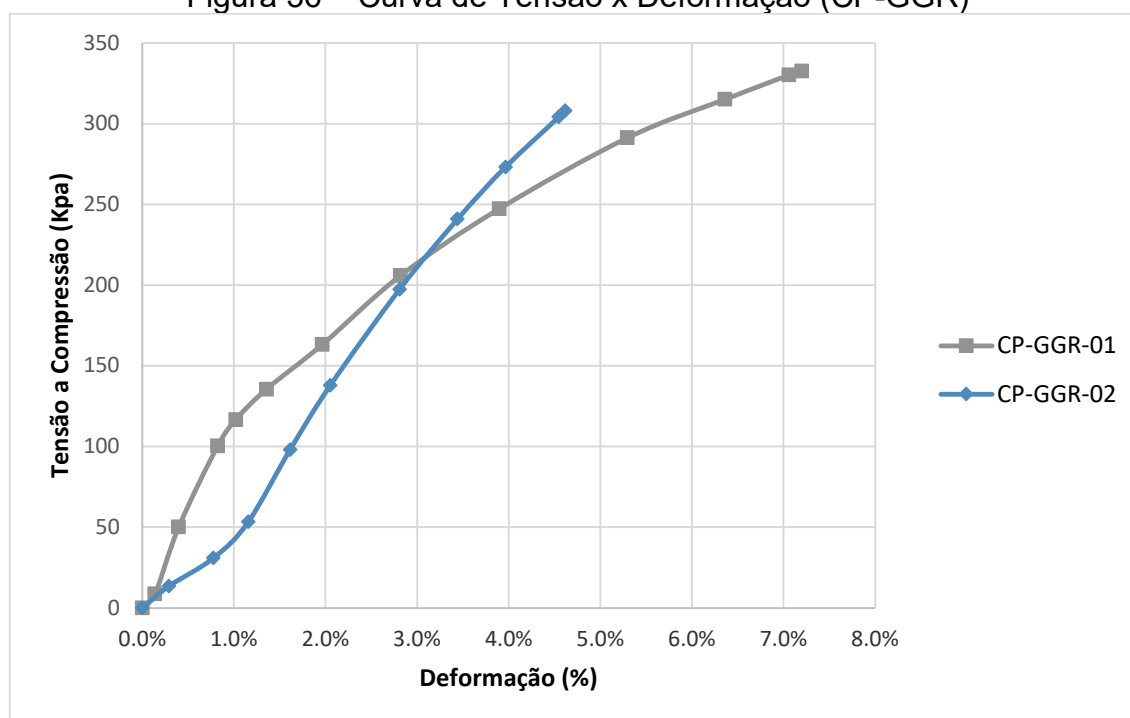
Para avaliar o efeito do reforço com geogrelha, foram ensaiados dois corpos de prova de solo incorporando com geogrelha do tipo unidirecional com resistência a tração de 400kn/m (CP-GGR-01 e CP-GGR-02). Os resultados detalhados são apresentados na Tabela 11, e suas respectivas curvas de tensão-deformação podem ser observadas na Figura 36.

Tabela 11 – Resultados dos Ensaio (CP-GGR)

Amostras	Qu (kPa)	Deformação na ruptura (%)	y (g/cm ³)	w (%)	Índice de vazios	Grau de saturação (%)
CP-GGR-01	333	7,2	1,75	12,40	0,54	62,16
CP-GGR-02	308	4,6	1,82	12,23	0,49	68,03

Fonte: Autores (2025).

Figura 36 – Curva de Tensão x Deformação (CP-GGR)



Fonte: Autores (2025).

5.5.3 Corpo de Prova de Solo Reforçado com Geotêxtil (CP-GTX)

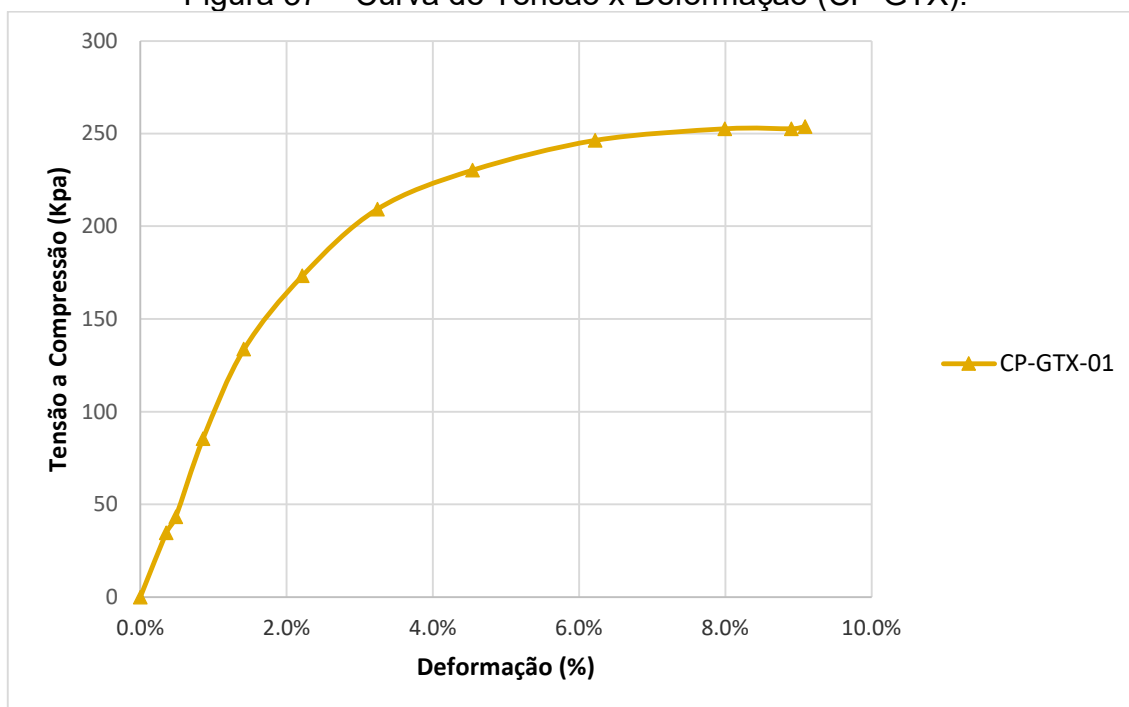
Um corpo de prova de solo reforçado com geotêxtil tipo MACGRID NET (CP-GTX-01) também foi ensaiado para fins comparativos. A Tabela 12 apresenta seus resultados, e a Figura 37 ilustra a curva de tensão-deformação obtida.

Tabela 12 – Resultados dos Ensaio (CP-GTX)

Amostras	Qu (kPa)	Deformação na ruptura (%)	y (g/cm ³)	w (%)	Índice de vazios	Grau de saturação (%)
CP-GTX-02	254	9,1	1,76	14,32	0,53	72,81

Fonte: Autores (2025).

Figura 37 – Curva de Tensão x Deformação (CP-GTX).



Fonte: Autores (2025).

5.5.4 Considerações e Comparação dos Resultados

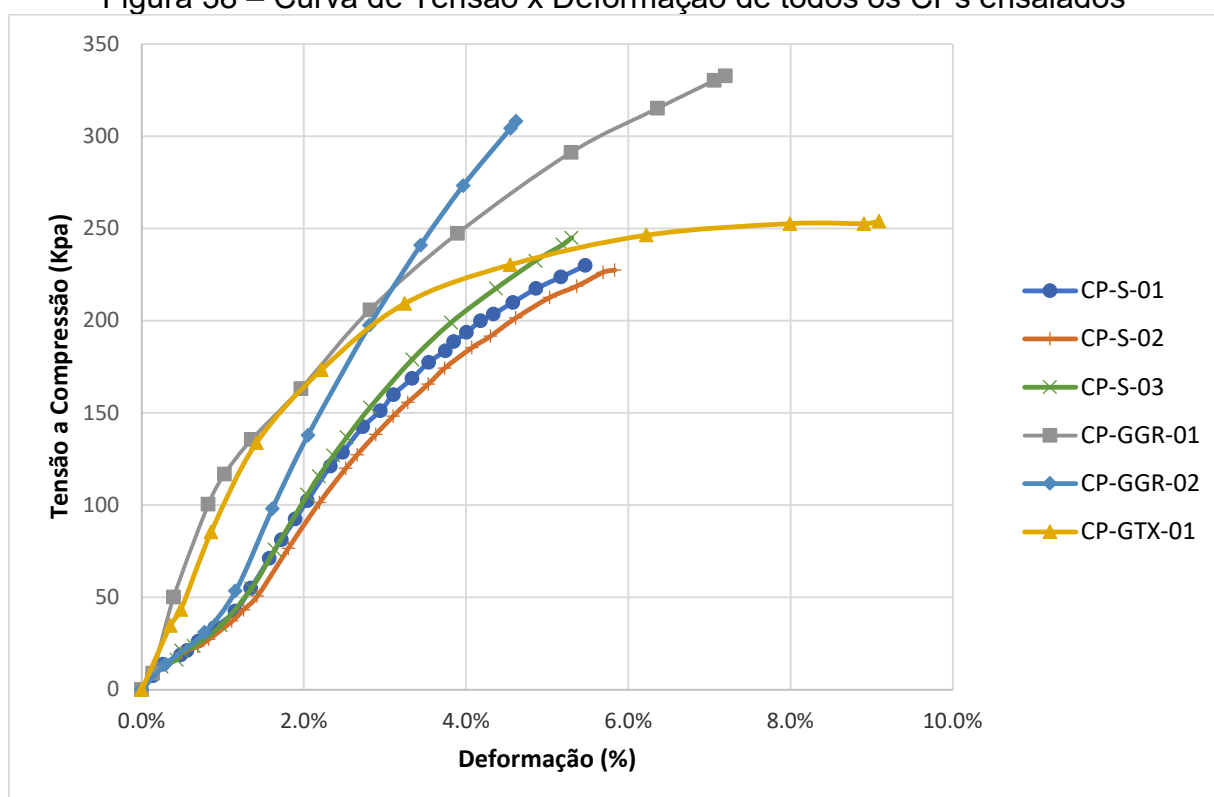
Para uma análise comparativa mais abrangente, a Tabela 13 apresenta os valores de resistência à compressão simples em deformações de 2%, 4% e na ruptura para cada condição de ensaio. A Figura 38 condensa as curvas de tensão-deformação, permitindo uma visualização direta do impacto do reforço.

Tabela 13 – Resultados dos Ensaios

Corpo de Prova	Qu (kPa)	Qu na deformação de 4% (kPa)	Qu na deformação de 2% (kPa)	Deformação na Ruptura (%)	Umidade (%)
CP-S-01	230	194	102	5,50	13,85
CP-S-02	227	182	89	5,80	14,1
CP-S-03	245	205	106	5,30	11,59
Média CP-S	234	194	99	5,50	13,18
CP-GGR-01	333	247	163	7,20	12,4
CP-GGR-02	308	273	138	4,60	12,23
Média CP-GGR	320	260	151	5,90	12,32
CP-GTX-01	254	222	163	9,10	14,32
Média CP-GTX	254	222	163	9,10	14,32

Fonte: Autores (2025).

Figura 38 – Curva de Tensão x Deformação de todos os CPs ensaiados



Fonte: Autores (2025).

Observa-se que a introdução do reforço geossintético alterou o comportamento do solo em relação à sua resistência e deformação. A resistência à compressão simples média do solo não reforçado (CP-S) foi de aproximadamente 234 kPa. Para os corpos de prova reforçados com geogrelha (CP-GGR), a resistência média aumentou para 320 kPa, representando um incremento de cerca de 36,75% em relação ao solo não reforçado. Esse aumento demonstra a eficácia da geogrelha em absorver tensões de tração, elevando sua capacidade de carga.

Quanto ao corpo de prova reforçado com geotêxtil (CP-GTX), a resistência foi de 254 kPa, o que representa um aumento de aproximadamente 8,54% em comparação com o solo não reforçado. Embora o geotêxtil também promova um incremento na resistência, o desempenho da geogrelha foi superior neste estudo. Essa diferença pode ser atribuída à estrutura de malha aberta da geogrelha, que permite um melhor engajamento e interação solo-reforço através do intertravamento, enquanto o geotêxtil não tecido atua mais por fricção superficial.

Além do aumento da resistência máxima, a presença do geossintético também influenciou significativamente o comportamento do solo para pequenas deformações. Para uma deformação axial de 2%, a resistência média do solo não reforçado (CP-S) foi de aproximadamente 99 kPa. Em contraste, a resistência média do solo reforçado com geogrelha (CP-GGR) alcançou 151 kPa, e com geotêxtil (CP-GTX), 163 kPa, representando um aumento significativo de cerca de 52% para a geogrelha, e 64% para o geotêxtil. Esse ganho inicial de resistência e rigidez para pequenas deformações indica que o reforço geossintético começa a atuar efetivamente desde os estágios iniciais do carregamento, proporcionando maior estabilidade e menor deformabilidade sob condições de serviço.

A umidade do solo é um fator crítico que influencia diretamente suas propriedades mecânicas e a eficiência da compactação. A umidade ótima determinada no ensaio de compactação foi de 13,8%. Ao analisar as umidades médias dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples, observou-se que o corpo de prova com geotêxtil (CP-GTX) apresentou uma umidade ligeiramente superior à umidade ótima (+0,52%), enquanto o solo não reforçado (CP-S) e o solo com geogrelha (CP-GGR) estavam com umidades ligeiramente inferiores à ótima (-0,62% e -1,48%, respectivamente).

Tradicionalmente, segundo Bowles (1996), a compactação na zona seca da umidade ótima pode resultar em uma estrutura de solo mais rígida (com maior módulo de elasticidade inicial) mas, por vezes, com menor densidade e maior fragilidade na ruptura. Já a compactação na zona úmida pode levar a uma menor densidade máxima e menor resistência, devido à lubrificação das partículas e à redução do atrito interno.

Considerando esses aspectos, é interessante observar que o solo reforçado com geogrelha (CP-GGR), apesar de ter sido compactado com a umidade mais distante da ótima (no lado seco), ainda assim apresentou o maior ganho de resistência à compressão simples. Isso sugere que o mecanismo de intertravamento e confinamento proporcionado pela geogrelha foi significativamente eficaz.

Para o solo reforçado com geotêxtil (CP-GTX), que estava ligeiramente mais úmido, o ganho de resistência também foi notável em comparação ao solo não reforçado, embora menor que o da geogrelha, o que pode indicar uma interação complexa entre o teor de umidade, o tipo de reforço e o mecanismo de reforço predominante (fricção versus intertravamento). Essas variações de umidade destacam a importância do controle rigoroso durante a execução de obras de terra e ensaios, pois mesmo pequenas diferenças podem impactar o comportamento do material e a eficácia do reforço.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal investigar o comportamento de um solo da região de Maceió-AL com o uso de geogrelha (microgrelhas), comparando os parâmetros de resistência à compressão simples do solo com e sem a utilização do material proposto.

Os estudos de caracterização indicaram que o solo local, com base nos ensaios de limites de consistência e análise granulométrica, pode ser classificado como areia argilosa (SC). A determinação da curva de compactação estabeleceu uma massa específica seca máxima de $1,84 \text{ g/cm}^3$ e uma umidade ótima de 13,8%, esses parâmetros são cruciais para o planejamento e execução de obras geotécnicas na região.

Os ensaios de compressão simples revelaram uma clara melhoria no desempenho geotécnico do solo quando reforçado. A geogrelha demonstrou ser particularmente eficaz, promovendo um aumento substancial na resistência à compressão simples de aproximadamente 36,75% em relação ao solo não reforçado, superando o geotêxtil, que proporcionou um ganho de cerca de 8,54%. Isso indica um mecanismo de interação mais robusto com a geogrelha, como o intertravamento e o confinamento.

Essa performance aprimorada, especialmente perceptível desde os estágios iniciais de deformação, valida o potencial dos geossintéticos para a estabilização de solos. Os resultados confirmam que tais reforços são capazes de conferir maior estabilidade e reduzir a deformabilidade do maciço sob carregamento axial, e demonstrando um impacto positivo na rigidez do solo em pequenas deformações, onde a resistência para 2% de deformação aumentou em aproximadamente 52% com a geogrelha e 64% com o geotêxtil em comparação com o solo não reforçado.

Os resultados deste estudo são de relevância para a engenharia geotécnica em Maceió e em regiões com solos de características similares, demonstrando que a utilização de geossintéticos, em particular a geogrelha, é uma solução eficaz para otimizar projetos geotécnicos e aumentar a capacidade de suporte de solos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a investigação sobre a interação solo-geossintético, considerando:

- A inclusão de diferentes tipos de geogrelhas e geotêxteis, explorando outras resistências e estruturas de malha, a fim de otimizar o desempenho do reforço;
- A variação da posição e número de camadas dos geossintéticos dentro do corpo de prova, buscando determinar a configuração mais eficiente para o ganho de resistência;
- Verificação do efeito combinado dos geossintéticos;
- A realização de ensaios de compressão triaxial para uma avaliação mais abrangente da resistência e dos parâmetros de deformabilidade do solo reforçado sob diferentes estados de tensões confinantes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7180**. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**. Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8044**. Projeto geotécnico - Procedimento. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10318-1**. Geossintéticos – Parte 1: Termos e definições. Rio de Janeiro 2021.

BENJAMIM, C. V. S. (2006). **Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil**. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BOWLES, J. E. **Foundation Analysis and Design**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1996.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8006-1**. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. London: BSI, 2010.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8006-2**. Code of practice for strengthened/reinforced soils – Part 2: Soil nail design. London: BSI, 2011.

CARVALHO, P A S e PEDROSA, J A B A e WOLLE, Claudio Michael. **Aterro reforçado com geotexteis**: uma opção alternativa para a engenharia geotécnica. 1986, Anais... São Paulo: Abms, 1986.

CASAGRANDE, A. **Research on the Atterberg Limits of Soils**. Public Roads, v. 13, n. 8, p. 121-130, 1932.

Convênio de Mapeamento de Solos EMBRAPA/PPP-SUDENE/DRN CONVÊNIO MA/CONTAP/USAID/ETA. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos**

do Estado de Alagoas: Subprojeto 11/1 – Suporte ao mapeamento esquemático dos solos do Nordeste, Recife, 1975.

COSTA, J. E.; RAMOS, M. I. F. **Geologia do Quaternário Costeiro: aspectos físicos.** In: GEOGRAFIA DO QUATERNÁRIO COSTEIRO: GEOLOGIA, PALEONTOLOGIA E GEOMORFOLOGIA. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2004.

H. P. Caputo. **Mecânica dos solos e suas aplicações**, v. 01, 6ed, Rio de Janeiro, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base Cartográfica Contínua ao Milionésimo (BCIM).** Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/cartografia/15747-base-cartografica-continua-ao-milionesimo.html> . Acesso em: 22 abr. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha territorial do Brasil: municípios.** Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-e-referenciais/15779-malhas-de-delimitacao-territorial.html> . Acesso em: 22 abr. 2025.

KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics.** 6th ed. Xlibris Corporation, 2012.

MACCAFERRI. **E-8.2.2-605 – rev. 03:** Especificação técnica – MacGrid NET. Belo Horizonte: Maccaferri do Brasil, 2019. Disponível em: www.maccaferri.com.br . Acesso em: 20 abr. 2025.

Palmeira, E. M. (2009). **Uso de geossintéticos em obras geotécnicas:** panorama atual e tendências. 2ª edição. ABMS, 2009.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SIEIRA, A. C. C. **Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha.** Dissertação (Doutorado em Ciências da Engenharia Civil: Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SILVA, T. C. L.; FERREIRA, B. **Levantamento dos principais aspectos da geodiversidade do município de Maceió, estado de Alagoas, nordeste do Brasil.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2017, Campinas. Anais... Campinas: Unicamp, 2017. Disponível em: <https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/1978> . Acesso em: 07 de mar. de 2025.

TEIXEIRA, S. H. C. **Estudo de Interação solo-geogrelha em teste de arrancamento e a sua aplicação e dimensionamento de maciços reforçados.** São Carlos, 2003. 214p. Tese de Doutorado submetida à Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**.
3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.