

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO MIOTO ANDRÉ

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE FUNDAÇÕES RASAS REFORÇADAS COM
GEOGRELHAS UTILIZANDO SOLO TRANSPARENTE**

CAMPO MOURÃO

2026

LEONARDO MIOTO ANDRÉ

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE FUNDAÇÕES RASAS REFORÇADAS COM
GEOGRELHAS UTILIZANDO SOLO TRANSPARENTE**

**Experimental investigation of geogrid-reinforced shallow foundations using
transparent soil**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Rodrigo Cesar Pierozan.

CAMPO MOURÃO

2026



Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LEONARDO MIOTO ANDRÉ

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE FUNDAÇÕES RASAS REFORÇADAS COM
GEOGRELHAS UTILIZANDO SOLO TRANSPARENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 12/junho/2026

Rodrigo Cesar Pierozan
Doutor em Geotecnia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ewerton Clayton Alves da Fonseca
Doutor em Geotecnia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Rodrigo Carreira
Doutor em Engenharia de Estruturas
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2026

RESUMO

Tendo em vista a dificuldade de conciliar projetos de fundações econômicos em locais com solos de baixa capacidade de suporte, pesquisou-se sobre o reforço de solos com geogrelhas para viabilizar o emprego de sapatas rasas. Para avaliar o comportamento carga-recalque dessas fundações, esta pesquisa utiliza a técnica de solo transparente, que permite a visualização interna não intrusiva do maciço, por meio de ensaios laboratoriais em escala reduzida. Para tanto, foi necessário avaliar a influência da profundidade de posicionamento da geogrelha, a quantidade de camadas de reforço e as características físicas e mecânicas dos materiais utilizados no sistema. Realizou-se, então, uma investigação experimental fundamentada em modelagem física com o uso de solo transparente, composto por quartzo fundido saturado com um fluido de índice de refração equivalente. Diante disso, verificou-se que o reforço aumentou significativamente a capacidade de carga do sistema, sendo o posicionamento estratégico das camadas o fator predominante para o sucesso do sistema, uma vez que camadas bem posicionadas podem superar o desempenho de múltiplos reforços dispostos de forma ineficiente. Além disso, a transparência do meio revelou-se eficaz para a observação precisa dos deslocamentos internos, o que impõe a constatação de que modelos físicos com solos transparentes são ferramentas valiosas para a compreensão de mecanismos complexos na engenharia de fundações.

Palavras-chave: fundações rasas; geogrelhas; solo transparente; capacidade de carga; modelagem física.

ABSTRACT

In view of the difficulty of reconciling economical foundation projects in locations with low bearing capacity soils, research was carried out on soil reinforcement with geogrids to enable the use of shallow foundations. To evaluate the load-settlement behavior of these foundations, this research uses the transparent soil technique, which allows for non-intrusive internal visualization of the soil mass through small-scale laboratory tests. To this end, it was necessary to evaluate the influence of the geogrid positioning depth, the number of reinforcement layers, and the physical and mechanical characteristics of the materials used in the system. Therefore, an experimental investigation was conducted based on physical modeling using transparent soil, composed of fused quartz saturated with a fluid of equivalent refractive index. It was verified that the reinforcement significantly increases the system's bearing capacity, with the strategic positioning of the layers being the predominant factor for the system's success, since well-positioned layers can surpass the performance of multiple reinforcements arranged inefficiently. Furthermore, the transparency of the medium proved to be effective for the accurate observation of internal displacements, which underscores that physical models with transparent soils are valuable tools for understanding complex mechanisms in foundation engineering.

Keywords: shallow foundations; geogrids; transparent soil; bearing capacity; physical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de geogrelhas.....	18
Figura 2: Uso de geogrelhas em estradas não pavimentadas.....	20
Figura 3: Uso de geogrelha para reforço em lastro ferroviário.....	20
Figura 4: Uso de geogrelha em estrada pavimentada.....	20
Figura 5: Tipos de reforços em taludes utilizando geogrelha.....	21
Figura 6: Reforço em talude íngreme.....	22
Figura 7: Aterro sobre estacas reforçado com geossintético.....	23
Figura 8: Visualização do sistema de aterro reforçado.....	23
Figura 9: Aterro estaqueado sendo reforçado com geogrelha.....	23

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1: Geotêxtil.....	15
Fotografia 2: Geogrelha.....	16
Fotografia 3: Geocélula.....	16
Fotografia 4: Geocomposto.....	16
Fotografia 5: Quartzo fundido triturado.....	26
Fotografia 6: Vaselina líquida.....	27
Fotografia 7: Tela de Poliéster (simulando a geogrelha em escala reduzida)	28
Fotografia 8: Recipiente de vidro utilizado para o ensaio.....	29
Fotografia 9: Refratômetro digital HI96800.....	30
Fotografia 10: Turbidímetro TB-2000.....	30
Fotografia 11: Cubetas utilizadas no ensaio de turbidez.....	31
Fotografia 12: Preparação granulométrica do material.....	32
Fotografia 13: Captura de tela do software ImageJ.....	36
Fotografia 14: Ensaio de resistência à tração da geogrelha.....	36
Fotografia 15: Modelo físico composto apenas por quartzo.....	38
Fotografia 16: Modelo físico com a instalação de uma geogrelha.....	39
Fotografia 17: Modelo físico com a instalação de duas geogrelhas.....	39
Fotografia 18: Modelo físico com a instalação de quatro geogrelhas.....	40
Fotografia 19: Espectrofotômetro UV-12 PHOX.....	40
Fotografia 20: Cubetas contendo a mistura de solo transparente.....	41
Fotografia 21: Resultado numérico do ensaio de refração.....	42
Fotografia 22: Resultado numérico do ensaio de turbidez.....	42
Fotografia 23: Modelo com uma camada sob aplicação de carga.....	51
Fotografia 24: Modelo com duas camadas sob aplicação de carga.....	52
Fotografia 25: Modelo com quatro camadas sob aplicação de carga.....	52
Fotografia 26: Modelo com quatro camadas (incluindo uma superficial) sob carga.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva Granulométrica do quartzo fundido.....	32
Gráfico 2: Resistência à Tração da Geogrelha (Força vs. Deformação)	43
Gráfico 3: Transmitância para cada comprimento de onda (compara as cubetas de 10, 20 e 50 mm)	44
Gráfico 4: Comparação de força vs. deslocamento utilizando uma geogrelha.....	45
Gráfico 5: Comparação de força vs. deslocamento utilizando duas geogrelhas.....	46
Gráfico 6: Comparação de força vs. deslocamento utilizando três geogrelhas.....	47
Gráfico 7: Comparação de força vs. deslocamento utilizando quatro geogrelhas.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultado do ensaio de determinação da massa específica dos sólidos.....	34
Tabela 2: Dados para determinação do índice de vazios máximo.....	35
Tabela 3: Dados para determinação do índice de vazios mínimo.....	35
Tabela 4: Relação entre alturas de queda do quartzo e a Compacidade Relativa (CR) resultante.....	38
Tabela 5: Gramatura calculada para as 5 amostras de geogrelha.....	43
Tabela 6: Comparativo da evolução dos melhores resultados de carga máxima.....	49
Tabela 7: Comparativo da evolução dos piores resultados (configurações menos eficientes).....	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos.....	13
3	JUSTIFICATIVA.....	14
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
4.1	Geossintéticos.....	15
4.1.1	Geogrelhas.....	17
4.2	Usos mais comuns das geogrelhas.....	19
4.3	Utilização da geogrelha em fundações rasas	24
4.4	Solos transparentes	25
5	MATERIAIS E MÉTODOS	26
5.1	Materiais	26
5.1.1	Quartzo fundido	26
5.1.2	Fluido de saturação	27
5.1.3	Geogrelha em escala reduzida.....	28
5.1.4	Recipiente para ensaio	28
5.2	Métodos.....	29
5.2.1	Fluido de saturação	29
<u>5.2.1.1</u>	<u>Determinação do índice de refração.....</u>	<u>29</u>
<u>5.2.1.2</u>	<u>Determinação da turbidez</u>	<u>30</u>
5.2.2	Quartzo fundido	31
<u>5.2.2.1</u>	<u>Adequação da granulometria</u>	<u>32</u>
<u>5.2.2.2</u>	<u>Determinação da massa específica dos sólidos.....</u>	<u>33</u>
<u>5.2.2.3</u>	<u>Determinação dos índices de vazios máximo e mínimo.....</u>	<u>34</u>
5.2.3	Geogrelhas	35
<u>5.2.3.1</u>	<u>Medição da gramatura.....</u>	<u>35</u>
<u>5.2.3.2</u>	<u>Ensaio de resistência à tração</u>	<u>36</u>
5.2.4	Modelo físico	37
<u>5.2.4.1</u>	<u>Determinação da transmitância e absorbância</u>	<u>40</u>
6	RESULTADOS.....	42

6.1	Fluido de saturação.....	42
6.2	Gramatura da geogrelha	43
6.3	Resistência à tração da geogrelha.....	43
6.4	Transmitância das amostras de solo transparente	44
6.5	Prova de carga.....	45
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
7.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
	<u>REFERÊNCIAS</u>	57

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a engenharia civil enfrenta vários desafios relacionados à grande extensão do país, com sua demanda pela adequação de áreas urbanas e pelo desenvolvimento de novas infraestruturas, que muitas vezes se deparam com solos de características geotécnicas desfavoráveis (Lopes, 2019). Nesse cenário geralmente são adotadas técnicas construtivas para contornar a potencial falta de resistência no solo, como: *jet grouting*, aterros estacados, substituição do solo, fundações profundas, entre outros. Entretanto, por vezes, a adoção dessas soluções pode encarecer ou inviabilizar o projeto, além do alto impacto ambiental que algumas delas trazem (Fernandes, 2014).

Diante dessa situação, as fundações rasas, reconhecidas por sua simplicidade construtiva e custo-benefício adequado, não seriam indicadas para solos com baixa capacidade de suporte nas camadas mais superficiais, pois estes estão mais propensos a recalques excessivos e ao comprometimento da funcionalidade e integridade das edificações (Das, 2016). Nesse contexto, o reforço de solos emerge como uma solução geotécnica capaz de aprimorar as características do maciço e viabilizar o emprego das fundações rasas, mesmo em condições adversas.

Entre os materiais geossintéticos empregados para reforço de solos, as geogrelhas destacam-se pela sua versatilidade e eficácia. Estes elementos, fabricados com polímeros, conferem ao sistema elevada resistência à tração e estabelecem uma interação mecânica significativa por meio do mecanismo de intertravamento das partículas do solo com as aberturas da geogrelha e do efeito membrana que restringe os movimentos laterais do solo (Palmeira *et al.*, 2021). Essa combinação resulta em uma redistribuição de tensões e, consequentemente, em uma melhoria potencialmente relevante de seu comportamento global.

Apesar dos benefícios do reforço de solos com geossintéticos, a compreensão dos mecanismos de interação solo-geogrelha em fundações rasas e a quantificação dos recalques ainda representam desafios consideráveis. Métodos convencionais de monitoramento, como a ressonância magnética, raios-X e tomografia são de alto custo e pouco acessíveis em contextos acadêmicos e laboratoriais (Lopes, 2019). Alternativamente, a instrumentação intensa do solo pode interferir o comportamento do mesmo.

Para superar essas limitações, a técnica de solos transparentes tem se consolidado como uma ferramenta de pesquisa inovadora. Essa técnica permite a visualização interna não intrusiva de modelos físicos durante os ensaios, facilitando assim o estudo do comportamento geotécnico. Essa técnica se baseia na saturação de agregados transparentes com um fluido de índice de refração equivalente, tornando o meio homogêneo à passagem de luz e possibilitando a análise de deformação e recalques através de técnicas de processamento de imagens digitais, como a Correlação Digital de Imagens (*DIC*) (Carvalho, 2015).

No presente estudo, foi abordada a utilização de geogrelha em escala reduzida. Esse estudo envolve modelo físico da solução estudada com uso de solos transparentes, permitindo assim a visualização do comportamento interno do solo durante os ensaios.

2 OBJETIVOS

Esta seção tem por finalidade apresentar o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa, indicando o que se pretende alcançar com o desenvolvimento do trabalho.

2.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento carga-recalque de fundações superficiais reforçadas com camadas de geogrelhas. Para tanto, serão empregados ensaios laboratoriais em escala reduzida do sistema de fundação com uso de solo transparente.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência das propriedades ópticas dos componentes do sistema na transparência do modelo físico;
- Avaliar a influência da profundidade de posicionamento das camadas de geogrelha;
- Avaliar a influência da quantidade de camadas de reforço e do espaçamento relativo entre as camadas;
- Analisar as características físicas e mecânicas da geogrelha.

3 JUSTIFICATIVA

Fundações rasas são amplamente aplicadas na engenharia, especialmente em projetos de pequeno e médio porte. No entanto, a falta de capacidade de carga em determinados tipos de solos, exige a adoção de soluções técnicas viáveis. Nesse sentido, os reforços com geogrelhas vêm atraindo bastante atenção devido à sua eficácia em múltiplas aplicações (Palmeira *et al.*, 2021; Vertematti, 2004). Com isso, do ponto de vista técnico, este estudo contribui com a quantificação do acréscimo de carga oriundo do reforço do solo com geogrelhas, além da quantificação da redução dos recalques com o uso dessa técnica.

Do ponto de vista econômico, o reforço do solo com geogrelha em fundações superficiais, pode reduzir a necessidade de materiais tradicionais como concreto e aço, em comparação a utilização de outros métodos de fundações, podendo assim diminuir o custo final da obra. Além disso, pode aumentar o uso de áreas que seriam consideradas inadequadas para construção por conta da baixa capacidade de carga do solo.

Por sua vez, do ponto de vista ambiental, a técnica em questão pode resultar na redução da emissão de carbono, pois está associada a maior previsibilidade de comportamento, menor demanda de transporte e menor necessidade de uso de materiais como concreto, em comparação às técnicas tradicionais de construção. Isso resulta em menor consumo de recursos naturais e contribui diretamente para práticas construtivas mais sustentáveis.

Por fim, do ponto de vista social, a inclusão de elementos industrializados, com propriedades técnicas bem definidas, pode emergir como uma alternativa construtiva para habitações de interesse social, onde a redução de custos e a otimização da performance são primordiais. Em regiões carentes ou em áreas urbanas em expansão, a utilização dessa técnica pode ser viabilizada mais facilmente, por questões logísticas, sustentáveis e econômicas.

Assim, pode-se atingir um desenvolvimento mais acessível e seguro para diferentes tipos de obras.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta os principais conceitos utilizados para a elaboração desta pesquisa.

4.1 Geossintéticos

Os geossintéticos são uma variedade de materiais utilizados em projetos de engenharia, em especial para resolver problemas que envolvem os solos. Conforme a NBR 10318-1 (ABNT, 2021), esses materiais podem ser constituídos por polímeros ou por produtos naturais, sempre buscando melhorar a performance geotécnica da estrutura. Entre os produtos comerciais atualmente disponíveis, destacam-se os seguintes geossintéticos: geotêxteis, geogrelhas, geocélulas, geomembranas e geocompostos. Cada um criado para uma finalidade como separação, filtragem, drenagem, impermeabilização, controle da erosão e reforço (Vertematti, 2004). Exemplos de geotêxteis, geogrelhas, geocélulas e geocompostos estão apresentados nas Fotografias 1 a 4, respectivamente.

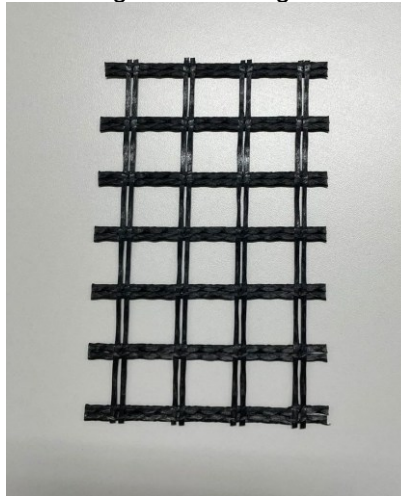
Segundo Vertematti (2004), os estudos com esses tipos de materiais iniciaram nos anos 60, com testes feitos na Europa e Estados Unidos. E desse tempo em diante, esses materiais começaram a fazer parte das soluções de engenharia global e, posteriormente, incluídos nas práticas brasileiras. A partir disso, a presença desses produtos começou a ser comum em infraestruturas.

Fotografia 1 - Geotêxtil.



Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 2 - Geogrelha.



Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 3 - Geocélula.



Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 4 - Geocomposto.



Fonte: Autoria própria (2025).

Tendo em vista sua diversidade e funcionalidade, os geossintéticos destacam-se pela ampla aplicação em práticas construtivas. Esses materiais são usados com frequência em obras para estabilização de taludes, reforço de aterros sobre solos moles, sistema de drenagem subterrânea, impermeabilização de reservatórios e canais, além de contenção de resíduos em aterros sanitários e industriais (Vertematti, 2004). Mas a sua utilização mais comum em áreas urbanas se deve a obras de pavimentação, que utilizam os geossintéticos para melhorar o desempenho estrutural das bases de rodovias e ruas, especialmente em regiões em que os solos não têm boas condições.

Projetos que utilizam geossintéticos geralmente necessitam de um volume menor de materiais comuns em obras, como brita, areia e cimento, o que gera uma diminuição de danos ambientais e gastos com transportes e execução (Zornberg, 2017). Outro ponto positivo é a sua resistência química e durabilidade, que permite a utilização desses produtos em solos considerados problemáticos.

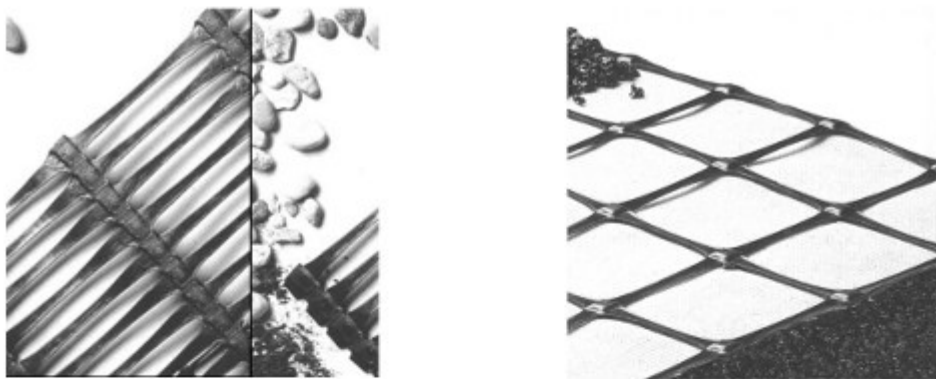
4.1.1 Geogrelhas

Dentre os diferentes tipos de geossintéticos, as geogrelhas desempenham um papel importante quando o objetivo da obra é reforçar os solos. Esses materiais, por sua forma de malha e resistência mecânica, são especialmente eficazes em projetos onde os solos precisam ter suas características melhoradas, como em fundações, contenções e reforço de aterros. O uso correto das geogrelhas não só traz ganhos estruturais, mas também reduz custos em relação a soluções mais tradicionais que podem ser mais onerosas e complexas. Segundo Palmeira *et al.* (2021), as geogrelhas promovem confinamento e redistribuição de tensões no sistema solo-reforço, aumentando a capacidade de suporte e a segurança da obra.

Conforme descrito por Vertematti (2004), as geogrelhas são feitas por materiais como polipropileno, polietileno ou poliéster e são classificadas de acordo com a orientação de sua resistência principal, como uniaxiais, biaxiais ou multiaxiais. Assim sendo, as geogrelhas extrudadas (GGE) são obtidas por meio de extrusão e estiramento, podendo ser desenvolvidas para oferecer resistência à tração em uma única direção (unidirecionais) ou em duas direções principais (bidirecionais) (Borges, 2012). Já as geogrelhas soldadas (GGB) são formadas pela união de elementos de tração longitudinais e transversais, que são soldados nas juntas. As GGB podem ser

fabricadas a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos ou, em abordagens mais recentes, com elementos extrudados soldados a laser (Borges, 2012; Dias, 2020). Por fim, as geogrelhas tecidas (GGW) são produzidas pelo entrelaçamento de fios ou filamentos têxteis sintéticos nas juntas, podendo ser tricotadas ou intertecidas (Borges, 2012) como mostrada na Figura 1. De forma geral, as geogrelhas são feitas para atingir elevada resistência e rigidez à tração, que são características importantes para o reforço do solo.

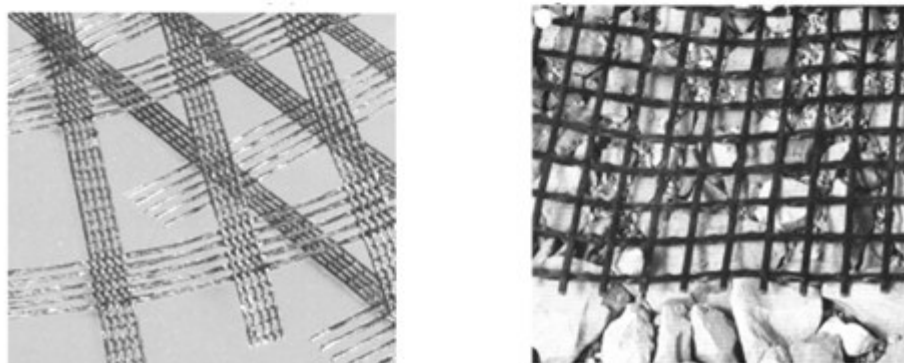
Figura 1 – Tipos de geogrelhas.



(a) Estruturas de geogrelhas extrudadas



(b) Estruturas de geogrelhas soldadas



(c) Estruturas de geogrelhas tecidas

Fonte: Sieira (2003).

Além das características técnicas descritas na literatura, as geogrelhas também apresentam vantagem operacionais que reforçam sua atratividade em projetos de engenharia. Sua leveza, facilidade de transporte e instalação e a possibilidade de utilizar materiais encontrados no próprio local da obra reduz significativamente os custos e o tempo de execução. Estudos relatados por Palmeira *et al.* (2021) afirmam que essas vantagens operacionais demonstram o benefício econômico gerado pelo menor consumo de materiais tradicionais e pelo uso mais racional de recursos naturais.

4.2 Usos mais comuns das geogrelhas

A capacidade das geogrelhas em adicionar resistência à tração em materiais essencialmente compressivos como o solo, faz com que estas sejam aplicadas em diversas áreas da engenharia. Essas qualidades fazem com que as geogrelhas se tornem um material utilizado em uma grande variedade de obras, aprimorando o desempenho e estabilidade de estruturas, que sem esse tipo de reforço seriam de difícil execução ou até inviáveis. As geogrelhas são reconhecidas por sua versatilidade e eficácia em solucionar problemas geotécnicos complexos, adaptando-se a diferentes condições de solo e carregamento (Vertematti, 2015; Dias, 2020).

Um dos usos mais comuns das geogrelhas se dá em obras viárias. Em estradas não pavimentadas (Figura 2), por exemplo, a inserção de geogrelhas na base granular pode reduzir a degradação da camada de base causada pelo tráfego, minimizando a degradação do material granular no subleito e controlando o bombeamento de finos. Isso resulta na necessidade de uma camada menor de solos granulares, e no aumento da vida útil da via (Palmeira, 2018). Da mesma forma, em pavimentos rodoviários e ferroviários (Figuras 3 e 4), as geogrelhas são empregadas para reforçar a estrutura, seja na base ou sob a capa asfáltica, contribuindo para a redução da espessura do revestimento ou para o aumento da vida útil do pavimento sob cargas cíclicas.

Figura 2 – Uso de geogrelhas em estradas não pavimentadas.



Fonte: geosoluções (2026).

Figura 3 – Uso de geogrelha para reforço em lastro ferroviário.



Fonte: geosoluções (2026).

Figura 4 – Uso de geogrelha em estrada pavimentada.



Fonte: Huesker (2016).

A utilização de geogrelhas também é comum em estruturas de contenção e taludes íngremes. Muros de arrimo e taludes reforçados com geogrelhas (Figuras 5 e 6) são soluções bastante utilizadas pois proporcionam estabilidade a massas de solo

que, de outra forma, tenderiam à ruptura (Palmeira, 2018). Nesses casos, as geogrelhas absorvem as tensões de tração que se desenvolvem no interior do maciço, permitindo a construção de faces mais verticais e economizando espaço. O princípio baseia-se na combinação de um material de aterro com boas características mecânicas e os elementos de reforço, os quais oferecem resistência e rigidez à tração compatíveis, garantindo a estabilidade global da obra (Palmeira, 2018). Adicionalmente, as geogrelhas são aplicadas para reforçar aterros sobre solos moles, onde contribuem para o aumento do fator de segurança da obra e possibilitam a construção de aterros mais altos ou com taludes mais íngremes em relação às alternativas sem o reforço (Palmeira, 2018).

Figura 5 – Tipos de reforços em taludes utilizando geogrelha.



Fonte: Huesker (2016).

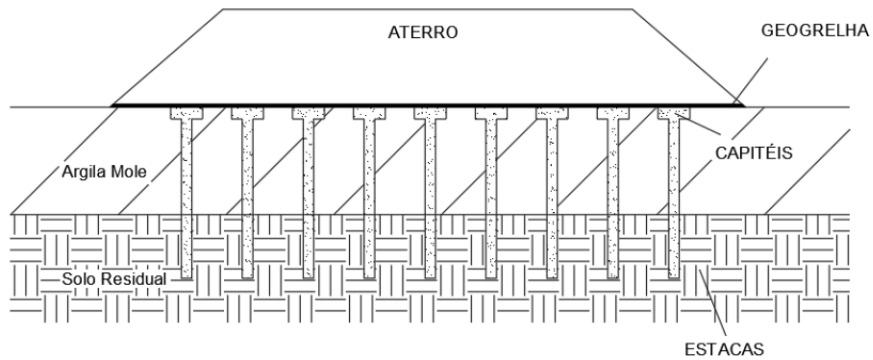
Figura 6 – Reforço em talude íngreme.



Fonte: Huesker (2016).

Outro campo de utilização de geogrelhas se dá no reforço de aterros construídos sobre estacas ou colunas granulares. Esta utilização é comum em aterros, onde o uso isolado de estacas pode não ser suficiente para limitar deformações ou para otimizar a transferência de carga. A utilização de estacas ou colunas granulares sob aterros é uma técnica utilizada para reduzir recalques e movimentações laterais do solo mole de fundação (Palmeira, 2018). Nesses sistemas, a adição de camadas de geogrelha atua como uma plataforma de transferência de cargas, ajudando na distribuição de tensões entre o aterro e os elementos de fundação profunda (Vertematti, 2015). Com isso as geogrelhas atuam como se fossem uma plataforma de transferência de carga, que favorecem a mobilização do efeito de arqueamento no aterro. Este fenômeno ocorre quando o solo, tensionado pelo carregamento, tende a se movimentar entre as cabeças das estacas, sendo impedido pela rigidez à tração da geogrelha que redistribui os esforços sobre esses vãos. Consequentemente, parte significativa da carga é transferida para os elementos de fundação profunda, atenuando as tensões verticais aplicadas ao solo mole de fundação. Esse comportamento resulta em um controle mais eficiente dos recalques diferenciais e em um ganho global na estabilidade do sistema.

Figura 7 – Aterro sobre estacas reforçado com geossintético.



Fonte: Oliveira (2021).

Figura 8 – Visualização do sistema de aterro reforçado.



Fonte: Huesker (2016).

Figura 9 – Aterro estaqueado sendo reforçado com geogrelha.



Fonte: geosoluções (2026).

4.3 Utilização da geogrelha em fundações rasas

As fundações rasas do tipo sapatas são comumente empregadas em projetos de pequeno e médio porte em função de sua simplicidade construtiva e de seu menor custo quando comparadas às fundações profundas. Entretanto, quando aplicadas em solos de baixa resistência, às fundações rasas do tipo sapatas podem sofrer elevados recalques e instabilidade estrutural. Deste modo, a utilização de geossintéticos, especialmente as geogrelhas, surge como uma estratégia para melhorar o comportamento do solo. Esse método pode oferecer vantagens técnicas e econômicas, dada a parcela adicional de resistência incorporada à fundação e a consequente redução da deformabilidade do maciço.

Em fundações rasas, o reforço com geogrelhas opera por meio de dois principais mecanismos, que segundo Borges (2012) e Dias (2020), as partículas do solo são solicitadas pela malha da geogrelha, gerando uma resistência mecânica que impede o movimento relativo entre o solo e o reforço, aumentando a rigidez do sistema. Já a interação solo-reforço atua superficialmente, limitando o deslocamento lateral do solo e gerando um componente de força que contribui com a estabilidade do maciço. O efeito combinado desses dois mecanismos é essencial para um bom desempenho do solo reforçado.

Estudos mais recentes, como o realizado por Dias *et al.* (2023), demonstram ganhos superiores a 90% na carga suportada utilizando sistema solo-reforço, indicando assim a viabilidade dessa alternativa em terrenos inadequados ou onde soluções convencionais seriam excessivamente custosas. O número de camadas de reforços também pode influenciar no aumento da capacidade de carga, havendo um aumento progressivo conforme o número de camadas de reforços, mas que tende a se estabilizar em determinado momento, dependendo do tipo de solo e fundação estudada (Ferreira; Zornberg, 2015).

Estudos de Palmeira *et al.* (2021) recomendam que a profundidade ideal da primeira camada de geogrelha equivale a 0,2 a 0,3 vezes a largura da fundação, garantindo o melhor aproveitamento da interação mecânica. Entretanto, há a necessidade de um número maior de estudos que investiguem o número ideal de camadas de reforço, o espaçamento entre estas e a influência das propriedades mecânicas de diferentes tipos de elementos no comportamento do maciço reforçado.

Essa atenção ao projetar é essencial não apenas para garantir a segurança da estrutura, mas também para garantir a eficiência técnica e econômica do projeto.

4.4 Solos transparentes

O entendimento do comportamento interno dos solos em situações reais é um grande desafio para engenharia geotécnica. Isso ocorre pois, em condições laboratoriais, durante o carregamento de uma fundação ou estrutura, não se consegue visualizar diretamente o que ocorre, dada a opacidade dos materiais naturais. Para contornar essa limitação, foi desenvolvida a técnica de solos transparentes, que permite observar internamente o comportamento do solo, permitindo assim a definição de parâmetros quantitativos e qualitativos (Lopes, 2019). Essa abordagem apresenta um avanço importante nos estudos experimentais, principalmente quando se busca compreender o comportamento do sistema solo-reforço.

O princípio fundamental do solo transparente é criar um meio opticamente homogêneo que permita a passagem de luz. Isso é feito pela saturação de partículas sólidas transparentes (como quartzo fundido triturado) com um fluido com o mesmo índice de refração, permitindo a visualização direta de fenômenos internos (Carvalho, 2015). Essa técnica começou a ser desenvolvida em estudos relacionados a estruturas submersas e fundações marítimas. Entretanto, com o tempo, sua aplicação foi estendida para investigações geotécnicas de diferentes naturezas.

Nesse contexto, os solos transparentes trazem uma grande vantagem, que são os métodos ópticos avançados que podem ser aplicados para análise de deslocamentos internos e outros fenômenos relacionados ao comportamento do solo, fornecendo detalhes que facilitam a inovação tecnológica.

A Correlação Digital de Imagens (*DIC*) é uma técnica frequentemente empregada para a visualização dos campos de deslocamento e das deformações (Ferreira; Zornberg, 2015). Esse monitoramento em tempo real, sem a necessidade de perturbar fisicamente o modelo, tem contribuído com avanços importantes na elucidação da complexidade das interações solo-geossintéticos em fundações, permitindo aos pesquisadores observarem diretamente como as tensões se propagam e como as deformações se desenvolvem (Lopes, 2019; Dias *et al.*, 2023).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os materiais empregados na pesquisa e os métodos de ensaio adotados na pesquisa.

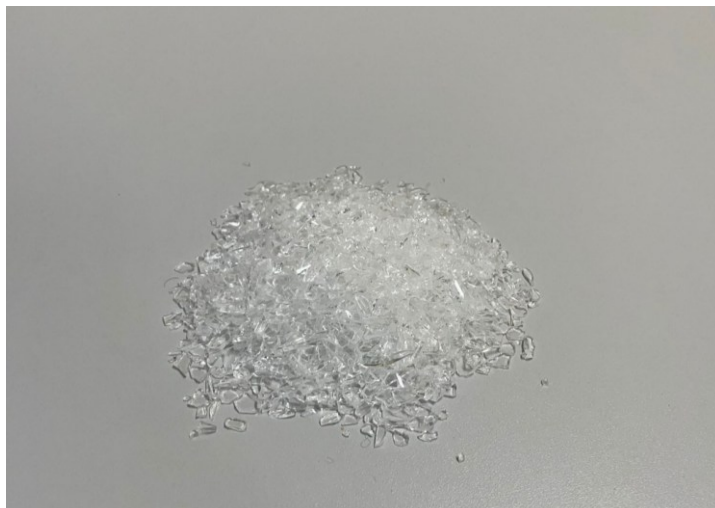
5.1 Materiais

Os principais materiais empregados nesta pesquisa são quartzo fundido, fluido de saturação, geogrelha em escala reduzida e recipiente para ensaio, conforme descrição subsequente.

5.1.1 Quartzo fundido

A utilização do quartzo fundido triturado (Fotografia 5) tem a finalidade de simular solo arenoso utilizado como elemento geotécnico de fundação. Conforme o fabricante, esse material possui teor de sílica amorfa (SiO_2) igual a praticamente 100%, índice de refração de 1,4585 e, massa específica de $2,2 \text{ g/cm}^3$ (ACTQUARTZO, 2013).

Fotografia 5 - Quartzo fundido triturado.



Fonte: Autoria própria (2025).

Segundo Carvalho (2015), o quartzo fundido é obtido por meio do aquecimento e resfriamento controlado de cristais de quartzo de alta pureza, o que resulta em partículas com baixa absorção de impurezas e elevada estabilidade

química. Esse material apresenta massa específica da ordem de 2,22 a 2,25 g/cm³, valor próximo ao encontrado em areias naturais, o que favorece a similaridade de comportamento mecânico com areias naturais, para uso em ensaios em escala reduzida. Outro aspecto fundamental para sua aplicação é o índice de refração, próximo de 1,46, compatível com fluidos como óleos minerais e misturas específicas, formando um sistema translúcido quando ambos estão adequadamente aplicados.

5.1.2 Fluido de saturação

Nos ensaios com solos transparentes, o fluido de saturação desempenha um papel importante para que o sistema sólido-fluido alcance a transparência desejada. O fluido é escolhido de forma que seu índice de refração seja equivalente ao do sólido utilizado (no caso, o quartzo fundido), garantindo que a luz passe pelo meio sem que sofra refração que leve à opacidade do material, o que ajuda na observação direta dos deslocamentos internos durante os testes laboratoriais.

O fluido de saturação escolhido para realizar os testes foi vaselina líquida (fotografia 6) com índice de refração equivalente ao do quartzo fundido utilizado na pesquisa, pois esse fluido não precisa ser misturado com outros componentes para chegar em um nível aceitável de refração. Essa definição do fluido de saturação ideal foi feita através de testagem com diferentes produtos comercialmente disponíveis na cidade de Campo Mourão - PR.

Fotografia 6 -Vaselina líquida.

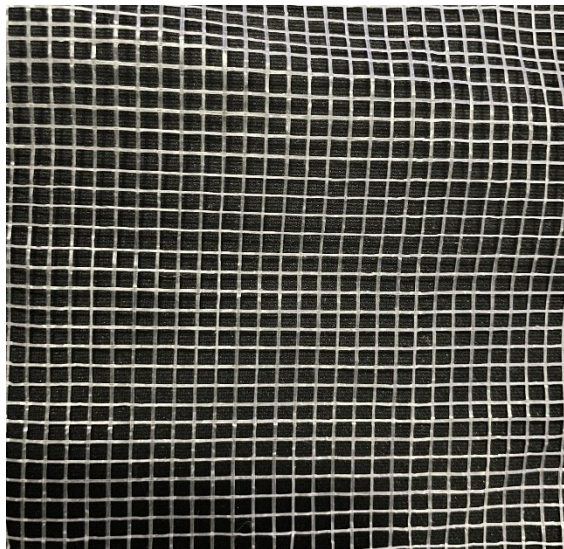


Fonte: Autoria própria (2025).

5.1.3 Geogrelha em escala reduzida.

Para simular a geogrelha, foram utilizados materiais de fácil acesso comercialmente, como telas de poliéster, comumente utilizadas para sustentação de forros de gesso. Foram utilizados recortes desses materiais com dimensões de 10 cm por 10 cm, para haver espaço livre em relação ao tamanho da sapata e considerando as dimensões do recipiente para ensaio. A fim de ajudar a simular uma geogrelha real com malha de 3x3cm, foi utilizada uma malha que tenha 3x3 mm como mostrada na Fotografia 7, para obter um modelo de escala 1:10.

Fotografia 7 -Tela de Poliéster.



Fonte: Autoria própria (2025).

5.1.4 Recipiente para ensaio

Para realização do ensaio, se optou a utilização de um recipiente com formato cúbico (Fotografia 8), feito de vidro, e com dimensões iguais, tendo 15 cm de comprimento, 15 cm de altura e 15 cm de profundidade. O parâmetro para a definir o tamanho do recipiente, foi a quantidade limitada do material utilizado para o preenchimento do recipiente (solo transparente).

Fotografia 8 - Recipiente de vidro.



Fonte: Autoria própria (2025).

5.2 Métodos

5.2.1 Fluido de saturação

Para caracterizar o fluido de saturação, deve-se determinar a turbidez e o índice de refração da vaselina líquida. Essa medição tem por finalidade determinar se o fluido utilizado terá características óticas compatíveis com o quartzo fundido.

5.2.1.1 Determinação do índice de refração

O índice de refração foi medido pelo equipamento de refratômetro digital HI96800 (Fotografia 9). Antes de serem feitas as medições, o equipamento foi devidamente calibrado com a utilização de água destilada. A utilização do equipamento é simples, bastando preencher o recipiente do prisma com o fluido a ser analisado, que imediatamente o valor do índice de refração será obtido.

Fotografia 9 - Refratômetro digital HI96800.



Fonte: Autoria própria (2025).

5.2.1.2 Determinação da turbidez

Para o ensaio de turbidez foi utilizado um turbidímetro modelo TB-2000 (Fotografia 10), que será analisada a transparência da amostra do fluido de saturação. A utilização do equipamento é simples, exigindo apenas proceder com a calibração prévia utilizando as amostras de referências disponibilizadas pelo fabricante.

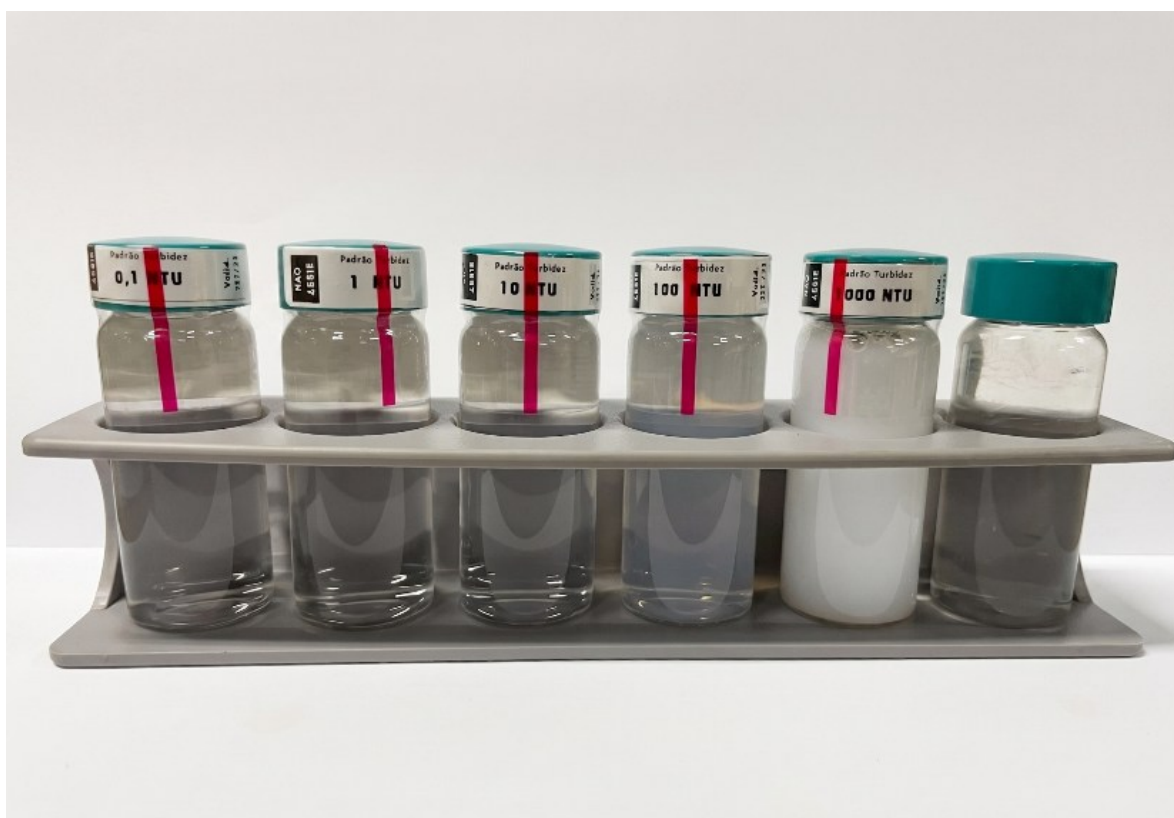
Fotografia 10 - TB-2000.



Fonte: Autoria própria (2025).

Após a calibração do equipamento, pode ser feita a medição da turbidez do fluido de saturação misturado com o quartzo através de cubetas (Fotografia 11), tomando-se o cuidado de verificar se estas estão limpas e livres de quaisquer materiais que possam interferir na medição. O resultado do ensaio tem seu valor medido em Unidades de Turbidez Nefelométricas (NTU). Esse valor pode variar de 0 NTU que é 100% transparente, até 1000 NTU, que é completamente turva.

Fotografia 11 – Cubetas de referência para a calibração do turbidímetro.



Fonte: Autoria própria (2025).

5.2.2 Quartzo fundido

Considerando que o quartzo fundido utilizado nesta pesquisa é o mesmo material empregado nos estudos de Silva (2023a) e Silva (2023b), optou-se pela utilização dos parâmetros geotécnicos já determinados por estes autores. Dessa forma, a caracterização granulométrica e a massa específica dos sólidos foram adotadas conforme os resultados obtidos por Silva (2023a, 2023b), dispensando a necessidade de repetição destes ensaios. Abaixo, descrevem-se os métodos

adotados pelos autores e os resultados obtidos, que fundamentam as propriedades do material utilizado no presente trabalho.

5.2.2.1 Adequação da granulometria

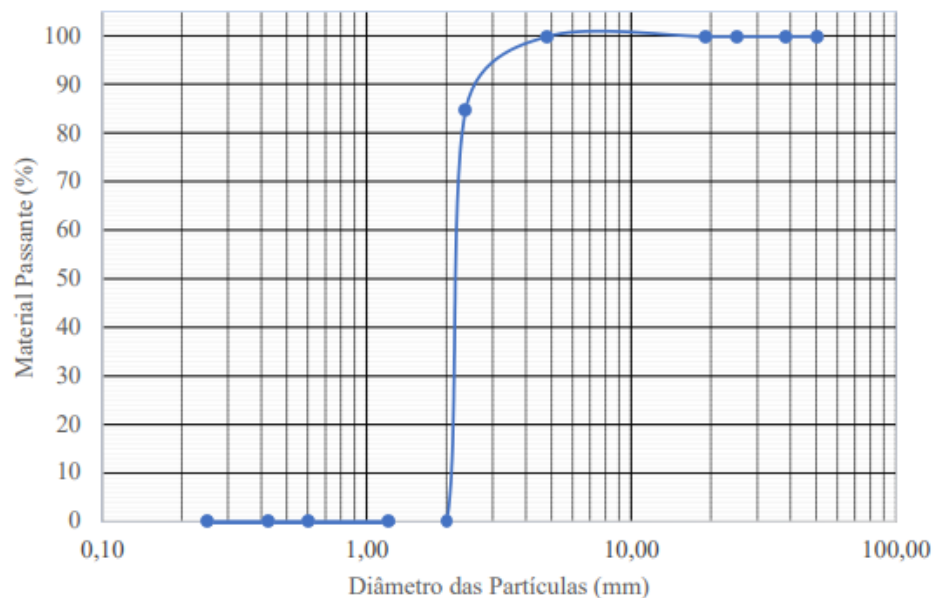
De acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 2018), foi feita a análise granulométrica do quartzo fundido (Silva, 2023a). Após o peneiramento, foram separados os materiais que passaram na peneira de 2,36 mm e ficaram retidos na peneira de 2 mm conforme mostrado na Fotografia 12. Essa granulometria foi escolhida por ser representativa de areias grossas.

Fotografia 12 – Preparação granulométrica do material.



Fonte: Silva, E. (2023a, p. 36)

Gráfico 1 – Curva Granulométrica



Fonte: Silva (2023a, p. 36).

Segundo Silva (2023a), os dados extraídos do ensaio permitiram a construção da curva granulométrica (Gráfico 1). Com o gráfico é possível obter o diâmetro efetivo (D10) de 2,0 mm, o coeficiente de não uniformidade (Cu) de 1,08 e o coeficiente de curvatura (Cc) de 0,98. A correlação desses valores indica uma mínima variação no diâmetro das partículas, enquadrando a amostra como areia mal graduada (SP), conforme os critérios do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

5.2.2.2 Determinação da massa específica dos sólidos

Para determinação da massa específica foi utilizado o método descrito pela norma NBR 6458 (ABNT, 2017), o qual é adequado para solos granulares. O material a ser analisado é aquele retido peneira de 2 mm. Após o processo de seleção da granulometria adequada, o material foi lavado para remover as partes finas que poderiam estar presentes. Atentou-se para a limpeza do quartzo, a qual envolve o uso álcool isopropílico e gaze, para não prejudicar sua saturação com o fluido de saturação.

Seguindo o processo descrito pela norma NBR 6458 (ABNT, 2017), foi feita inicialmente a determinação da massa da amostra de solo seco (Ms). Com o auxílio de um funil, o material foi transferido para o picnômetro e parcialmente submerso em água destilada. Para a remoção do ar aprisionado, conectou-se uma bomba de vácuo ao sistema, garantindo-se a completa vedação da tampa com vaselina e filme plástico. Após a extração do ar, preencheu-se o volume restante do picnômetro com água destilada desaerada, procedendo-se à pesagem do conjunto (picnômetro + água + solo). A temperatura do sistema foi aferida para a devida correção da massa específica da água, conforme a norma técnica. Adicionalmente, registrou-se a massa do picnômetro calibrado preenchido apenas com água. Para garantir a representatividade e a confiabilidade dos resultados, todo o procedimento foi realizado três vezes.

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_s - M_i} * \rho_t \quad (\text{Eq. 1})$$

Com base nos resultados apresentados na Tabela 1, resultados obtidos por Silva (2023b) a massa específica dos sólidos foi determinada pela média aritmética dos três resultados dos ensaios, resultando em aproximadamente 2,228 g/cm³. Este

valor demonstra-se satisfatório e em conformidade com as especificações do fabricante (ACTQUARTZO, 2013), que estabelece o valor nominal de 2,2 g/cm³.

Tabela 1 – Resultado do ensaio de determinação de massa específica.

Amostra	Ms (g)	Mw+pic+solo (g)	Mw+pic (g)	Mi (g)	Temp. (°C)	pT (-)	ps (g/cm ³)
A1	60	655,08	622,1	32,98	27,5	0,9964	2,2134
A2	60	665,47	632,5	32,97	28	0,9963	2,2123
A3	60	641,29	607,8	33,49	27	0,9965	2,2567
Média	-	-	-	-	-	-	2,2275

Fonte: Adaptado de Silva (2023b).

5.2.2.3 Determinação dos índices de vazios máximo e mínimo

A determinação dos índices de vazios máximo e mínimos foi realizada conforme estabelecido nas normas NBR 16840 (ABNT, 2021) e NBR 16843 (ABNT, 2020), para a realização dos ensaios os materiais devem estar secos.

Para a obtenção do índice de vazios máximo, foram utilizados um molde cilíndrico e um dispositivo para verter o material (funil). Foi feito o enchimento do molde até cerca de 1 cm acima da borda, utilizando um funil de forma que areia de quartzo seja depositada de uniformemente, sem segregações. Utilizando uma régua biselada, foi retirado o excesso de material, deixando este rente à borda. Com isso foi feita a determinação do índice de vazios máximo ($e_{\text{máx}}$).

$$\rho_{\text{min}} = \frac{\text{massa dos sólidos}}{\text{volume do molde}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$e_{\text{max}} = \frac{\rho_s}{\rho_{\text{min}}} - 1 \quad (\text{Eq. 3})$$

Já para o índice de vazios mínimo, é utilizado um molde cilíndrico e uma mesa vibratória. O procedimento de ensaio envolve o preenchimento do molde até cerca de 1 cm a 2 cm acima do topo e a retirada do excesso de material. Na sequência, foi colocada uma sobrecarga sobre o material junto com a vibração da mesa, iniciando-se assim o ensaio. Com isso, determina-se o índice de vazios mínimo ($e_{\text{mín}}$).

$$\rho_{\text{max}} = \frac{\text{massa dos sólidos}}{\text{volume do molde}} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$e_{min} = \frac{\rho_s}{\rho_{max}} - 1 \text{ (Eq.5)}$$

De acordo com Silva (2023b), os ensaios foram feitos de acordo com as normas ABNT NBR 16843:2021 e ABNT NBR 16840:2021, com os valores e resultados nas Tabelas 2 e 3, obteve-se um índice de vazios máximo (e_{max}) de 0,76 e um índice de vazios mínimo (e_{min}) de 0,46. Estes valores definem o intervalo de variação volumétrica do solo, essencial para a análise de sua compactação relativa.

Tabela 2 – Índice de vazios máximo.

Ensaio (#)	Mmolde (g)	Mmolde+solo (g)	Msolo (g)	Vmolde (cm³)	pd,min (g/cm³)
1	6065	7315	1250	1008	1,24
2	6065	7335	1270	1008	1,26
Média	-	-	-	-	1,25
Resultado	-	-	-	e_{max}	0,76

Fonte: Adaptado de Silva (2023b).

Tabela 3 – Índice de vazios mínimo.

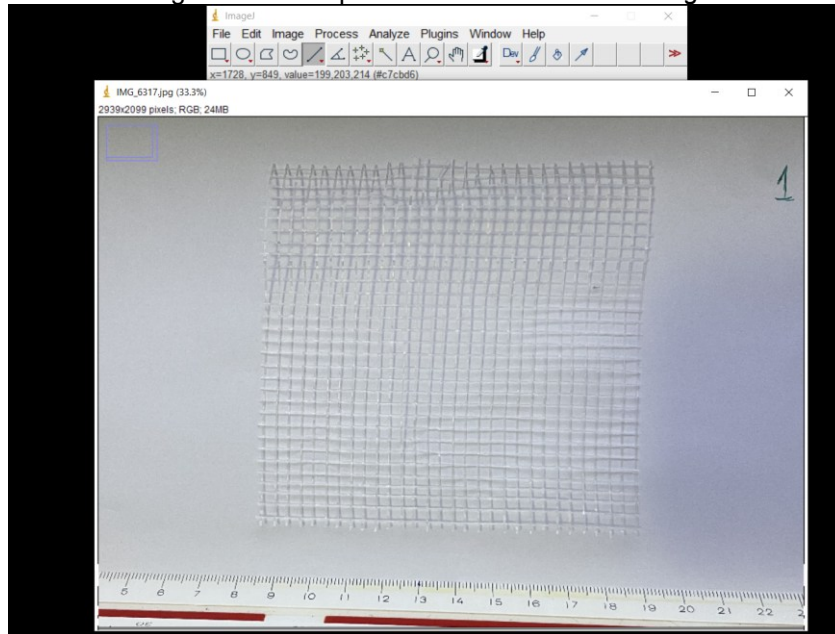
Ensaio (#)	Mmolde (g)	Mmolde+solo (g)	Msolo (g)	Vmolde (cm³)	pd,max (g/cm³)
1	6065	7595	1530	1008	1,52
2	6065	7575	1510	1008	1,5
Média	-	-	-	-	1,51
Resultado	-	-	-	e_{min}	0,46

Fonte: Adaptado de Silva (2023b).

5.2.3 Geogrelhas

5.2.3.1 Medição da gramatura

A gramatura da geogrelha foi determinada por meio de um procedimento simples, baseado na relação direta entre a massa do material e a sua área superficial. O método foi constituído por recortes com dimensões padronizada de 10 cm x 10 cm na geogrelha. A massa foi medida através de uma balança de precisão e a área foi calculada através do *software ImageJ* (Fotografia 12).

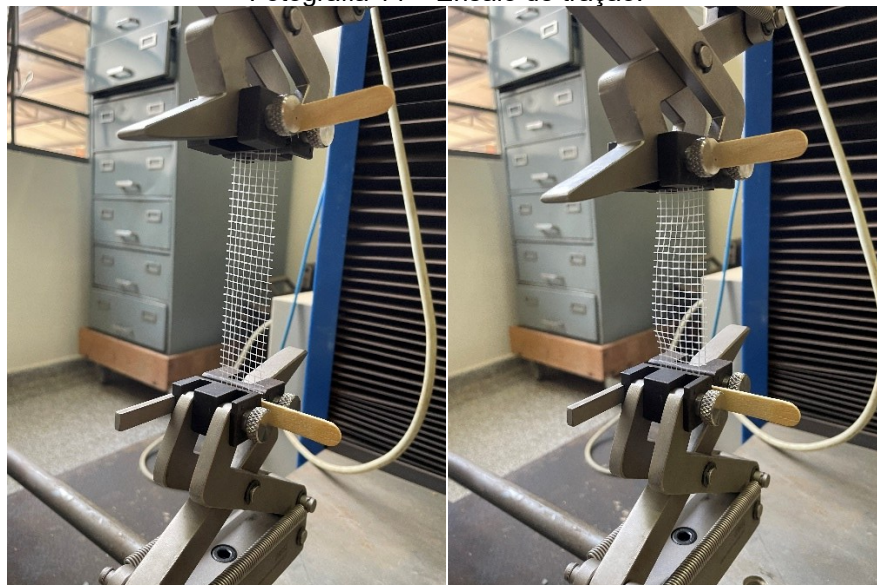
Fotografia 13 – Captura de tela do *software ImageJ*.

Fonte: Autoria própria (2025).

5.2.3.2 Ensaio de resistência à tração

O ensaio de resistência à tração foi realizado conforme a ABNT NBR ISSO 10319:2013, por uma máquina que aplicou uma força de tração em uma amostra da geogrelha em escala reduzida (Fotografia 14) de dimensões de 2,5 cm de largura e 10 cm de altura. A máquina aplicou uma força de tração que cresceu progressivamente até o rompimento da amostra. O resultado utilizou o valor da média de três amostras.

Fotografia 14 – Ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria (2025).

5.2.4 Modelo físico

Para a realização dos ensaios desta pesquisa, foi construído um modelo físico tridimensional em escala reduzida, desenvolvido com o objetivo de simular o comportamento de sapatas apoiadas sobre solo transparente, com e sem a presença de reforço por geogrelhas.

O modelo foi instalado em um recipiente cúbico transparente, confeccionado de vidro com dimensões de 15 cm x 15 cm x 15 cm. No interior do recipiente, foi colocado o solo transparente até uma altura de aproximadamente 10 cm. A base da sapata foi simulada por uma placa rígida de madeira quadrada de 5 cm x 5 cm, compatível com o propósito de simular uma sapata rasa. O carregamento vertical foi aplicado por um sistema gradual de força a 4,3 mm/min, no centro da fundação, para garantir o controle preciso sobre as cargas transmitidas. Foram utilizados critérios de similitude para identificar a relação entre as dimensões no modelo reduzido e as dimensões em protótipo.

Para ensaios com o solo reforçado, as geogrelhas foram inseridas em posições previamente definidas, sendo variado os números de camadas e as profundidades de instalação.

A fim de assegurar a uniformidade da compacidade do material, foi definida a altura de queda do quartzo com o objetivo de obter uma Compacidade Relativa (CR) de 80%. Para isso, o material foi lançado de diversas alturas para o interior do molde cilíndrico padrão. Calculou-se o índice de vazios resultante de cada ensaio (e_{calc}) utilizando as Equações 3 e 5. Por fim, ao aplicar os dados na Equação 6, foi possível achar a altura de queda que mais se aproxima do CR desejado.

$$CR = \frac{e_{max} - e_{calc}}{e_{max} - e_{min}} - 1 \quad (\text{Eq.6})$$

Os valores de compacidade relativa (CR) obtidos na calibração das diferentes alturas de queda do quartzo estão detalhados na Tabela 4, obtida por Silva (2023b). Visando atingir o CR de 80% adotado para os modelos reduzidos, selecionou-se a altura de queda de 5 cm, a qual resultou no índice mais próximo ao desejado (78,77%). Para garantir a mesma densidade e o mesmo comportamento mecânico do material em todas as provas de carga, essa altura de queda foi seguida durante todos ensaios.

Tabela 4 – Alturas de quedas para cada índice de vazios e seus respectivos CR

Altura de queda (cm)	2	4	5	8	10
e	0,614	0,544	0,523	0,498	0,499
CR (%)	48,645	71,701	78,768	87,318	86,801

Fonte: Adaptado de Silva (2023b).

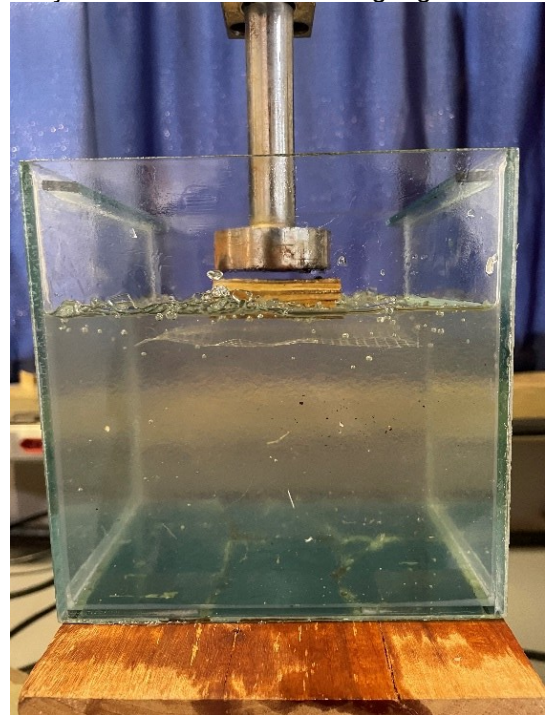
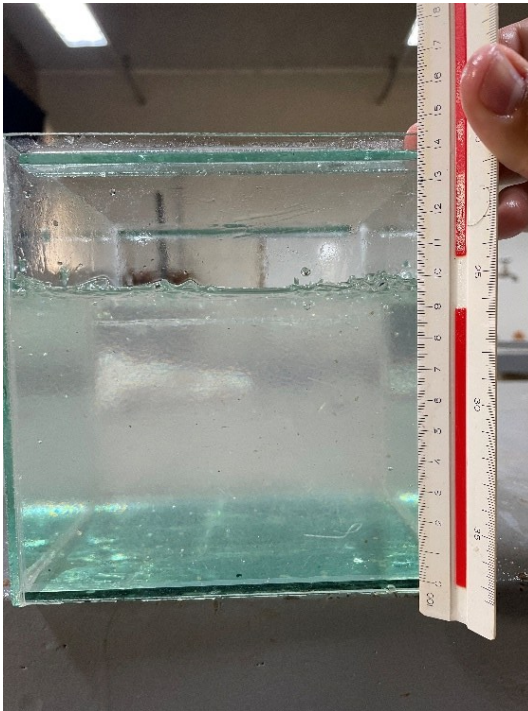
Para ilustrar algumas configurações dos ensaios, as Fotografias 15 a 18 apresentam os modelos físicos montados no recipiente de vidro. É possível observar a disposição do quartzo fundido e a instalação das camadas de geogrelha nas diferentes profundidades, evidenciando o preparo do sistema para as provas de carga.

Fotografia 15 – Modelo físico preenchido com quartzo fundido triturado.



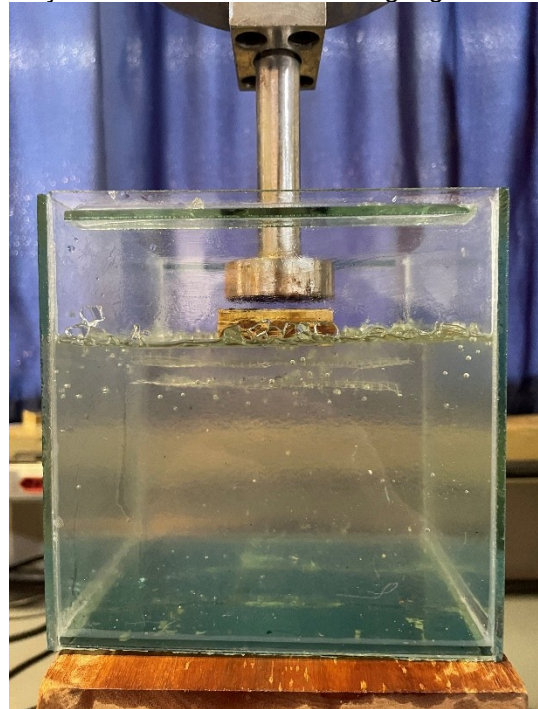
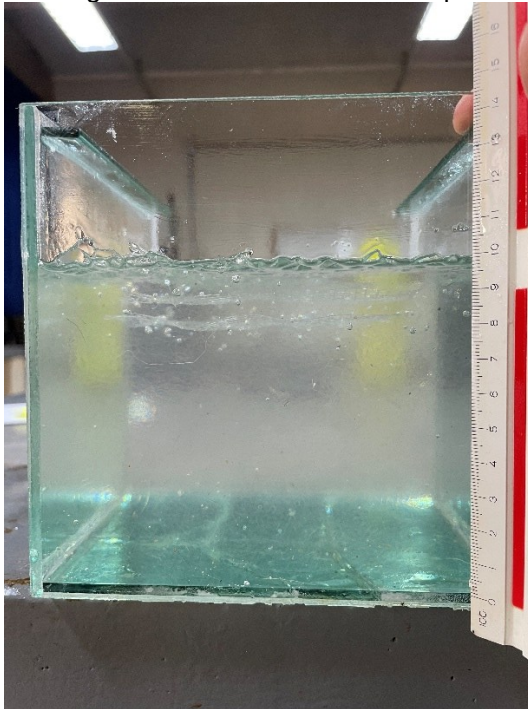
Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 16 – Modelo físico transparente reforçado com uma camada de geogrelha.



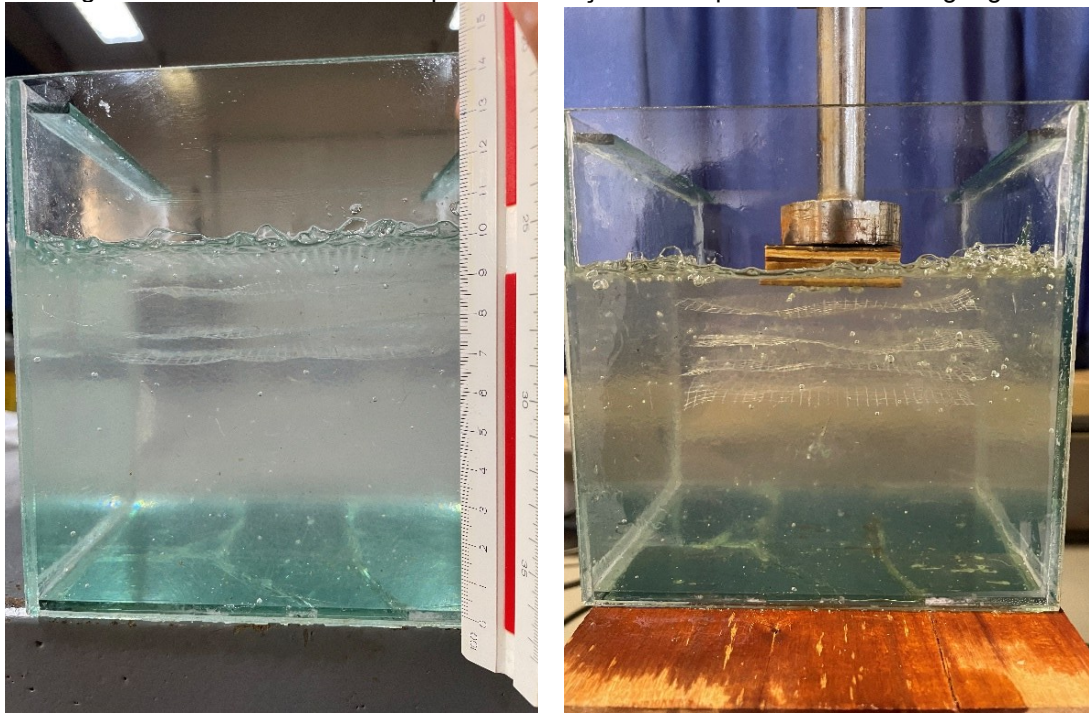
Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 17 – Modelo físico transparente reforçado com duas camadas de geogrelha.



Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 18– Modelo físico transparente reforçado com quatro camadas de geogrelha.



Fonte: Autoria própria (2025).

5.2.4.1 Determinação da transmitância e absorbância

A medição da transmitância e da absorbância das amostras foi realizada por meio do Espectrofotômetro UV-12 PHOX (Fotografia 19), equipamento essencial para quantificar a qualidade da transparência do solo. Com o equipamento pode-se analisar a quantidade de luz que é absorvida pelas amostras. Nos ensaios foi avaliado a mistura do quartzo junto ao fluido de saturação (solo transparente).

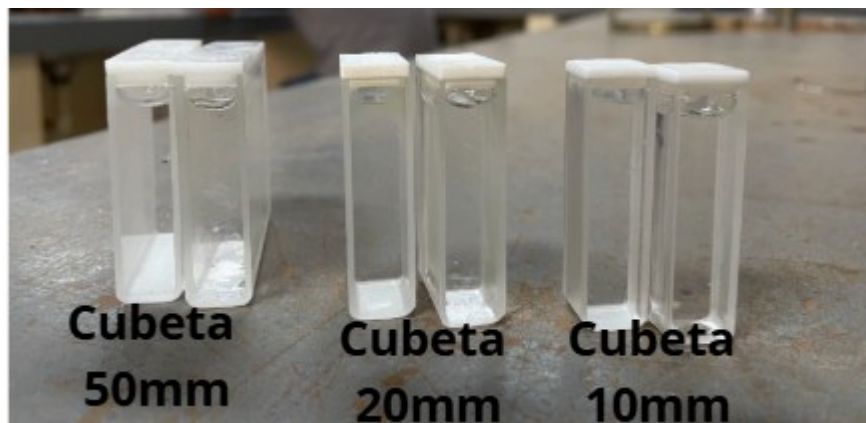
Fotografia 19 – Espectrofotômetro UV-12 PHOX.



Fonte: Autoria própria (2025).

O equipamento necessitou ser calibrado sempre antes de sua utilização, e foram empregados cubetas com distância de visibilidade de 10mm, 20mm e 50mm (Fotografia 20). São utilizadas cubetas de diferentes dimensões, para poder avaliar a influência da distância de visibilidade na quantidade de luz passante através das amostras. O ensaio é realizado em diferentes comprimentos de ondas, compreendidas entre 200 nm e 800 nm, com o objetivo de verificar em qual faixa de valores ocorre maior transmitância, uma vez que valores mais elevados de transmitância indicam maior transparência do material.

Fotografia 20 – Cubetas com mistura de solo transparente.



Fonte: Autoria própria (2025).

6 RESULTADOS

Esta seção apresenta os dados obtidos nos ensaios experimentais, detalhando os resultados.

6.1 Fluido de saturação

Para a composição do solo transparente, utilizou-se apenas vaselina líquida em virtude de sua compatibilidade óptica com o quartzo, pois o índice de refração encontrado na vaselina foi de 1,4577 (Fotografia 21), aproximando-se do valor de referência da fabricante que é de 1,4585 (ACTQUARTZO, 2013). A incorporação da vaselina junto ao quartzo apresentou um índice de turbidez de 22 NTU (Fotografia 22). O valor de NTU vai de 0 a 1000, e quanto menor os valores de NTU, menor é a turbidez do meio, o que favorece consideravelmente a qualidade óptica do modelo.

Fotografia 21 – Resultado Refração



Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 22 – Resultado Turbidez



Fonte: Autoria própria (2025).

6.2 Gramatura da geogrelha

A gramatura do material foi calculada a partir da razão entre a massa (g) e a área (m²) para todas as 5 amostras analisadas. Os resultados individuais estão descritos na Tabela 5, sendo que a gramatura média obtida para o conjunto foi de 31,8 g/m².

Tabela 5 – Gramatura das geogrelhas.

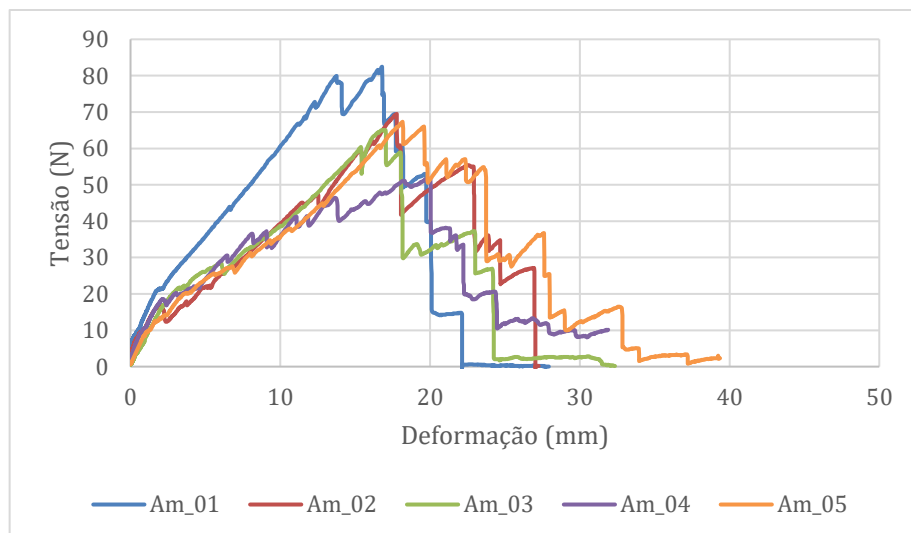
Amostras	Propriedades		
	Área (m ²)	Massa (g)	Gramatura(g/m ²)
1	0,0103057	0,329	31,924
2	0,0106585	0,333	31,243
3	0,0103459	0,329	31,800
4	0,0106696	0,334	31,304
5	0,0100357	0,323	32,185

Fonte: Autoria própria (2025).

6.3 Resistência à tração da geogrelha

Através das medições da célula de carga, pode-se traçar o gráfico de força *versus* deformação para cada uma das cinco amostras (Gráfico 2). O comportamento das amostras apresentou-se na sua maioria uniforme, apenas a primeira amostra apresentou maior variabilidade, sendo sua força mais elevada comparada com as outras amostras, sua força alcançou 82,45 N enquanto a média de todas juntas foi de 67,21 N. Já a zona de rompimento ocorreu entre 17 mm e 20 mm de deslocamento, tendo seus valores mais uniformes, e não destoantes entre si.

Gráfico 2 – Gráfico de resistência à tração da geogrelha



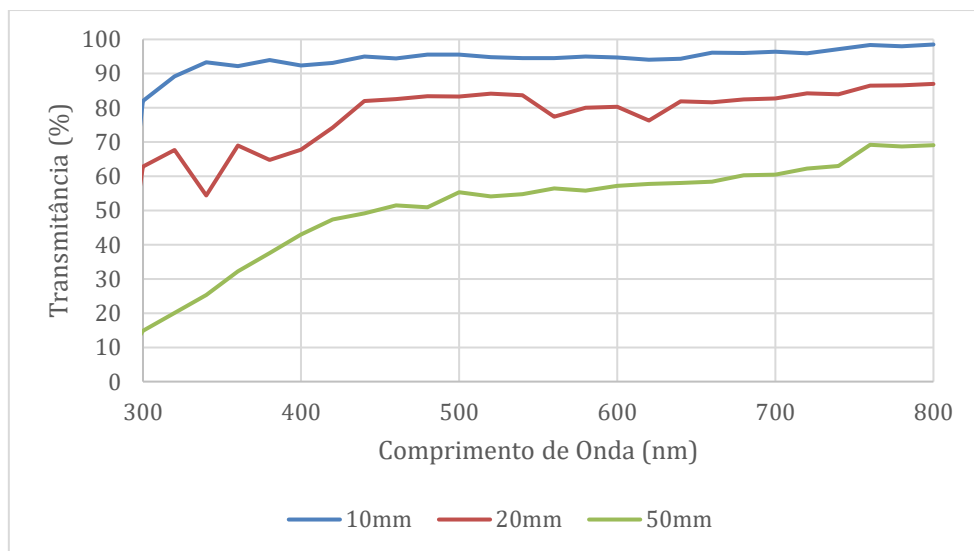
Fonte: Autoria própria (2025).

6.4 Transmitância das amostras de solo transparente

Os dados de transmitância das amostras foram coletados e plotados para cada uma das cubetas, conforme ilustra a Gráfico 3. Observou-se que os valores mais elevados de transmitância ocorreram na cubeta de 10 mm, seguidos pela de 20 mm e, por fim, pela de 50 mm. A redução da transmitância em cubetas de maiores dimensões é um comportamento físico esperado, uma vez que a absorção da energia radiante pelo meio é diretamente proporcional ao comprimento do caminho óptico percorrido pelo feixe de luz (Harris; Lucy, 2023).

A análise considerou o espectro visível, que compreende a faixa de comprimentos de onda de aproximadamente 380 nm a 750 nm (Halliday; Resnick; Walker, 2016), sendo este um parâmetro crucial para determinar a qualidade da transparência do material. Notou-se que os índices de transmitância aumentaram gradualmente à medida que o comprimento de onda foi ampliado. Por fim, conclui-se que os níveis de transmitância obtidos são plenamente compatíveis com a distância de visibilidade exigida para o modelo físico em escala reduzida (150 mm) utilizado na pesquisa.

Gráfico 3 – Transmitância para cada comprimento de onda

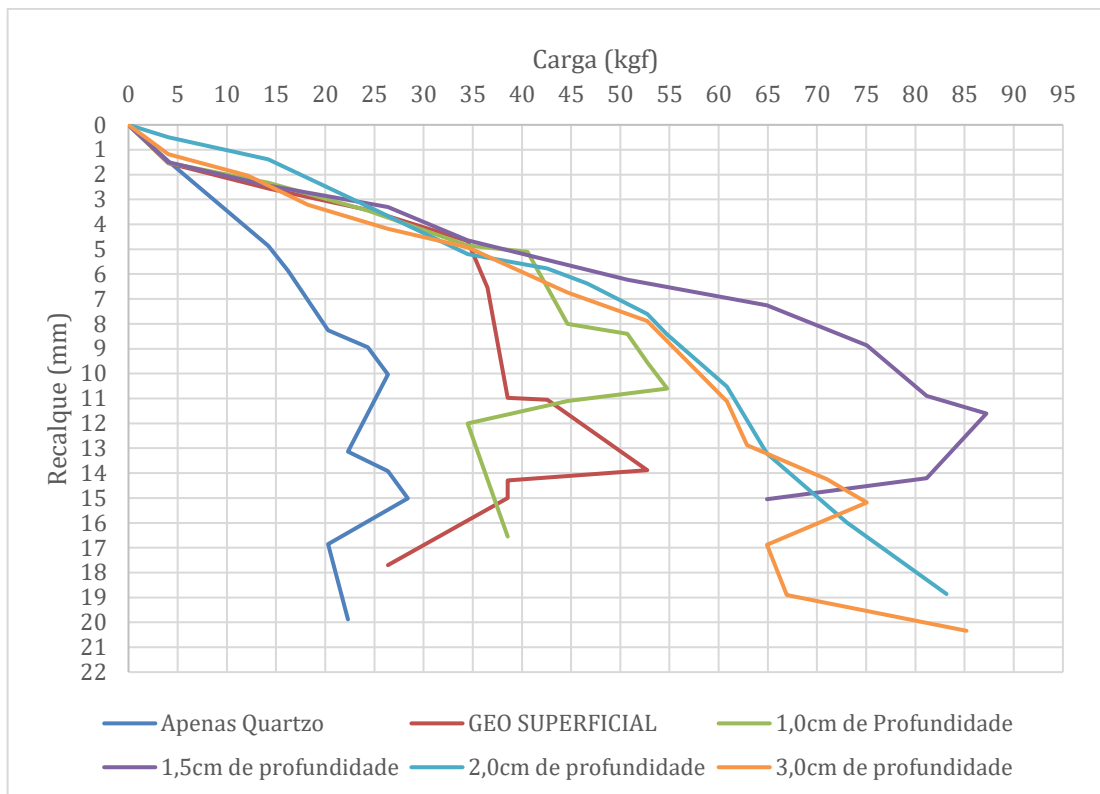


Fonte: Autoria própria (2025).

6.5 Prova de carga

A partir dos ensaios realizados, pode-se coletar os valores dos recalques em milímetro (mm) utilizando um relógio comparador, e os valores de força aplicada em quilograma-força (kgf), com o auxílio de uma célula de carga. Com base nestes resultados, plotou-se os gráficos de carga *versus* recalque.

Gráfico 4 – Gráfico de comparação utilizando uma geogrelha.



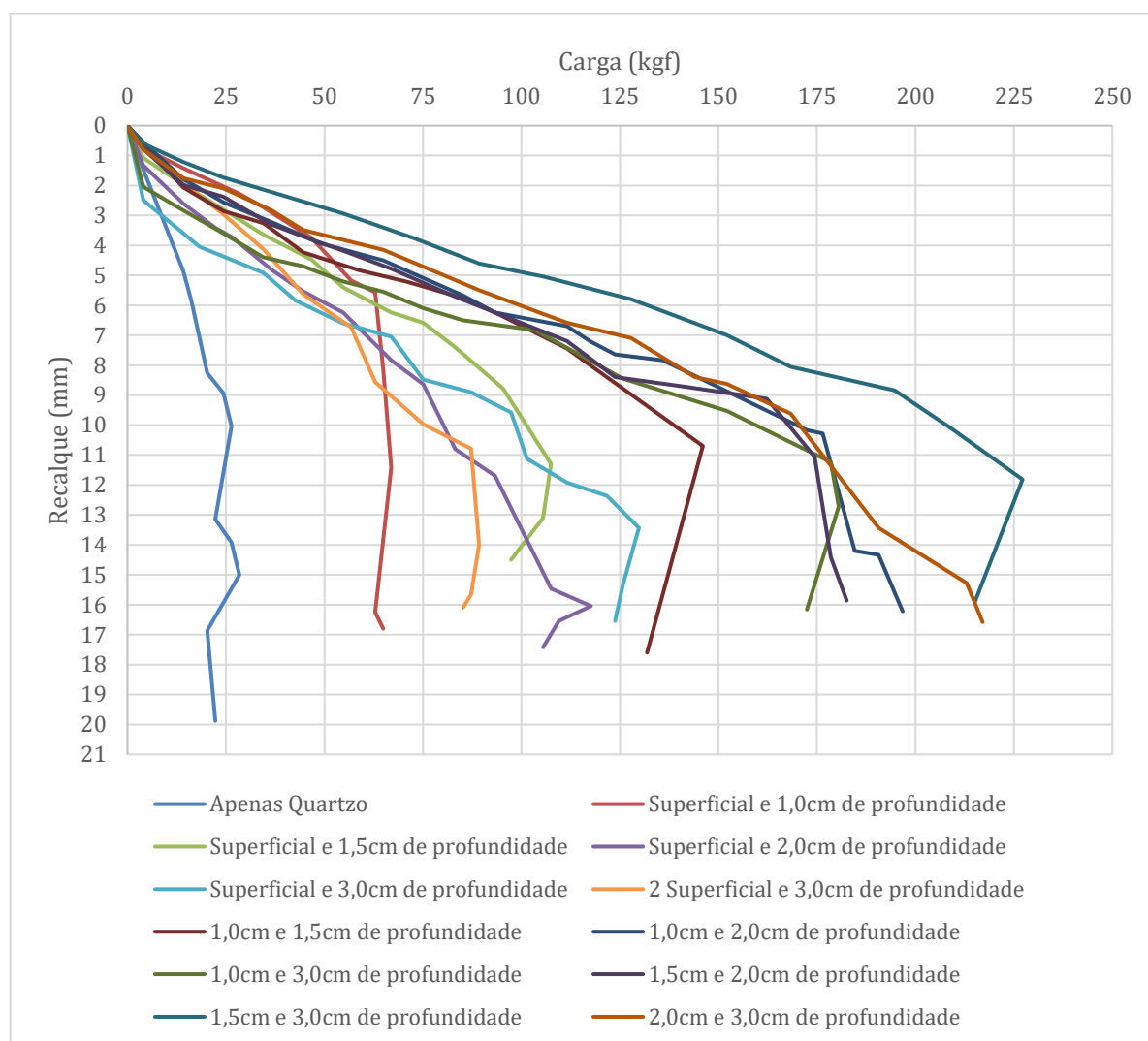
Fonte: Autoria própria (2025).

No Gráfico 4, compara-se o sistema sem nenhuma adição de geogrelha, junto com o sistema com adição de apenas uma geogrelha em profundidade variada. Com isso pode-se comparar suas resistências a força aplicada e seus respectivos deslocamentos, os valores encontrados para o ensaio sem a geogrelha foi de 28,39 kgf e 15,01 mm, enquanto o maior valor para os ensaios com uma camada de reforço foi na profundidade de 1,5 cm que apresentou 87,23 kgf e 11,60 mm.

Pode-se validar o que foi dito pelos estudos de Palmeira *et al.* (2021), citado lá na revisão bibliográfica, ele recomenda que a profundidade ideal da primeira camada de geogrelha equivale a 0,2 a 0,3 vezes a largura da fundação. Como a

largura da fundação utilizada nos ensaios foi de 5,0 cm, dando então que a profundidade ideal para a primeira camada seja de 1,0 a 1,5 cm. Apesar que na profundidade de 1,0 cm não teve uma eficiência tão adequado quanto ao de 1,5 cm, nota-se uma melhora significativa na resistência de aproximadamente 99% em relação ao solo sem nenhum tipo de reforço.

Gráfico 5 – Gráfico de comparação utilizando duas geogrelhas.



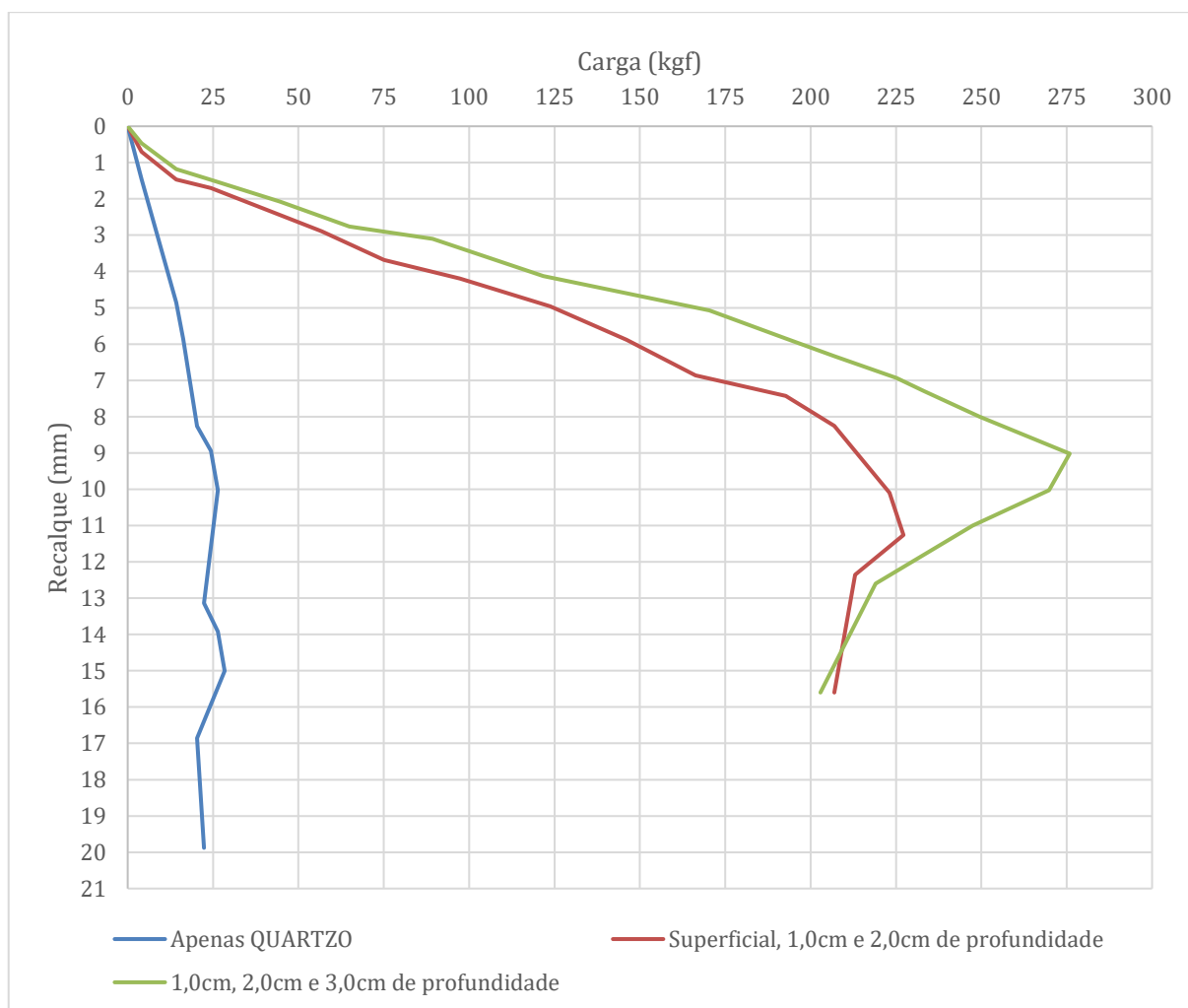
Já no Gráfico 5, pode-se observar as comparações de carga *versus* recalque, com o sistema utilizando 2 camadas de geogrelhas em profundidades distintas. O gráfico evidencia que há uma grande variação de valores, mostrando que a capacidade de resistência do sistema depende diretamente da localização das camadas de reforço.

O menor valor apresentado no gráfico é da camada superficial (0,0 cm) com a profundidade de 1,0 cm, que suportou 66,94 kgf e 11,42 mm de deslocamento.

Destaca-se que este desempenho é inferior ao pico alcançado pelo solo com apenas uma camada bem-posicionada, que chegou a suportar 87,23 kgf e 11,60 mm de deslocamento.

Por outro lado, o maior valor apresentado no gráfico para o solo reforçado com duas camadas foi de 227,19 kgf e 11,82 mm de deslocamento, correspondente à combinação das profundidades de 1,5 cm e 3,0 cm. Este valor representa um aumento de aproximadamente 2,6 vezes o apresentado nos ensaios do sistema com uma camada de reforço. Nota-se um padrão, uma correlação direta de eficiência, percebendo que as profundidades que proporcionaram as maiores e menores resistências no ensaio com duas camadas (1,5 cm e 3,0 cm; superficial e 1,0 cm, respectivamente) são as mesmas profundidades que apresentaram os melhores e piores desempenhos nos ensaios com camada de reforço única.

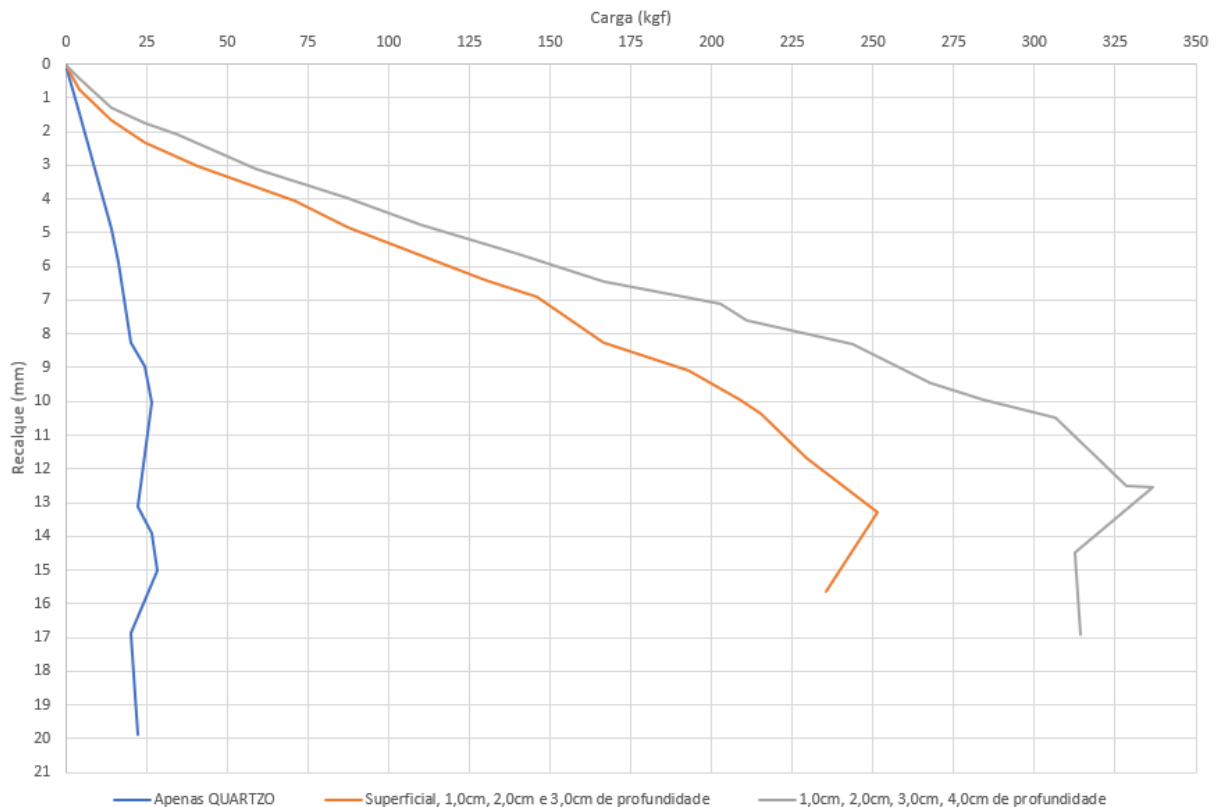
Gráfico 6 – Gráfico de comparação utilizando três geogrelhas.



Fonte: Autoria própria (2025).

O Gráfico 6 apresenta curvas resultantes dos ensaios utilizando três camadas de geogrelhas. Observa-se que o menor valor de resistência obtido nesta configuração (camadas a 0,0; 1,0 e 2,0 cm) atingiu 227,19 kgf, igualando-se à capacidade máxima de suporte encontrada no melhor ensaio com duas camadas. Por sua vez, o desempenho máximo do sistema com três camadas ocorreu na disposição a 1,0; 2,0 e 3,0 cm de profundidade, suportando uma carga de 275,88 kgf com um deslocamento de apenas 9,02 mm. Este pico de resistência representa um incremento de aproximadamente 1,2 vezes em relação ao melhor resultado com duas camadas, e é 3,16 vezes superior ao limite máximo obtido nos testes com apenas uma camada de reforço.

Gráfico 7 – Gráfico de comparação utilizando quatro geogrelhas.



Fonte: Autoria própria (2025).

O Gráfico 7 apresenta os resultados dos ensaios utilizando quatro camadas de reforços no sistema. A análise destes dados evidencia, novamente, a relevância do posicionamento do reforço: a configuração de menor desempenho com quatro camadas (posicionadas a 0,0; 1,0; 2,0 e 3,0 cm) suportou uma carga de 251,53 kgf

com um deslocamento de 13,30 mm, mantendo-se inferior ao melhor resultado utilizando três camadas de reforço, que foi de 275,88 kgf e 9,02 mm.

Em contrapartida, o ensaio de maior eficiência com quatro camadas (1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 cm) suportou uma carga de 336,73 kgf e 12,56 mm de deslocamento. Esta capacidade de suporte apresenta um aumento de aproximadamente 1,2 vezes em relação ao valor máximo encontrado nos testes de camada tripla de reforço.

Para avaliar de forma mais abrangente a eficiência e o custo-benefício do sistema de reforço de solo, realizou-se um estudo comparativo focado nos cenários extremos de cada configuração ensaiada. A Tabela 6 mostra o aumento de resistência considerando exclusivamente os melhores resultados para cada quantidade de camadas.

Tabela 6 – Comparativo evolução dos melhores resultados.

Qtd. de Camadas (Melhores)	Carga Máxima (kgf)	Sem Reforço (28,39 kgf)	Melhor 1 Camada (87,23 kgf)	Melhor 2 Camadas (227,19 kgf)	Melhor 3 Camadas (275,88 kgf)
1 Camada	87,23	207,3%	-	-	-
2 Camadas	227,19	700,2%	160,4%	-	-
3 Camadas	275,88	871,8%	216,3%	21,4%	-
4 Camadas	336,73	1086,1%	286,0%	48,2%	22,1%

Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 6 evidencia-se o ganho progressivo de capacidade de carga, mas também se revela importante taxa perda na eficiência do sistema. Nota-se que o maior ganho expressivo de capacidade de carga ocorre na transição de uma camada para o de duas camadas de reforço, resultando em um acréscimo de 160,4% na resistência. Contudo, à medida em que vai se adicionando reforços, a contribuição individual de novas geogrelhas diminui. A adição de uma quarta camada no seu melhor resultado, por exemplo, ofereceu um incremento de apenas 22,1% em relação ao sistema com três camadas.

Para contrastar o potencial máximo do sistema com os riscos de um posicionamento inadequado de reforços, a Tabela 7 apresenta a evolução da

resistência considerando as configurações menos eficientes para cada número de camadas.

Tabela 7 – Comparativo evolução dos piores resultados.

Qtd. de Camadas (Piores)	Carga Máxima (kgf)	Sem Reforço (28,39 kgf)	Pior 1 Camada (52,74 kgf)	Pior 2 Camadas (66,94 kgf)	Pior 3 Camadas (227,19 kgf)
1 Camada	52,74	85,8%	-	-	-
2 Camadas	66,94	135,8%	26,9%	-	-
3 Camadas	227,19	700,2%	330,8%	239,4%	-
4 Camadas	251,53	786,0%	376,9%	275,8%	10,7%

Fonte: Autoria própria (2025).

A Tabela 7 demonstra que a adição de um reforço não garante uma melhoria estrutural proporcional se o posicionamento não for adequado. A demonstração mais evidente ocorre na transição de uma para duas camadas mal posicionadas, onde a segunda geogrelha acrescentou apenas 26,9% de resistência em relação ao pior cenário de camada única.

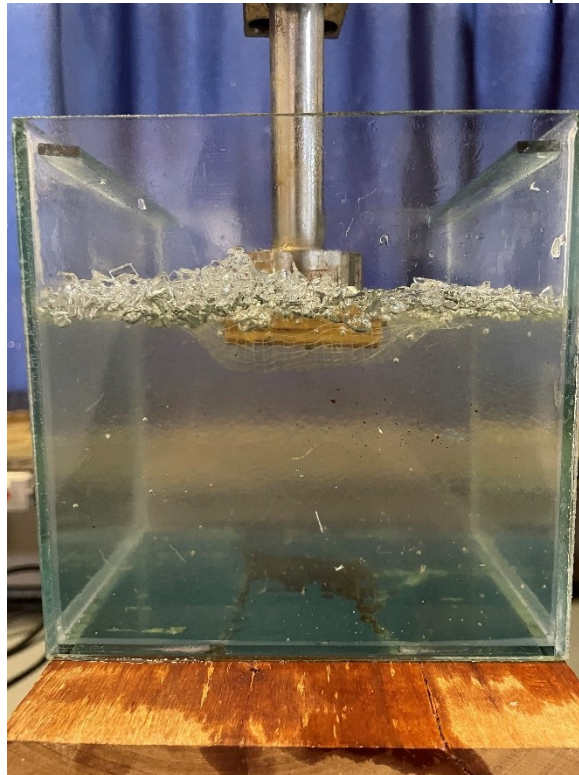
Avaliando as tabelas em conjunto, pode-se perceber que a localização das geogrelhas é o fator predominante para o sucesso do sistema. Mostrando que um sistema com menor quantidade de reforços, porém posicionado em profundidades estratégicas (como o melhor caso de duas camadas, que suportou 227,19 kgf), é capaz de igualar ou até superar configurações com maiores quantidades de geogrelhas dispostas em cotas ineficientes (como o pior caso de três camadas).

Também pode-se identificar nos ensaios feitos utilizando a camada superficial (0,0 cm) em todas as configurações teve o pior desempenho. Independentemente da quantidade de geogrelhas utilizadas, a instalação do reforço na superfície resulta em baixa eficiência estrutural comparadas aos outros sistemas utilizados. Esse comportamento pode ser justificado pela ausência de confinamento na cota superficial. Conforme descreve Koerner (2012), a eficiência das geogrelhas depende fundamentalmente do mecanismo de intertravamento (ou restrição) das partículas de solo dentro das aberturas da malha. Para que o reforço consiga mobilizar sua resistência à tração, é necessária uma tensão normal mínima atuante que confine o solo, impedindo o seu deslocamento livre. Como na superfície a tensão confinante é

praticamente nula, o intertravamento não se desenvolve de maneira satisfatória. Verifica-se, portanto, que a alocação de geogrelhas na cota superficial apresenta uma relação custo-benefício desfavorável, não justificando sua aplicação em projetos de reforço.

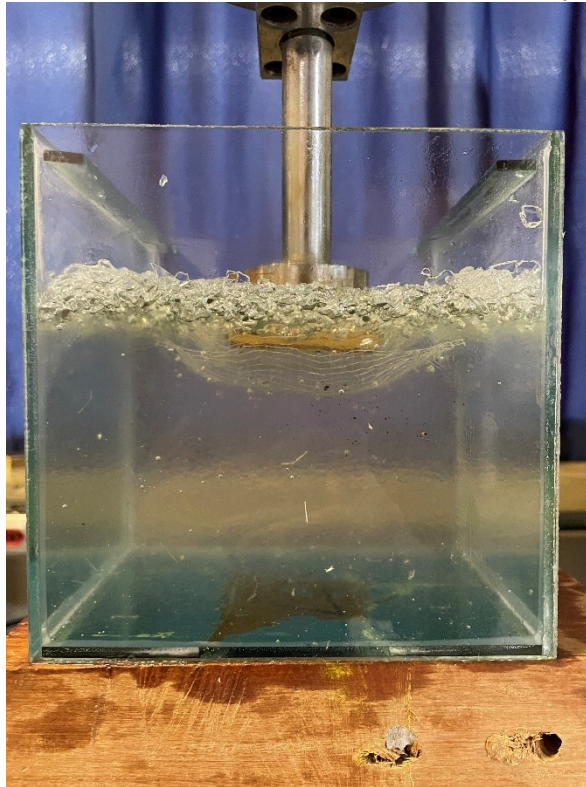
Complementando a análise apresentada anteriormente, as imagens a seguir ilustram o comportamento dos modelos físicos durante a fase de carregamento. As Fotografias 23, 24, 25 e 26, é possível observar visualmente a interação entre o solo transparente e as geogrelhas, bem como a deformação do sistema sob carga em diferentes configurações de reforço.

Fotografia 23 – Modelo físico com uma camada recebendo aplicação de carga.



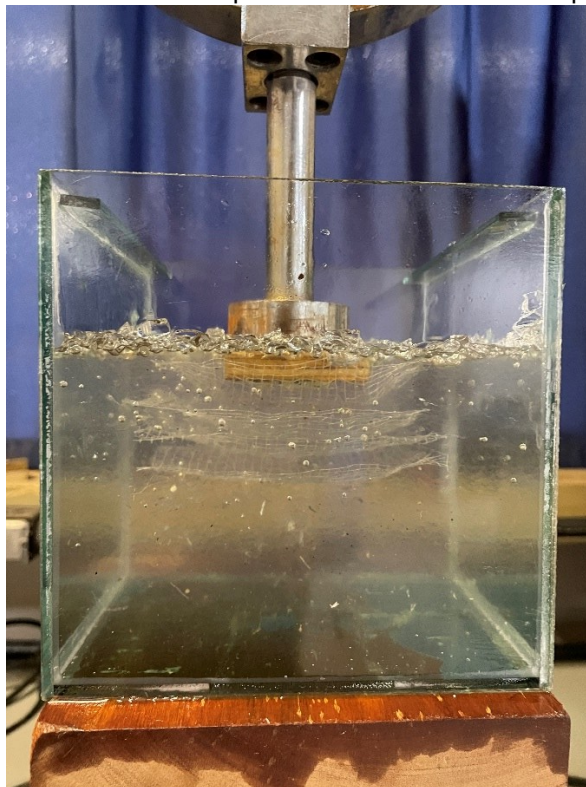
Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 24 – Modelo físico com duas camadas recebendo aplicação de carga.



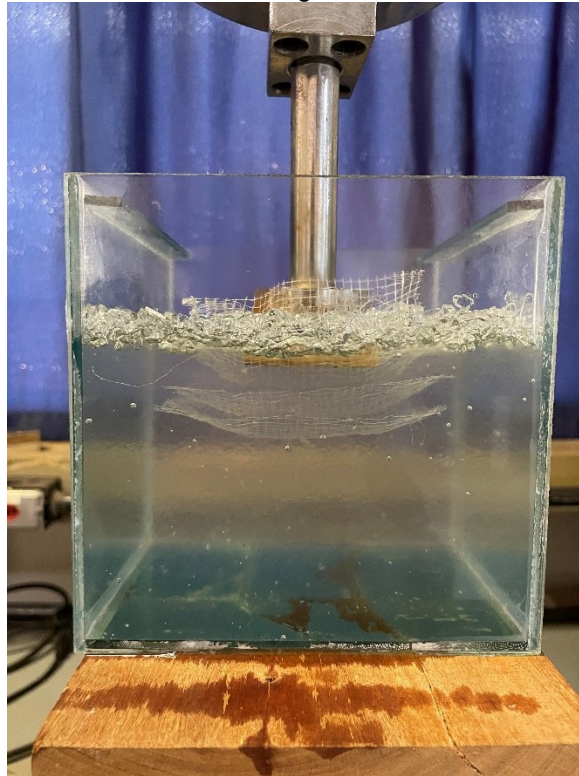
Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 25 – Modelo físico com quatro camadas recebendo aplicação de carga.



Fonte: Autoria própria (2025).

Fotografia 26 - Modelo físico com quatro camadas, sendo uma superficial recebendo aplicação de carga.



Fonte: Autoria própria (2025).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta seção apresenta as principais conclusões obtidas a partir da investigação experimental, retomando os objetivos propostos frente aos resultados alcançados. Adicionalmente, são citadas considerações sobre as limitações observadas durante o desenvolvimento da pesquisa e apresentadas sugestões para estudos futuros, visando o aprimoramento contínuo do tema em questão.

7.1 Considerações finais

A pesquisa atingiu seu objetivo geral ao avaliar o comportamento carga *versus* recalque por meio de modelos físicos reduzidos ensaiados em laboratório. Se realizou os ensaios de diversos modelos, coletando valores de deslocamento com o uso de um relógio comparador e de força utilizando uma célula de carga, o que permitiu uma análise detalhada e objetiva dos resultados obtidos.

Quanto aos objetivos específicos, avaliou-se a influência das geogrelhas no sistema, considerando tanto a quantidade de camadas quanto as diferentes profundidades de instalação. Os ensaios demonstraram que o reforço aumentou significativamente a capacidade de carga do sistema, mas evidenciaram que o posicionamento nas profundidades corretas é o fator predominante para o sucesso do funcionamento do sistema. Verificou-se que uma menor quantidade de reforços bem posicionados pode igualar ou até superar o desempenho de mais camadas dispostas de forma ineficiente, o que evita gastos de reforços desnecessários.

Outro objetivo específico foi analisar as características físicas e mecânicas da geogrelha, confirmando que elas exercem grande influência na interação solo-reforço. Também se verificou que a abertura da malha está ligada diretamente ao mecanismo de intertravamento com as partículas do solo. Além disso, a resistência à tração desse material mostrou-se fundamental para absorver os esforços de tração e limitar os movimentos laterais do solo.

Durante o desenvolvimento do trabalho, verificou-se que o solo transparente, composto por quartzo fundido saturado com um fluido de índice de refração equivalente, apresentou comportamento físico e mecânico muito semelhante ao de areias encontradas na natureza. Essa característica, somada à transparência do meio, revelou-se altamente eficaz para a observação direta e precisa dos deslocamentos

internos durante os ensaios, tornando o uso desses modelos físicos uma ferramenta valiosa para a compreensão de mecanismos complexos na engenharia de fundações.

A pesquisa adotou uma metodologia de investigação experimental, fundamentada em uma revisão bibliográfica de trabalhos acadêmicos, teses, livros especializados e normas técnicas. Essa etapa permitiu consolidar o embasamento teórico necessário para investigar a hipótese do aumento da capacidade de carga do solo por meio do reforço com geogrelhas.

A partir desse levantamento, foi possível definir os procedimentos práticos, a sequência de ensaios e a seleção de equipamentos específicos, como a célula de carga e o relógio comparador. Por fim, a execução dos ensaios laboratoriais gerou os dados necessários para validar as premissas do trabalho e analisar o comportamento do sistema solo-geogrelha.

Dentre as limitações observadas na realização deste trabalho, destaca-se a escassez de literatura técnica de solos transparentes e reforços em fundações utilizando geogrelhas, o que impôs desafios adicionais. O tempo elevado para a montagem e execução de cada modelo físico, somado à quantidade restrita de material em virtude do alto custo de aquisição do quartzo fundido, limitaram a quantidade de provas de carga realizadas, e o volume do modelo físico utilizado. Tais fatores restringiram a possibilidade de analisar uma variedade ainda maior de profundidades e distribuições de camadas de reforço.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nesses resultados, recomenda-se para trabalhos futuros investigar melhor o espaçamento entre as camadas de geogrelha, buscando a opção com o melhor custo-benefício, já que adicionar muitas camadas perde a eficiência. Também seria interessante testar geossintéticos com outras propriedades (como malhas e rigidezes diferentes) para comparar o intertravamento, além de testar o solo transparente utilizando outras compacidades relativas para verificar como o reforço se comporta em condições ainda diferentes de estabilidade.

Na parte prática dos ensaios, sugere-se usar programas de computador (técnica de DIC) para ler as imagens e medir com mais precisão os deslocamentos dentro do solo transparente. Outra recomendação é realizar os ensaios em recipientes maiores, para garantir que as paredes de vidro não estejam interferindo na forma

como o solo distribui as cargas. Até mesmo fazer testes de simulação numérica para o sistema.

REFERÊNCIAS

ACTQUARTZO. **Dados técnicos do vidro de quartzo**. 2013. Disponível em: <http://www.actquartzo.com/page010.html>. Acesso em: 03 jun. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de pedregulhos retidos na peneira de abertura de 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10318-1**: Geossintéticos - Parte 1: Termos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 20.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16840**: Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16843**: Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10319**: Geossintéticos - Determinação das propriedades de tração de largura total. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BORGES, Bruno da Silva. **Estudo da interação solo-geogrelha pelo método dos elementos discretos**. 2012. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

CARVALHO, Tiago Gomes Barroso. **Propriedades dos solos transparentes e técnicas de correlação de imagens digitais para aplicação em modelagem física**

geotécnica. 2015. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

DAS, Braja M. **Princípios de engenharia de fundações**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

DIAS, André Pereira. **Análise do uso de geogrelha para reforço de solo na aplicação de fundação superficial**. 2020. 58 f. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

DIAS, André Pereira; SOARES, Fábio Lopes; NASCIMENTO, Gleycielle Rodrigues do. Analysis of the use of geogrid for soil reinforcement in the application of surface foundation. **International Journal of Geoscience, Engineering and Technology**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 1-7, 2023. DOI: 10.47879/ijget.2023.v7.01.

FERNANDES, Igor. **Fundações diretas em aterros reforçados com geossintéticos**. 2014. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

FERREIRA, Julio A. Z.; ZORNBERG, Jorge G. A Transparent Pullout Testing Device for 3D Evaluation of Soil-Geogrid Interaction. **Geotechnical Testing Journal**, West Conshohocken, v. 38, n. 5, p. 1-22, 2015.

GEOSOLUÇÕES. **Geosoluções: engenharia geotécnica**. [S. l.], 2026. Disponível em: <https://www.geosolucoes.com/>. Acesso em: 19 jun. 2026.

HUESKER. **Huesker Brasil: soluções em geossintéticos**. [S. l.], 2026. Disponível em: <https://www.huesker.com.br/>. Acesso em: 19 jun. 2026.

LOPES, Ana Carolina das Chagas. **Estudo de interação solo-geogrelha-estrutura de fundações rasas utilizando modelagem física com solos transparentes**. 2019. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2019.

OLIVEIRA, Bianca Lopes. **Construções de aterros sobre solos moles**. 1. ed. São Paulo: Platos Soluções Educacionais S.A., 2021.

PALMEIRA, Ennio Marques. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

PALMEIRA, Ennio M.; ARAÚJO, Gregório Luis Silva; ALMEIDA, Maria das Graças Gardoni. **Geossintéticos em engenharia geotécnica e geoambiental: avanços e perspectivas**. Brasília: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2021.

Sieira, A., C., C., F. (2003). **Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo - Geogrelha**. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.363.

SILVA, Thaynara da Silva e. **Estudo de técnicas de reforço de solos por meio de ensaios de laboratório**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia, 67 f., Porto Velho, 2023a.

SILVA, Edson Dias da. **Técnica de solos transparentes aplicada ao reforço de fundações em solos granulares**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia, 51 f., Porto Velho, 2023b.

VERTEMATTI, José Carlos (ed.). **Manual brasileiro de geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

VERTEMATTI, José Carlos (ed.). **Manual brasileiro de geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

ZORNBERG, Jorge G. Funções e aplicações de geossintéticos em rodovias. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 189, p. 298-306, 2017.