



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**RICARDO CÉSAR BEZERRA TELES JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO ARENOSO**  
**REFORÇADO COM MICROGRELHA**

**FORTALEZA**

**2022**

RICARDO CÉSAR BEZERRA TELES JÚNIOR

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO ARENOSO  
REFORÇADO COM MICROGRELHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

T272a Teles Júnior, Ricardo César Bezerra.  
Avaliação do Comportamento Mecânico de Solo Arenoso Reforçado com Microgrelha / Ricardo César Bezerra Teles Júnior. – 2022.  
92 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

Coorientação: Prof. Dr. Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar.

1. Reforço de solo. 2. Geossintéticos. 3. Ensaio Triaxiais. 4. Microgrelha. I. Título.

CDD 624.15

---

RICARDO CÉSAR BEZERRA TELES JÚNIOR

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO ARENOSO  
REFORÇADO COM MICROGRELHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar (Coorientador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante  
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

A Deus.

Aos meus pais e amigos.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares pelas dicas, companheirismo, amizade, orientação e paciência nessa etapa tão importante da minha vida. MUITÍSSIMO OBRIGADO.

Ao Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar pelas dicas e orientações acadêmicas. Muito obrigado.

Ao Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura que foi um dos responsáveis por me apoiar para o mestrado.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho e o Prof. Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante pelo tempo concedido, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A todo o corpo docente, discente e de funcionários que formam o setor de Geotecnia da faculdade, em especial aos professores Rosiel Leme, Fabíola Costa e Roberto Cordeiro e aos amigos Francisco da Silva e Anselmo Clemente, por excelente recepção e ensinamentos no Laboratório. MUITÍSSIMO OBRIGADO.

A todos os profissionais que formam a Universidade Federal do Ceará por terem me acolhido por anos e terem repassados conhecimentos fundamentais para a minha formação intelectual e social, sou eternamente grato a vocês.

À empresa Macaferri Brasil Ltda por fornecer os materiais necessários para a pesquisa.

A minha família por todo apoio, amor e carinho, sem vocês eu não teria conseguido chegar até aqui, em especial meus pais Christinna e Ricardo e meu irmão Felipe. Homenagem póstuma a minha avó Maria Alves Sousa, minha eterna gratidão e saudade. Amo todos vocês.

A minha namorada Carolina Arouche Cambraia e família por todo apoio, conselhos e amor recebido, muitíssimo obrigado.

Aos meus amigos por estarem sempre ao meu lado e me proporcionarem momentos únicos.

Aos colegas da turma de mestrado pela convivência, amizade e sugestões.

“Cada sonho que você deixa para trás é um pedaço do seu futuro que deixa de existir.”  
(Steven Jobs).

## RESUMO

Um assunto de grande relevância para a engenharia geotécnica é a busca por soluções econômicas de melhoramento das características de resistência e compressibilidade dos solos. Dentre as técnicas utilizadas com esse propósito há o uso de geossintéticos como material de reforço, que são materiais industrializados que quando misturados aos solos possuem a capacidade de suportar tensões de tração. Atualmente cada vez mais materiais geossintéticos estão sendo desenvolvidos para desempenhar diferentes funções em substituição aos solos. Nesta categoria enquadram-se as microgrelhas que podem ser utilizadas, dentre algumas funções, como elemento de separação e de reforço dos solos. No entanto, muitas das propriedades das microgrelhas e a interação com o solo ainda são pouco conhecidas, carecendo de maiores pesquisas sobre o tema. Esta pesquisa tem por finalidade avaliar o comportamento mecânico de solos arenosos reforçados com microgrelhas, através das análises de curvas tensão  $\times$  deformação e dos parâmetros de resistência obtidos para o solo reforçado. Para a avaliação do comportamento mecânico do solo reforçado utilizaram-se ensaios triaxiais do tipo adensado e drenado (CD), em pequena escala, variando a quantidade de camadas de microgrelhas inseridas no solo. Adicionalmente, para comparação de resultados, foram realizados ensaios triaxiais no solo arenoso reforçado com geotêxtil não-tecido, com 200 g/m<sup>2</sup> e 300 g/m<sup>2</sup> de gramatura. Os resultados mostraram que houve aumento da tensão desviadora e da deformação axial na ruptura a inserção da microgrelha no solo, resultando em melhorias nos parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atritos efetivos), sendo maior para corpos de prova reforçados com três camadas de microgrelhas. Os resultados indicaram que o solo reforçado com microgrelhas apresentou parâmetros de resistência superiores ao solo reforçado com geotêxteis.

**Palavras-chave:** reforços de solo; geossintéticos; ensaios triaxiais; microgrelha.

## ABSTRACT

A matter of incredible relevance for geotechnical engineering is the research for economic solutions in order to improve the strength and compressibility characteristics of soils. Among the techniques used for this purpose there is the use of geosynthetics as reinforcement material, which are industrialized materials that when mixed with soils have the ability to withstand tensile stresses. Currently, more and more geosynthetic materials are being developed to perform different functions in replacement of soils. As an illustration, this category includes microgrids that may be used, among some functions, for instance, as an element for separating and reinforcing the soil. However, many of the properties of microgrids and their interaction with the soil are still poorly understood, that implies it is necessary further research about the subject. This research aims to evaluate the mechanical behavior of sandy soils reinforced with microgrids, through the analysis of stress-strain curves and the resistance parameters obtained for the reinforced soil. For the evaluation of the mechanical behavior of the reinforced soil, triaxial tests of the densified and drained type (CD) were used varying the amount of microgrid layers inserted in the soil using a small scale. Furthermore, for comparison of results, triaxial tests were carried out in sandy soil reinforced with non-woven geotextile with 200 g/m<sup>2</sup> and 300 g/m<sup>2</sup> of grammage. Overall, increased deflection stress and axial deformation at rupture, the results showed that the insertion of the microgrid in the soil resulted in improvements in the parameters of soil resistance (cohesion and effective friction angle), being higher for specimens reinforced with three layers of microgrids. In conclusion, the results indicated that the soil reinforced with microgrids presented higher strength parameters than the soil reinforced with geotextiles.

**Keywords:** soil reinforcement; geosynthetics; triaxial tests; microgrid.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Representação das geocélulas.....	21
Figura 2 -	Representação dos geotêxteis.....	22
Figura 3 -	Representação de um geocomposto de drenagem.....	22
Figura 4 -	Representação das geofôrmas.....	23
Figura 5 -	Representação das geogrelhas.....	23
Figura 6 -	Representação das geomantas.....	24
Figura 7 -	Representação das geomembranas.....	24
Figura 8 -	Representação dos geotubos corrugados de PEAD.....	25
Figura 9 -	Representação da Microgrelha.....	28
Figura 10 -	Representação do uso de microgrelhas:a) aterros de conquista; b) confinamento de rachão.....	30
Figura 11 -	Aplicação da Microgrelha em obra.....	31
Figura 12 -	Resultado final da obra de uso com microgrelhas.....	31
Figura 13 -	Desenho esquemático de uma estrutura de solo reforçado.....	33
Figura 14 -	Comportamento de solos reforçados (a) sem reforço; (b) com reforço.....	34
Figura 15 -	Comparação dos estados de tensão em amostras com e sem reforço em ensaios triaxiais.....	36
Figura 16 -	Mecanismos de tração e de deslocamento na interface de solos reforçados: (a) mobilização de tração em amostras reforçadas; (b) mobilização de atrito entre superfícies reforçadas.....	38
Figura 17 -	Curvas de tensão x deformação dos estudos de Siera (2003) para solos arenosos: (a) $\sigma_3 = 50$ kPa, em (b) $\sigma_3 = 150$ kPa e em (c) $\sigma_3 = 300$ kPa.....	40
Figura 18 -	Curvas tensão x deformação dos estudos de Sieira (2003) para solos argilosos: (a) $\sigma_3 = 50$ kPa, em (b) $\sigma_3 = 150$ kPa e em (c) $\sigma_3 = 300$ kPa.....	41
Figura 19 -	Curvas tensão x deformação de vários geossintéticos estudados por Unnikrishnan.....	43
Figura 20 -	Representação da área de coleta das amostras.....	46

Figura 21 -	Superfície de ruptura para o corpo de prova reforçado com uma camada de microgrealha para as tensões confinantes diferentes: (a) $\sigma_3 = 100$ kPa; (b) $\sigma_3 = 150$ kPa.....	75
Figura 22 -	Corpo de prova reforçado com duas camadas de microgrealha para a tensão de 50 kPa.....	75
Figura 23 -	Corpos de prova reforçados com duas camadas de microgrealha após ruptura: (a) $\sigma_3 = 50$ kPa, em (b) $\sigma_3 = 100$ kPa e em (c) $\sigma_3 = 150$ kPa.....	76
Figura 24 -	Imagem da microgrealha após a ruptura dos corpos de prova.....	76
Figura 25 -	Corpos de prova reforçados com geotêxtil não-tecido após a ruptura para a tensão confinante de 100 kPa: (a) Geot. Não-tecido de 300 g/m <sup>2</sup> ; (b) Geot. Não-tecido de 200 g/m <sup>2</sup> .....	84
Figura 26 -	Reforço de geotêxtil não-tecido após a ruptura: (a) Geot. Não-tecido de 300 g/m <sup>2</sup> ; (b) Geot. Não-tecido de 200 g/m <sup>2</sup> .....	85
Quadro 1 -	Tipos de geossintéticos com suas principais funções.....	25
Quadro 2 -	Relação de propriedades com seus ensaios e normas.....	27

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Curva granulométrica da amostra.....	51
Gráfico 2 -	Curva de compactação do solo.....	52
Gráfico 3 -	Curva tensão x deformação para o solo sem reforço.....	53
Gráfico 4 -	Curva tensão x deformação para o solo com 1 camada de reforço	54
Gráfico 5 -	Curva tensão x deformação para o solo com 2 camadas de reforço.....	54
Gráfico 6 -	Curva tensão x deformação para o solo com 3 camadas de reforço.....	55
Gráfico 7 -	Envoltória de resistência para o solo sem reforço.....	56
Gráfico 8 -	Envoltória de resistência para o solo com 1 camada de reforço....	56
Gráfico 9 -	Envoltória de resistência para o solo com 2 camadas de reforço...	57
Gráfico 10 -	Envoltória de resistência para o solo com 3 camadas de reforço...	57
Gráfico 11 -	Curva deformação volumétrica x deformação axial para o solo sem reforço.....	58
Gráfico 12 -	Curva deformação volumétrica x deformação axial para o solo com 1 camada de reforço.....	59
Gráfico 13 -	Curva deformação volumétrica x deformação axial para o solo com 2 camadas de reforço.....	59
Gráfico 14 -	Curva deformação volumétrica x deformação axial para o solo com 3 camadas de reforço.....	60
Gráfico 15 -	Trajectoria de tensão para o solo sem reforço.....	60
Gráfico 16 -	Trajectoria de tensões do solo com 1 camada de reforço.....	61
Gráfico 17 -	Trajectoria de tensões do solo com 2 camadas de reforço.....	61
Gráfico 18 -	Trajectoria de tensões do solo com 3 camadas de reforço.....	62
Gráfico 19 -	Curva tensão x deformação para o solo reforçado com o geotêxtil não-tecido de 200 g/m <sup>2</sup> .....	63
Gráfico 20 -	Curva tensão x deformação para o solo reforçado com o geotêxtil não-tecido de 300 g/m <sup>2</sup> .....	63
Gráfico 21 -	Envoltória de resistência para o solo reforçado com o geotêxtil não-tecido 200 g/m <sup>2</sup> .....	64

Gráfico 22 -	Envoltória de resistência para o solo reforçado com o geotêxtil não-tecido 300 g/m <sup>2</sup> .....	64
Gráfico 23 -	Curva deformação axial x deformação volumétrica para o solo reforçado com o geotêxtil de 200 g/m <sup>2</sup> .....	65
Gráfico 24 -	Curva deformação axial x deformação volumétrica para o solo reforçado com o geotêxtil de 300 g/m <sup>2</sup> .....	66
Gráfico 25 -	Curvas para o solo sem e com reforço de microgrelha para a tensão confinante de 50 kPa: a) Tensão desvio x Deformação axial; b) Deformação axial x Deformação volumétrica.....	68
Gráfico 26 -	Curvas para o solo sem e com reforço de microgrelha para a tensão confinante de 100 kPa: a) Tensão desvio x Deformação axial; b) Deformação axial x Deformação volumétrica.....	70
Gráfico 27 -	Curvas para o solo sem e com reforço de microgrelha para a tensão confinante de 150 kPa: a) Tensão desvio x Deformação axial; b) Deformação axial x Deformação volumétric.....	72
Gráfico 28 -	Comportamento deformação axial na ruptura x tensões confinantes para o solo sem e com reforço.....	74
Gráfico 29 -	Módulo de deformabilidade secante normalizado pela tensão confinante com a inserção das camadas de reforço de microgrelha.....	77
Gráfico 30 -	Curvas para o solo sem reforço e com reforço de microgrelha e geotêxtil para a tensão confinante de 50 kPa: a) Tensão desvio x Deformação axial; b) Deformação axial x Deformação volumétrica.....	79
Gráfico 31 -	Curvas para o solo sem reforço e com reforço de microgrelha e geotêxtil para a tensão confinante de 100 kPa: a) Tensão desvio x Deformação axial; b) Deformação axial x Deformação volumétrica.....	81

Gráfico 32 - Curvas para o solo sem reforço e com reforço de microgrelha e geotêxtil para a tensão confinante de 100 kPa: a) Tensão desvio x Deformação axial; b) Deformação axial x Deformação volumétrica..... 83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela comparativa de resistência entre geossintéticos de reforço.....	29
Tabela 2 - Configuração das camadas de microgrealha do estudo.....	49
Tabela 3 - Valores das densidades reais dos grãos.....	52
Tabela 4 - Parâmetros de resistência efetiva para o solo sem e com reforço.....	78
Tabela 5 - Parâmetros de resistência efetiva para o solo reforçado com os diferentes geossintéticos.....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABINT	Associação Brasileira das Indústrias de Não-tecidos e Tecidos Técnicos
ASTM	Associação Americana de Ensaios e Materiais
CD	Ensaio Triaxial Adensado e Drenado
CECEF	Campo Experimental de Geotecnia e Fundações
CP	Corpo de Prova
CTG	Comitê Técnico de Geossintéticos
CU	Ensaio Triaxial Consolidado e Não Drenado
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IGS	Sociedade Internacional de Geossintéticos
MBG	Manual Brasileiro de Geossintéticos
NBR	Norma Técnica Brasileira
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
RDC	Resíduos de Construção e Demolição
SUCS	Sistema Universal de Classificação dos Solos
UU	Ensaio Triaxial Não Adensado e Não drenado

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma$	Tensão Normal
$\sigma_1$	Tensão principal maior
$\sigma_3$	Tensão principal menor
$\sigma_{3\text{ rf}}$	Tensão principal menor na ruptura
T	Força de Tração
$\tau$	Tensão de Cisalhamento
$\tau_G$	Tensão máxima de tração do reforço
$\tau_{SG}$	Tensão máxima da interface solo-reforço
$T_{100}$	Tempo de adensamento
$T_f$	Tempo de falha
Esec	Módulo da deformabilidade secante
$\xi$	Deformação axial
$\xi_a$	Deformação axial na ruptura

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>17</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>17</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivo Específicos.....</i>	<i>17</i>
<b>1.2</b>	<b>Estrutura da dissertação.....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Geossintéticos.....</b>	<b>19</b>
<i>2.1.1</i>	<i>Definição e Benefícios.....</i>	<i>19</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Tipos e Classificação.....</i>	<i>20</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Propriedades, Ensaios e Normas.....</i>	<i>25</i>
<b>2.2</b>	<b>Microgrelhas.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3</b>	<b>Uso de Geossintéticos como elemento de reforço.....</b>	<b>32</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Considerações iniciais.....</i>	<i>32</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Conceito de Solo Reforçado.....</i>	<i>32</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Mecanismos desenvolvidos amostras reforçadas em ensaios triaxiais.....</i>	<i>36</i>
<b>2.4</b>	<b>Conceitos Iniciais sobre Deformabilidade de Solos.....</b>	<b>44</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>46</b>
<i>3.1.1</i>	<i>Solo.....</i>	<i>46</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Microgrelha.....</i>	<i>47</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Geotêxtil não-tecido.....</i>	<i>47</i>
<b>3.2</b>	<b>Métodos dos ensaios.....</b>	<b>47</b>
<i>3.2.1</i>	<i>Granulometria.....</i>	<i>47</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Umidade natural.....</i>	<i>48</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Densidade real dos grãos.....</i>	<i>48</i>
<i>3.2.4</i>	<i>Compactação.....</i>	<i>48</i>
<i>3.2.5</i>	<i>Ensaio triaxial.....</i>	<i>48</i>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>Granulometria.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2</b>	<b>Densidade real dos grãos e umidade.....</b>	<b>51</b>
<b>4.3</b>	<b>Compactação.....</b>	<b>52</b>

<b>4.4</b>	<b>Ensaio Triaxial.....</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>87</b>
<b>6.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>88</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por melhorias nas características de resistência dos solos é um assunto de bastante interesse na engenharia geotécnica, principalmente quando se deseja construir estruturas sobre camadas de solos *in situ* ou utilizar solos oriundos de áreas de empréstimo, que devem estar o mais próximo da obra, para otimização dos custos. Isto nem sempre é possível, pois os solos são materiais heterogêneos e de diversas formações, características e granulometrias. O melhoramento do comportamento mecânico dos solos pode ser feito através de adições de estabilizantes químicos ou com o uso de geossintéticos, sendo que há diversos estudos na geotecnia nesse sentido (CASTRO, 2020; LATHA, 2006; LESHCHINSKY *et al.*, 2015; ZHANG, 2006) e pesquisas continuam sendo feitas para mais difusão de conhecimentos sobre o assunto.

No que se refere a materiais sintéticos, os geossintéticos são materiais industriais de origem polimérica utilizados para diversos fins, tais como drenagem, separação, filtração, barreira, proteção, reforço, entre outras. São materiais homogêneos usados para melhorar o comportamento geotécnico de uma massa ou substituir uma camada de solo, aferindo um menor volume de material juntamente com um melhor controle de qualidade. Existe uma variedade de geossintéticos disponíveis em mercado e muitos em fase de desenvolvimento. Particularmente importantes são os geossintéticos desenvolvidos para a função de reforço ao solo, havendo opções já consolidadas no mercado. Dentre os materiais geossintéticos que podem atuar como reforço de solo disponível no mercado pode-se citar as geogrelhas, malhas metálicas, fibras de materiais sintéticos e naturais, e, mais recentemente, as microgrelhas.

Estudos sobre o comportamento mecânico de solos reforçados com geossintéticos feitos através de ensaios triaxiais utilizando solos arenosos e argilosos são apresentados na literatura (CARLOS, 2016; CHEN ET AL., 2014; GALI, 2006; SIEIRA, 2003; YANG, 2016; ZAO, 2020). Nesses estudos se avaliam, dentre outras características, a influência da quantidade de camadas, o tipo de geossintético, o tipo de solo, o nível de compactação e de compactação, as dimensões corpo de prova, etc., no comportamento mecânico do compósito.

Dentre os geossintéticos recentemente desenvolvidos podem-se citar as microgrelhas. Estas são materiais produzidos a partir de filamentos de poliéster apresentam diferentes funções. Há relatos do uso desse geossintético em obra brasileira com fins de separação e reforço entre camadas de solos de pavimentos e para confinamento de rachão para uso em fundações rasas (ROCHA, 2016). Apesar das aplicações práticas de uso do material, ainda são poucos os estudos sobre o seu uso para uma estrutura de reforço de solo.

Estudos sobre o uso de microgrelhas como alternativa para reforço de solo não são tão discutidos na literatura técnica quando comparados com outros geossintéticos, como as geogrelhas e os geotêxteis, os quais já apresentam suas funções bem definidas. Diante disso, é importante avaliar o uso da microgrelhas como material de reforços em solos de obras geotécnicas, como os aterros de resíduos ou em obras de infraestrutura. É importante avaliar soluções que possam ser técnica e economicamente viáveis que as atualmente disponíveis no mercado.

De acordo com o exposto nos parágrafos anteriores, torna-se necessário realizar estudos mais aprofundados sobre a utilização das microgrelhas como material de reforço ao solo, a partir do estudo do comportamento mecânico do compósito comparando os resultados com os observados para outros tipos de geossintéticos utilizados para a mesma função.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo Geral***

O objetivo geral dessa pesquisa é analisar o comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com microgrelhas, a partir de análises das curvas de tensão  $\times$  deformação e dos parâmetros de resistência obtidos do solo reforçado.

### ***1.1.2 Objetivos Específicos***

Para alcançar o objetivo geral especificado nesse trabalho foram realizados os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar um solo arenoso através de ensaios de granulometria, densidade real dos grãos, umidade *in loco* e compactação;
- Avaliar o aumento da resistência do solo em função da quantidade dos reforços.
- Realizar ensaios triaxiais em amostras de solos reforçados com geotêxteis não-tecido, de diferentes gramaturas, a fim de comparar os resultados com os obtidos para o solo reforçado com a microgrelha.

## **1.2 Estrutura da dissertação**

O presente trabalho é composto por seis capítulos. O Capítulo 2, aborda os conceitos fundamentais para entendimento da pesquisa bem como trabalhos na literatura que serviram de fundamentação teórica. O Capítulo 3, descreve os materiais usados, definindo suas características e propriedades, e os métodos de ensaio utilizados nesta pesquisa. O Capítulo 4, é de apresentação dos resultados obtidos nos ensaios executados e suas discussões com a análise dos resultados. Por fim, o Capítulo 5, discute sobre as conclusões desta pesquisa, bem como sugestões para futuros trabalhos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os temas mais importantes para a fundamentação desse trabalho, serão discutidos conceitos de geossintéticos, as microgrelhas e do solo reforçado com geossintéticos.

### 2.1 Geossintéticos

#### 2.1.1 Definição e Benefícios

Geossintéticos são produtos poliméricos com usos em obras de geotecnia e de proteção ambiental, que podem ser manufaturados ou naturais, tendo uma maior predominância os industrializados, pois apresentam maior vida útil devido suas constituições e seus processos de controle de qualidade na produção. Estes produtos apresentam várias aplicações de obras de construção civil e dentre elas, destacam-se: reforços de solo, estabilização de solos, drenagem e filtração, barreiras contra a passagem de fluidos e gases, atuando como sistemas de impermeabilização, controle de erosão e proteção ambiental (PALMEIRA, 2018).

Vertematti (2004), definiram geossintéticos como materiais constituídos essencialmente por polímeros e, em menor proporção, podendo conter aditivos. Tais aditivos têm como objetivo melhorar a qualidade dos geossintéticos, introduzindo a eles certas características que os mesmos sozinhos não possuiriam. Os polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos são em sua maioria advindos do petróleo e em alguns casos extraídos de fibras naturais. Em uma obra de engenharia, os geossintéticos podem exercer uma ou mais das funções descritas a seguir que estão na norma brasileira NBR 10.318 (ABNT, 2018).

- a) Controle de erosão superficial;
- b) Drenagem;
- c) Filtração;
- d) Impermeabilização;
- e) Proteção;
- f) Reforço;
- g) Separação.

A norma americana D4439 (ASTM, 1995) define geossintéticos de forma parecida com as referências anteriores, sendo um produto plano de origem polimérica que pode ser usado

em solos, em rochas ou em outro material relacionado a engenharia geotécnica como integrante de um projeto, uma estrutura ou um sistema artificial.

A diversidade de problemas presentes em engenharia requer materiais com certas características físicas, mecânicas ou químicas distintas. Há uma grande vantagem técnica no uso dos geossintéticos, pois em cada situação se pode requerer aquela determinada propriedade que o polímero pode fornecer, ainda dispondo da combinação de propriedades para solucionar questões de projeto em engenharia (VERTEMATTI, 2004).

Inúmeros benefícios dos geossintéticos podem ser citados, tais como: são instalados facilmente, não exigindo mão-de-obra muito qualificada, passam por rigorosos processos de fabricação, substituem recursos naturais, mais fáceis de serem operados do que solos, custos competitivos contra solos e outros materiais de construção (KOENER, 1998).

### ***2.1.2 Tipos e Classificação***

O uso de materiais para melhorar a qualidades dos solos é antigo e sabe-se que era comum em cerca de 5.000 anos atrás, em que se usavam fibras vegetais do coco e do bambu para levantar os zigurates na Mesopotâmia. No entanto, o uso de produtos sintéticos ocorreu a partir de processos industriais desenvolvidos em meados do século XX, quando em 1934 foi produzido o PVC para fins comerciais. Em 1960 foram produzidos os primeiros geotêxteis que auxiliaram na difusão dos geossintéticos, sendo que a partir daí surgiu uma variedade de produtos e maior disponibilização no mercado. Hoje, existem inúmeros tipos de materiais geossintéticos. Apesar dos avanços nos últimos anos, com a integração da pesquisa acadêmica, com a formação profissional, com os eventos técnicos e com órgãos e normas específicas para geossintéticos, ainda é necessária uma melhor disseminação acerca desses produtos (VERTEMATTI, 2004). Na sequência serão apresentados alguns tipos e classificações, estas são definidas pela NBR 10.318 (ABNT, 2018) e entre colchetes a sigla usada pela *International Geosynthetic Society* (IGS).

a) Geobarra, GBA: item usado como reforço prioritariamente com formato de barra;

b) Geocélula, GL [GCE]: item com uma estrutura tridimensional constituídas por células no formato de “colmeia de abelha” que guardam no seu interior o material que for destinado apresentando funções de controle de erosão e reforço de taludes como mostra abaixo (Figura 1);

Figura 1 - Representação das geocélulas



Fonte: Maccaferri (2021).

c) Geotêxtil, GT [GTX]: produto bidimensional de origem têxtil permeável, composta de fibras cortadas ou fios, formando estruturas tecidas ou não-tecidas (Figura 2), as quais apresentam propriedades mecânicas e hidráulicas que permitem o desempenho de várias funções, sendo as principais de reforço e filtração. Divide-se em:

- i. Geotêxtil não-tecido, GTnw: podem ser dos tipos termoligados e agulhados, apresentam vários fins, mas principalmente drenagem e filtração;
- ii. Geotêxtil tecido, GTw: pode ser tricotado, também apresentando várias funções, mas, principalmente reforço e podem ser associados a outros geossintéticos em um sistema de drenagem.

Figura 2 - Representação dos geotêxteis



Fonte: Maccaferri (2021).

d) Geocomposto, GC: item formado a partir da união de dois ou mais materiais que podem envolver geossintéticos ou outros produtos. Dentro desta categoria destacam-se:

i. Geocomposto argiloso, GCL: item desenvolvido a partir da união de um geossintético com solos argilosos com a finalidade de impermeabilização;

ii. Geocomposto para drenagem, GCD: produto desenvolvido pela união de um item filtrante, como os geotêxteis, e um item drenante, como georrede ou geoespaçadores, como finalidade de drenagem, como mostra abaixo (Figura 3):

Figura 3 - Representação de um geocomposto de drenagem



Fonte: Maccaferri (2021).

e) Geoespaçador [GSP]: produto em estrutura tridimensional quem tem uma grande quantidade de vazios utilizadas para fins drenantes;

f) Geofôrma: produto tridimensional que é preenchido com algum material, geralmente, e é usado para estrutura de contenção, proteção ou tratamento de efluente (lodo de estação de tratamento de esgoto – ETE) como ilustrado a seguir (Figura 4):

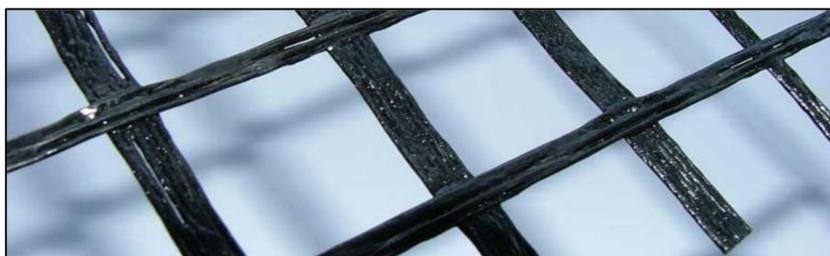
Figura 4 - Representação das geofôrmas



Fonte: Maccaferr (2021).

g) Geogrelha, GG [GGR]: produto usado como reforços de solos por oferecer qualidades resistivas de tração aos solos, podendo oferecer resistência em uma direção (unidimensional) ou em duas direções (bidimensional) como se pode ver abaixo (Figura 5):

Figura 5 - Representação das geogrelhas



Fonte: Maccaferri, 2021

h) Geomanta, GA [GMA]: produto que apresenta uma estrutura tridimensional e é usado para controle de erosão. Recebe o nome de biomanta quando é feito com material biodegradável (Figura 6):

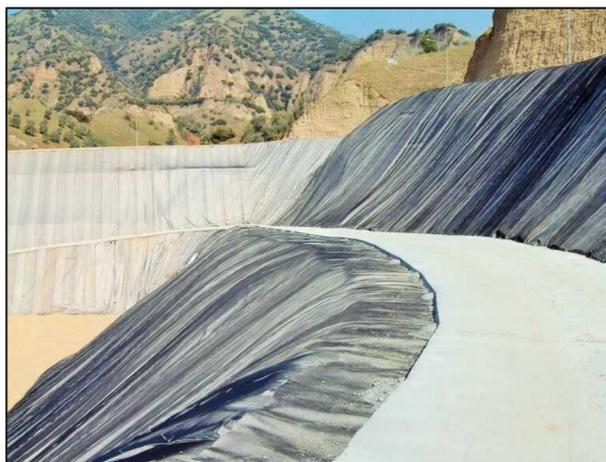
Figura 6 - Representação das geomantas



Fonte: Maccaferri (2021).

i) Geomembrana, GM [GMB]: produto para usos impermeabilizantes de formato bidimensional em forma de “lençol” pode conter aditivos que aumentem sua resistência a tração e as intempéries do ambiente como ilustrado adiante (Figura 7):

Figura 7 - Representação das geomembranas



Fonte: Maccaferri (2021).

j) Geotubo: produto para fins drenantes com formato tubular (Figura 8):

Figura 8 - Representação dos geotubos corrugados de PEAD



Fonte: Maccaferri, 2021

O Quadro 1 a seguir adaptado de Palmeira (2014) resume as aplicações típicas dos geossintéticos, além de trazer mais alguns que não mencionados na lista anterior.

Quadro 1 - Tipos de geossintéticos com suas principais funções

Tipo	Função						
	Reforço	Separação	Drenagem	Filtração	Barreira	Proteção	Outros
Geobarra	X						
Geocélula	X					X	
Geocompostos	X	X	X	X	X	X	
Geofôrmas			X			X	
Geoespaçadores			X				
Geogrelhas	X						X
Geomantas						X	X
Geomembranas		X			X	X	
Geotêxteis	X	X	X	X	X	X	X
Geotubos			X				

Fonte: Adaptado de Palmeira (2014).

### 2.1.3 Propriedades, Ensaios e Normas

Segundo Vertematti *et al.* (2004), a primeira obra de utilização dos geossintéticos no Brasil ocorreu em 1971 em Angra dos Reis (RJ), onde foi utilizado em uma obra de aterro sobre solo mole, cujas funções dos geossintéticos foram de reforço e a criação de uma camada de separação na BR – 101 - Rodovia Rio-Santos. A partir de lá começaram a surgir com mais intensidades uniões de grupos de pesquisas em Universidades e associações públicas ou privadas para estudos e aplicações desses materiais. Nesse contexto, foram criados a Associação Brasileira das Indústrias de Não-tecidos e Tecidos Técnicos (Abint) e o Comitê Técnico de Geossintéticos (CTG) com o objetivo se de criarem normas brasileiras e literaturas para difusão

dos conhecimentos, surgindo então livros como o Manual Brasileiro de Geossintético (MBG). Hoje ainda há a necessidade de maior exposição nos meios da engenharia acerca dos usos e finalidades desses produtos, pensando nisso, há a criação de vários seminários organizados sobre o assunto pelo Brasil.

Com o objetivo de normatizar os geossintéticos quanto as suas propriedades de interesse na engenharia, foram desenvolvidos ensaios de laboratório para controle da qualidade dos produtos, surgindo assim normas brasileiras que avaliam as propriedades específicas de cada geossintético, baseadas em dados da literatura estrangeira ou nas experiências em obras brasileiras.

Existem quatro categorias de ensaios para caracterização das propriedades dos geossintéticos, que são divididos de acordo com a propriedade que se quer avaliar, são elas: as propriedades físicas, as mecânicas, as hidráulicas e as de desempenho (PALMEIRA, 2014).

As propriedades físicas são consideradas índices que identificam os produtos. Dentre os ensaios que fazem parte dessas propriedades, pode-se citar a massa por unidade de área, ou gramatura, a espessura nominal, a porosidade e a porcentagem de área coberta. Dentre elas, destaca-se a gramatura que é a razão entre a massa e área ocupada pelo geossintético. A gramatura serve em particular para diferenciá-los geotêxteis e são expressos em  $g/m^2$ , sendo diretamente proporcional ao preço e à resistência mecânica do produto. Ressalta-se também a porosidade que é a relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra, sendo usado para verificar a ocorrência de colmatação em geotêxteis (VERTEMATTI *et al.*, 2004).

Segundo Palmeira (2014) as propriedades mecânicas são mais utilizadas para os dimensionamentos e buscam relações de tensão x deformação nos geossintéticos, com o intuito de determinar parâmetros de resistência e de deformabilidade. Entre os principais ensaios dessas propriedades estão a compressibilidade, a resistência a tração unidirecional, a tração multidirecional e ao estouro, a resistência a propagação de rasgos, a resistência ao puncionamento e a fluência. Dentre estas propriedades, destaca-se a compressibilidade, que avalia as deformações longitudinais das amostras a partir de certos carregamentos. Destacam-se também as resistências as trações tanto unidirecionais como multidirecionais, pois estas avaliam a resistência dos geossintéticos para serem empregados como material de reforço. Ressalta-se a resistência ao puncionamento, sejam estáticos ou dinâmicos, que avaliam os esforços de compressão de materiais granulares sobre os geossintéticos e a fluência que avaliam as deformações sofridas ao longo do tempo sob carregamento constante.

As propriedades hidráulicas são de fundamental importância para avaliar os usos dos geossintéticos para aplicações em filtragem, drenagem e impermeabilização. Nesta

categoria destacam-se as geomembranas (impermeabilização), os geotêxteis (filtragem), geoespassadores, georredes, geotubos (drenagem). Segundo Palmeira (2014) os principais ensaios para avaliar as propriedades hidráulicas são a permissividades, a transmitividade e os de abertura de filtração e aparente.

Conforme Vertematti *et al.* (2004) os ensaios para determinação de propriedades de desempenho são executados para verificar a interação geossintético com outro material, podendo ser solo, líquido envolvente ou outro geossintético. Os principais ensaios são resistência a deslizamentos da interface, resistência ao arrancamento, tração confinada, fluência confinada, resistência a abrasão, resistência a danos de instalação, resistência química, biológica em contato com raios ultravioleta e ensaio de filtração de longa duração. Entre estes se destacam a resistência ao arrancamento usado em geogrelhas para avaliar as resistências das interfaces com o solo e o ensaio de tração confinada que tem por objetivo avaliar as resistências de geotêxteis não-tecidos quando estão confinados com o solo. O Quadro 2 resume os ensaios utilizados para determinação das propriedades dos geossintéticos e as normas (brasileiras ou estrangeiras) correspondentes.

Quadro 2 - Relação de propriedades com seus ensaios e normas

Propriedades	Ensaio	Normas
<b>Física</b>	Gramatura	NBR 12568 (ABNT,2013)
	Espessura Nominal	NBR 12569 (ABNT,2021)
	Porosidade	-
<b>Mecânicas</b>	Compressibilidade	-
	Resistência a tração	NBR 12824(ABNT,2013)
	Resistência ao puncionamento	NBR 13359 (ABNT,2013)
	Resistência a propagação de rasgos	ASTM D 4533 (ASTM,2016)
	Resistência ao estouro	ASTM D 3786 (ASTM,2018)
	Fluência	ASTM D 5262(ASTM,2021)
<b>Hidráulicas</b>	Permissividade	ISO11058 (ISO,2019)
	Transmissividade	ISO12958 (ISO,2020)
	Filtração	ASTM D 4751(ASTM,2020)
<b>Desempenho</b>	Resistência a tração contínua	-
	Fluência confinada	-
	Resistência de interface	ISO13427 (ISO,2014)
	Resistência a abrasão	ISO13427 (ISO,2014)
	Filtração de longa duração	ASTM D 5101(ASTM,2017)
	Danos de instalação	ISO10722 (ISO,2019)

Fonte: Adaptada pelo autor de Vertematti *et al.* (2004).

## 2.2 Microgrelhas

As microgrelhas (Figura 9) são geossintéticos que apresentam formato de uma malha. Podem ser produzidos a partir de fibras de vidro, de metais, entre outros materiais. Geralmente são aplicados sobre as microgrelhas produtos que conferem resistência a abrasão e aos ataques químicos e biológicos, fazendo com que possa ser usado em aterros sanitários, aterros de rejeitos e aterros de resíduos de construção e demolição (RCD). São materiais versáteis que combinam propriedades hidráulicas e físicas como boa permeabilidade, pequena abertura aparente e a elevada resistência de tração. Podem ser usados em obras de construção civil, de infraestrutura e ambientais.

Figura 9 - Representação da Microgrelha



Fonte: Maccaferri (2021).

As características dos geossintéticos de reforço fornecidas pela fabricante Maccaferri do Brasil são resumidas na Tabela 1 e pela fabricante Huesker na Tabela 2. Pode-se comparar a resistência a tração e o alongamento máximo da microgrelha com de geossintéticos usados tipicamente para fins de reforço.

Tabela 1 - Tabela comparativa de resistência entre geossintéticos de reforço

Tipo	Resistência à tração longitudinal (KN/m)	Resistência à tração transversal (KN/m)	Alongamento Máximo (%)
Microgrelha	45	45	15
Geogrelha (MacGrid WG)	40 a 150	30	10
Geogrelha (ParaDrain)	50 a 200	5	9
Malha Hexagonal	47	-	12
Geot. Não-Tecido 300 g/m <sup>2</sup>	16	-	50
Geot. Não-Tecido 200 g/m <sup>2</sup>	10	-	50

Fabricante Maccaferri.

Tipo	Resistência à tração longitudinal (KN/m)	Resistência à tração transversal (KN/m)	Alongamento Máximo (%)
Geogrelha (Fortrac T)	35 a 800	20 a 100	10
Geogrelha(Fortrac 3D)	20 a 120	-	12,5
Geogrelha (Grid Pet)	30 a 80	30 a 80	10
Geotêxtil Tecido (Basetrac)	até 80	-	35

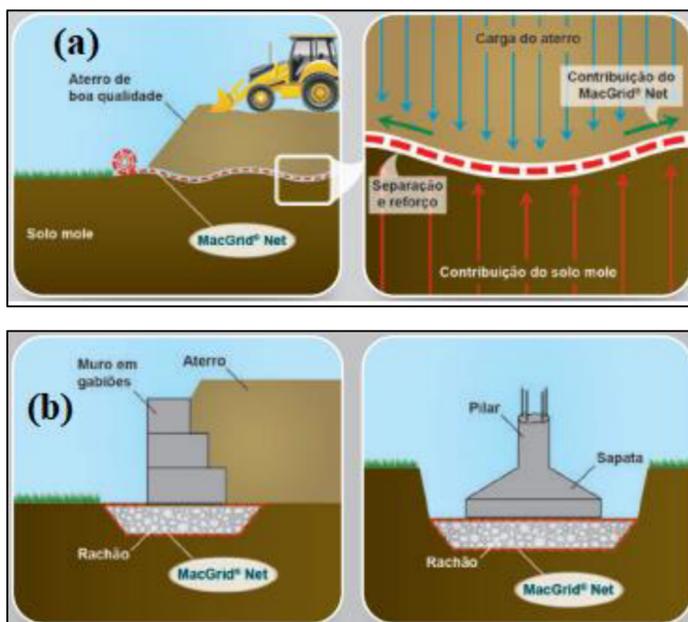
Fabricante Huesker.

Fonte: Adaptada pelo autor (2022).

Pelos valores fornecidos pelo fabricante, percebe-se que a microgrelha apresenta resistência à tração longitudinal maior que os geotêxteis não-tecidos utilizados nessa pesquisa, no entanto para alongamentos maiores que 15% a microgrelha se rompe. Ao comparar com as geogrelhas, nota-se que a resistência a tração longitudinal das microgrelhas é similar aos tipos de geogrelhas com classe de resistência menor (MacGrid WG 40 e ParaDrain 50.5), no entanto para alongamentos maiores que 10% a microgrelha ainda é capaz de fornecer resistência ao solo, algo que as geogrelhas não conseguem.

O produto é comercializado como solução para separação e reforço, com aplicação em obras de confinamento de bases de infraestrutura, de aterro de conquista e de confinamento de berço de rachão, devido sua alta resistência a tração e ao puncionamento estático. A Figura 10 mostra o uso desse tipo de geossintético, em a) como aterros de conquista e em b) como confinamento de rachão.

Figura 10 - Representação do uso de microgrelhas: a) aterros de conquista; b) confinamento de rachão



Fonte: Maccaferri do Brasil (2017).

Segundo Comitê Técnico de Geossintéticos (2021), as microgrelhas foram usadas com sucesso em uma obra de infraestrutura em Novo Hamburgo/RS, em que era preciso executar um acesso em forma de rampa a uma rodovia já existente. Como o solo de fundação existente era de baixa capacidade de suporte, a solução adotada foi construir um colchão de areia de 50 cm de espessura envolvido em uma microgrelha com resistência biaxial de 45 KN/m para servir como elemento de separação entre o colchão de reforço de base com a camada de argila subjacente e também com função de dar resistência inicial ao conjunto para operação das máquinas. Além de servir como separação das camadas, a microgrelha serviu para resistir aos esforços de tração localizada e punção estático. Outra utilização da microgrelha é como reforço de aterros sobre solos moles, auxiliando a diminuir os recalques diferenciais. As Figuras 11 e 12 a seguir mostram a aplicação da microgrelha e o resultado final da obra.

Figura 11 - Aplicação da Microgrelha em obra



Fonte: Comitê Técnico de Geossintéticos (2021).

Figura 12 - Resultado final da obra de uso com microgrelhas



Fonte: Comitê Técnico de Geossintéticos (2021).

## **2.3 Uso de Geossintéticos como elemento de reforço**

### ***2.3.1 Considerações iniciais***

A indústria de produção de geossintéticos iniciou o processo na década de 1960, no entanto já se usava a adição de materiais em solos para melhoria de funções há bastante tempo. Ingold (1983) comenta que a Torre de Babel foi construída com solo reforçado com fibras de bambu. Estabilização, reforço e drenagem de solos foram as primeiras funções em que foram inseridos materiais alternativos para melhoramento do solo. Com a revolução da indústria dos geossintéticos, suas soluções são conhecidas em todo mundo, com o mercado americano muito forte e em expansão para outros continentes (SOONG, 1997).

A técnica de inserir geossintéticos com o objetivo de melhorar a resistência do solo vem sendo desenvolvido de forma crescente, principalmente para o uso em obras de estabilização de taludes, instalação de bases e sub-bases e aterros sobre solos moles. Esse uso representa economia de gastos nas obras. De acordo com Siera (2013) a cidade do Rio de Janeiro gastava no período reportado cerca de R\$ 10 a R\$ 30 milhões de reais por ano para estabilizar suas encostas, e esses valores poderiam ser minorados com a adoção de soluções com uso de geossintéticos.

Geossintéticos podem ser utilizados em obras geotécnicas para estabilizar encostas, pois promovem uma redistribuição das tensões no maciço, resultando em menores deformações, permitindo construir taludes mais íngremes e com menor volume de material compactado, que leva a redução dos custos de obra.

O processo de melhoria resistiva do maciço de solo com geossintéticos vem do fato do material fornecer resistências à tração ao conjunto. Podem-se citar diferentes materiais utilizados como reforço para solos: geogrelhas, fibras, geotêxteis, malhas metálicas, geocompostos e microgrelhas.

### ***2.3.2 Conceito de Solo Reforçado***

Os solos são materiais abundantes que, em sua maioria, quando compactados em teor de umidade ótimo e peso específico seco máximo são bastante resistentes a esforços de compressão. No entanto, como ocorre no concreto não armado, os solos apresentam baixas resistências à tração, isso pode limitar o uso de determinados tipos de solo em obras geotécnicas, restringido a construção de algumas geometrias. O uso de materiais de reforço no

solo atua de maneira análoga as barras de aço adicionadas ao concreto, formando um compósito que apresenta grande melhoria do comportamento mecânico do conjunto. Nos solos a inserção de barras metálicas, técnica conhecida como “terra armada” patenteada na década de 60 pelo engenheiro francês Henri Vidal, constituiu-se de uma boa técnica de reforço e melhoramento das características resistivas do solo (MITCHELL, 1987).

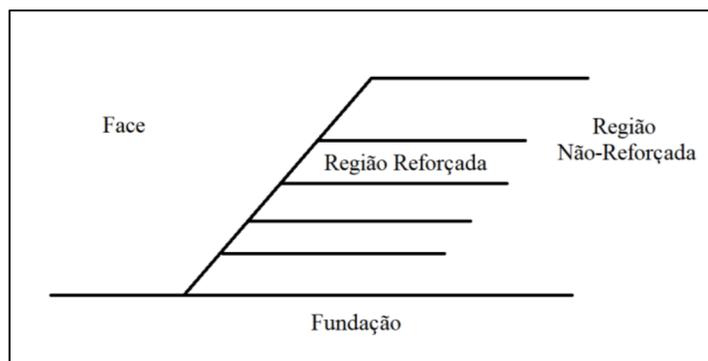
Com o avanço da engenharia geotécnica surgiram outros materiais que se comportavam de maneira análoga as barras metálicas da técnica de Henri, como por exemplo, as fibras naturais ou artificiais e os geossintéticos. As fibras naturais, como o bambu, já eram usadas desde 5.000 anos atrás pelos babilônios na construção dos Zigurates (MITCHELL, 1987).

A inclusão de geossintéticos de reforço na massa do solo fornece resistência de tração ao conjunto, contribuindo para a estabilidade, isto pode proporcionar projetos mais econômicos de engenharia geotécnica. Os principais geossintéticos usados como reforço são os geotêxteis, geogrelhas e geocélulas (ZORNBERG, 2007).

A definição de solo reforçado condiz com técnicas de inserção de outros materiais, sejam eles naturais ou artificiais, que, ao serem inseridos em uma massa de solo, interagem formando um compósito. Esse material passa então a ter melhorias resistivas em suas propriedades, permitindo que obras de terra possam ser executadas com geometrias que apresentem um benefício em relação ao mesmo solo não reforçado.

Uma estrutura de solo reforçado (Figura 13) é composta basicamente de solo, reforço e face. O processo de construção é realizado com a compactação das camadas de solo e posteriormente a inserção de elementos de reforço, geralmente horizontais, que são adicionados em alturas e em tamanhos pré-dimensionados.

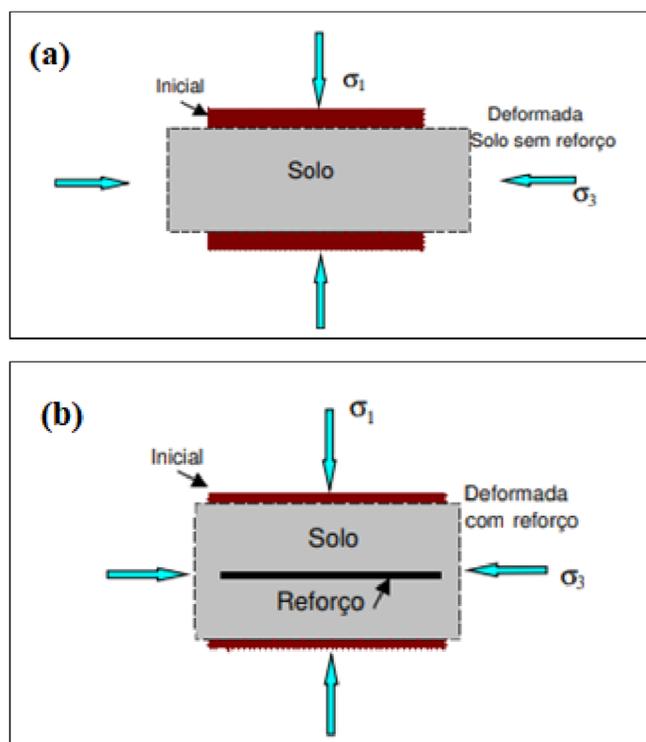
Figura 13 - Desenho esquemático de uma estrutura de solo reforçado



Fonte: Adaptado pelo autor

Os solos, de uma forma geral, quando compactados adequadamente apresentam boa resistência à compressão. No entanto, apresentam baixa resistência à tração. No momento em que um solo é carregado verticalmente, experimentam compressibilidade que o deforma em um sentido e o estende (esforços de tração) no seu sentido lateral. É nesse contexto que os reforços atuam, eles diminuem as deformações laterais por apresentarem resistência à tração limitando a deformabilidade do compósito solo-reforço (WHELLER, 1996). A Figura 14 ilustra o comportamento de um solo reforçado, em a) sem o reforço e b) com o reforço, em a) o solo é carregado verticalmente com uma tensão  $\sigma_1$  e apresentam deformações laterais maiores que em b) com a presença do reforço, o qual limita esse efeito.

Figura 14 - Comportamento de solos reforçados: (a) sem reforço; (b) com reforço



Fonte: Sieira (2013).

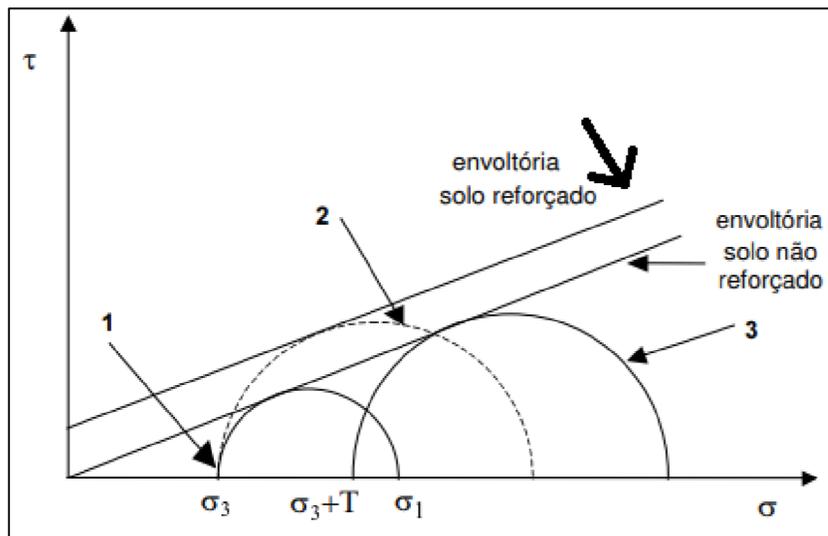
O motivo pelo qual o compósito solo-reforço aumenta a resistência, quando comparado com o solo natural, é explicado pelo mecanismo de transmissão dos esforços provocados pela inserção do reforço, que fornece ao conjunto uma coesão aparente, pois os reforços fornecem uma restrição anisotrópica ao solo nas direções dos reforços, e isso leva a uma rotação das direções principais no campo das deformações e tensões.

Mitchell (1987) avalia que sob baixas tensões de confinamento haverá a falha por deslizamento do reforço sob o solo, enquanto que com altas tensões de confinamento, o sistema irá falhar por quebra do reforço. Esses resultados foram obtidos em ensaios triaxiais em areias reforçadas com folha de alumínio.

No solo reforçado aparecem tensões de cisalhamento no plano solo-reforço, os quais são absorvidos pelo reforço, tracionando-o e redistribuindo as tensões. Quando a tensão de cisalhamento imposta a um solo não reforçado é superior à sua resistência ao cisalhamento, há a ruptura em um determinado plano. Mas, quando um solo está reforçado, a contribuição do reforço é interpretada como sendo análogo a um aumento de confinamento, havendo assim, um aumento de resistência ao cisalhamento como é mostrado na Figura 15. O círculo um indica o estado de tensões para um solo não reforçado, quando este está reforçado, o reforço age de forma similar ao aumento de tensão de confinamento e o círculo dois ilustra em ensaios triaxiais com carregamento axial. No entanto, o estado de confinamento não mudou, já quem isto é imposto pelo ensaio, o que é ilustrado pelo círculo três. Nota-se a existência de uma coesão aparente.

Uma partícula do solo entra em ruptura quando em um determinado plano a tensão de cisalhamento imposta é maior que a tensão de resistência ao cisalhamento. Quando o solo está reforçado, há um efeito similar ao aumento da tensão de confinamento, fazendo com que a resistência ao cisalhamento aumente para o mesmo estado de tensões impostas (Figura 15):

Figura 15 - Comparação dos estados de tensão em amostras com e sem reforço em ensaios triaxiais



Fonte: Sieira (2013).

### 2.3.3 Mecanismos desenvolvidos em amostras reforçadas em ensaios triaxiais

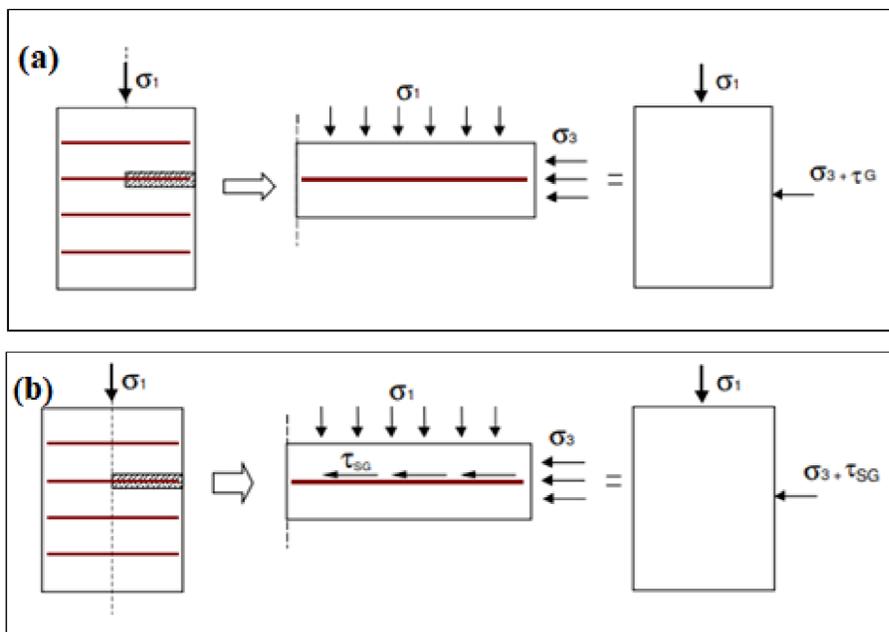
Atualmente, o uso de microgrelhas com função tipicamente de reforço não é tão discutida na literatura, no entanto, a abordagem do assunto não é inédita. Leshchinsky *et al.* (2015) realizaram estudos para avaliar o ganho de resistência em solos arenosos mal graduados com a inserção de microgrelhas. Foram introduzidos fragmentos de microgrelhas aleatoriamente à massa do solo, com dimensões variadas, resultando em um corpo de prova homogêneo. As microgrelhas apresentavam a resistência bidimensional e aberturas de 2,1 mm x 1,6 mm. Foram testadas proporções de 0,25 %, 0,5 % e 1% de microgrelhas em relação ao peso total, e os resultados mostraram que o uso de microgrelhas aumentou a resistência e a rigidez das amostras, observado pelo crescente aumento das tensões desvios de pico. Vale ressaltar que no estudo foram executados ensaios triaxiais adensados e drenados (CD) com valores baixos valores de tensão de confinamento (menores que 15 kPa), restringido pela capacidade do sistema em que a pesquisa foi realizada. Há também estudos na literatura sobre solos argilosos reforçados com geossintéticos. Omari *et al.* (1989) realizaram ensaios triaxiais dos tipos CD e adensados e não drenado (CU) em amostras de solos argilosos reforçados com geossintéticos, que o autor chama de *Geomesh*, que são malhas de polímeros (Netlon) com abertura de 8 mm x 6 mm. Os *geomesh* são produtos que se assemelham as microgrelhas.

Nos ensaios drenados os autores constataram um aumento das resistências das amostras, pelo aumento do intercepto coesivo e do ângulo de atrito efetivos. Nos ensaios não drenados constatou-se um aumento do intercepto coesivo. O estudo também mostrou que existem diferenças nos comportamentos de solos arenosos e argilosos quando reforçados com geogrelhas e geotêxteis. Sieira (2013) reforçou essa diferença nos seus estudos, atestando que existem diferenças na mobilização dos esforços desenvolvidos na camada de geossintético que dependem do tipo de solo ensaiado.

Os dois principais mecanismos de transferência de tensões entre o solo e o reforço são a resistência ao cisalhamento provocado pelo atrito entre as superfícies planas do solo e do reforço e a resistência de tração desenvolvida pelo reforço no intertravamento dos grãos nas superfícies normais à direção do movimento relativo entre o solo e o reforço. Nesse segundo mecanismo, esforços de tração são desenvolvidos no reforço. Os reforços em tiras, barras e chapas transferem esforços principalmente por atrito e os reforços de grade, como as geogrelhas, transferem esforços por meio da resistência de tração entre o solo e o reforço (MITCHELL, 1987).

Os estudos de Saez (1997) ratificam os resultados obtidos por Mitchell (1987), a partir da observação de resultados de ensaios triaxiais, indicam que existem dois tipos de mecanismos que se desenvolvem em corpos de prova reforçados. Um deles é a mobilização de tração no reforço; o segundo são os deslocamentos relativos na interface solo-reforço. A representação desses dois mecanismos é apresentada na Figura 16 em a) mobilização de tração em amostras reforçadas e b) mobilização de atrito entre as superfícies em amostras reforçadas.

Figura 16 - Mecanismos de tração e de deslocamento na interface de solos reforçados: (a) mobilização de tração em amostras reforçadas; (b) mobilização de atrito entre superfícies reforçadas



Fonte: Sieira (2003).

No primeiro mecanismo (Fig 16 a) oferece mais rigidez ao conjunto solo-reforço por oferecer capacidade de resistir a esforços de tração. Esse valor fica limitado a máxima tensão de tração suportada pelo reforço ( $\tau^G$ ). No segundo mecanismo (Fig 16 b) apresentado, ocorre o deslocamento entre o solo e o reforço mobilizando o atrito da interface, esse valor fica limitado à tensão máxima de resistência da interface ( $\tau_{SG}$ ).

Dessa forma, pode-se afirmar que as tensões principais menores no momento da ruptura são:

- $\sigma_{3\text{ rf}} = \sigma_3 + \tau^G$ , se ocorrer o primeiro mecanismo;
- $\sigma_{3\text{ rf}} = \sigma_3 + \tau_{SG}$ , se ocorrer o segundo mecanismo.

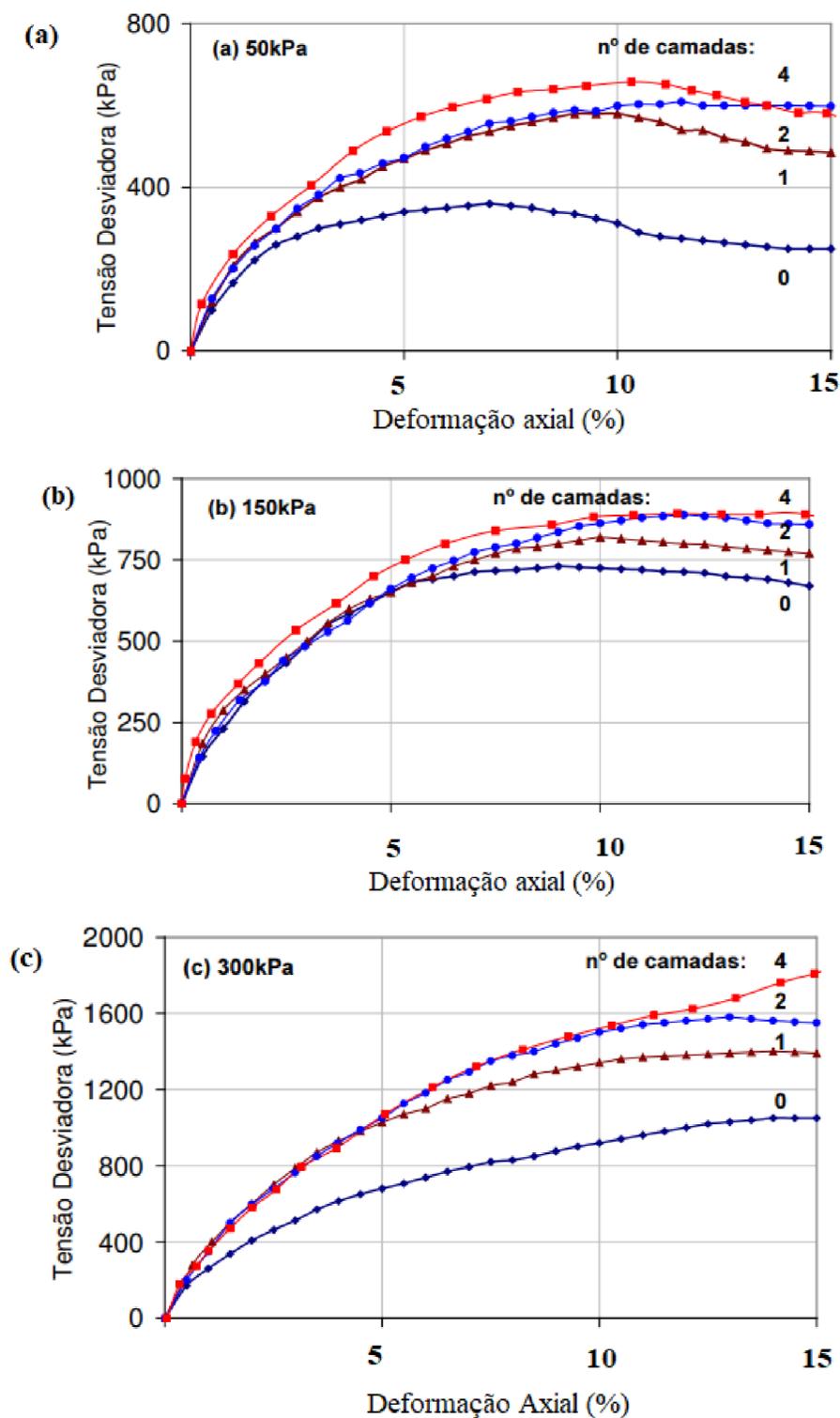
Becker e Ehrlich (2009) observaram que os mecanismos de interação solo-reforço são diferentes de acordo com o tipo de reforço que está sendo estudado. Geogrelhas apresentam mecanismos diferentes que geotêxteis, pois as geogrelhas são elementos vazados, e uma parte das partículas do solo se adentramos espaços vazados. Neste tipo de reforço, é mais comum, o aparecimento de esforços de tração provocados pelo intertravamento dos grãos.

Os estudos desenvolvidos por Sieira (2003) apontaram para a ocorrência dos dois mecanismos anteriormente citados a partir de análises visuais dos corpos de prova deformados ao final de ensaios triaxiais. Siera (2003) realizou ensaios triaxiais drenados em corpos de prova de grandes dimensões, de 22,9 cm de diâmetro e 45,7 cm de altura, e os estudos envolveram dois tipos de geogrelhas e um tipo de malha hexagonal de aço. As geogrelhas utilizadas possuem uma malha retangular com resistência a tração de 97 KN/m e 29 KN/m nos sentidos longitudinais e transversais, respectivamente. A autora justificou a escolha das dimensões do corpo de prova baseada nas recomendações da norma ASTM D5321 (ASTM, 2008), que indica a relação da dimensão da abertura do geossintético e o diâmetro do corpo de prova deve ser menor que 1/5. A abertura da malha da geogrelha era de 20 mm, o que respeita as recomendações da norma prescrita.

Sieira (2003) avaliou o ganho de resistência e rigidez de solos reforçados com geogrelhas, em que foram selecionados dois tipos de solos para realizar os ensaios – (1) solo arenoso e (2) silto-argiloso. Foram ensaiados corpos de prova com tensões de confinamento de 50, 150 e 300 kPa com 1, 2 e 4 camadas de reforço para as areias e 1 e 4 camadas para os silto-argilosos. Como esperado, o aumento da tensão confinante em amostras não-reforçadas resultou em ganho de resistência em ambos os tipos de solos, com diferenças observadas no comportamento de deformação volumétrica  $\times$  deformação axial. No solo arenoso houve a diminuição das deformações com o aumento das tensões confinantes e no solo silto-argilosos ocorreu o inverso, o que é de se esperar devido às diferenças de comportamento de deformabilidade desses solos.

Para as amostras de solos arenosos reforçados constatou-se que o aumento do número de camadas de reforço representava um aumento na resistência do conjunto solo-geogrelha como pode ser visto na imagem abaixo. Percebe-se um comportamento parecido com 2 e 4 camadas de geogrelhas, mostrando que camadas localizadas mais próximas da extremidade não exercem efeito significativo conforme a Figura 17, em a)  $\sigma_3 = 50$  kPa, em b)  $\sigma_3 = 150$  kPa e em c)  $\sigma_3 = 300$  kPa.

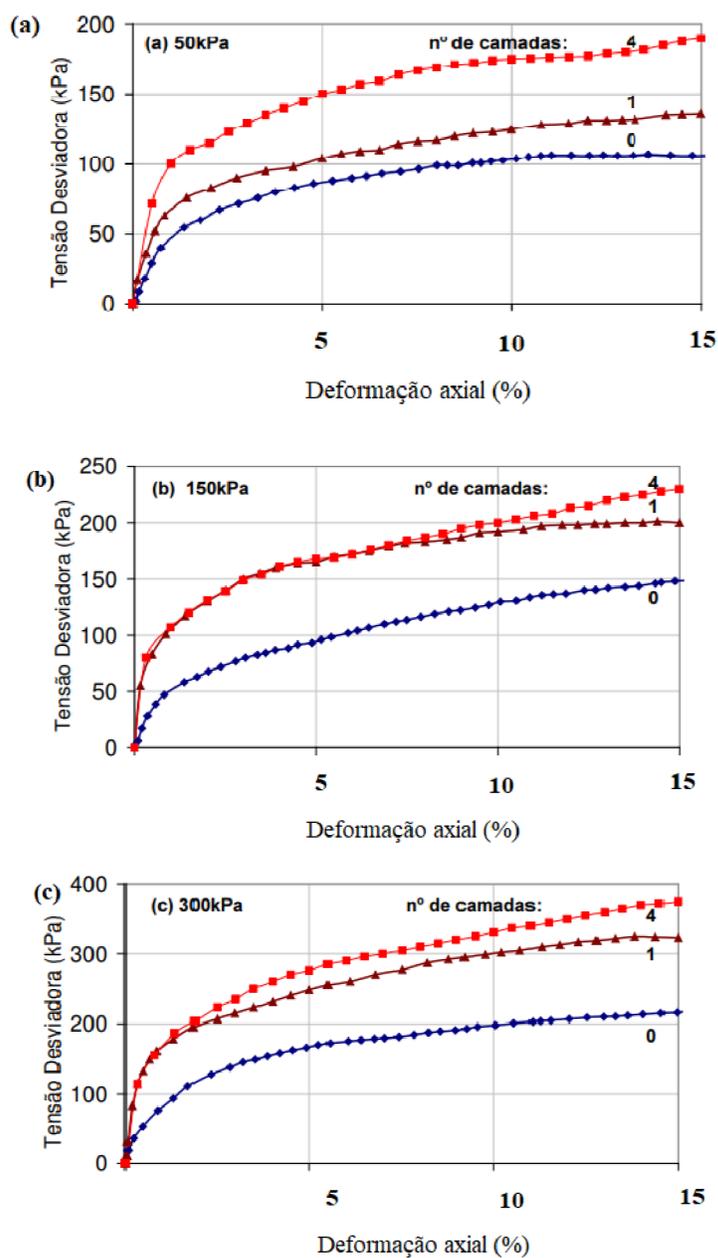
Figura 17 – Curvas de tensão x deformação dos estudos de Siera (2003) para solos arenosos:  
 (a)  $\sigma_3 = 50$  kPa, em (b)  $\sigma_3 = 150$  kPa e em (c)  $\sigma_3 = 300$  kPa



Fonte: Siera (2003).

Para as amostras de solos silto-argilosos constatou-se que o aumento do número de camadas de reforço representava um aumento na resistência do conjunto solo-geogrelha como pode ser visto na Figura 18, em a)  $\sigma_3 = 50$  kPa, em b)  $\sigma_3 = 150$  kPa e em c)  $\sigma_3 = 300$  kPa.

Figura 18 – Curvas tensão x deformação dos estudos de Sieira (2003) para solos argilosos: (a)  $\sigma_3 = 50$  kPa, em (b)  $\sigma_3 = 150$  kPa e em (c)  $\sigma_3 = 300$  kPa



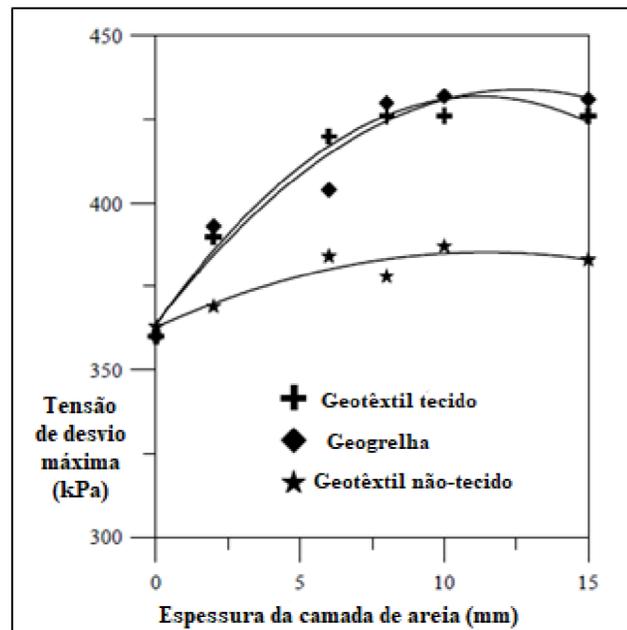
Fonte: Sieira (2003).

A inserção de camadas de reforço provoca um aumento nas tensões laterais fazendo um efeito similar ao aumento das tensões confinantes, o que provoca aumento de tensões para levar o corpo de prova à ruptura. Sieira (2003) concluiu que o aumento do número de camadas aumentava a rigidez das amostras.

Após as rupturas foram feitas análises visuais das amostras, sendo constatado que as amostras de solos arenosos apresentavam deformações na geogrelha, o que levou a concluir que o reforço sofreu esforços de tração, com a ocorrência do primeiro mecanismo (resistência de tração do reforço). Já para o solo silto-argiloso não foram percebidas deformações na geogrelha, indicando que ocorreu o segundo mecanismo (resistência de atrito entre as interfaces).

Unnikrishnan (2002) avaliou o ganho de resistência em argilas provocada pela inserção de um reforço inserido entre finas camadas de areia. Foram utilizados geotêxteis tecidos, geotêxteis não-tecidos e microgrelhas em ensaios triaxiais do tipo não adensado e drenado (UU) em equipamentos de pequena e grande escala, a depender da quantidade de camadas e das espessuras das camadas de areia utilizada. Vale ressaltar que o autor definiu a microgrelha usada como um material de plástico em formato de tela com abertura de 0,5 mm. Os resultados mostraram que é benéfico à inserção de camadas de areia entre as camadas de reforço. A Figura 19 mostra a tensão desviadora máxima em função do tipo de reforço e da espessura da camada de areia usada, para uma tensão confinante constante de 110 kPa. Observa-se um aumento da tensão de desvio com o aumento da espessura da camada, com melhores resultados quando a camada foi reforçada com a microgrelha.

Figura 19 – Curvas tensão x deformação de vários geossintéticos estudados por Unnikrishnan



Fonte: Unnikrishnan (2002).

Na literatura há várias pesquisas que mostram a utilização de ensaios triaxiais para avaliar o comportamento tensão x deformação de solos reforçados com geossintéticos. Estudam-se o comportamento considerando uma variedade de fatores, por exemplo, as diferenças existentes do comportamento de acordo com o número de camadas de reforço, com o tipo de ensaio triaxial, com o tipo de geossintético de reforço, com o tamanho do corpo de prova ensaiado, com o tipo de solo e com o tipo de energia de compactação.

Goordarz *et al.* (2019), Haeri *et al.* (2000) e Sieira (2003) avaliaram o comportamento mecânico de areias reforçadas com geossintéticos em ensaios triaxiais CID, com geotêxtil tecido, geotêxtil não-tecido e geogrelhas, respectivamente, variando de 1 até 4 camadas de reforço, usando equipamento de pequena e grande dimensão. Gali (2006) avaliou o comportamento tensão x deformação de uma areia seca, através de ensaio triaxial tipo UU, reforçada com geotêxtil tecido, utilizando até 8 camadas de reforço. Yi (2020) avaliou o comportamento de rejeitos de mineração reforçados com geogrelha e geotêxtil através de ensaios triaxiais do tipo UU em equipamento de grandes dimensões. Todos esses estudos indicaram que a inserção do reforço aumenta a tensão desvio e a deformação axial na ruptura com aumento principalmente do intercepto coesivo. Foram também avaliadas as deformações volumétricas existentes e a percepção que o reforço age na diminuição das deformações laterais do corpo de prova, fazendo com que haja o aumento da tensão de confinamento e assim

melhoras resistivas do compósito. Os autores anteriormente citados também ressaltam a importância da quantidade de camadas de reforço e da posição que o reforço encontra, tendo sido observados os melhores resultados, no que diz respeito ao aumento da resistência do compósito, quando o reforço intercepta o plano de ruptura.

Chen *et al.* (2014) e Yang (2016) avaliaram solos argilosos reforçados com geogrelha e geotêxtil não-tecido, através de ensaios triaxiais do tipo CIU. Os autores utilizaram em suas pesquisas equipamentos de pequeno e grande escala, variando de 1 até 3 camadas de reforço. Seus resultados convergem com os obtidos por outros autores, em que o uso do reforço conduz a um aumento da tensão desvio e da deformação axial na ruptura. Chen (2014) que avaliou em equipamento de grande escala não obteve grandes diferenças entre os resultados com 2 e com 3 camadas, similar aos resultados de Sieira (2003), para solos arenosos reforçados. Esses resultados sugerem a existência de um limite para os ganhos de resistência, com o aumento do número de reforços, pois a adição de camadas em regiões que não são interceptadas pelo plano de ruptura não irá contribuir com o ganho de resistência.

Skuodis *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2021) realizaram ensaios triaxiais em areias do tipo CID em corpos de prova com dimensões 10 cm x 20 cm, enquanto que Feng (2018) realizou ensaios triaxiais em amostras reforçadas com dimensões de 3,8 cm x 7,6 cm. Todos os autores citados utilizaram geogrelhas como reforços, as quais apresentavam tamanho de malha de 20 mm x 20 mm (estudos de Feng e de Wang) e 30 x 30 mm (estudo de Skuodis). Estes estudos obtiveram melhoras nos parâmetros de resistência, principalmente no intercepto coesivo.

#### **2.4. Conceitos iniciais sobre deformabilidade de solos**

Os materiais apresentam uma característica particular que é o módulo de deformabilidade ou módulo de Young. Este parâmetro avalia a rigidez do material, quanto mais alto o valor do módulo de deformabilidade de um material maior é sua rigidez. Existem modelos teóricos de comportamento do material que avaliam o comportamento tensão-deformação dos solos. No entanto, os solos não apresentam uma linearidade bem-definida, logo é preciso adotar um modelo que apesar de não ser real seja acurado para a aplicação requerida. Os modelos existentes são: a) elástico-linear, b) elástico não-linear, c) histerese e d) elastoplástico. (ORTIGÃO, 2007).

A Lei de Hooke, que aplica uma relação diretamente proporcional entre tensão e deformação, em que o coeficiente angular desta reta é o módulo de Young é aplicada a materiais

elástico-lineares que não apresentam histerese. Aplicação esta limitada e usada geralmente para carregamentos baixos, em que o começo da curva pode ser avaliado como uma certa linearidade. (ORTIGÃO, 2007).

Em ensaios triaxiais é possível determinar o módulo de deformabilidade, este módulo pode ser retirado de algumas formas, entre elas estão o módulo de deformabilidade secante e módulo de deformabilidade tangente. O módulo de deformabilidade secante é retirado utilizando-se dois pontos a escolher da curva tensão  $\times$  deformação e o módulo tangente é retirado quando o limite entre dois pontos escolhidos tende a zero, ou seja, o módulo de deformabilidade tangente é mais específico a uma estreita faixa de tensões. (VELOSO E LOPES, 2010).

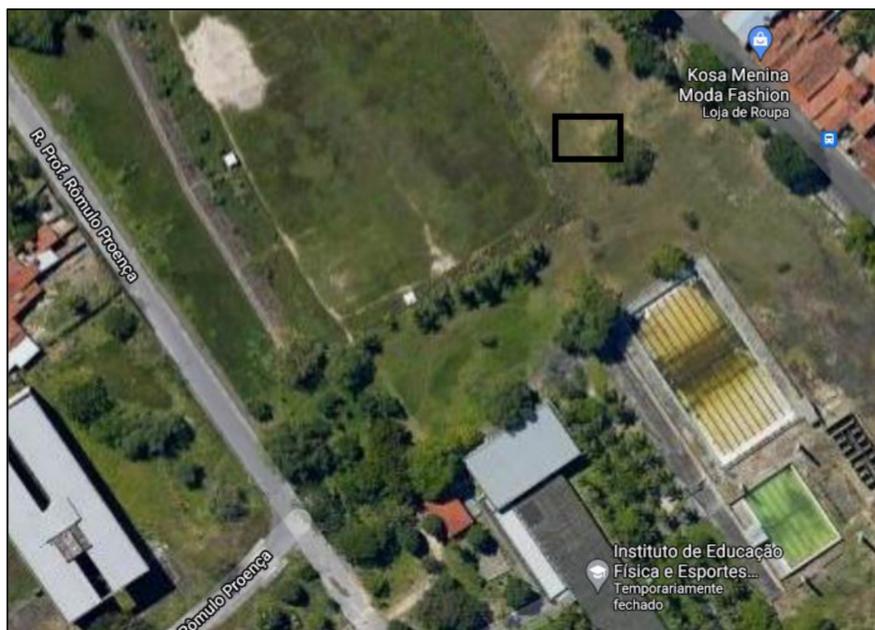
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa foi recolhido no Campo Experimental de Geotecnia e Fundações (CECEF) da Universidade Federal do Ceará (UFC). A área é coberta por uma vegetação rasteira que foi retirada a partir de um local aleatoriamente selecionado para a coleta. A limpeza foi feita para evitar a contaminação do solo com materiais indesejados, como plásticos, vidros e resíduos orgânicos. Escavou-se até a profundidade de 50 cm para realizar a coleta do material. A Figura 20 indica a localização aproximada da coleta. O campo experimental que apresenta uma área aproximada de 900 m<sup>2</sup> fica próximo ao Instituto de Educação Física e Esportes da UFC e tem acesso pela rua Prof. Rômulo Proença. O material recolhido passou por um processo de caracterização geotécnica (ensaio de granulometria, densidade real dos grãos e umidade natural) e posteriormente de avaliação mecânica.

Figura 20 - Representação da área de coleta das amostras



Fonte: Google Maps (2022).

### **3.1.2 Microgrelha**

A microgrelha usada na pesquisa é comercializada pela empresa Maccaferri com o nome de MacGrid, com abertura da malha de 2 mm  $\times$  1,5mm. De acordo com as recomendações da ASTM D5321 (ASTM, 2018), para conferir validação dos resultados obtidos nos ensaios triaxiais, o corpo de prova moldado deve ter o diâmetro no mínimo cinco vezes maior que a maior abertura da geogrelha. Como o diâmetro do corpo de prova utilizado nos ensaios triaxiais foi de 5 cm, e a maior abertura da microgrelha foi de 0,2 cm (5 vezes esta abertura é igual a 1 cm) as dimensões do corpo de prova para os ensaios triaxiais atendem a recomendação. A microgrelha utilizada nos ensaios tem resistência última a tração longitudinal e transversal de 45 kN/m e alongamento máximo de 15%.

### **3.1.3 Geotêxtil não-tecido**

Os geotêxteis não-tecido são produzidos a partir de fibras cortadas de poliéster, agulhadas e consolidadas termicamente por calandragem. O produto é comercializado pela Maccaferri com o nome de MacTex H.2. Foram utilizadas duas gramaturas diferentes que conferem propriedades diferentes aos materiais. Utilizou-se um geotêxtil de 200 g/m<sup>2</sup> de gramatura, com resistência à tração longitudinal de 10 kN/m, e um geotêxtil de 300 g/m<sup>2</sup> de gramatura, com uma resistência de tração longitudinal de 16 kN/m.

## **3.2 Métodos dos ensaios**

Os tópicos a seguir descreverão as normas que foram utilizadas para guiar os ensaios da pesquisa, assim como detalhes que foram executados para realizá-los. Sendo abrangidos os ensaios de caracterização (granulometria, umidade e densidade real), compactação e o ensaio de resistência (triaxial do tipo adensado, isotrópico e drenado - CID).

### **3.2.1 Granulometria**

A análise granulométrica do solo seguiu as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 2016). Antes da realização do ensaio propriamente dito, coletou-se aproximadamente 15 kg de

solo que foi exposto o sol, para secagem ao ar livre. Após a secagem, procedeu-se o quarteamento da amostra até a obtenção de uma amostra representativa, de 2 kg, conforme recomenda a NBR 6457 (ABNT, 2016). A amostra de 2 kg foi passada pela peneira de abertura 2,00 mm, separando os materiais para o peneiramento grosso (retidos na peneira) e peneiramento fino e sedimentação, para a obtenção da curva granulométrica do solo.

### ***3.2.2 Umidade natural***

Foram tomadas três amostras com aproximadamente 110 g para verificar a umidade gravimétrica do solo, antes do processo de secagem ao ar livre. As amostras foram pesadas antes e depois de 24 horas na estufa, sendo feito uma média para determinação da umidade natural do solo. A realização desse ensaio seguiu a norma NBR 16097 (ABNT, 2012).

### ***3.2.3 Densidade real dos grãos***

A realização desse ensaio seguiu a norma ME-093 (DNER, 1994). Foram preparadas quatro amostras para a realização desse ensaio e seguiu-se as recomendações da norma para realizar tal determinação, respeitando o critério de que pelo menos 3 resultados não podem se diferir em mais de 0,009 da média.

### ***3.2.4 Compactação***

O ensaio de compactação foi feito com o cilindro proctor com dimensões de 10 cm x 12,7 cm pequeno por dois motivos: economia de material e devido à massa retida na peneira de abertura de 4,8 mm ser menor que 7%, sendo permitido pela norma NBR 6457 (ABNT, 2016). Os ensaios foram realizados com reuso do material, utilizando 3 kg de solo na umidade seca ao ar. O solo foi compactado na energia de compactação Proctor Normal, em três camadas, com 26 golpes aplicados por um peso de 2,5 kg. Os detalhes seguiram os procedimentos em norma, com acréscimos de 2 % de umidade para cada ponto da curva de compactação.

### ***3.2.5 Ensaio triaxial***

O ensaio triaxial realizado foi do tipo adensado, isotrópico e drenado (CID), sendo adotadas as tensões confinamento de 50, 100, 150 e 200 kPa para obter os círculos de Mohr e

as envoltórias de ruptura. Para mensurar os ganhos de resistência do conjunto solo-microgrelha, adotou-se diferentes números de camadas no corpo de prova dos ensaios triaxiais. Foram feitos ensaios com o solo natural e o solo com 1,2 e 3 camadas de reforço, com as alturas variando de acordo com a tabela 2 abaixo, totalizando 16 ensaios.

Tabela 2 – Configuração das camadas de microgrelha do estudo

Solo	Número de camadas	Tensão Confinante (KPa)
Campo experimental	0, 1, 2 e 3	50, 100,150 e 200

Número de camadas	Altura do posicionamento da camada
0	-
1	H/2
2	H/3 e 2H/3
3	H/4, H/2 e 3H/4

Fonte: Próprio Autor (2022).

O ensaio possui 4 fases: a) saturação do corpo de prova por drenagem, b) saturação pelo mecanismo da contrapressão, c) adensamento e d) ruptura. Na saturação por drenagem é aplicada uma pressão externa de 15 kPa por meio da imposição de um fluxo ascendente de água no corpo de prova que auxilia no processo de expulsão do ar, por aproximadamente 24 horas. No entanto, somente esse procedimento não é suficiente para o corpo de prova atingir uma saturação mínima de 90%. A obtenção de graus de saturação iguais ou superiores a esse é por meio da aplicação de contrapressões no corpo de prova, etapa essa em que são aplicadas pressões crescentes e constantes de 50 kPa, primeiramente externamente e depois internamente, com a determinação do coeficiente B de Skempton (SKEMPTON, 1954). Quanto mais próximo de 1 estiver o parâmetro B, mais próximo da saturação o corpo de prova estará ( $B = 1$ , solo saturado). Depois de alcançada a saturação, procede-se para a fase de adensamento, medindo-se as porções e as variações de volume do corpo de prova ao longo do tempo. Quando as leituras de pressão interna e do nível de óleo da bureta se estabilizavam, indicava que o corpo de prova havia sido adensado. O tempo do adensamento depende da tensão confinante do ensaio, sendo que o máximo tempo de obtido foi por volta de 7 minutos. Com as curvas de adensamento obtidas para a maior tensão confinante, estimou-se o  $T_{100}$  (tempo de adensamento), valor este usado para calcular a máxima velocidade que os ensaios triaxiais poderiam estar sujeitos. A velocidade máxima foi calculada com base nas recomendações de

Head (1998) em que é calculado o tempo de adensamento ( $T_{100}$ ) multiplicado por um fator de falha, no caso 8,5, para se calcular o tempo de falha ( $T_f$ ). O cálculo feito obteve a velocidade de 0,28 mm/min, no ensaio utilizou-se a de 0,18 mm/min.

Adotou-se a deformação axial máxima de 10% do corpo de prova para ruptura, que permitiu calcular a velocidade máxima a ser imposta aos ensaios (em mm/min). Na fase de ruptura o ensaio foi realizado com deformação controlada. Durante o processo de deformação, anotaram-se os valores das que ocorreram poropressões, as quais não devem variar, e as deformações volumétricas ocorridas, sendo o processo realizado com a torneira de drenagem aberta para evitar a geração de excesso de poropressão, segundo recomendações da norma americana D7181 (ASTM, 2020).

Os corpos de prova utilizados nos ensaios triaxiais foram moldados em um cilindro metálico, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (volume aproximado de 196 cm<sup>3</sup>), na umidade ótima e massa aparente seca máxima obtidos no ensaio de compactação. Como o volume do molde cilíndrico era conhecido, o peso do material inserido no molde foi determinado em função da massa aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação na Energia Proctor Normal. Pela dificuldade de se chegar com exatidão nesse valor, adotou-se um grau de compactação mínimo de 90% como critério de validação. Para o solo natural e para o solo com 2 camadas de reforço, executou-se 3 camadas com 15 golpes cada. Já para o solo com 1 camada e para o solo com 3 camadas executou-se 4 camadas com 15 golpes cada.

Para a moldagem dos corpos de provas procurou-se uniformizar a energia de compactação que era exercida sobre as camadas através da padronização da altura de queda do soquete e do número de golpes dados, traçando-se a mesma relação energia por camada por área do ensaio de compactação na moldagem do CP para o triaxial. A altura de queda estabelecida foi de 20 cm com o soquete apresentando uma massa de 1,25 kg.

Para os ensaios realizados com os geotêxteis procederam-se na compactação do corpo de prova de maneira similar aos corpos de prova reforçados com a microgrelha. Para os geotêxteis foram feitos ensaios com 1 camada de reforço, pois se queria comparar os comportamentos mecânicos entre os diferentes materiais reforços.

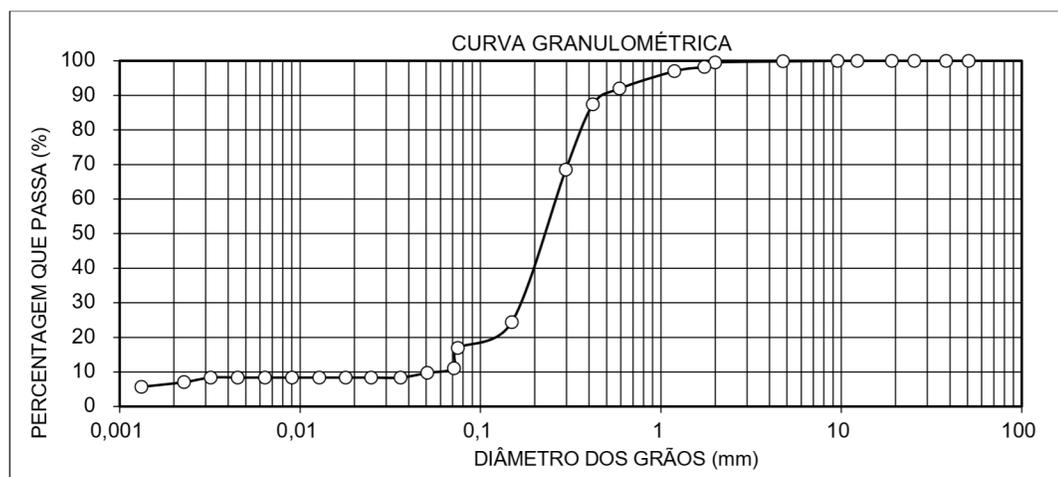
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Granulometria

O resultado do ensaio de granulometria é apresentado no Gráfico 1, através da curva granulométrica. Os ensaios de caracterização indicaram que a amostra estudada é uma areia siltosa e bem graduada (SM-SW) com aproximadamente 10% do solo passante na peneira #200, segundo a classificação do SUCS. O coeficiente de não uniformidade é de 6 e coeficiente de curvatura é 2,5 que indica um solo não-uniforme e bem graduado. Na amostra não foi possível realizar os ensaios de limite de plasticidade e de liquidez, pois o material se apresentou como não plástico o que indica a presença significativa de silte na parte dos finos da amostra estudada. De forma geral, solos arenosos siltosos bem graduados (SM-SW) são permeáveis, apresentam alta-média resistência ao *piping*, alta resistência ao cisalhamento e trabalhabilidade muito boa.

Pela classificação do Sistema Rodoviário de Classificação o solo foi classificado como A-2-4, o qual é do grupo das areias siltosas com uma boa qualidade para ser usado em bases e sub-bases.

Gráfico 1 - Curva granulométrica da amostra



Fonte: Próprio autor (2022).

### 4.2 Densidade real dos grãos e umidade

O resultado do ensaio de densidade real dos grãos foi de 2,627 com 1% de umidade seca ao ar. O valor calculado pela média, como prescreve a norma, os valores estão na Tabela

3. Os limites de plasticidade e liquidez não foram obtidos, pois o solo se apresentou como não plástico.

Tabela 3 – Valores das densidades reais dos grãos

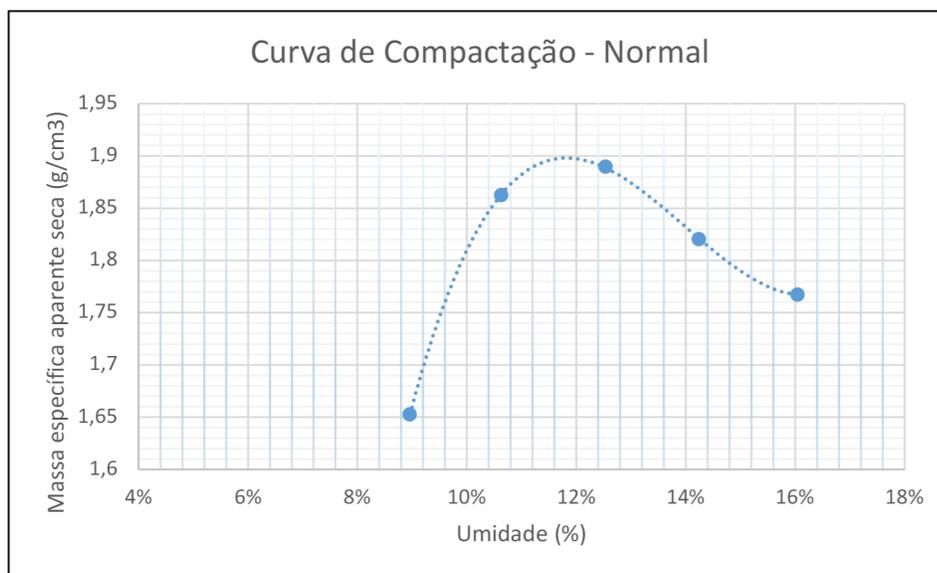
Amostras	PIC 34	PIC 36	PIC 30	PIC 18
<b>P1 (g)</b>	38,54	40,67	40,17	47,01
<b>P2 (g)</b>	48,97	50,82	50,2	57,44
<b>P3 (g)</b>	96,36	96,93	95,84	104,5
<b>P4 (g)</b>	89,893	90,65	89,55	98,04
<b>DR GRÃOS (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,632	2,623	2,682	2,627
<b>DR GRÃOS (Média)</b>	<b>2,627</b>			

Fonte: Próprio autor (2022).

### 4.3 Compactação

O ensaio de compactação Proctor normal indicou uma umidade ótima de 11,8% para uma massa aparente específica seca máxima de 1,9 g/cm<sup>3</sup> conforme Gráfico 2, que são valores estes típicos de solos arenosos-siltosos. O volume do cilindro é de 997 cm<sup>3</sup> com 2121 gramas de massa.

Gráfico 2 - Curva de compactação do solo.



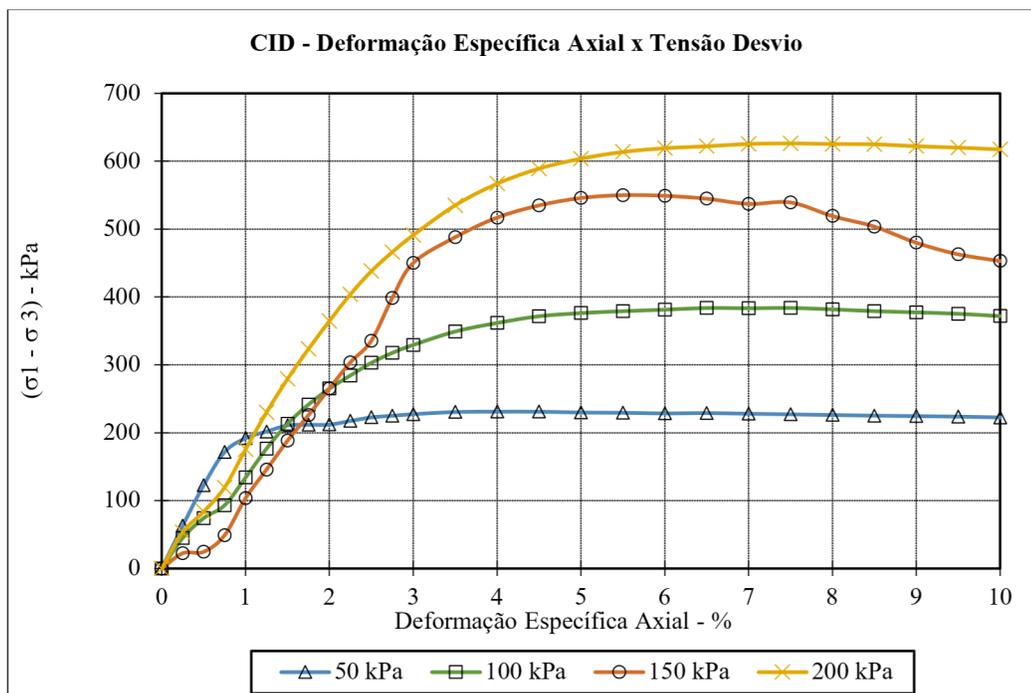
Fonte: Próprio autor (2022).

#### 4.4 Ensaios Triaxiais

Os parâmetros de resistência, intercepto coesivo e o ângulo de atritos efetivos, foram obtidos como descrito anteriormente, em corpos de prova compactados na energia Proctor Normal, na umidade ótima, em ensaios triaxiais do tipo adensado e drenado (CD). A seguir serão apresentadas, as curvas de tensão  $\times$  deformação e as deformações volumétricas  $\times$  deformações axiais.

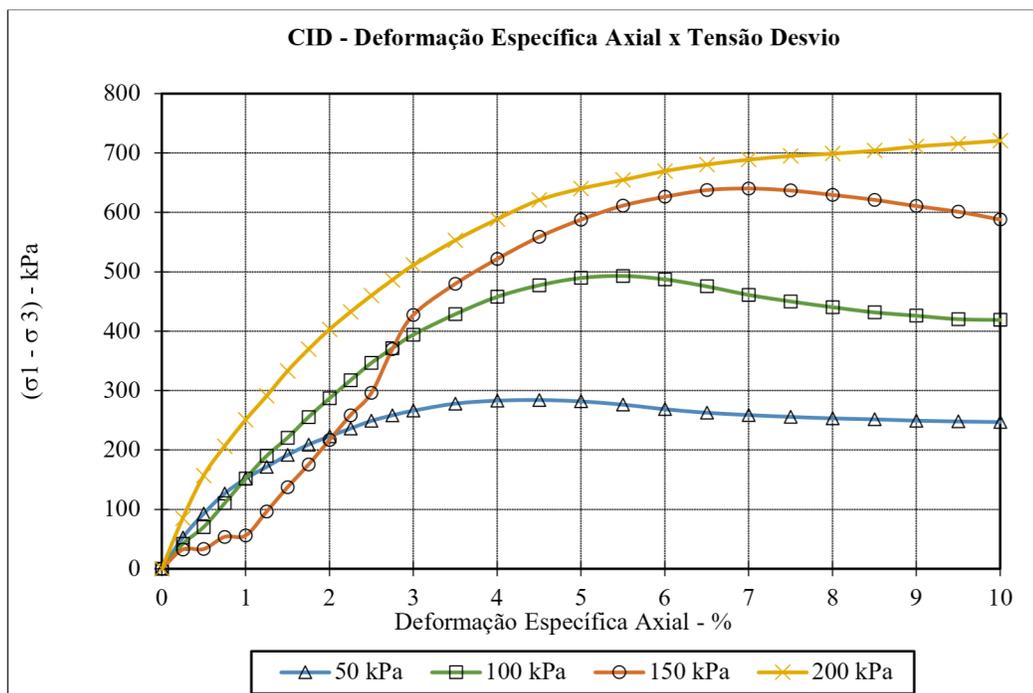
As curvas de tensão  $\times$  deformação obtidas para o solo com reforço e para o solo reforçado com a microgrelha são apresentados na sequência pelos Gráficos 3, 4, 5 e 6.

Gráfico 3 - Curva tensão  $\times$  deformação para o solo sem reforço



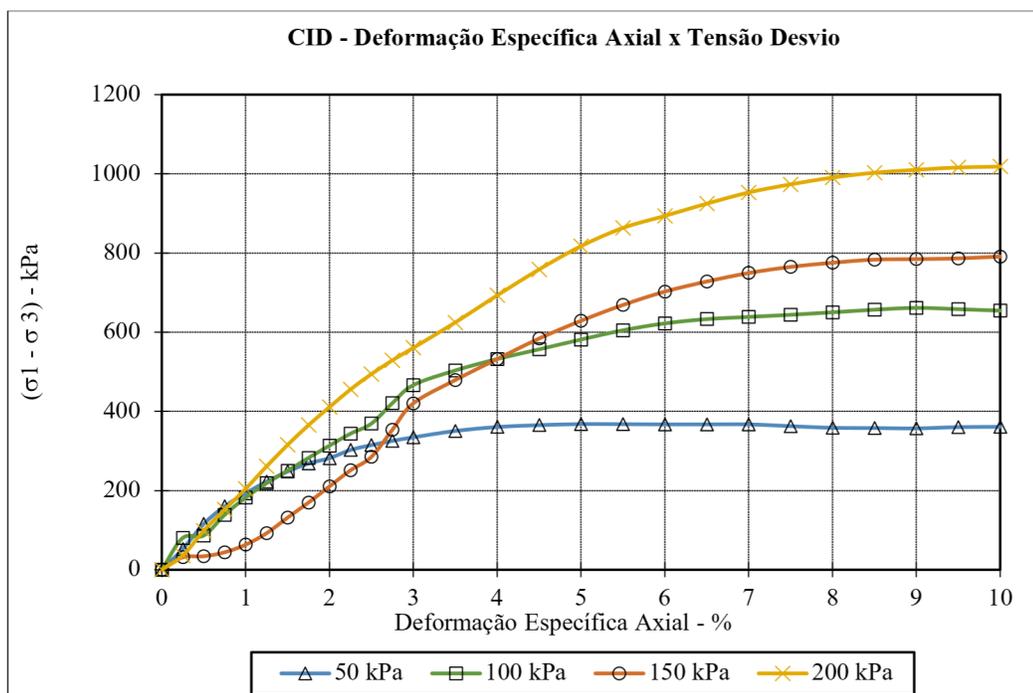
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 4 - Curva tensão x deformação para o solo com 1 camada de reforço



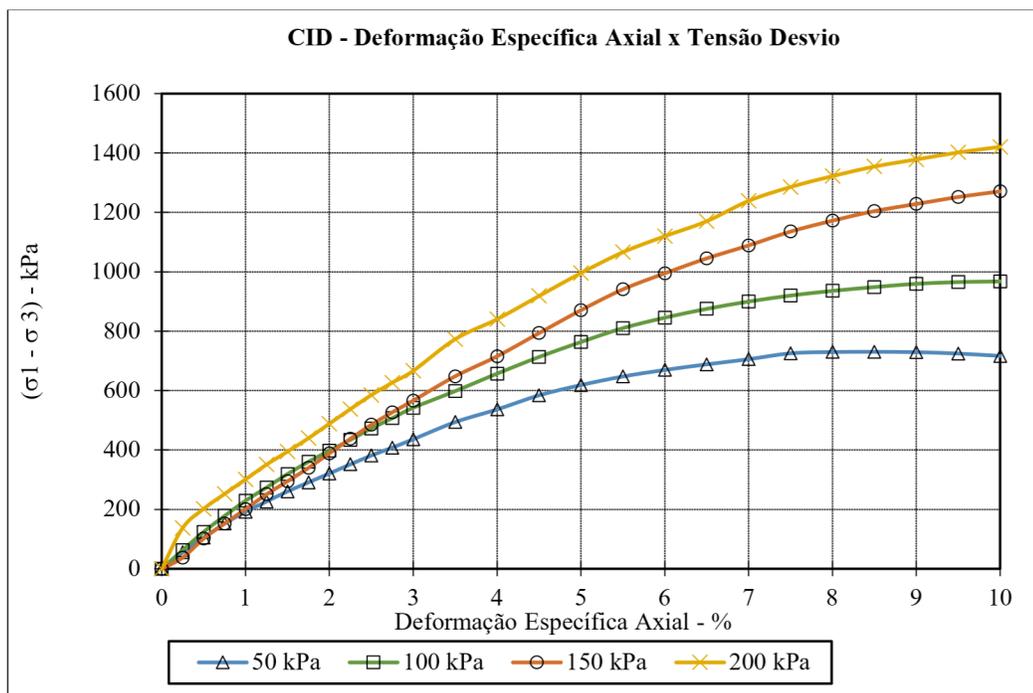
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 5 - Curva tensão x deformação para o solo com 2 camadas de reforço



Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 6 - Curva tensão x deformação para o solo com 3 camadas de reforço

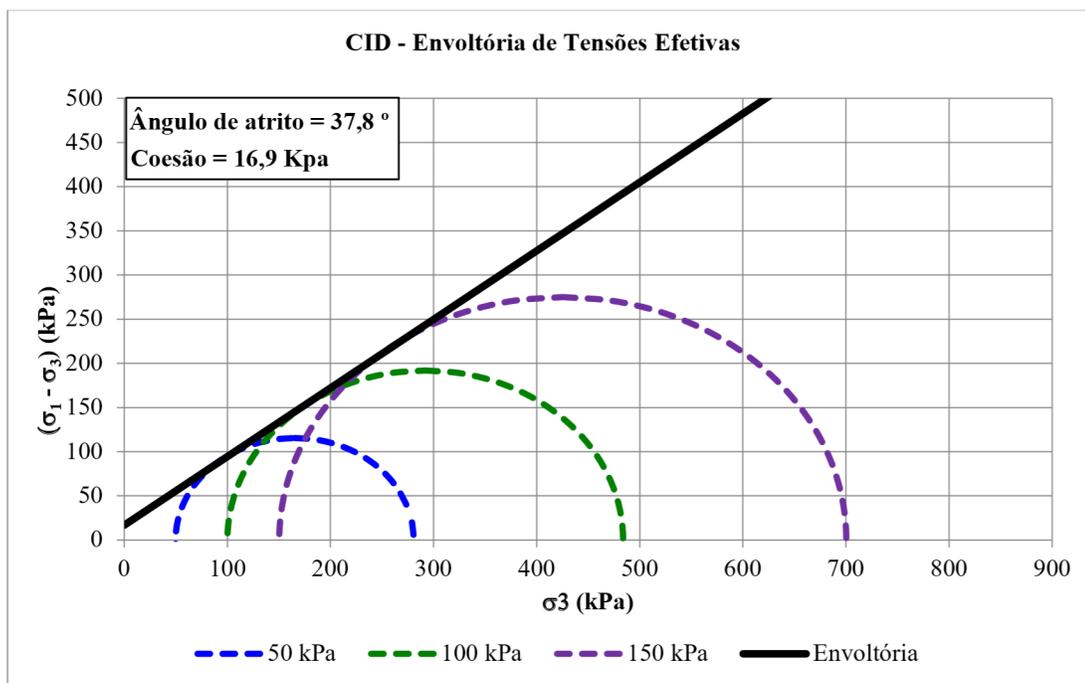


Fonte: Próprio autor (2022).

As envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb para o solo sem reforço e para o solo reforçado com a microgrealha são apresentadas na sequência. As retas foram traçadas com base nos círculos para as tensões de confinamento de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa, pois para a tensão

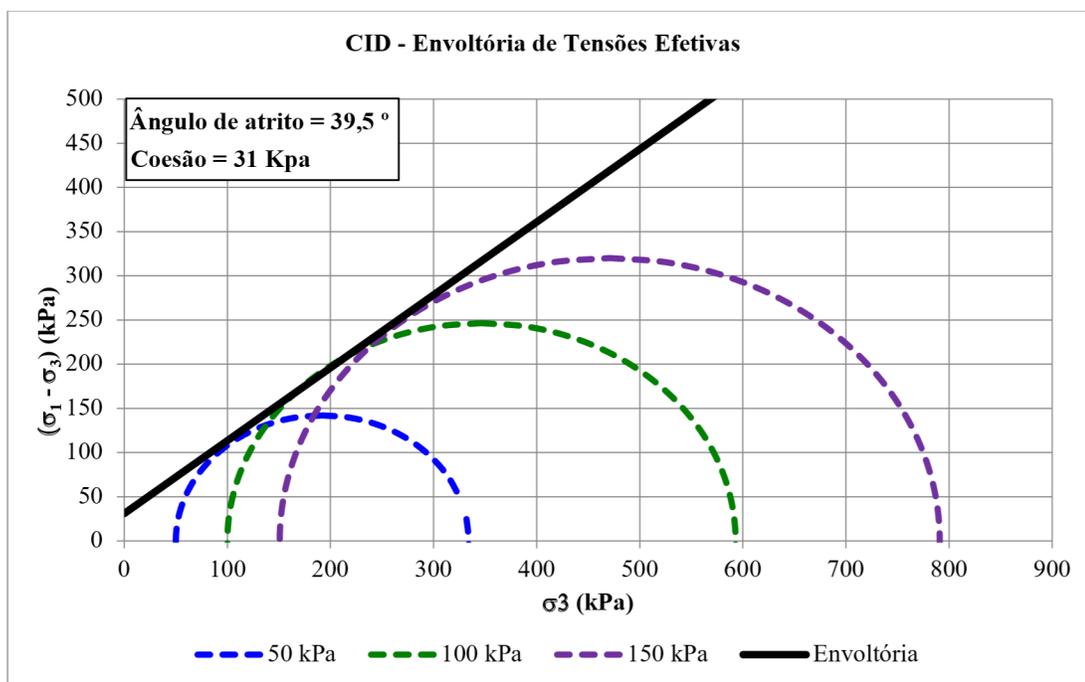
de 200 kPa, em alguns casos, não houve ruptura até a deformação axial máxima de 10% do equipamento.

Gráfico 7 - Envoltória de resistência para o solo sem reforço



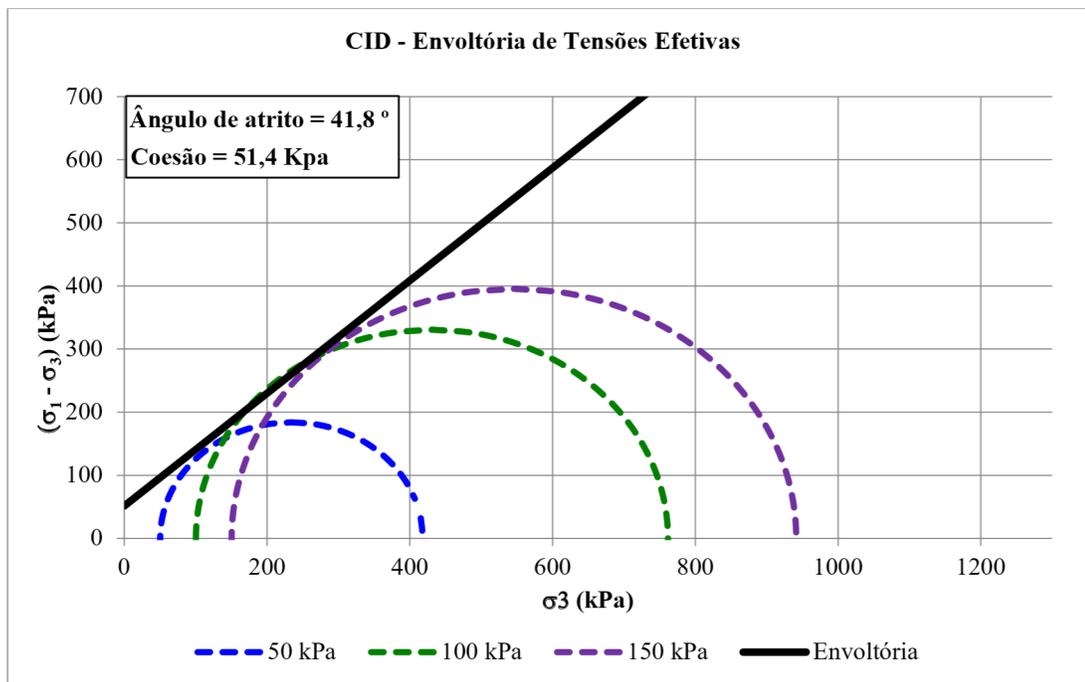
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 8 - Envoltória de resistência para o solo com 1 camada de reforço



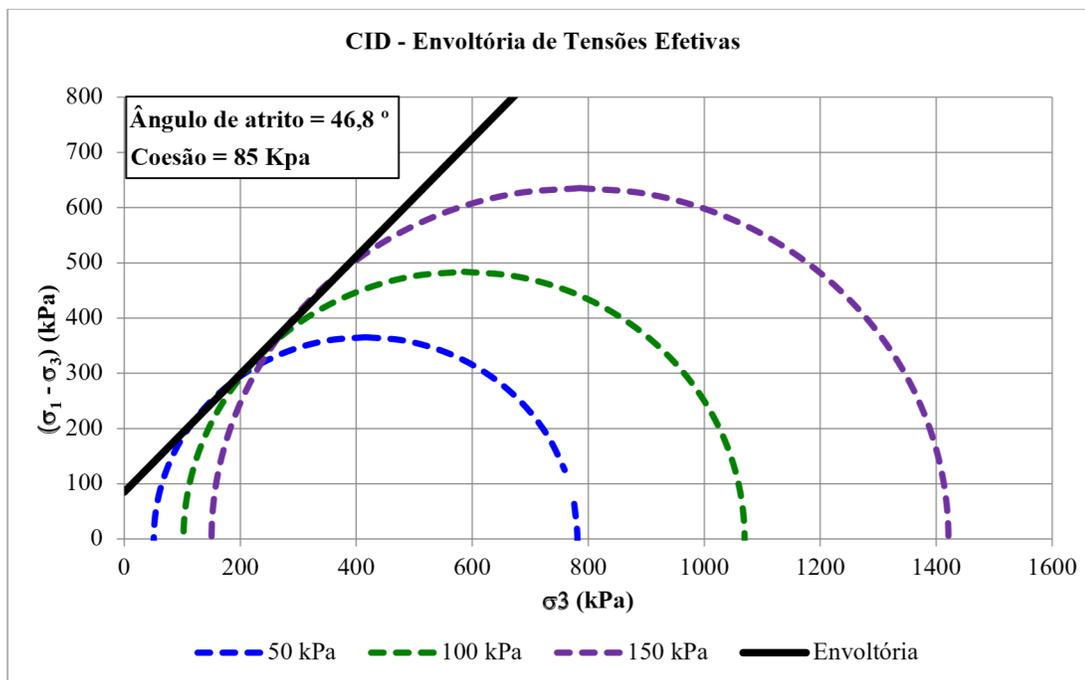
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 9 - Envoltória de resistência para o solo com 2 camadas de reforço



Fonte: Próprio autor (2022).

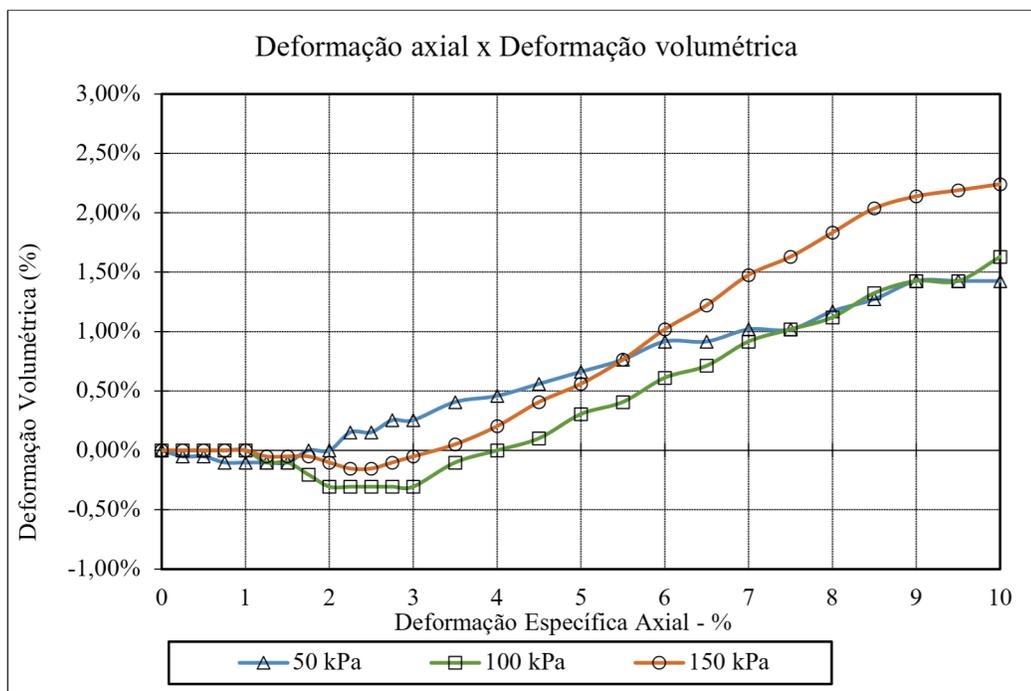
Gráfico 10 - Envoltória de resistência para o solo com 3 camadas de reforço



Fonte: Próprio autor (2022).

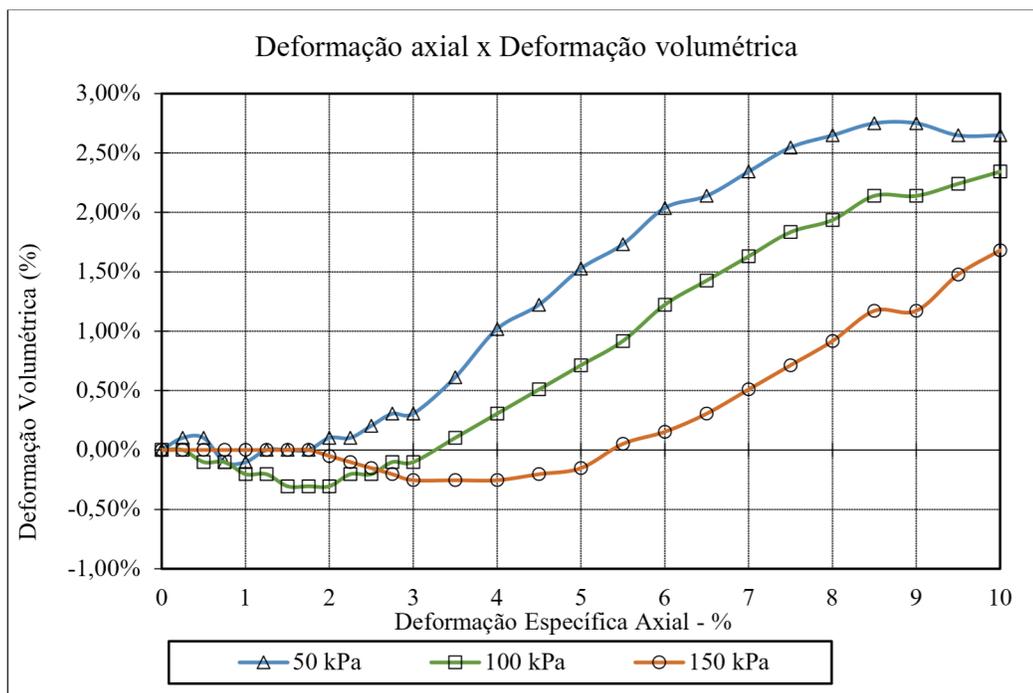
As curvas de deformação axial  $\times$  deformação volumétrica para o solo sem reforço e para o solo reforçado com a microgrelha são apresentados na sequência pelos gráficos 11, 12, 13 e 14.

Gráfico 11 - Curva deformação volumétrica  $\times$  deformação axial para o solo sem reforço



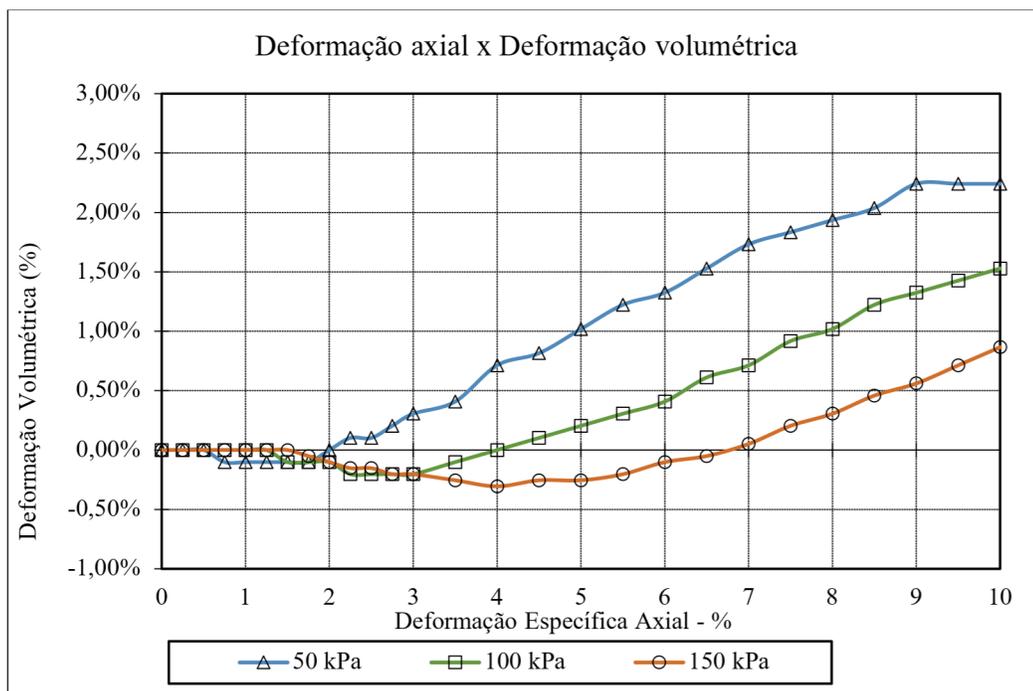
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 12 - Curva deformação volumétrica x deformação axial para o solo com 1 camada de reforço



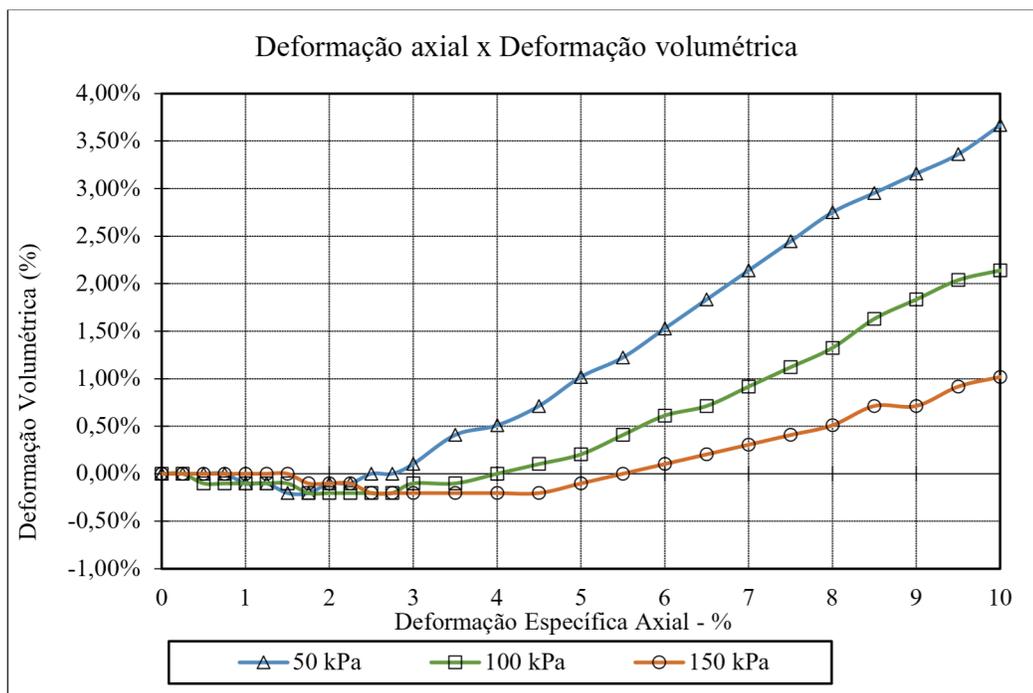
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 13 - Curva deformação volumétrica x deformação axial para o solo com 2 camadas de reforço



Fonte: Próprio autor (2022).

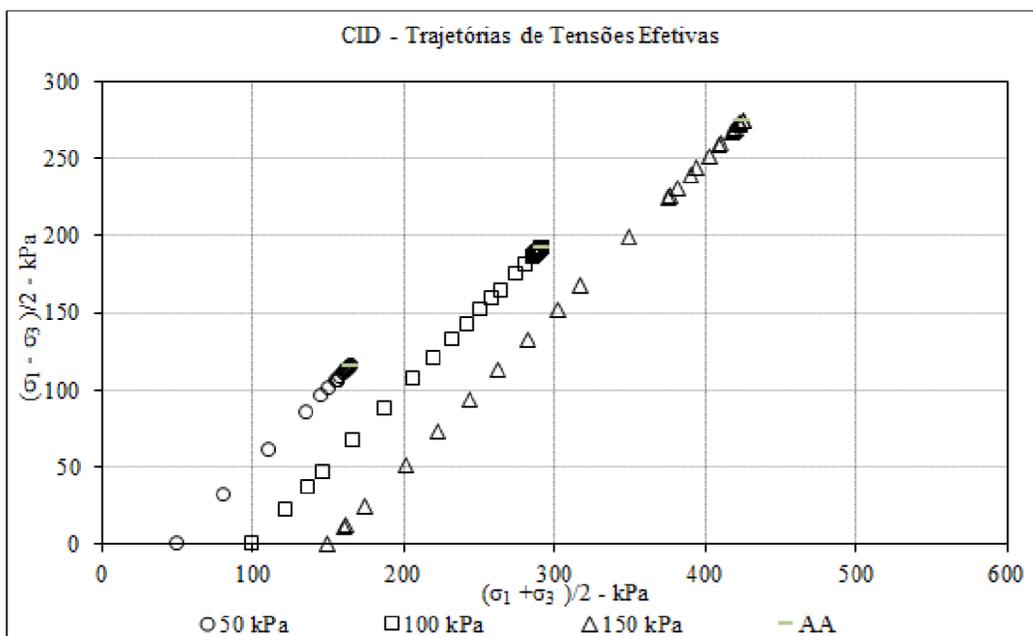
Gráfico 14 - Curva deformação volumétrica x deformação axial para o solo com 3 camadas de reforço



Fonte: Próprio autor (2022).

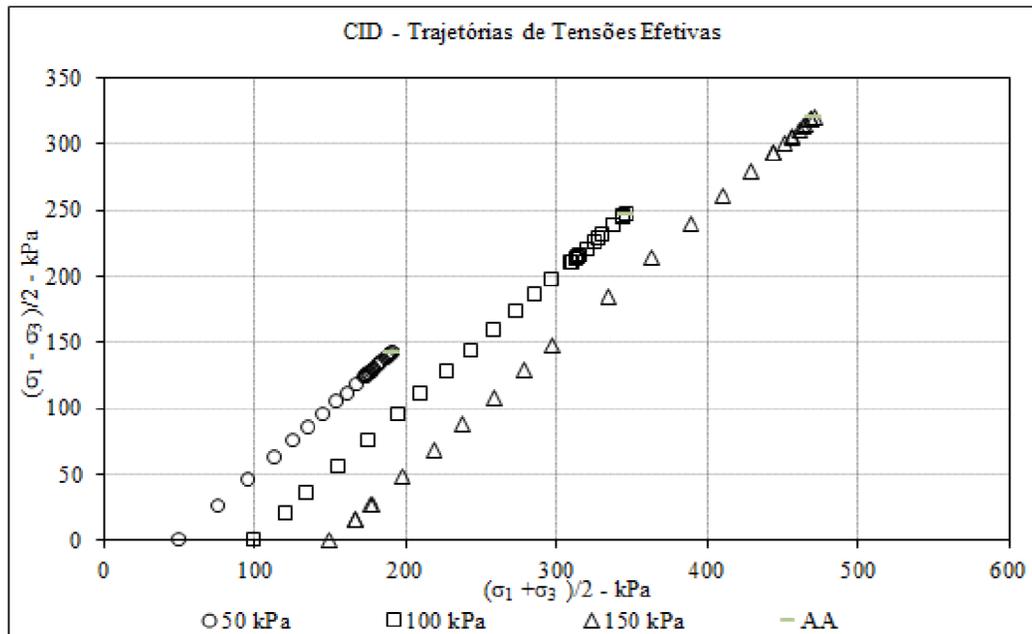
As trajetórias de tensões para o solo sem reforço e para o solo reforçado com a microgrida são apresentadas na sequência pelos gráficos 15, 16, 17 e 18.

Gráfico 15 - Trajetória de tensão para o solo sem reforço



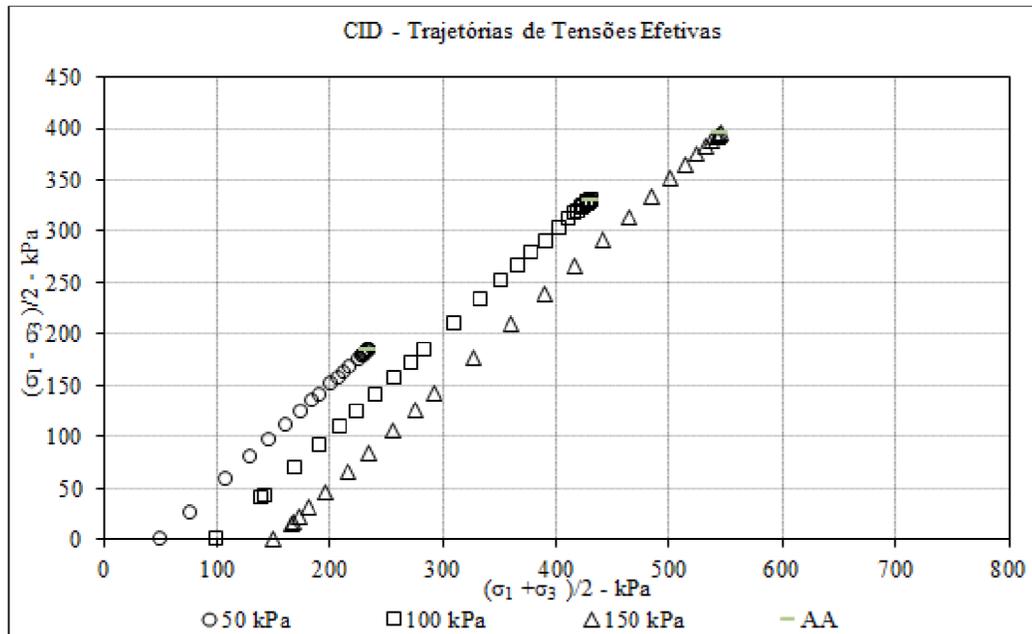
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 16 - Trajetória de tensões do solo com 1 camada de reforço



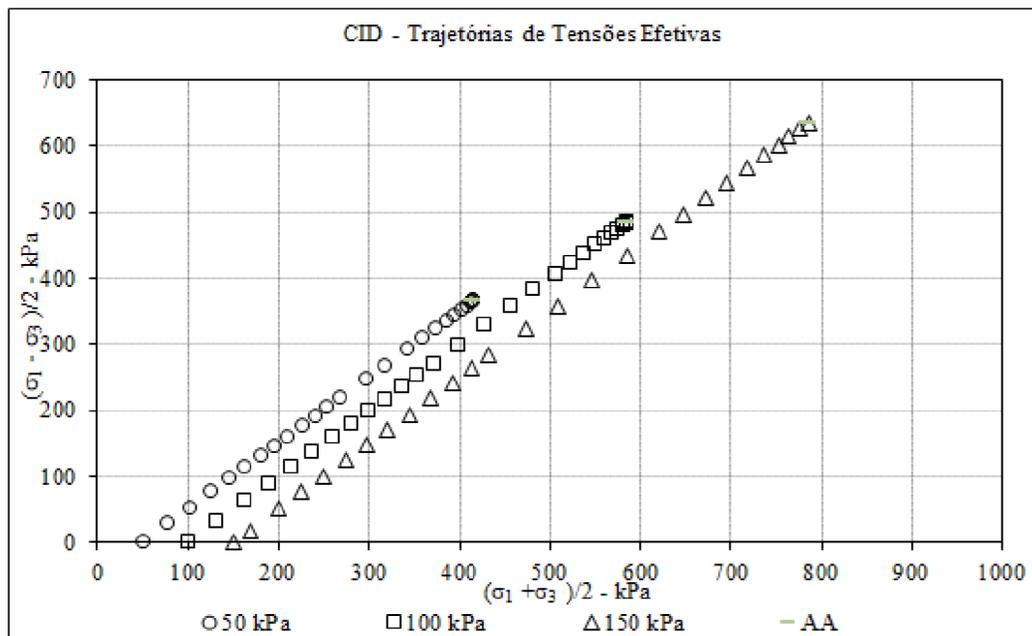
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 17 - Trajetória de tensões do solo com 2 camadas de reforço



Fonte: Próprio autor (2022).

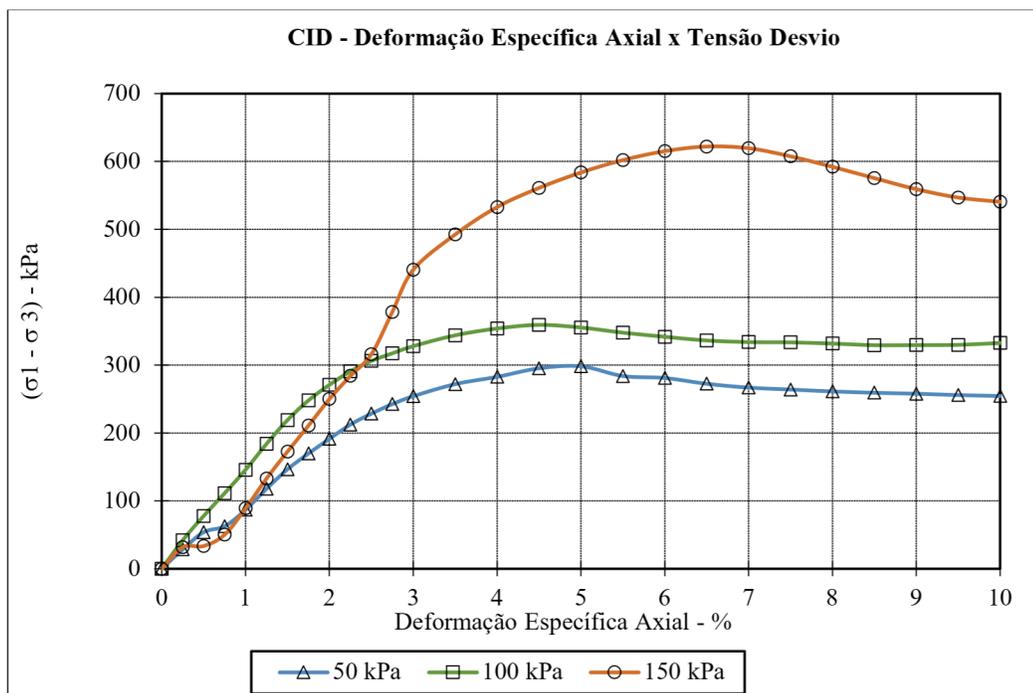
Gráfico 18 - Trajetória de tensões do solo com 3 camadas de reforço



Fonte: Próprio autor (2022).

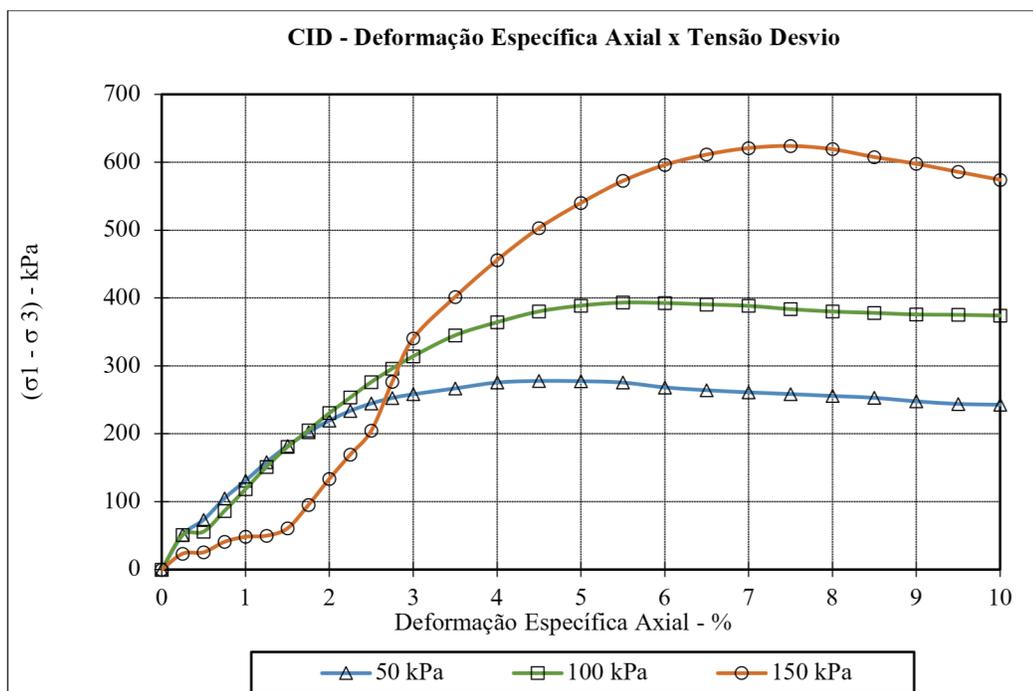
Os resultados dos corpos de provas reforçados com uma camada de geotêxtil não-tecido são apresentados nos Gráficos 19 e 20, que mostram as curvas tensão  $\times$  deformação axial, nos Gráficos 21 e 22, que mostram as envoltórias de ruptura, e nos Gráficos 23 e 24 mostram a curva de deformação axial  $\times$  deformação volumétrica.

Gráfico 19 - Curva tensão  $\times$  deformação para o solo reforçado com o geotêxtil não-tecido de 200 g/m<sup>2</sup>



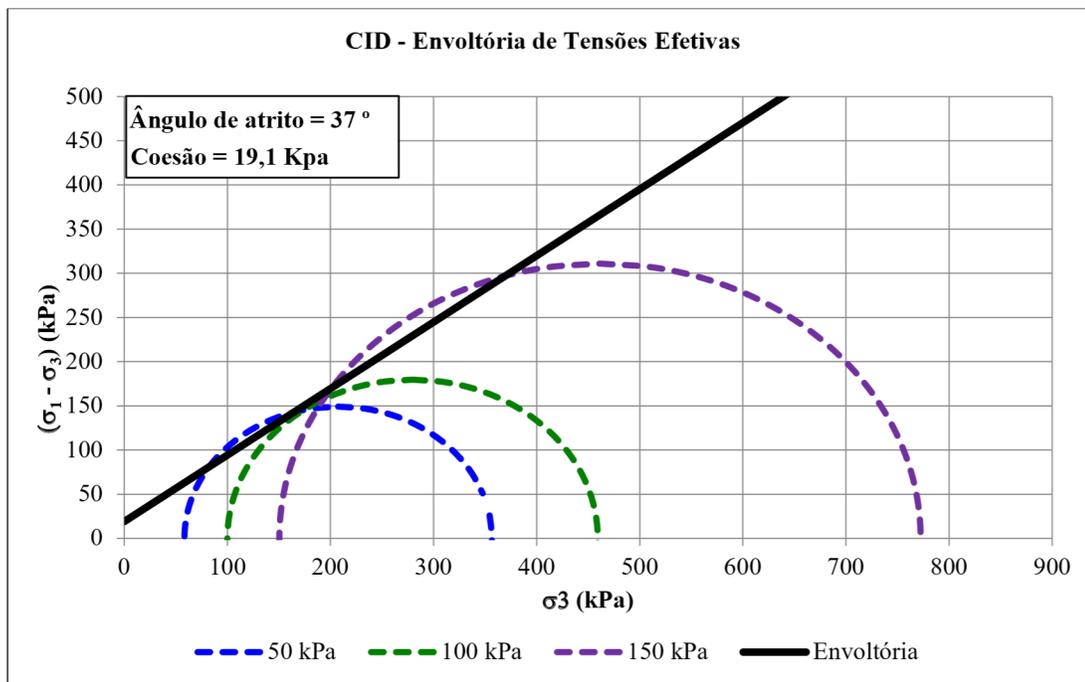
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 20 - Curva tensão  $\times$  deformação para o solo reforçado com o geotêxtil não-tecido de 300 g/m<sup>2</sup>



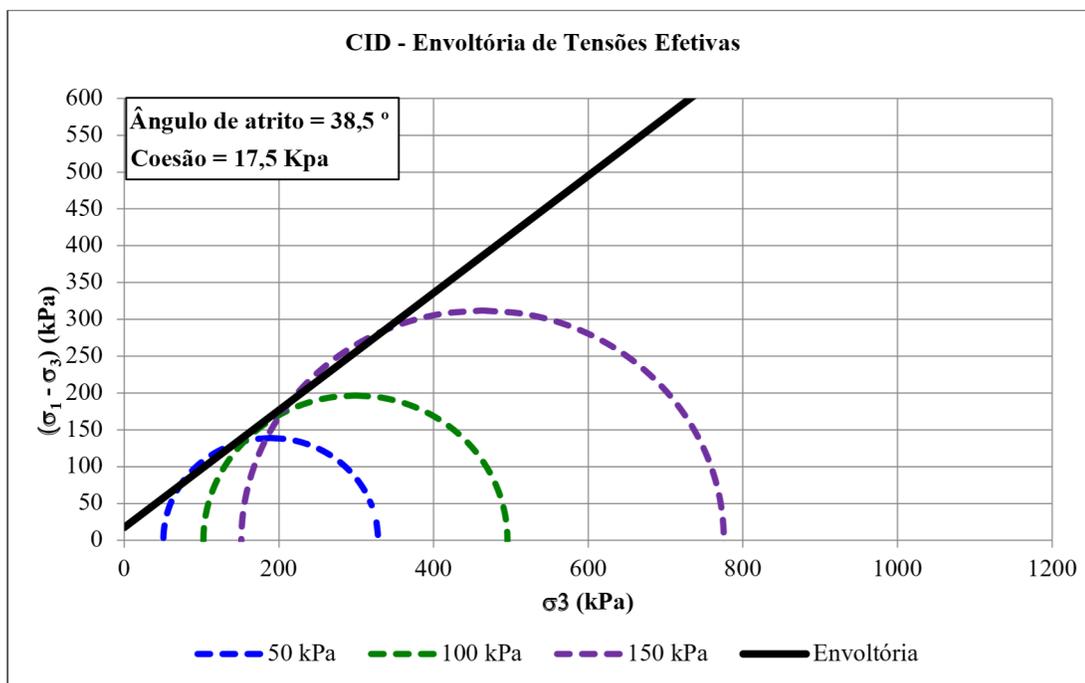
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 21 - Envoltória de resistência para o solo reforçado com o geotêxtil não-tecido 200 g/m<sup>2</sup>



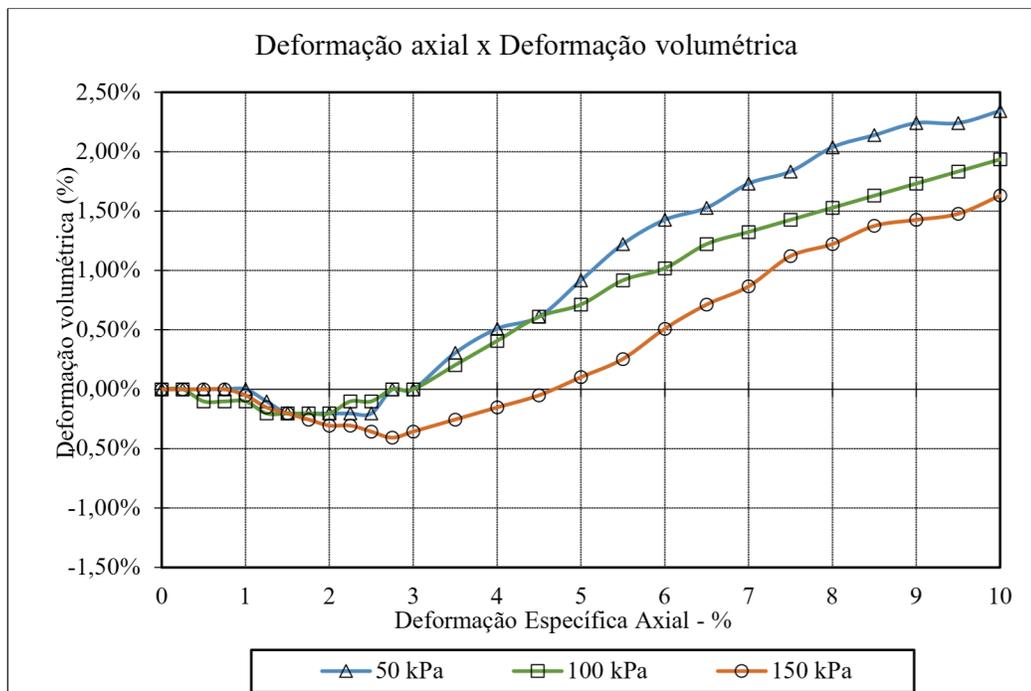
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 22 - Envoltória de resistência para o solo reforçado com o geotêxtil não-tecido 300 g/m<sup>2</sup>



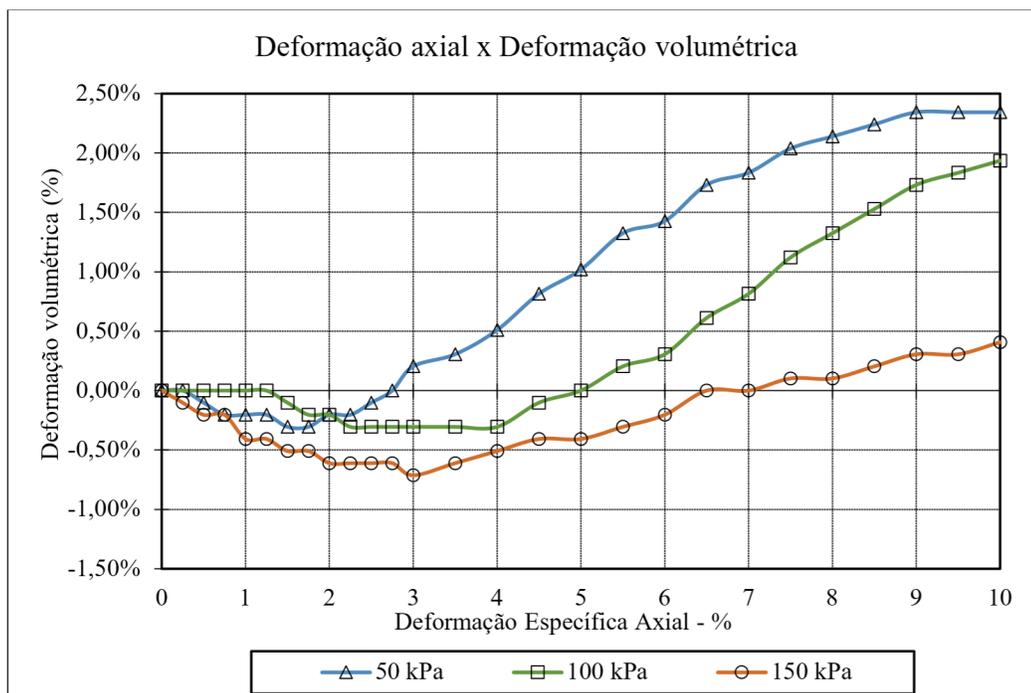
Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 23 - Curva deformação axial x deformação volumétrica para o solo reforçado com o geotêxtil de 200 g/m<sup>2</sup>



Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 24 - Curva deformação axial x deformação volumétrica para o solo reforçado com o geotêxtil de 300 g/m<sup>2</sup>

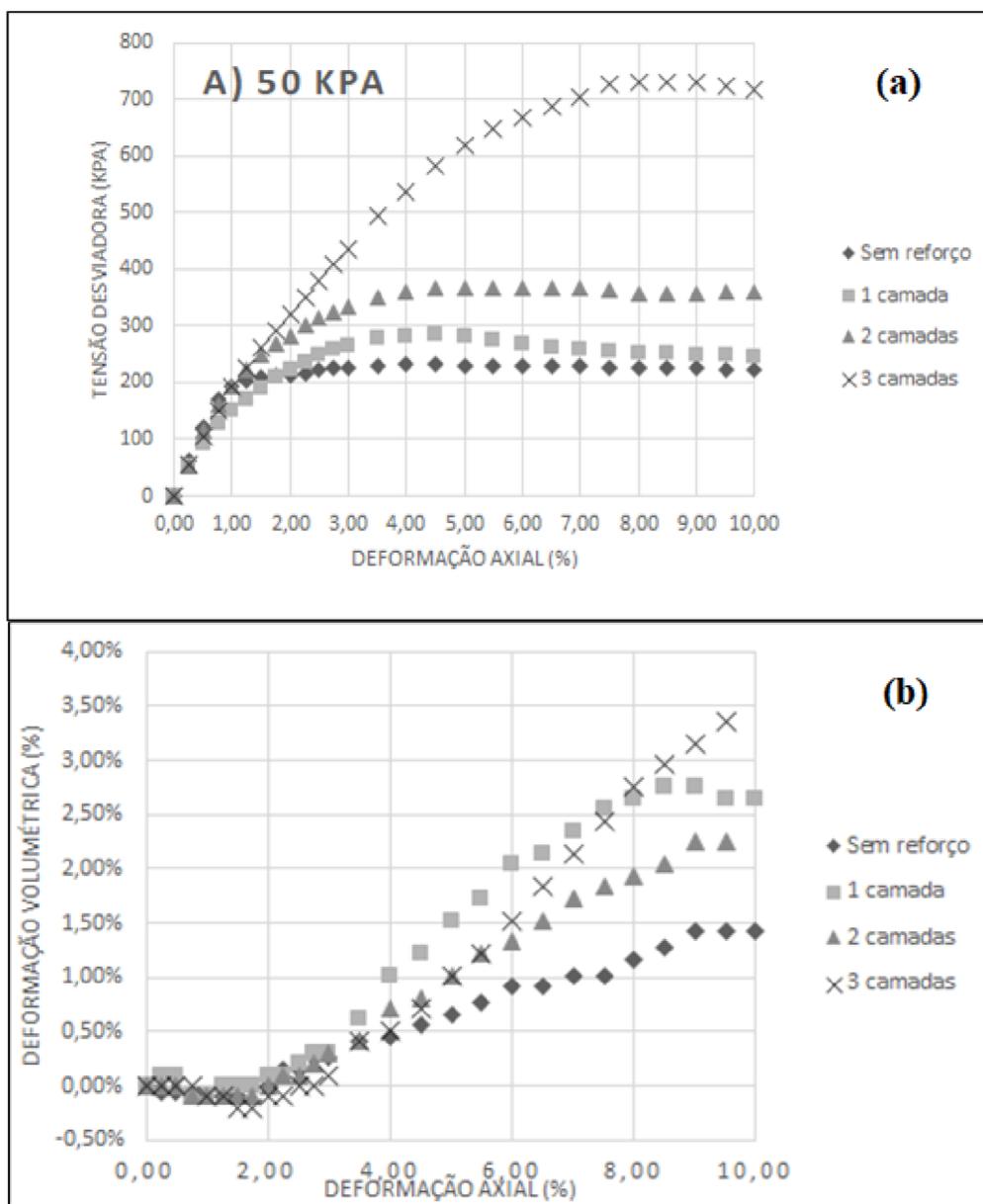


Fonte: Próprio autor (2022).

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O Gráfico 25 apresenta em a) tensão desvio  $\times$  deformação axial e b) tensão desvio  $\times$  deformação volumétrica para a tensão confinante de 50 kPa, onde se observa a ocorrência de ruptura para todos os corpos de prova reforçados e para o corpo de prova não reforçado, com a formação de um leve pico de tensões para os corpos de prova reforçados. Na ruptura há o aumento das tensões desvios e das deformações axiais com o aumento do número de camadas de reforço. Para o corpo de prova sem reforço e para o corpo de prova reforçado com uma camada de microgrelha a deformação axial de ruptura foi próxima de 4,5%; já para o corpo de prova reforçado com duas camadas de microgrelha, de 7,0%, e para o corpo de prova reforçado com três camadas de microgrelha, de 8,5%. Ao analisar as máximas tensões desvios alcançadas, o corpo de prova com 3 camadas atingiu cerca de 700 kPa, diferença de 98 % maior que o corpo de prova reforçado com 2 camadas, 130% maior que o corpo de prova reforçado com 1 camada e de 215% maior que o corpo de prova sem reforço. Em todos os casos, as rupturas ocorreram com aumento de volume, havendo uma fase inicial de contração seguida pela expansão, comportamento este típico de areias compactas.

Gráfico 25 – Curvas para o solo sem e com reforço de microgrelha para a tensão confinante de 50 kPa: a) Tensão desvio  $\times$  Deformação axial; b) Deformação axial  $\times$  Deformação volumétrica

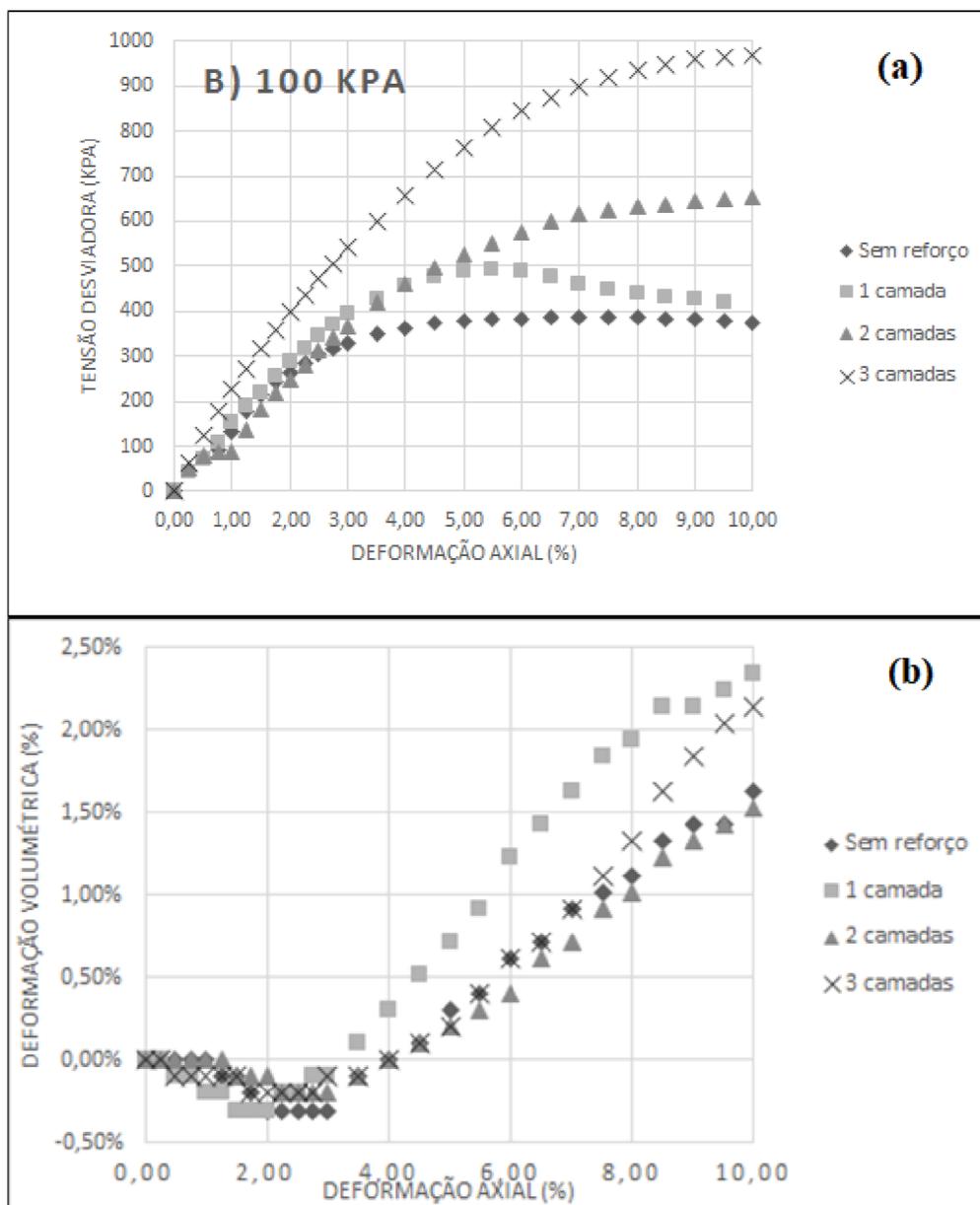


Fonte: Próprio autor (2022).

O Gráfico 26 apresenta em a) tensão desvio  $\times$  deformação axial e b) tensão desvio  $\times$  deformação volumétrica para a tensão confinante de 100 kPa, onde pode-se observar ruptura em todos os corpos de prova com a formação de pico para o corpo de prova reforçado com 1 camada de microgrelha. A tendência de aumento de deformação axial e da tensão desvio na ruptura com o aumento do número de camadas de reforço foi semelhante ao comportamento observado para a tensão de confinamento de 50 kPa. O corpo de prova sem reforço e reforçado

com uma camada de microgrelha romperam com deformação próxima de 5,5%, comportamento similar aos corpos de prova ensaiados na tensão confinante de 50 kPa. Para o corpo de prova reforçado com duas camadas de microgrelha ocorreu ruptura com 9,0%, e para o corpo de prova reforçado com três camadas de microgrelha ocorreu com 9,5%. Nota-se um aumento das deformações axiais na ruptura para todos os corpos de provas com o aumento da tensão de confinamento. Ao analisar as máximas tensões desvios alcançadas, o corpo de prova reforçado com três camadas de microgrelha atingiu a ruptura com maior próximo de 1000 kPa, diferença de 45% maior que o corpo de prova reforçado com duas camadas, 100% maior que o corpo de prova reforçado com 1 camada e diferença de 150% maior que o corpo de prova sem reforço. Em todos os casos, as rupturas ocorreram com aumento de volume, havendo uma fase inicial de contração seguida pela expansão, comportamento este típico de areias compactas, semelhante ao comportamento da tensão confinante de 50 kPa. No entanto, nota-se que as deformações volumétrica diminuíram com o aumento da tensão de confinamento

Gráfico 26 - Curvas para o solo sem e com reforço de microgrelha para a tensão confinante de 100 kPa: a) Tensão desvio x Deformação axial; b) Deformação axial x Deformação volumétrica

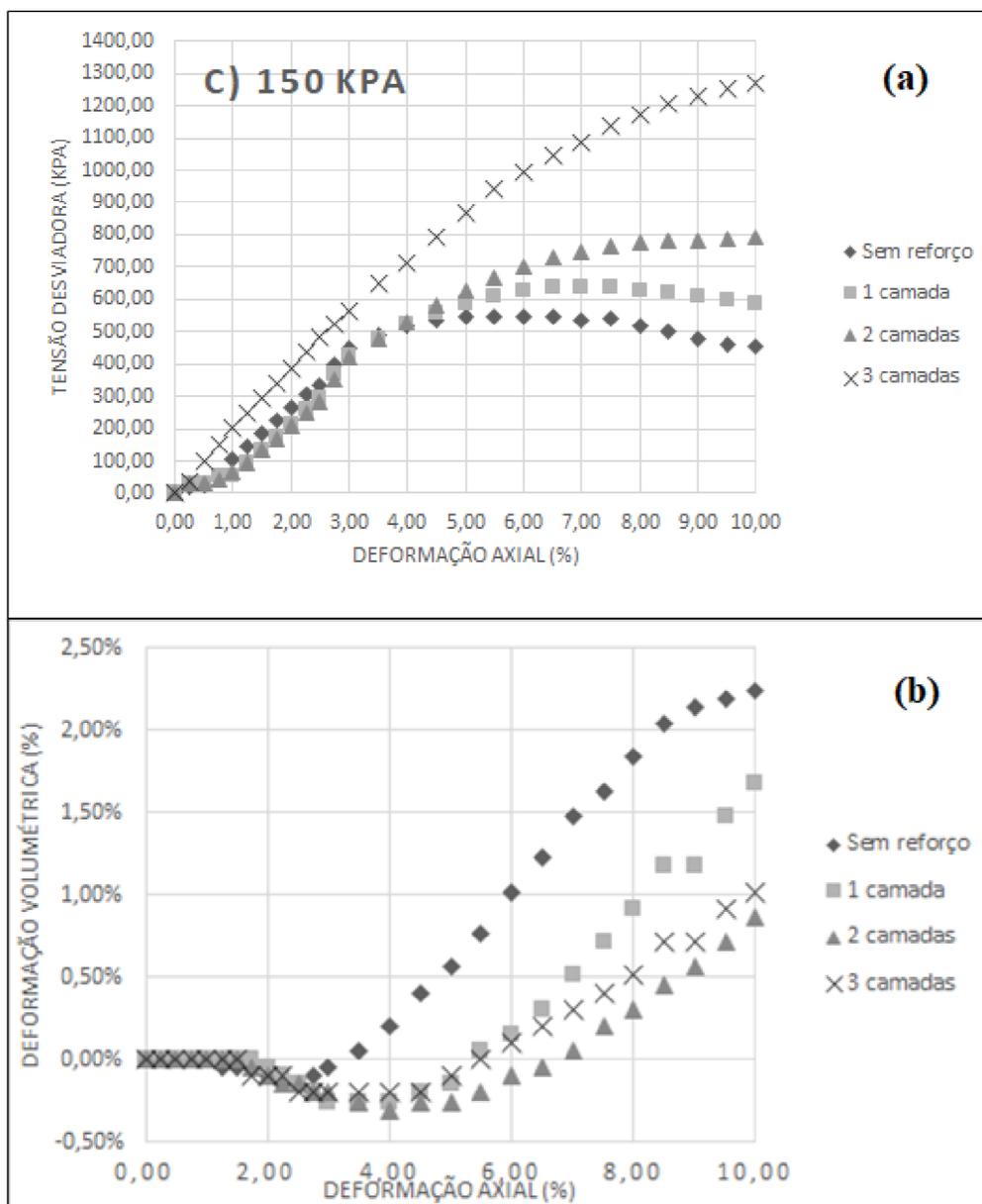


Fonte: Próprio autor (2022).

O Gráfico 27 apresenta em a) tensão desvio x deformação axial e b) tensão desvio x deformação volumétrica para a tensão confinante de 150 kPa e evidencia ruptura para todos os corpos de prova, com a formação de pico para o corpo de prova sem reforço e com uma camada de reforço de microgrelha. Para esta tensão de confinamento também se observou um aumento de deformação axial e da tensão desvio na ruptura com o aumento do número de camadas de reforço. Diferentemente do que aconteceu para as tensões confinantes de 50 kPa e

100 kPa, as deformações axiais na ruptura para o corpo de prova sem reforço e para o corpo de prova com uma camada de microgrelha foram diferentes. Para os demais corpos de prova, as deformações axiais na ruptura mantiveram-se iguais as obtidas na tensão confinante de 100 kPa. Ao analisar as máximas tensões desvios atingidas, nota-se que o corpo de prova reforçado com três camadas de microgrelha obteve o de maior valor, próximo de 1300 kPa, com aumento de 60 % em relação ao corpo de prova reforçado com 2 camadas, 100% de aumento em relação ao corpo de prova reforçado com 1 camada e aumento de 130 % em relação ao corpo de prova sem reforço, comportamento similar ao observado para a tensão confinante de 100 kPa.

Gráfico 27 - Curvas para o solo sem e com reforço de microgrelha para a tensão confinante de 150 kPa: a) Tensão desvio x Deformação axial; b) Deformação axial x Deformação volumétrica



Fonte: Próprio autor (2022).

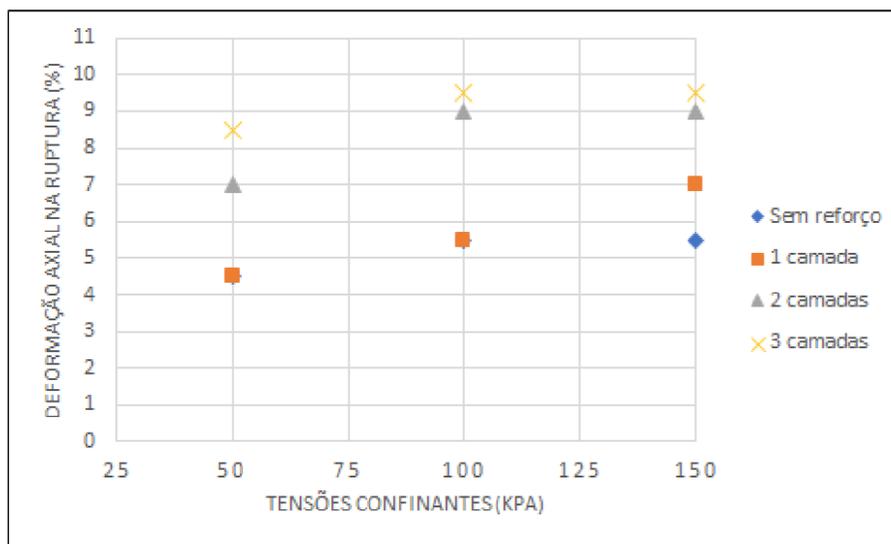
Os resultados obtidos em triaxiais com solos reforçados com geossintéticos apresentados na literatura indicam que há aumento da tensão desvio e da deformação axial na ruptura após a inserção das camadas de reforço, sendo este comportamento melhorado com a inserção de mais camadas. No entanto, existe um limite em que a inserção de camadas, a partir do qual não há melhoras significativas na resistência, conforme com os resultados obtidos por

Sieira (2003) e Chen *et al.* (2014) que realizaram ensaios triaxiais em solos reforçados em diferentes tipos de solo (arenosos e argilosos). Nesta pesquisa os resultados com 2 e 3 camadas de reforço apresentaram diferenças, que sugere não ter sido atingido o número de camadas de reforço para obter a máxima resistência do compósito.

Broms *et al.* (1989), Skoudis (2020) e Yi (2020), observaram que o aumento das tensões confinantes implica em uma menor mobilização do reforço, pois tensões confinantes mais elevadas amenizam a ação de restrição das deformações laterais que os reforços provocam. Este comportamento pôde ser verificado nesta pesquisa, em que os aumentos das tensões desvios de ruptura com a inserção das camadas apresentaram porcentagens de aumento maior para as tensões confinantes de 50 kPa e 100 kPa.

O Gráfico 28 relaciona a deformação axial na ruptura com a tensão confinante ensaiada. Nota-se que para as tensões confinantes ensaiadas há uma tendência de aumento das deformações axiais na ruptura com o aumento do número de camadas de reforço e com o aumento das tensões de confinamento, ocorrendo, em alguns casos, a estabilização das deformações axiais na ruptura com o aumento da tensão de confinamento. O solo rompeu com deformações axiais maiores quando foi reforçado, apresentando um comportamento mais dúctil após a inserção do reforço. Para as tensões confinantes de 100 kPa e 150 kPa observou-se uma tendência de estabilização da deformação axial de ruptura para os corpos de prova ensaiados com duas e três camadas de microgrelha. Para as tensões confinantes de 50 kPa e 100 kPa as deformações axiais de ruptura para os corpos de prova reforçado com 1 camada e o corpo de prova sem reforço foram idênticas, sendo maiores no corpo de prova reforçado submetido a tensão confinante de 150 kPa.

Gráfico 28 - Comportamento deformação axial na ruptura  $x$  tensões confinantes para o solo sem e com reforço



Fonte: Próprio autor (2022).

Para a tensão confinante de 50 kPa percebeu-se maior diferença entre a deformação axial de ruptura entre os corpos de prova reforçados com duas e três camadas de microgrelha, em relação às outras tensões de confinamento. Somente para a tensão confinante de 150 kPa foram observadas deformações axiais de ruptura diferentes entre os corpos de prova sem reforço e reforçado com uma camada de microgrelha.

No corpo de prova reforçado com uma camada de microgrelha ficou evidente a formação de uma superfície de ruptura para a tensão confinante de 150 kPa, a qual é identificada na Figura 21, ao contrário do corpo de prova ensaiado para a tensão confinante de 100 kPa. O corpo de prova reforçado com uma camada de microgrelha que foi ensaiado com  $\sigma_c=150$  kPa rompeu para uma deformação axial maior (7%) do que o mesmo um ensaiado com  $\sigma_c=100$  kPa (5,5%) e, baseado na visualização das superfícies de ruptura, pode ter havido uma mobilização da resistência do reforço para a tensão de confinamento de 150 kPa.

Na Figura 22, quando observarmos o aspecto do corpo de prova rompido com o solo reforçado com duas camadas de microgrelhas para a tensão confinante de 50 kPa, percebe-se que a segunda camada do reforço não foi completamente mobilizada, diminuindo a deformação axial na ruptura deste corpo de prova, conforme mostra a Figura 21, em a) a superfície de ruptura para  $\sigma_3 = 100$  kPa e em b)  $\sigma_3 = 150$  kPa

Figura 21 - Superfície de ruptura para o corpo de prova reforçado com uma camada de microgrelha para as tensões confinantes diferentes. (a)  $\sigma_3 = 100$  kPa; (b)  $\sigma_3 = 150$  kPa

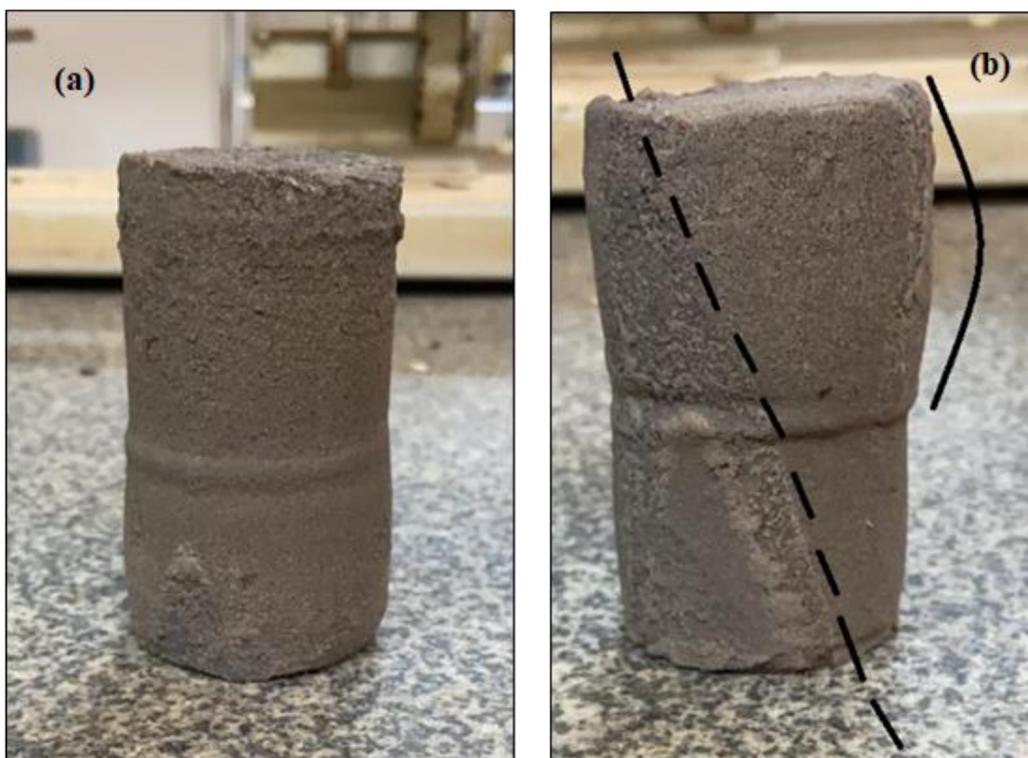


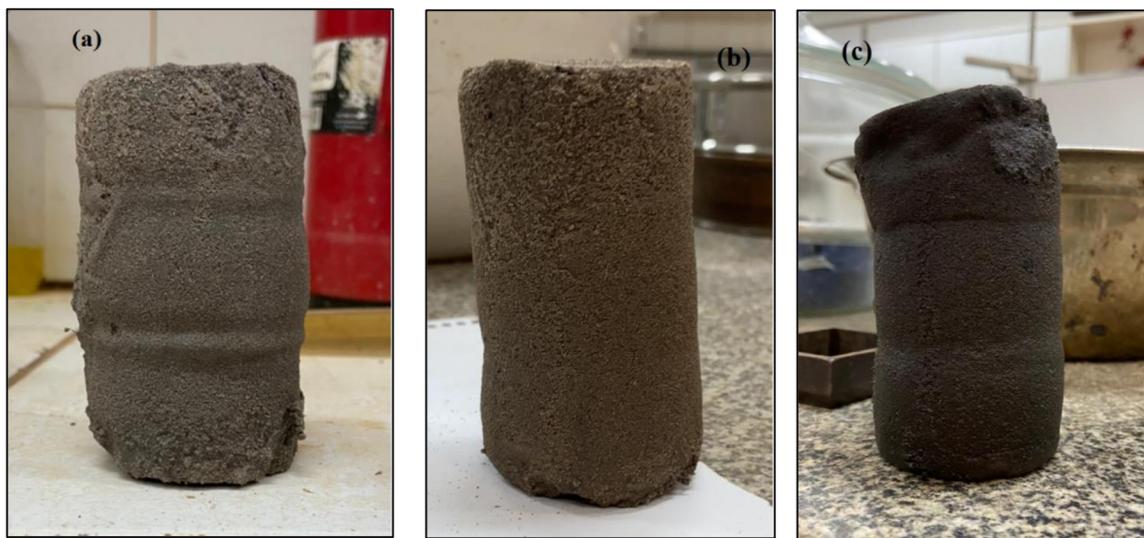
Figura 22 - Corpo de prova reforçado com duas camadas de microgrelha para a tensão de 50 kPa



A Figura 23 que mostra os corpos de provas rompidos com duas camadas de microgrelha para as diferentes tensões confinantes: a)  $\sigma_3 = 50$  kPa, b)  $\sigma_3 = 100$  kPa e c)  $\sigma_3 = 150$

kPa, evidencia que o aumento das tensões confinantes diminui as deformações volumétricas dos corpos de prova. Percebe-se também que as marcas de onde foram colocados os reforços se tornam menos proeminentes com o aumento das tensões de confinamento

Figura 23 - Corpos de prova reforçados com duas camadas de microgrelha após ruptura. (a)  $\sigma_3 = 50$  kPa, em (b)  $\sigma_3 = 100$  kPa e em (c)  $\sigma_3 = 150$  kPa



Após os rompimentos verificados nos corpos de prova e verificação do estado físico dos reforços não ficou evidente a ocorrência de rasgos ou de deformações permanentes nos reforços, demonstrando que o principal mecanismo mobilizador de resistência no contato solo-reforço foi o atrito entre as superfícies solo-reforço. Este mecanismo é mais comum em solos argilo-siltosos reforçados com geogrelha como comprova Siera (2003).

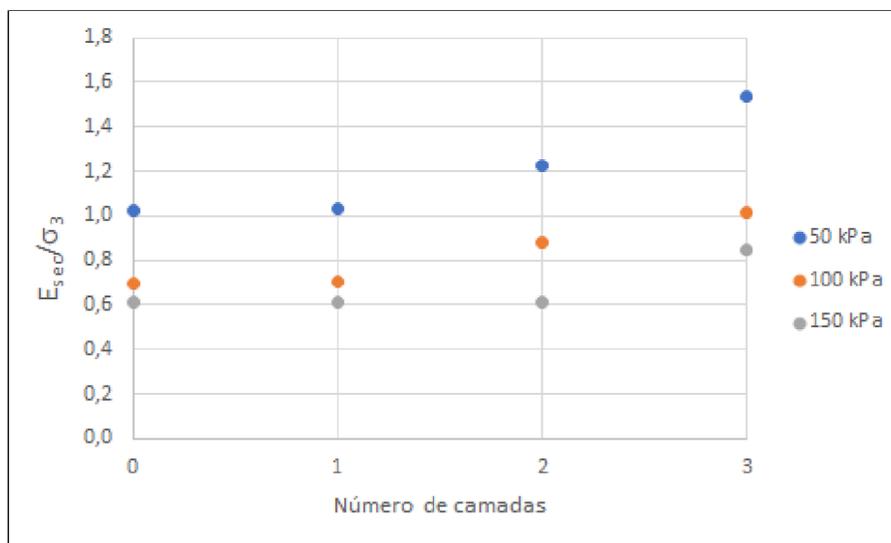
Figura 24 - Imagem da microgrelha após a ruptura dos corpos de prova



O Gráfico 29 descreve sobre a deformabilidade dos corpos de provas, onde é representado o módulo de deformabilidade secante, normalizado com a tensão confinante, em função do número de camadas de reforço no corpo de prova. Evidencia-se que o aumento do número de camadas de reforço provocou um aumento de rigidez dos corpos de provas. O aumento da tensão confinante provocou um aumento do módulo de deformabilidade secante. Avaliando em valores absolutos sem a normalização, o valor do módulo secante aumentou em 50%, 45% e 38% para as tensões confinante de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa, respectivamente. Ranjan (2000) apresentou valores típicos de módulo de deformabilidade secante para alguns tipos de solos, na faixa de valores (48 a 80 MPa) apresentado para areias densas, valores estes que se encontram os módulos de deformabilidade obtidos nesta pesquisa.

Carlos *et al.* (2016), Sieira (2003) e Yi (2020), avaliam também que a inserção dos reforços aumentou o módulo de deformabilidade secante do conjunto e este aumento era maior com a inserção de mais camadas.

Gráfico 29 – Módulo de deformabilidade secante normalizado pela tensão confinante com a inserção das camadas de reforço de microgrelha



Fonte: Próprio autor (2022).

A Tabela 4 relaciona os valores dos parâmetros resistência ao cisalhamento efetivo nos corpos de prova. Para a determinação desses parâmetros, não se utilizou o círculo de Mohr da tensão confinante de 200 kPa, pois, em alguns casos, o ensaio não atingiu a ruptura para deformações axiais de 10%. Evidencia-se que com o aumento do número de camadas houve

aumento dos parâmetros de resistência, principalmente na coesão efetiva, que apresentou aumento de 400%. O ângulo de atrito efetivo apresentou aumento de 24%.

Com relação aos aumentos dos parâmetros de resistência provocado pelos reforços de geogrelhas, Feng *et al.* (2018), Skoudis (2020) e Wang *et al.* (2021), realizaram ensaios drenados em areias e perceberam aumentos significativos no intercepto coesivo. Chen *et al.* (2014) e Yang *et al.* (2006) que realizaram ensaios não drenados em argilas, perceberam aumentos também mais significativos no intercepto coesivo. Os resultados obtidos pelos autores citados indicaram que solos com maiores teores de areias apresentam menores crescimentos no ângulo de atrito quando reforçados com geogrelha.

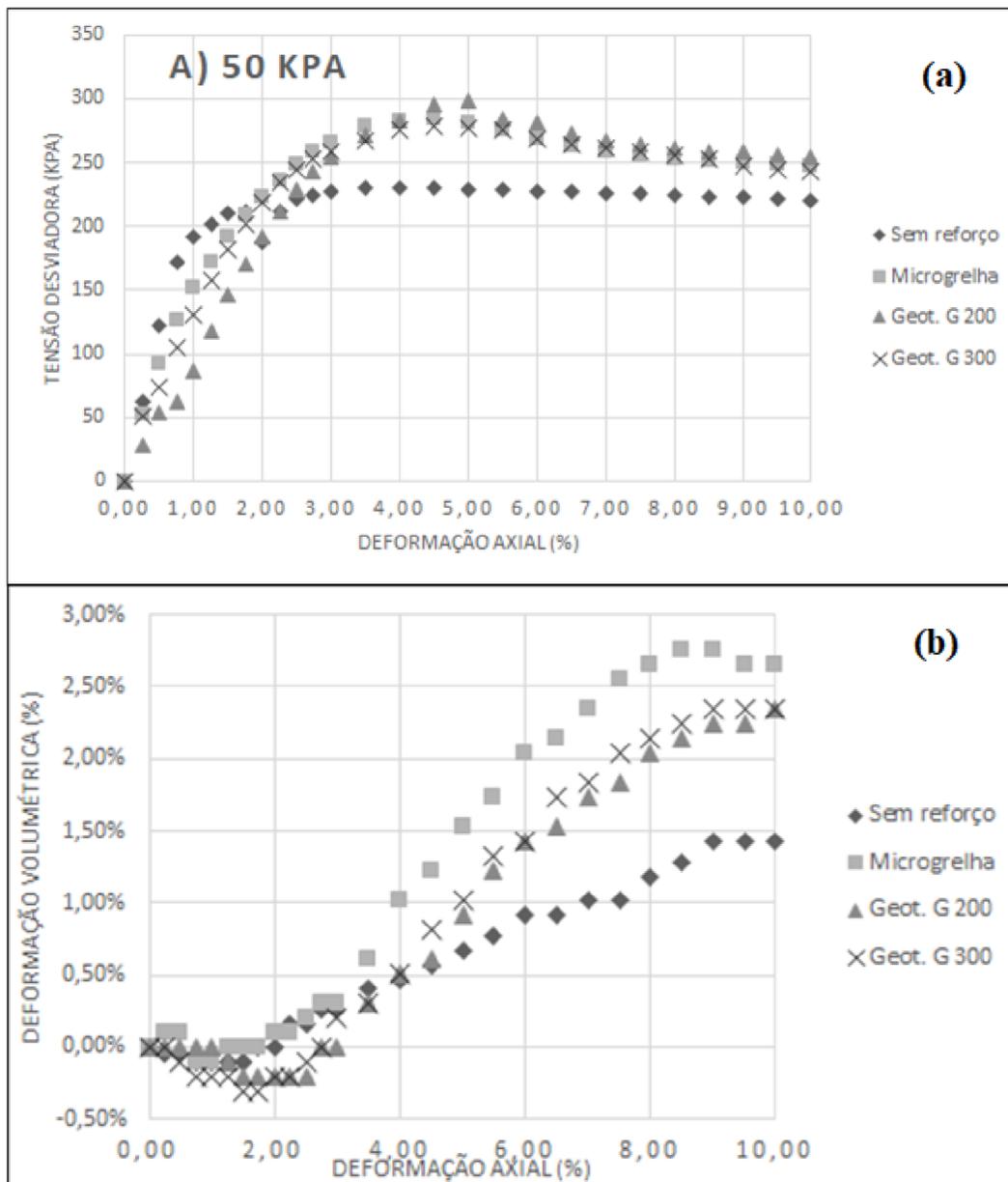
Tabela 4 - Parâmetros de resistência efetiva para o solo sem e com reforço

Geossintético de reforço	Número de camadas	Coesão efet. (kPa)	Âng. atrito efet. (°)
Microgrelha	0	16,9	37,8
	1	31,0	39,5
	2	51,4	41,8
	3	85,0	46,8

Fonte: Próprio autor (2022).

A fim de comparar o comportamento mecânico do solo arenoso reforçado com microgrelhas com outros geossintéticos, foram realizados ensaios triaxiais no mesmo solo reforçado com uma camada de geotêxtil não-tecido com duas diferentes gramaturas: 200 g/cm<sup>3</sup> e 300 g/cm<sup>3</sup>. O Gráfico 30 apresenta em a) tensão desvio x deformação axial e b) tensão desvio x deformação volumétrica para a tensão confinante de 50 kPa, onde se evidencia ruptura para todos os corpos de prova, com a formação de pico para as amostras de solo reforçados com microgrelha e com geotêxtil não-tecido. Percebe-se uma semelhança nos comportamentos dos corpos de prova reforçados, que apresentaram curvas tensão x deformação quase coincidentes. As deformações axiais na ruptura foram semelhantes entre as espécies reforçadas e foram de 5,0%. As rupturas ocorreram com aumento de volume, como pode ser visualizado no Gráfico 30.

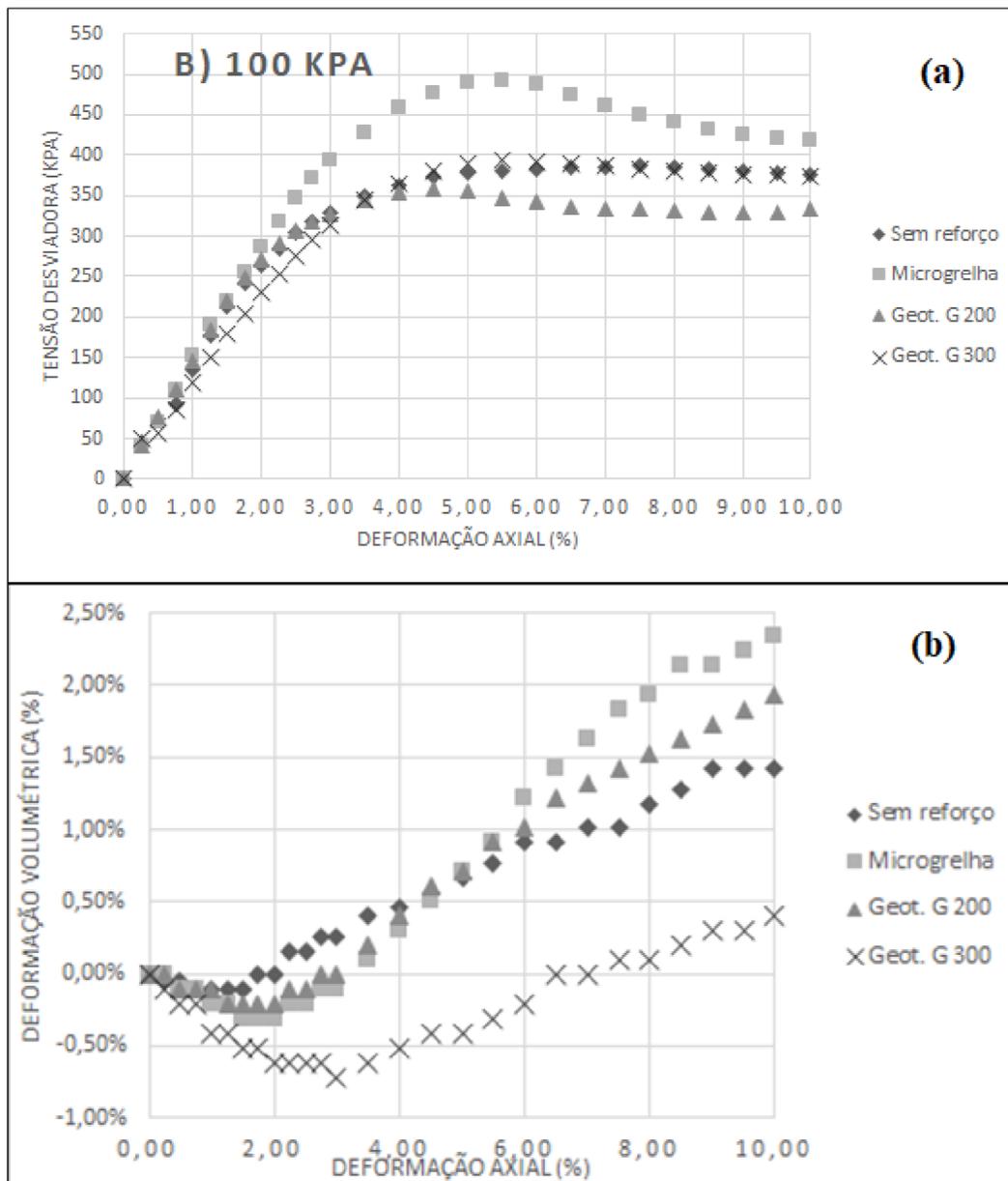
Gráfico 30 - Curvas para o solo sem reforço e com reforço de microgelha e geotêxtil para a tensão confinante de 50 kPa: a) Tensão desvio  $\times$  Deformação axial; b) Deformação axial  $\times$  Deformação volumétrica



Fonte: Próprio autor (2022).

O Gráfico 31 apresenta em a) tensão desvio  $\times$  deformação axial e b) tensão desvio  $\times$  deformação volumétrica para a tensão confinante de 100 kPa. Para todos os solos reforçados houve a formação de pico, mais pronunciado para as espécies reforçadas com microgrelha e com geotêxtil não-tecido de gramatura 200. A espécie reforçada com microgrelha apresentou maior tensão desvio máxima com diferença de 100 kPa para o corpo de prova reforçado com geotêxtil não-tecido de gramatura 300. As deformações axiais de ruptura mantiveram-se próximas com valor de 5,5%, para todas as amostras, comportamento similar ao observado com a tensão confinante de 50 kPa. Os corpos de prova apresentaram aumento de volume na ruptura, exceto a espécie reforçada com geotêxtil não-tecido 300 g/m<sup>2</sup> que apresentou contração na ruptura.

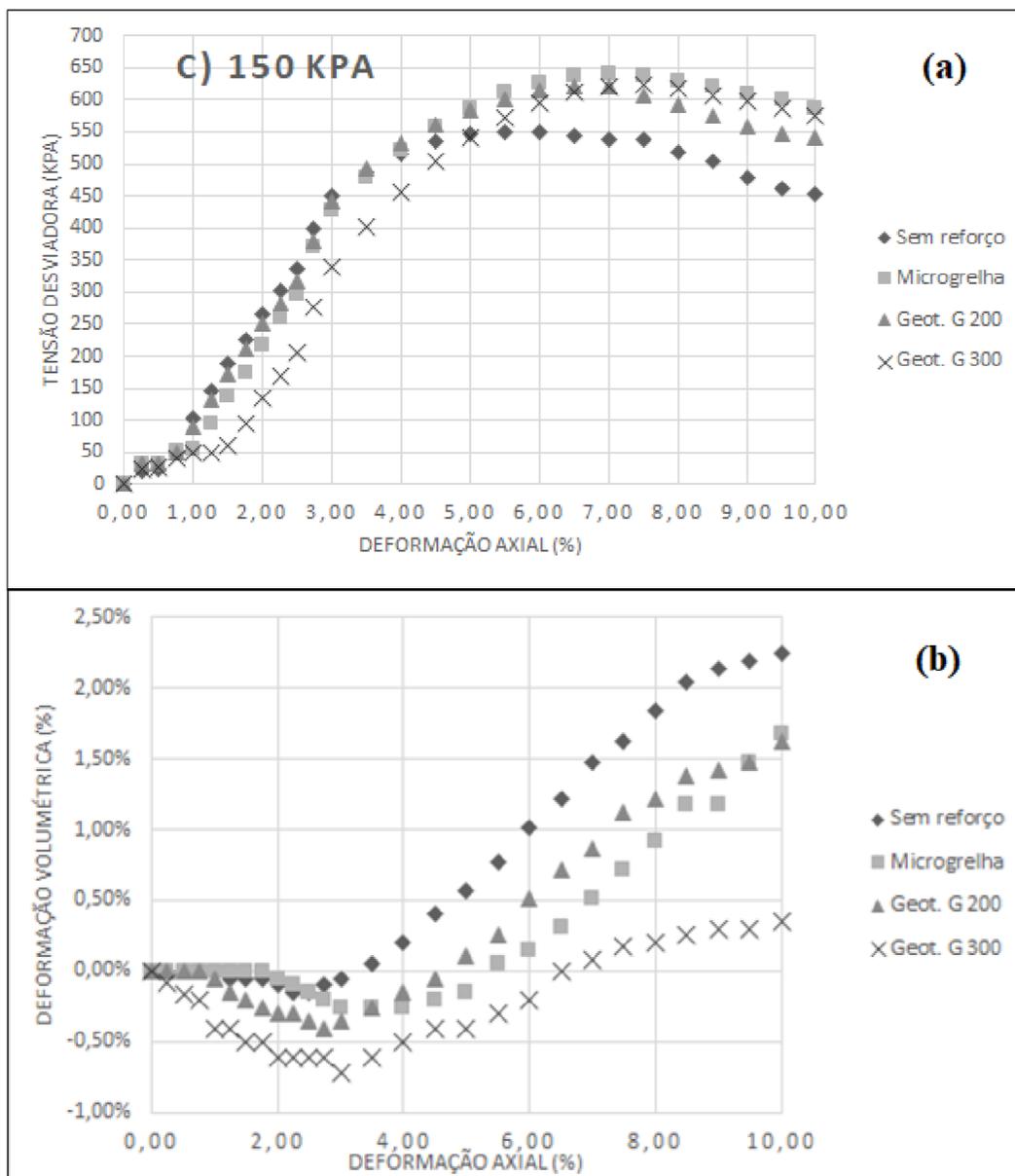
Gráfico 31 - Curvas para o solo sem reforço e com reforço de microgrelha e geotêxtil para a tensão confinante de 100 kPa: a) Tensão desvio  $\times$  Deformação axial; b) Deformação axial  $\times$  Deformação volumétrica



Fonte: Próprio autor (2022).

O Gráfico 32 apresenta em a) tensão desvio  $x$  deformação axial e b) tensão desvio  $x$  deformação volumétrica para a tensão confinante de 150 kPa. Houve a formação de um pico na ruptura conforme se pode observar nas curvas. Nota-se uma similaridade no formato das curvas  $x$  tensões deformações, com o solo sem reforço rompendo com tensões desviadores mais baixas. As deformações axiais de ruptura dos corpos de provas foram próximas. A amostra de solo reforçada com microgrelha e com geotêxtil não-tecido, de 300 de gramatura, romperam com 7,5% de deformação axial e a da amostra reforçada com geotêxtil não-tecido, de 200 de gramatura, rompeu com 6,5% de deformação. O máximo valor de tensão desvio é alcançado pela microgrelha com pouca diferença de valor para as outras espécies reforçadas. Todas as espécies rompem com aumento de volume.

Gráfico 32 - Curvas para o solo sem reforço e com reforço de microgelha e geotêxtil para a tensão confinante de 100 kPa: a) Tensão desvio  $\times$  Deformação axial; b) Deformação axial  $\times$  Deformação volumétrica



Fonte: Próprio autor (2022).

A Figura 25 mostra o aspecto visual dos dois corpos de provas reforçados com os geotêxteis não-tecidos usados, após o ensaio, para a tensão de confinamento de 100 kPa. Notam-se semelhanças nas deformações de ambas as espécies, em que se observa um abaulamento das camadas superiores e inferiores, evidenciando mecanismos iguais de mobilização de resistência. Ao visualizar as camadas de reforço, na Figura 26, não se percebeu rasgos nem deformações permanentes, o que pode sugerir que o mecanismo mobilizador de resistência do compósito foi o mesmo observado na microgrealha.

Figura 25 - Corpos de prova reforçados com geotêxtil não-tecido após a ruptura para a tensão confinante de 100 kPa: (a) Geot. Não-tecido de 300 g/m<sup>2</sup>; (b) Geot. Não-tecido de 200 g/m<sup>2</sup>

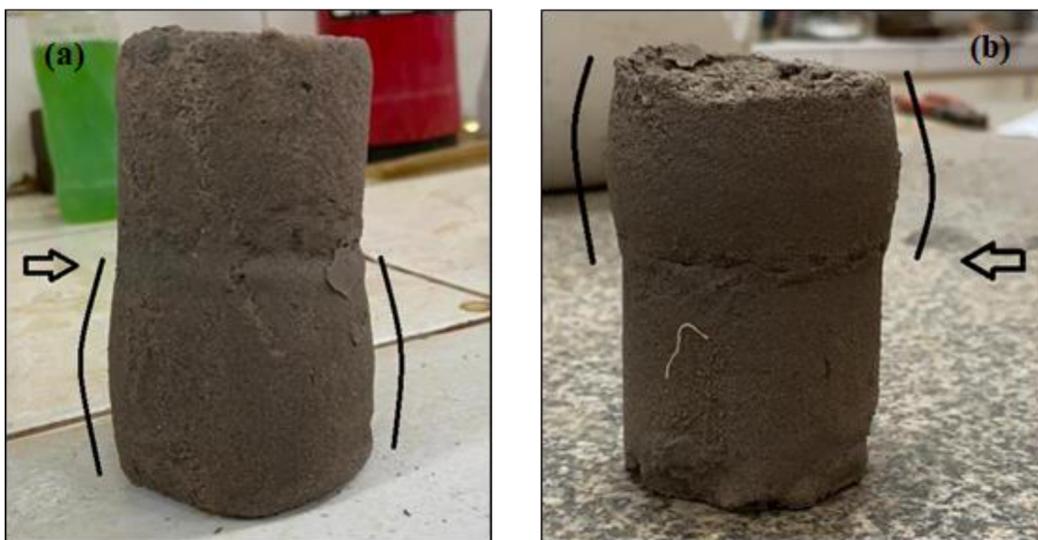


Figura 26 - Reforço de geotêxtil não-tecido após a ruptura: (a) Geot. Não-tecido de 300 g/m<sup>2</sup>; (b) Geot. Não-tecido de 200 g/m<sup>2</sup>



Com relação à deformabilidade das amostras do solo reforçado com os geotêxteis, os valores de módulo secante não apresentaram grandes diferenças, com a microgrelha apresentando uma maior rigidez para as tensões confinantes de 50 kPa e 100 kPa. Para a tensão confinante de 150 kPa a espécie reforçada com o geotêxtil de 200 g/m<sup>2</sup> apresentou maior rigidez.

A Tabela 5 mostra os parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivo para as amostras reforçadas com microgrelha e com os geotêxteis. Nota-se pequena diferença entre os valores para os geotêxteis de gramatura 200 e 300. Os parâmetros atingidos pela microgrelha foram melhores, com diferença de 11,9 kPa na coesão e 1,0° no ângulo de atrito, o que representa um aumento de 62% na coesão e 2,5% no ângulo de atrito. A maior diferença entre as espécies está no valor da coesão efetiva.

Tabela 5 - Parâmetros de resistência efetiva para o solo reforçado com os diferentes geossintéticos

Geossintético de reforço	Número de camadas	Coesão efet. (kPa)	Âng.atrito efet. (°)
Microgrelha	1	31	39,5
Geotêxtil não-tecido 200 g/cm <sup>2</sup>	1	19,1	37
Geotêxtil não-tecido 300 g/cm <sup>2</sup>	1	17,5	38,5

Fonte: Próprio autor (2022).

Os resultados de ensaios triaxiais reforçados com microgrelhas realizados por Unnikrishman (2002) mostram que a microgrelha apresentou tensão desvio maior de ruptura quando comparado com os geotêxteis. Feng *et al.* (2018) percebeu que a geogrelha usada em seus estudos, que possuía tensão máxima de tração similar à microgrelha, apresentou o mesmo comportamento obtido por Unnikrishman (2002). Conclusões tais que se assemelham as encontradas nesta pesquisa, dando indícios de validade acerca da efetividade da microgrelha para uso de reforço de solos.

Segundo Goodzard *et al.* (2019), na literatura é mais comum a realização de ensaios Haeri *et al.* (2000) concluíram que o efeito do tamanho da amostra para solos reforçados é significativo com as amostras ensaiadas em escalas menores tendo maiores tensão desvio e deformação axial na ruptura e menos perdas de resistência pós-pico. Ensaios em amostras reforçadas com geotêxtil revelam um aumento de até 7% na tensão desvio máxima ao comparar corpos de provas com 3,8 cm x 7,6 cm e 10cm x 20 cm. Portanto, é necessário avaliar os resultados em corpos de provas reforçados com microgrelha em grande escala para analisar esta variável.

Castro (2020) analisou através de ensaios triaxiais tipo CID saturados solo arenoso, extraído na mesma localização desta pesquisa, reforçado com fibras de polipropileno os valores dos parâmetros de resistência obtidos. Para a proporção em massa de fibra por solo de 0,25% observou-se um aumento de 10% da coesão efetiva e para a proporção em massa de fibra por solo de 1,25% observou-se um aumento de 7% do ângulo de atrito efetivo. Por estes indícios, nota-se que o aumento da coesão efetiva obtida pela microgrelha foi mais significativo para qualquer configuração de camada.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com camadas de microgrelhas através de ensaios triaxiais do tipo adensado e drenado, com dimensões 5 cm x 10 cm. Os resultados indicaram um aumento, na ruptura, da tensão desviadora e da deformação axial, com o aumento do número de reforços. Ensaios triaxiais foram realizados com tensões de confinamento de 50, 100 e 150 kPa e a ruptura dos corpos de prova ocorreu com aumento de volume. Para a tensão de confinamento de 200 kPa não houve ruptura em amostras reforçadas. Os resultados indicaram que a inserção de mais camadas de reforço aumentou as tensões máximas de desvio e que essa diferença é mais proeminente para tensões de confinamento mais baixas, resultado semelhante ao encontrado por Sieira (2003). Os ensaios triaxiais CD realizados com a tensão confinante de 200 kPa não alcançaram ruptura até a deformação axial de 10% que representava o limite do equipamento e por isso, não foram utilizados para traçar a envoltória de ruptura dos solos reforçados.

Após os ensaios, inspeções visuais das camadas da microgrelha e do geotêxtil não-tecido mostraram que não houve ruptura nem deformações permanentes aparentes, sugerindo que o principal mecanismo mobilizador de resistência foi o atrito entre as interfaces do reforço e do solo. Para maiores tensões de confinamento observou-se uma menor deformação volumétrica das amostras.

Verificou-se que o aumento do número de camadas acarretou um aumento do módulo de deformabilidade secante das espécies, tornando-as mais rígidas. Não foram verificadas grandes diferenças neste parâmetro para as espécies reforçadas com uma camada de microgrelha e ou com solo reforçado com uma camada de geotêxteis não-tecidos, de 200 e de 300 gramatura.

Para a microgrelha a inserção de mais camadas de reforço provocou aumento dos parâmetros de resistência efetivos (ângulo de atrito e coesão), tendo o corpo de prova reforçado com três camadas apresentando os maiores valores, obtendo um aumento de 24% no ângulo de atrito e de 400% na coesão ao comparado com o solo sem reforço.

Quando comparado os resultados do solo reforçado com uma camada, de microgrelha e de geotêxteis não-tecidos, com gramaturas de 200 g/m<sup>2</sup> e 300 g/m<sup>2</sup>, observou-se que as máximas tensões desvios foram obtidas no solo reforçado com microgrelha para as tensões confinantes de 100 kPa e 150 kPa. Os parâmetros de resistência obtidos no solo reforçado com uma camada de microgrelha foram superiores ao solo reforçado com geotêxtil, apresentando ângulo de atrito 2,5% e coesão de 62% superiores ao solo reforçado com geotêxtil.

O aumento dos parâmetros de resistência do solo arenoso reforçado com microgrelhas foi significativo, quando comparado com o aumento dos mesmos observados em solos reforçados com outros tipos de geossintéticos (geotêxteis e geogrelhas) obtidos em ensaios triaxiais apresentados por diferentes autores na literatura.

Os resultados obtidos demonstram a capacidade de uso das microgrelhas em reforço de solos, sendo uma alternativa válida e com potencial de ser até melhor que geossintéticos de reforço já utilizados em larga escala pela engenharia geotécnica.

### **6.1. Sugestões para futuros trabalhos**

Sugere-se para trabalhos futuros a realização de ensaios triaxiais com amostras reforçadas com microgrelha que estejam não saturados, para avaliação dos ganhos de resistência do solo e do comportamento mecânico quando o solo arenoso está reforçado e não saturado, estabelecendo qual proporção de ganho de resistência está relacionada ao reforço e qual está relacionado com as forças de coesão aparente.

Propõe-se um estudo realizado em equipamento de grande escala para avaliação dos ganhos de resistência provocados pelas dimensões das amostras, assim como ensaios em equipamentos que suportem tensões confinantes maiores.

Sugere-se também a avaliação prática do uso da microgrelha, por exemplo, em ensaios com prova de carga para verificação de capacidade de carga e deformabilidade de fundações rasas, para comparação de resultados em laboratório e reais. Para estudos de melhoramento de bases e sub-bases para pavimentação, sugere-se também a realização de ensaios CBR e triaxial dinâmico em amostras reforçadas para tal avaliação. Assim como sugere-se a avaliação em ensaios triaxiais de grande escala para análise do fator de escala.

## REFERÊNCIAS

- AL-OMARI, R. R. *et al.* Shear strength of geomesh reinforced clay. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 325-336, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(89\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0266-1144(89)90015-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0266114489900150>. Acesso em: 03 mar. 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **ASTM D4439**: Standart Terminology for Geosynthetics. West Conshohocken, USA: [s. n.], 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **ASTM D5321**: Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method. West Conshohocken, USA: [s. n.], 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **ASTM D7181**: Standart Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. West Conshohocken, USA: [s. n.], 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10.318**: Geossintéticos - Termos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16097**: Solo - Determinação do teor de umidade - Métodos expeditos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BROMS, B.; CHANDRASEKARAN, B.; WONG, K. S. B. Strength of fabric reinforced sand under axisymmetric loading. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 293-310, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(91\)90060-A](https://doi.org/10.1016/0266-1144(91)90060-A). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/026611449190060A>. Acesso em: 03 mar. 2022.
- CARLOS, D. M.; LOPES, M. P.; LOPES, M. L. Effect of geosynthetic reinforcement inclusion on the parameters and bearing ratio of a fine soil. **Elsevier**, [s. l.], v. 143, p.34-41, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581630443X>. Acesso em: 03 mar. 2022.
- CARLOS, D. M. **Análise experimental e numérica do comportamento de estruturas de solo reforçado com geossintéticos**: solo granular *versus* fino. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2016.

COMITÊ TÉCNICO DE GEOSSINTÉTICOS. **Casos de obra:** aterro sobre solo mole. São Paulo: CTG ABINT, 2021. Disponível em: <https://geossinteticos.org.br/casos-de-obras/obra-24-aterro-sobre-solo-mole-11>. Acesso em: 24 fev. 2022.

CASTRO, C. L. **Comportamento Hidromecânico de solos reforçados com fibras considerando a condição não saturada.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

CHEN, X.; ZHANG, J.; LI, Z. Shear behaviour of a geogrid-reinforced coarse-grained soil based on large-scale triaxial tests. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 42, n. 4, p.312-328, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.05.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114414000417>. Acesso em: 03 mar. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME-093:** Solos - Determinação da Densidade Real. Brasília: DNER, 1994.

EHRlich, M.; BECKER, L. **Muros e Taludes de Solo Reforçado.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

FENG, G. Y. et al. Influence of geotextil e type on strength and failure behavior of geotextiles reinforced desert sand based on Mohr-Coulomb criterion. **IOPSCIENCE**, [s. l.], v. 6, n. 1, 2018.

GALL, M. Investigations on sand reinforced with different geosynthetics. **Geotechnical Testing Journal**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 133-150, 2006.

GOODARZI S.; HABIB S. Strength enhancement of geotextile-reinforced carbonate sand. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 47, n. 2, p. 128-139, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.12.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114418301122>. Acesso em: 03 mar. 2022.

HAERI, S. Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 18, n. 6, p. 385-402, 2020 DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(00\)00005-4](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(00)00005-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114400000054>. Acesso em: 03 mar. 2022.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing.** England: Jonh Wiley & Sons Ltd., 1998.

HUESCKER. **Catálogo de produtos.** São Paulo: [s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.https://www.huesker.com.br/geossinteticos/produtos/>. Acesso em: 07 fev. 2022.

INGOLD, T. S. Geotextiles: Spectification and Testing. Ground Engineering. Journal Geotechnical Engineering. **Journal of ASCE**, [s. l.], v. 6, n. 109, p. 45-51, 1983.

KOERNER, R. **Designing with Geosynthetics.** London: Pearson Education, 1998.

LATHA, G. M.; VIDYA, S.; MURTHY, S. Effects of reinforcement form on the behavior of geosynthetic reinforced sand. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 23-32, 2007. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2006.09.002. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-1cac93d2-51f5-3c80-9025-871b6d1ffe2d>. Acesso em: 03 mar. 2022.

LESHCHINSKY B.; EVANS T.; VESPER J. Microgrids inclusions to increase the strength and stiffness of sand. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 170-177, 2015. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2015.08.003. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/281463428\\_Microgrids\\_Inclusions\\_to\\_Increase\\_the\\_Strength\\_and\\_Stiffness\\_of\\_Sand](https://www.researchgate.net/publication/281463428_Microgrids_Inclusions_to_Increase_the_Strength_and_Stiffness_of_Sand). Acesso em: 03 mar. 2022.

MACCAFERRI. **Catálogo de especificações técnicas**. São Paulo: Maccaferri do Brasil Ltda, 2021. Disponível em: <https://www.maccaferri.com/br/documentos/especificacoes-tecnicas/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

MITCHELL, J. K. Working stress design method for reinforced soil walls. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, n. 4, p. 625-645, 1987.

PALMEIRAS, E. M. **Geossintéticos em geotécnica e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

ORTIGÃO, J. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. Rio de Janeiro: Terratek, 2007.

ROCHA, P. Aterros de conquista com uso de microgrelhas tecidas. **Fundações & Obras Geotécnicas**, São Paulo, v. 6, n. 69, p. 69-71, 2016.

SAEZ, J. A. Caracterización geomecánica de geotextiles. *In*: CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS. **Curso sobre técnicas generales de refuerzo del terreno y sus complicaciones**. Madri: CEDEX, 1997. p. 1-29.

SIEIRA, A. C. C. F. **Estudo experimental dos mecanismos de interação solo-geogrelha**. 2003. Tese (Doutorado em geotécnica) – Faculdade Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SKEMPTON, A. The pore-pressure coefficients a and b. **Géotechnique**, [s. l.], v. 4, n. 4, p.143-147, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1954.4.4.143>. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/geot.1954.4.4.143>. Acesso em: 03 mar. 2022.

SKUODIS, S. Dirgeliene, n.; Medzvieckas, j. Using triaxial tests to determine the shearing strength of geogrid-reinforced sand. **Studia Geotechnica et Mechanica**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 341-354, 2020. DOI: 10.2478/sgem-2020-0005. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/344510101\\_Using\\_Triaxial\\_Tests\\_to\\_Determine\\_the\\_Shearing\\_Strength\\_of\\_Geogrid-Reinforced\\_Sand](https://www.researchgate.net/publication/344510101_Using_Triaxial_Tests_to_Determine_the_Shearing_Strength_of_Geogrid-Reinforced_Sand). Acesso em: 03 mar. 2022.

KOERNER, R. M.; SOONG, T. Y. The Evolution of Geosynthetics. **Journal of ASCE**, [s. l.], v. 67, n. 7, p. 62-64, 1997.

UNNIKRISHNAN, N. Behaviour of reinforced Clay under monotonic and cyclic loading. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 117-133. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(02\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(02)00003-1). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114402000031>. Acesso em: 03 mar. 2022.

VELLOSO, D.; LOPES, F. **Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VERMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Blucher, 2004.

WANG, J. *et al.* Triaxial shear behavior of a gravelly sand with different forms of reinforcement. **Advances in Civil Engineering**, [s. l.], v. 2021, p. 1-11, 2021. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8891400>. Disponível em: <https://downloads.hindawi.com/journals/ace/2021/8891400.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2021.

WHEELER, P. Earth bound: reinforced soil. *In*: WHEELER, P. **Ground engineering, reinforcement soil supplement**. London: [s. n.], 1996. p. 3-5.

YANG, K. *et al.* Behavior of geotextile-reinforced clay in consolidated-undrained tests: reinterpretation of porewater pressure parameters. **Journal of Geo Engineering**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 45-57, 2016.

YI, F.; DU, C. Triaxial testing of geosynthetics reinforced tailings with different reinforced layers. **Materials**, [s. n.], v. 13, n. 8, p. 1943, 2020.

ZHANG, M. X.; JAVADI, A.; MIN, X. Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions. **Geotextiles and Geomembranes**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 201-209, 2006. DOI: [10.1016/j.geotexmem.2006.03.004](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.03.004). Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-78e73fd9-0c18-3dfb-88f5-4d0464c6ca5f>. Acesso em: 03 mar. 2021.

ZHAO, Y. *et al.* Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Soil under Triaxial Compression and Parameter Determination Based on the Duncan-Chang Model. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 10, n. 24, p. 9043, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10249043>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/24/9043>. Acesso em: 03 mar. 2022.

ZORNBERG, J. G.; CHRISTOPHER, B. R. **Chapter 37: Geosynthetics**. 2nd ed. Florida: Taylor & Francis Group, 2007.