

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

DESEMPENHO DE GEOCÉLULAS PREENCHIDAS  
COM RESÍDUOS DE PEDRAS PRECIOSAS PARA  
REFORÇO DE SOLO

Daira Sibeles de Oliveira

Passo Fundo

2020



**DAIRA SIBELE DE OLIVEIRA**

**DESEMPENHO DE GEOCÉLULAS PREENCHIDAS COM  
RESÍDUOS DE PEDRAS PRECIOSAS PARA REFORÇO DE  
SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob orientação do Prof. Dr. Márcio Felipe Floss.

Passo Fundo

2020

CIP – Catalogação na Publicação

---

O48d Oliveira, Daira Sibeles de

Desempenho de geocélulas preenchidas com resíduos de pedras preciosas para reforço de solo [recurso eletrônico] / Daira Sibeles de Oliveira. – 2020.

3.6 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Felipe Floss.

Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, 2020.

1. Solos – Comportamento. 2. Pedras preciosas.  
3. Geocélulas. I. Floss, Márcio Felipe, orientador. II. Título.

CDU: 624

---

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

Universidade de Passo Fundo  
Faculdade de Engenharia e Arquitetura  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

A Comissão Examinadora abaixo aprova a dissertação de mestrado intitulada “Desempenho de geocélulas preenchidas com resíduo de pedras preciosas para reforço de solo”, elaborada por Daira Sibeles de Oliveira, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Aprovada em 29 de Abril de 2020.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Felipe Floss  
Orientador Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Francisco Dallarosa  
Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto  
Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Ennio Marques Palmeira  
Universidade de Brasília

Passo Fundo  
2020

## RESUMO

O crescimento populacional se intensificou, gerando uma grande demanda por obras de estruturas esbeltas, onde muitas vezes a construção destas obras podem transpor regiões com solo geotecnicamente inviável, necessitando assim a inserção de técnicas de melhoramento para obtenção de uma maior capacidade de carga. O emprego de geocélulas é uma alternativa para conferir maior resistência a fundações, proteção e controle de taludes e erosão. A geocélula usada como método de reforço melhora a capacidade do solo devido aos efeitos de confinamento, membrana e do efeito laje, além de contar com maior eficiência no efeito confinamento do solo. O formato tridimensional da célula permite a utilização de diferentes materiais para o preenchimento das células. Estudos realizados indicam que é possível a utilização do resíduo de mineração em diversos segmentos da engenharia civil. Visando sustentabilidade, aliada a viabilidade técnica, observou-se a oportunidade de empregar o resíduo de beneficiamento de pedras preciosas, proveniente do sul do Brasil, como preenchimento das geocélulas. Neste contexto o trabalho abordou uma alternativa técnica mitigadora do problema de capacidade de carga dos solos e reutilização de resíduos. O programa experimental proposto analisou o desempenho mecânico da geocélula, por meio de ensaios de placa, investigando o aumento na capacidade de carga e recalques promovidos em um solo arenoso denso. Os testes de placa foram realizados para amostras de solo reforçado com geocélulas de 7,5 cm e 20 cm de altura para analisar a influência desse parâmetro na resistência do solo. Também foram ensaiadas amostras de resíduo sem geocélula, sobrejacente à camada de solo nas mesmas alturas das geocélulas, para verificação do real aumento na resistência do solo promovida pelo sistema de confinamento celular. Os resultados mostraram que os mecanismos atuam de forma conjunta e são inter-relacionados. Os ensaios reforçados com geocélula de 7,5cm de altura mostraram-se mais eficientes no aumento de capacidade de carga, e para os ensaios reforçados com geocélula de 20cm de altura os resultados observados foram minimizações dos recalques.

Palavras-chave: ensaios de placa, geocélula, geossintéticos de reforço, melhoramento de solo.

## ABSTRACT

The population growth has intensified, generating a great demand for works with slender structures, where many times, the construction of these works can cross regions with geotechnically unviable soil, thus requiring the insertion of improvement techniques to obtain a greater load capacity. The use of geocells is an alternative to provide greater resistance to foundations, protection and control of slopes and erosion. The geocell used as a reinforcement method improves the capacity of the soil due to the confinement, membrane and slab effects, in addition to having greater efficiency in the soil confinement effect. The three-dimensional shape of the cell allows the use of different materials to fill the cells. Studies performed, indicate that it's possible to use mining residue in several segments of civil engineering. With a view to sustainability, combined with technical viability, there was an opportunity to use the waste from the processing of precious stones, coming from the south of Brazil, to fill the geocells. In this context, the work approached a technical alternative to mitigate the problem of soil load capacity and waste reuse. The proposed experimental program analyzed the mechanical performance of the geocell, through plate tests, investigating the increase in the load capacity and settlements promoted in a dense sandy soil. The plaque tests were performed for soil samples reinforced with 7.5 cm and 20 cm height geocells to analyze the influence of this parameter on soil resistance. Samples of residue without geocell were also tested, overlying the soil layer at the same heights of the geocells, to verify the real increase in soil resistance promoted by the cell confinement system. The results showed that the mechanisms work together and are interrelated. The tests reinforced with a 7.5 cm high geocell proved to be more efficient in increasing the load capacity, and for the tests reinforced with a 20 cm high geocell, the observed results were minimization of the settlements.

Keywords: plate tests, geocell, reinforcement geosynthetics, soil improvement.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geocélula de a) PE; b) PP;.....	17
Figura 2: Geocélula de PEAD a) com parede lisa ; b)com parede perfurada.....	17
Figura 3: Formatos padrão das geocélulas. ....	17
Figura 4: Mecanismo do efeito de confinamento. ....	20
Figura 5: Mecanismo do efeito da distribuição de tensões.....	20
Figura 6: Mecanismo do efeito membrana. ....	21
Figura 7: Parâmetros geométricos de um sistema de reforço por geocélula. ....	22
Figura 8: Mapa gemológico da região sul do Brasil.....	28
Figura 9: Pilha de rejeitos de Pedras Preciosas em uma empresa de Soledade/RS.....	29
Figura 10: Organograma das fases do estudo.....	35
Figura 11– Amostra das geocélulas a) geocélula (altura 7,5cm) b) geocélula (altura 20cm). ..	36
Figura 12: Amostra do resíduo do beneficiamento de pedras preciosas .....	37
Figura 13: Curva granulométrica do resíduo peneirado. ....	38
Figura 14: Preparação de amostra para o ensaio MEV. ....	39
Figura 15: Dimensões dos grãos de resíduo analisados em ensaio MEV. ....	40
Figura 16: Ensaio de difração de raio X para o resíduo de pedras preciosas. ....	41
Figura 17: Amostra da areia de Osório.....	43
Figura 18: Curva granulométrica da areia de Osório. ....	43
Figura 19: Esquematização da configuração dos ensaios de placa. ....	45
Figura 20: Montagem das amostras.....	46
Figura 21: Montagem da amostra com geocélula.....	47
Figura 22: Montagem completa do ensaio. ....	48
Figura 23: Montagem completa do ensaio. ....	48
Figura 24: Curva tensão-deslocamento (Ensaio SB1 e SB2).....	50
Figura 25: Variações dos deslocamentos normalizados da superfície com o recalque da placa (Ensaio SB1 e SB2).....	51
Figura 26: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SB1). .....	52
Figura 27: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SB2) .....	52
Figura 28: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SB1)	53
Figura 29: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SB2)	53

Figura 30: Mecanismo de ruptura dos ensaios com solo branco (Ensaio SB1) .....	54
Figura 31: Mecanismo de ruptura dos ensaios com solo branco (Ensaio SB1 e SB2) .....	54
Figura 32: Curva tensão- deslocamento relativo (Ensaio SR1 7,5 e SR2 7,5).....	55
Figura 33: Variações dos deslocamentos normalizados da superfície com o recalque da placa .....	56
Figura 34: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SR1 7,5).....	56
Figura 35: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SR2 7,5).....	57
Figura 36: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SR1 7,5) .....	57
Figura 37: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SR2 7,5) .....	58
Figura 38: Curva tensão-deslocamento relativo (Ensaio SR1 20 e SR2 20).....	59
Figura 39: Variação do deslocamento normalizado da superfície com o recalque da placa .....	59
Figura 40: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SR1 20).....	60
Figura 41: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SR2 20).....	61
Figura 42: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SR1 20). .....	61
Figura 43: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SR2 20). .....	62
Figura 44: Mecanismo de ruptura dos ensaios (a) SR1 7,5, (b) SR1 20. ....	62
Figura 45: Exumação dos ensaios SR1 7,5 e SR1 20.....	63
Figura 46: Curva tensão-deslocamento relativo (Ensaio SG1 7,5 e SG2 7,5) .....	64
Figura 47: Variação do deslocamento normalizado da superfície com o recalque da placa .....	65
Figura 48: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SG1 7,5).....	65
Figura 49: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SG2 7,5).....	66
Figura 50: Deformação ocorrida na geocélula após ruptura do solo (Ensaio SG1 7,5) .....	66
Figura 51: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SG1 7,5). .....	67
Figura 52: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SG2 7,5). .....	67

Figura 53: Curva tensão-deslocamento relativo (Ensaio SG1 20 e SG2 20).....	68
Figura 54: Deformação ocorrida na geocélula após ruptura do solo (Ensaio SG1 20) .....	68
Figura 55: Variação do deslocamento normalizado da superfície com o recalque da placa .....	69
Figura 56: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SG1 20).....	70
Figura 57: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SG2 20).....	70
Figura 58: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SG1 20). .....	71
Figura 59: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SG2 20). .....	71
Figura 60: Mecanismo de ruptura dos ensaios (a) SG1 7,5, (b) SG1 20. ....	72
Figura 61: Exumação das camadas de areia subjacente a camada de resíduo (a) SG1 7,5, (b) SG1 20. ....	73
Figura 62: Curvas tensão-deslocamento relativo dos ensaios SR1 7,5, SR2 7,5, SR1 20 e SR2 20. ....	74
Figura 63: Curvas tensão-deslocamento dos ensaios SG 7,5 e SG 20. ....	74
Figura 64: Curvas tensão-deslocamento relativo dos ensaios SB1, SB2, SR1 7,5, SR2 7,5, SG1 7,5 e SG2 7,5. ....	76
Figura 65: Curvas tensão-deslocamento relativo dos ensaios SB1, SB2, SR1 7,5, SR2 7,5, SG1 7,5 e SG2 7,5. ....	77
Figura 66: Variação dos fatores de melhora da capacidade de carga com o recalque da placa (If) ensaios SG1 7,5 e SG2 7,5. ....	78
Figura 67: Variação dos fatores de melhora da capacidade de carga com o recalque da placa (If) para os ensaios SG1 20 e SG2 20. ....	80
Figura 68: Variações das porcentagens de redução no deslocamento da sapata com a tensão para os ensaios SG1 7,5 e SG2 7,5.....	82
Figura 69: Variações das porcentagens de redução no deslocamento da sapata com a tensão para os ensaios SG1 20 e SG2 20.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos estudos experimentais relacionados a capacidade de suporte pela geocélula submetido ao carregamento estático. ....	25
Tabela 2: Variáveis fixas, controláveis e de resposta no experimento .....	33
Tabela 3: Plano experimental dos ensaios de placa.....	33
Tabela 4: Especificações técnicas das geocélulas. ....	36
Tabela 5: Caracterização geotécnica do resíduo.....	38
Tabela 6: Composição do resíduo. ....	39
Tabela 7: Resultados ensaio Óleos e Graxas extrato solubilizado .....	42
Tabela 8: Resultados ensaio Óleos e Graxas extrato lixiviado.....	42
Tabela 9: Resultados ensaio leitura de absorção atômica para os metais.....	42
Tabela 10: Caracterização geotécnica da areia de Osório. ....	44
Tabela 11: Síntese dos resultados em termos do fator de melhora da capacidade de carga para os ensaios SG1 7,5.....	78
Tabela 12: Síntese dos resultados em termos do fator de melhora da capacidade de carga para os ensaios SG2 7,5.....	79
Tabela 13: Síntese dos resultados em termos do fator de melhora da capacidade de carga para o ensaio SG1 20.....	80
Tabela 14: Síntese dos resultados em termos do fator de melhora da capacidade de carga para o ensaio SG2 20.....	80
Tabela 15: Síntese dos resultados em termos da porcentagem de redução do deslocamento da sapata .....	83
Tabela 16: Síntese dos resultados em termos da porcentagem de redução do deslocamento da sapata .....	83
Tabela 17: Síntese dos resultados em termos da porcentagem de redução do deslocamento da sapata .....	84
Tabela 18: Síntese dos resultados em termos da porcentagem de redução do deslocamento da sapata .....	84

## LEGENDA

$\delta$ : Deslocamento da superfície

$\gamma_s$ : Peso específico real dos grãos

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

b: Largura do reforço

B: Largura do carregamento

$C_c$ : Coeficiente de curvatura

$C_u$ : Coeficiente de uniformidade

d: Abertura da célula

D: Largura do carregamento

$D_{50}$ : Diâmetro médio das partículas

$D_{10}$ : Diâmetro efetivo das partículas

$D_r$ : Densidade relativa

$e_{máx.}$ : Índice de vazios máximo

$e_{mín.}$ : Índice de vazios mínimo

GCE: Geocélula

h: Altura da célula / espessura da camada de reforço

h/d: Fator de forma da geocélula

If: Fator de melhora da capacidade de carga

ISO: International Organization for Standardization

NBR: Norma Brasileira

PE: Polietileno

PEAD: Polietileno de alta densidade

PET: Poliéster

PP: Polipropileno

PRS: Porcentagem de redução no deslocamento da sapata

$\sigma_o$ : Tensão do solo não reforçado

$\sigma_r$ : Tensão do solo reforçado

s: Deslocamento da placa

$S_o$ : Deslocamentos do solo não reforçado

$S_r$ : Deslocamentos do solo reforçado

u: Profundidade de disposição do reforço

w: Teor de umidade

x: Distância do eixo da placa

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	Problema e relevância da pesquisa .....	12
1.2	Objetivo geral .....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	Definições e características das geocélulas .....	15
2.1.1	Definições.....	15
2.1.2	Características das geocélulas .....	15
2.2	Geocélula como material de reforço .....	18
2.2.1	Resistência da camada de geocélula.....	18
2.2.1.1	Efeito do confinamento .....	19
2.2.1.2	Efeito da distribuição das tensões.....	20
2.2.1.3	Efeito membrana.....	21
2.2.2	Fatores que influenciam a performance de reforço de geocélula .....	21
2.2.2.1	Geometria e quantidade das células.....	22
2.2.2.2	Interação solo/geocélula .....	23
2.2.2.3	Aplicações e eficiência das geocélulas .....	24
2.2.2.3.1	Estudos laboratoriais .....	24
2.2.2.3.2	Estudos de campo .....	26
2.2.2.3.3	Casos de obras .....	27
2.3	A indústria e os resíduos de pedras preciosas.....	28
3	METODOLOGIA .....	32
3.1	Planejamento experimental.....	32
3.2	Delineamento da pesquisa.....	33
3.3	Materiais e métodos .....	36
3.3.1	Geocélulas .....	36
	Fonte: Adaptado catálogo Maccaferri (2017). .....	36
3.3.2	Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas .....	37
3.3.3	Solo de base.....	43
3.3.4	Equipamentos para ensaio de placa .....	44
3.3.5	Procedimentos de moldagem das amostras para os Ensaios de Placa.....	46
3.3.5.1	Execução dos ensaios de placa .....	48
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	50
4.1	Considerações iniciais.....	50
4.2	Ensaio solo de referência (ensaio branco).....	50

4.3	Ensaio sem geocélula .....	55
4.3.1	Camada de resíduo com 7,5 cm.....	55
4.3.2	Camada de resíduo com 20 cm.....	58
4.3.3	Mecanismos de ruptura e exumação das camadas (SR 7,5 e SR 20) .....	62
4.4	Ensaio reforçado com geocélula .....	63
4.4.1	Geocélula 7,5 cm .....	63
4.4.2	Geocélula 20 cm .....	67
4.4.3	Mecanismos de ruptura e exumação das camadas (SG 7,5 e SG 20).....	72
4.5	Análise global sobre o desempenho da geocélula.....	73
4.5.1	Influência da altura da geocélula .....	73
4.5.2	Fator de melhora da capacidade de carga (If).....	76
4.5.3	Porcentagem de redução no deslocamento da sapara (PRS). .....	81
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
5.1	Conclusões .....	86
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	88

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Problema e relevância da pesquisa

A descrição do perfil do solo é sempre um aspecto importante para o engenheiro geotécnico. Soluções técnicas que promovam o aumento da capacidade de carga do solo são metas de pesquisas em desenvolvimento na área de estruturas geotécnicas. Construções grandiosas como obras de pavimentação, aterros, fundações e subleitos rodoviários e ferroviários exigem execução em solo que garanta estabilidade e sustentação da estrutura.

Comumente quando o solo apresenta deficiência do ponto de vista de resistência e estabilidade, são utilizados métodos de melhoramento, nos quais podem-se citar a estabilização por processos físico-químicos, compactação mecânica, remoção e substituição do solo. No entanto, estes tipos de soluções podem ser inviáveis por questões econômicas, de tempo ou de execução. O desenvolvimento de técnicas e materiais alternativos nas áreas de Construção Civil e Geotecnia representam uma enorme contribuição ao tema. Para isto, produtos de fácil aplicação, economicamente viáveis e sustentáveis estão tomando amplo espaço no mercado.

Dentre as diversas técnicas e materiais ofertados pela indústria para a melhoria das condições de suporte do solo, pode-se citar o sistema de reforço geossintético. Os geossintéticos são utilizados para cumprir uma série de funções que contribuem significativamente para o bom desempenho dos solos. Um dos materiais desenvolvidos na classe dos geossintéticos são as geocélulas. Avesani Neto (2013) descreve as geocélulas como sendo um produto construído de polímeros com elevada resistência, de estrutura tridimensional aberta, composta por séries de células interligadas, que confinam mecanicamente os materiais nela inseridos aumentando o módulo e a capacidade de suporte dos solos.

Segundo Meneses (2004), as geocélulas foram criadas para reforçar em particular solos granulares, sendo assim, é necessário compreender a resistência ao cisalhamento deste tipo de solo para entender completamente o mecanismo de funcionamento das geocélulas. A eficiência deste método de reforço dependerá da compactação do material de preenchimento.

Para Avesani Neto (2013), o aumento da capacidade de suporte fornecido pela geocélula é função também da espessura do reforço, da sua profundidade, do

carregamento aplicado e do material de preenchimento. Esse preenchimento das células pode ser realizado por meio de solos, vegetação, concreto, materiais primários extraídos do meio ambiente ou resíduos industriais. Em vista disso, Sarsby (2013) relata que resíduos ou subprodutos industriais podem ser potencialmente eficientes, desempenhando funções similares as dos agregados naturais.

Neste contexto, novas formas de utilização de resíduos industriais visam reduzir ao máximo possível, mesmo que em longo prazo, a quantidade destes materiais descartados, aumentando os espaços disponíveis em aterros industriais e nos pátios das empresas geradoras. O uso da geocélula deve ser considerado como uma técnica alternativa de melhoramento do solo, pois sua utilização permite que as células sejam preenchidas com material residual diminuindo o volume de material de origem natural (areias e pedregulhos, por exemplo) a ser extraído e utilizado como aterro, em virtude do aumento de resistência promovido pelo confinamento celular (FAVRETTO, 2018).

Devido a esse cenário, o presente trabalho utilizará o resíduo de beneficiamento de pedras preciosas, oriundos do sul do Brasil, como preenchimento de geocélula empregados sobre um solo arenoso denso, a fim de analisar o desempenho do sistema, através de ensaios de placa.

Tomando como foco a Engenharia Geotécnica pergunta-se: Quando utilizado um sistema de reforço com geocélula, qual é o real aumento da capacidade de carga quando empregado um material residual como preenchimento? Qual a influência que a altura da camada de reforço exerce sobre o conjunto?

As obras de engenharia devem ser projetadas visando minimizar o esgotamento dos recursos naturais, o consumo de energia, a degradação e o impacto ambiental. Os resíduos provenientes do beneficiamento de pedras preciosas, elencados nesta pesquisa, são classificados como cacos de pedra e pedras rolada. Sendo assim, além de minimizar os gastos enfrentados pelas indústrias com o armazenamento destes rejeitos e/ou reduzir o impacto ambiental que possa ocorrer, a utilização deste material como matéria prima para o desenvolvimento de materiais alternativos na área das Engenharias torna-se atrativo.

Como método de reforço de solo, o uso de geocélulas em projetos de infraestrutura está crescendo rapidamente, incluindo obras de controle de erosão, aterros, pavimentos, estruturas de terra e fundações (HEGDE, 2017), porém ainda assim há carência de pesquisas científicas a respeito do uso de materiais alternativos tecnicamente viáveis para o preenchimento das células. Diferentes técnicas têm sido estudadas em

pesquisas anteriores realizados por Baruffi (2016) e Favretto (2018), para o reaproveitamento destes resíduos, alterando a caracterização geotécnica, portanto com o intuito de incorporar este resíduo em atividades da engenharia, o estudo tem continuidade nesta linha de pesquisa. Neste contexto, busca-se contribuir com o entendimento do comportamento mecânico deste conjunto através da análise e comparação dos resultados de tensão e deslocamento relativo obtidos em ensaios de placa laboratoriais.

## **1.2 Objetivo geral**

Esta pesquisa tem como objetivo principal, avaliar o desempenho mecânico de geocélulas preenchidas com resíduos de pedras preciosas oriundos do sul do Brasil, utilizados como alternativa para melhoramento de solos.

### *1.2.1 Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos da pesquisa se delimitarão nos seguintes:

- a) Avaliar o comportamento mecânico de solos reforçados e não reforçados com geocélulas através da relação carga-recalque resultante de ensaios de placa;
- b) Verificar se há influência da altura da camada de reforço na capacidade de carga do solo;
- c) Investigar a variação dos deslocamentos e a influência da inserção da geocélula no ganho de resistência do solo.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Neste capítulo, é apresentado uma revisão da literatura onde inicialmente, é tratado sobre definições e características das geocélulas bem como os principais conceitos e mecanismos relacionados ao emprego do material como técnica de melhoramento de solos. Na sequência, são citados alguns estudos experimentais, de campo e casos de obra onde foram empregadas as geocélulas. Por fim segue uma síntese sobre a utilização de resíduos de pedra preciosas como material alternativo na engenharia civil.

### **2.1 Definições e características das geocélulas**

#### **2.1.1 Definições**

Definido por Avesani Neto (2013) apud Koerner (1994), a geocélula na literatura internacional é “uma caixa composta por tiras rígidas de polímeros habitualmente dispostas verticalmente com formato celular, utilizando um arranjo horizontal (com células na vertical) e preenchidas com solo, de sorte a gerar um confinamento celular capaz de criar um colchão impressionantemente forte e estável”.

A norma ISO 10318-1:2015 classifica a geocélula como um produto de estrutura tridimensional polimérica (sintética ou natural), permeável, em forma de uma colmeia ou estrutura celular similar, produzida a partir de tiras de geossintéticos ligadas entre si. Da mesma forma representando a *International Geosynthetics Society* (IGS), Bathurst (2016) define geocélula (GCE) como sendo produtos tridimensionais em forma de colmeias similares a uma trama ou rede, confeccionadas por tiras de geotêxteis, geogrelhas ou geomembranas interligados por meio de costura ou solda.

#### **2.1.2 Características das geocélulas**

A crescente demanda por construções em solos geotecnicaamente inviáveis tem impulsionado o emprego de geossintéticos, incluindo a geocélula como um dos materiais criados recentemente pela indústria.

O desenvolvimento das geocélulas poliméricas ocorreu, originalmente, na década de 70 por motivações do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Com o objetivo de construir rapidamente estradas e pistas de pouso em solos de baixa capacidade de suporte, esta estrutura celular tornou-se conhecida como “*Sandgrid*”. Desde essa época, diversos centros de pesquisa no mundo se dedicam a estudar essa aplicação, com destaque para a Índia.

A partir disso, as geocélulas foram melhoradas para muitas outras aplicações de estabilização do solo, incluindo a rápida construção de muros fortificados nas zonas de combate do Oriente Médio nos Estados Unidos, começando pela Operação Tempestade no Deserto no início da década de 1990 (GREENFIX, 2016).

Os primeiros testes de um sistema de confinamento incluíam papel revestido com cera. Rea e Mitchell (1978) estudaram o comportamento da base circular apoiada no leito de areia reforçada com geocélula preparada usando o papel. Confeccionadas atualmente com Polietileno (PE), Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Poliéster (PET) e o Polipropileno (PP), unidas por meio de costuras ou soldas ultrassônicas ou por termofusão, esta última utilizada apenas para os materiais do tipo PE e PEAD, de maneira a estruturar no final do processo o aspecto celular umas com as outras (AVESANI NETO, 2013). Ainda de acordo com o mesmo autor, alguns modelos apresentam perfurações nas paredes para permitir o fluxo de água no plano, sendo que para tal são utilizados materiais de preenchimento granular como areia e brita. Após o processo de manufatura, as geocélulas resultarão em um produto com funções de reforço.

Dependendo do fabricante, as geocélulas são disponibilizadas em dimensões variadas (abertura (d), altura (h), relação de forma (h/d). Com o intuito de facilitar o transporte, armazenamento e montagem, este geossintético chega até o consumidor em forma de painéis esbeltos, quando expandidos podem apresentar área em torno de 2,60 x 3,00 m para tamanho mínimo e 2,60 x 6,00 m para as maiores (OBER, 2017). Nas Fig. 1 e 2 são apresentados alguns modelos de geocélulas.

Figura 1: Geocélula de a) PE; b) PP;



a)

b)

Fonte: Avesani Neto, 2013; Lavoie et al, 2016.

Figura 2: Geocélula de PEAD a) com parede lisa ; b)com parede perfurada



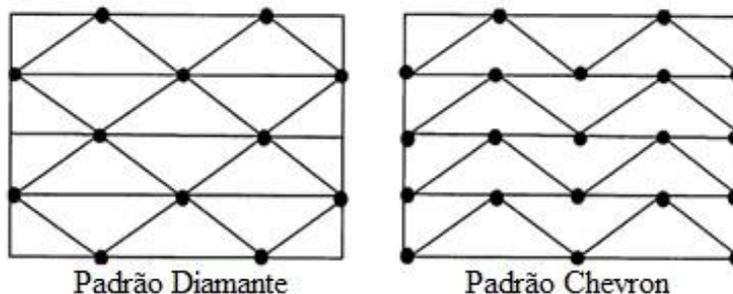
a)

b)

Fonte: TMP Geosynthetics (2017).

Em um estudo proposto por Dash *et al.* (2001) um formato de célula diferente denominado Padrão Chevron é exposto, enquanto que os idênticos (Fig. 1 e 2) são denominados de Padrão Diamante. Esses dois padrões existentes no mercado podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3: Formatos padrão das geocélulas.



Padrão Diamante

Padrão Chevron

Fonte: Adaptado de Dash *et al.* (2001).

Além das geocélulas pré-fabricadas a moldagem *in loco* pode ser realizada em casos especiais, de modo a dimensionar a altura e comprimento desejados, utilizando outro geossintético para a sua montagem, geralmente as geogrelhas.

## **2.2 Geocélula como material de reforço**

Regiões que possuem solos geotécnicamente instáveis, muitas vezes são consideradas áreas impróprias para construções. O desenvolvimento de infraestrutura sempre crescente requer um terreno adequado e competente, que está se tornando escasso no momento. Técnicas de consolidação, tratamento ou melhoramento dos solos são, muitas vezes, imprescindíveis para viabilizar construções sobre estes espaços, visto que elevam a capacidade de carga do solo, minimizando os efeitos de recalques.

Neste âmbito o avanço tecnológico no campo da geotecnia vem mudando esta realidade. Atualmente encontra-se uma gama de opções para minimização destas divergências, variando desde as mais usuais, como a substituição total ou parcial do solo local por um material de maior resistência, até as menos tradicionais, que é o caso da utilização de geossintéticos de reforço. A escolha da estratégia de intervenção mais adequada depende da análise de alguns fatores, como tipo e condições do solo, grau de melhoramento pretendido, nível de tolerância dos recalques, custo previsto e prazo de execução (ALMEIDA e MARQUES, 2013).

O mercado atual demanda inovação de técnicas que sejam mais rápidas, econômicas e ambientalmente amigáveis do que as técnicas tradicionais, isto para diversos segmentos da engenharia, tais como construção de ruas, estradas vicinais, pátios, fundações, subleitos rodoviários e ferroviários. Diante disso, a geocélula torna-se atrativo pois reduz o uso de materiais de fontes primárias, como cascalho e areia, é de fácil aplicação, demandando menor tempo de serviço, conseqüentemente, sustentável e economicamente viável.

Para Avesani Neto e Bueno (2010) a principal característica acrescentada quando do emprego da geocélula é o confinamento realizado por esta no material de preenchimento. Em solos granulares como existe ausência de coesão, este confinamento, irá gerar uma coesão aparente, justificando o aumento de capacidade do composto geocélula-solo (BATHURST e KARPURAPU, 1993).

### **2.2.1 Resistência da camada de geocélula**

Cada mecanismo de resistência pode ser analisado e entendido de forma particular, entretanto são gerados pelo mesmo carregamento aplicado, inter-relacionados atuando de forma conjunta. Além dos três mecanismos (confinamento, distribuição das

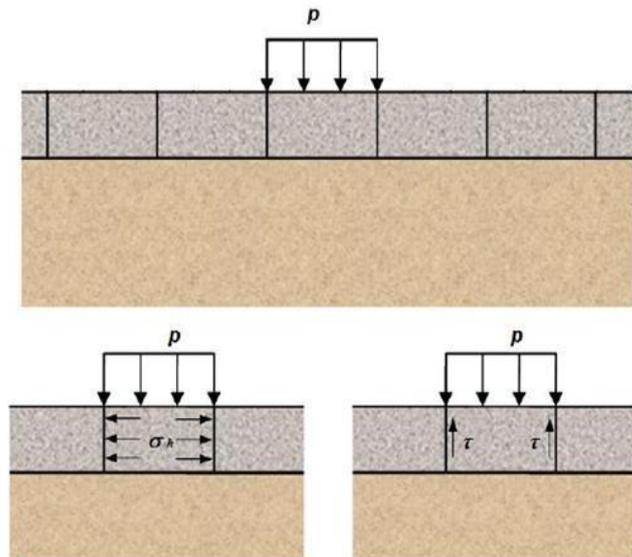
tensões, membrana), Avesani Neto *et al.* (2013) comenta que o uso do geotêxtil como material utilizado para o impedimento do deslocamento do solo de preenchimento, mesmo que de magnitude pequena, tem a capacidade de melhorar a eficiência da camada de reforço.

### 2.2.1.1 Efeito do confinamento

A resistência de uma camada reforçada com geocélula é fundamentada no princípio do confinamento celular. Este princípio consiste em aumentar as tensões confinantes do material de enchimento induzindo a compressão deste material devido ao formato das células. Ocorre o aumento da resistência e dissipação dos carregamentos devido ao aumento das tensões horizontais entre o material e as paredes da célula que são distribuídas e compartilhadas entre as células adjacentes mobilizando as resistências passivas e cisalhantes. O seu funcionamento baseia-se na resistência criada pelo confinamento lateral que um carregamento gera e pelo atrito das paredes das células com o material de enchimento, impedindo a ruptura por cisalhamento e o movimento lateral dos materiais (KOERNER, 1994).

Nesta definição, Avesani Neto *et al.* (2013) ilustra o mecanismo do efeito de confinamento em reforços com geocélula. Quando aplicado um carregamento ( $p$ ) há um aumento da tensão de confinamento e rigidez do material de preenchimento devido a estrutura celular ( $\sigma_h$ ), então surge tensões horizontais entre material/parede, que irão imobilizar o cisalhamento provocado na interface ( $\tau$ ). A Figura 4 ilustra este mecanismo.

Figura 4: Mecanismo do efeito de confinamento.

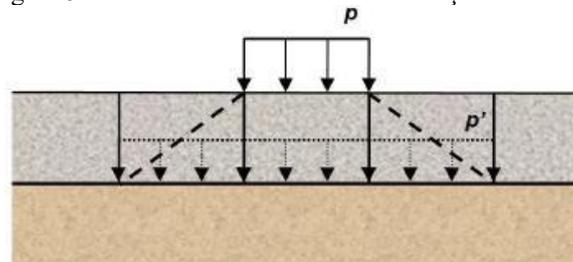


Fonte: Avesani Neto *et al.* (2013).

### 2.2.1.2 Efeito da distribuição das tensões

Similar ao efeito que ocorre em uma laje de concreto semirrígida, o efeito da distribuição de tensões, é devido a estrutura tridimensional das células interconectadas e preenchidas, originando uma estrutura com capacidade para resistir a compressão flexão, tração e cisalhamento. Em função do confinamento existe a dispersão de tensões, o que acarreta na transferência do carregamento para a fundação, conseqüentemente os níveis de tensões e recalque diminuem (AVESANI NETO *et al.*, 2013; BISWAS *et al.*, 2012). A Figura 5 ilustra o efeito deste mecanismo.

Figura 5: Mecanismo do efeito da distribuição de tensões.

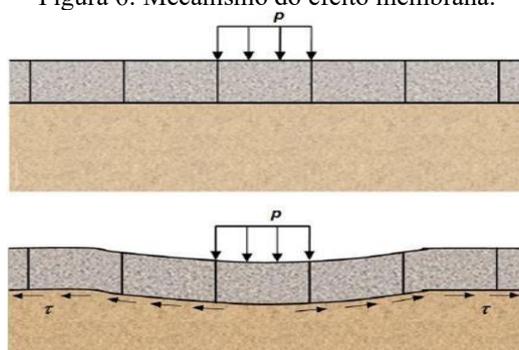


Fonte: Avesani Neto *et al.* (2013).

### 2.2.1.3 Efeito membrana

Uma camada de reforço disposta sobre um material compressível, submetido a carregamento, apresentará uma deflexão correspondente ao deslocamento vertical do solo de fundação. Devido a rigidez e extremidades ancoradas, atuará como uma membrana tensionada de forma côncava, na tentativa de suportar o carregamento, exerce uma força para cima, redistribuindo e transferindo as cargas, mobilizando a resistência ao cisalhamento de interface reforço/solo (AVESANI NETO *et al.*, 2013). Tal efeito está esquematizado na Figura 6.

Figura 6: Mecanismo do efeito membrana.



Fonte: Avesani Neto *et al.* (2013).

### 2.2.2 Fatores que influenciam a performance de reforço de geocélula

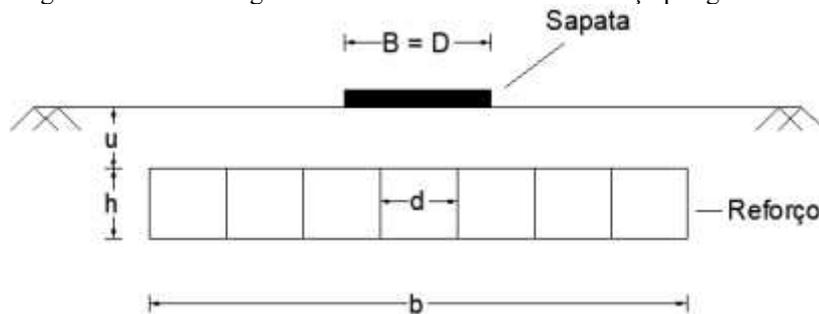
O fator de melhoria depende dos vários parâmetros, tais como, características mecânicas do solo e do reforço, material da geocélula, densidade do solo, geometria do sistema, entre outros. Entretanto, deve ser dada atenção especial aos mecanismos de interação e aos fatores que neles influenciam, uma vez que a eficiência da transferência de tensão do solo para o reforço depende do comportamento do sistema como um todo (LOPES, 2002).

Vários testes de laboratório foram realizados para investigar a eficiência e os fatores que influenciam o reforço com geocélula (Bathurst e Jarrett, 1988; Biswas *et al.*, 2013; Chang *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2013; Dutta e Matos, 2016; Indraratna *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2016).

Em um estudo experimental, Pokharel *et al.* (2010) investigou os fatores que influenciam no comportamento das bases reforçadas com geocélulas. Esses fatores são

geometria da célula e a qualidade dos materiais de preenchimento. Favretto (2018) descreve esquematicamente os elementos geométricos do sistema (Figura 7).

Figura 7: Parâmetros geométricos de um sistema de reforço por geocélula.



B, D – largura do carregamento; u – profundidade de disposição do reforço; h – altura da geocélula; d – largura da célula; b – largura do reforço.

Fonte: Favretto (2018).

Neste mesmo contexto, estudos realizados por Dash *et al.* (2008), avaliaram a partir de vários parâmetros (tamanho do bolso, altura e largura do colchão de geocélula, e a profundidade da camada de geocélula), uma fundação de areia com densidade de 70% reforçada com geocélula.

Uma vez que, além da melhoria do solo, a redução de custos também é um objetivo de usar sistemas de reforço de geocélulas, determinando a colocação ideal de camadas de reforço (por exemplo, altura ideal, largura e profundidade) é uma questão significativa (OLIAEI e KOUZEGARAN, 2017).

### 2.2.2.1 Geometria e quantidade das células

A profundidade ideal de assentamento do reforço em solos arenosos, por meio da variação de coeficientes obtidos da razão entre a profundidade de disposição do reforço (u) e o diâmetro da placa (D) foram estudados por Dash (2001). Os resultados do teste sugerem que o topo do reforço esteja localizado a uma profundidade de  $0,1D$ , partindo da base da placa, distribuindo assim a carga em grande parte da geocélula, impossibilitando o contato direto da parede da célula com a placa, aumentando o desempenho em termos de capacidade de carga e minimizando o possível efeito de flambagem. As razões de  $u/D$  entre 0 e 0,25 foram as que se mostraram mais favoráveis, ou seja, conforme a profundidade vai aumentando, menor é o desempenho do sistema de reforço. As geocélulas de menor altura são as mais indicadas para diminuição dos recalques, mas para

aumento de capacidade de carga o ideal é utilizar geocélulas com maiores alturas (BARUFFI, 2016).

De acordo com Dash *et al.* (2007), a largura da camada de geocélula melhora a eficiência da ancoragem no solo. Os autores realizaram ensaios de placa com sapata retangular em solo arenoso, onde as tensões máximas ocorreram na projeção da linha central da sapata, diminuindo com o decorrer do afastamento central.

A altura ideal da camada de geocélula ideal na areia é de 30% a 40% da largura da base ( $0,3 < H/B < 0,4$ ), enquanto em um solo argiloso é de 30% a 50% (OLIAEI e KOUZEGARAN 2017).

Rajagopal *et al.* (1999) realizou ensaios triaxiais em amostras de solos reforçados com uma, duas, três e quatro células e concluíram que a resistência do solo aumenta com a quantidade de células utilizadas, sendo que observaram um acréscimo de quase 100% na resistência para um deslocamento de 7%. Eles afirmam que a capacidade de carga é diretamente proporcional à quantidade de células, porém, comparando os solos reforçados com três e quatro células o aumento na resistência é pequeno.

#### **2.2.2.2 Interação solo/geocélula**

Interação entre solos e geossintéticos é de extrema importância em aplicações destes materiais como reforço na Engenharia Geotécnica. Conforme exposto por Biswas *et al.* (2017) os parâmetros como geometria do reforço e interação com solo preenchido, influenciam em grande parte o desempenho dos sistemas reforçados com geocélulas. Em geral, o autor verifica que o formato padrão "Chevron" (Figura 3) de geocélula pode ser adotado, sendo o preenchimento feito com solo granular no estado mais denso possível, para que se obtenha melhores resultados. Neste mesmo sentido, de acordo com Sireesh *et al.* (2009) o aumento da densidade relativa do material granular de preenchimento influi no desempenho do reforço.

Castro e Sayão (2008) mencionam que os parâmetros de extrema relevância na interação entre solo e geossintético são a adesão e o ângulo de atrito de interface. A interação do reforço com solo cria um novo material com novos índices físicos e químicos, sendo assim de grande importância para o desempenho das estruturas de solo reforçadas. O comportamento de interação depende da geometria e das propriedades mecânicas do reforço e do solo empregado, pois quando aplicados em conjunto, deverão

trabalhar como um único sistema refletindo na melhoria das características mecânicas, distribuindo as tensões e melhorando a capacidade de carregamento (DONATO, 2007).

Segundo Dash *et al.* (2001a) a rigidez do material das células é solicitada para restringir os deslocamentos horizontais devido ao material de preenchimento, isto somente a deformações superiores a 20%.

Rajagopal *et al.* (1999) afirmam que solos granulares são indicados como material de preenchimento, pois apresentam coesão aparente devido ao efeito do confinamento. A rigidez do material granular aumenta com a utilização do reforço celular, maximizando a capacidade de carga e melhorando a distribuição das tensões no solo de fundação. O colchão de geocélula, devido à sua estrutura celular, contém e limita a areia de forma mais eficaz do que os outros tipos de reforço (DASH *et al.*, 2003).

Lambert *et al.* (2011) usaram areia para preencher os bolsos dos geocélulas. Foram observadas que as características do material de preenchimento afetam em grande parte a resposta do geocélula ao carregamento de compressão uniaxial. A interação depende do comportamento do material de preenchimento e da geometria da geocélula.

Hegde e Sitharam (2014) realizaram um estudo para avaliar o efeito de três materiais de enchimento (agregado, areia e solo vermelho local) sobre o desempenho em base de argila reforçada com geocélula. Os resultados sugerem que o desempenho da geocélula não foi fortemente influenciado pelos materiais de preenchimento.

## **2.2.1 Aplicações e eficiência das geocélulas**

### **2.2.1.1 Estudos laboratoriais**

A aplicação de geocélulas é indicada para melhoramento de solos, controle de erosão e proteção de taludes (BUENO E VILAR, 2015).

Diversos pesquisadores aplicam testes em laboratório para estudar a eficácia dos diferentes tipos de geocélulas, de solo de fundação e os efeitos dos materiais de preenchimento. Hegde (2017), em seu recente trabalho reúne informações em ordem cronológica de várias outras pesquisas e autores de estudos experimentais relacionados com a capacidade de suporte de geocélulas, submetidas ao carregamento estático. O autor relata que em geral, os testes foram realizados com o objetivo de quantificar o solo da fundação quanto ao aumento da capacidade de suporte e redução do recalque. Na Tabela

1, encontra-se o resumo dos estudos laboratoriais importantes relacionados com reforço de solo de fundação utilizando a geocélula citados por Hegde (2017).

A melhoria na força e rigidez do solo reforçado com o geocélula também podem ser estudados por meio de ensaios triaxiais. Bathurst e Karpurapu (1993) realizaram uma série de testes triaxiais de grande escala com amostras de solo não reforçado e solo reforçado com geocélulas com 200mm de altura. Os resultados ilustram o aumento de capacidade de suporte conferido ao solo pelo efeito de confinamento melhorado.

Tabela 1: Resumo dos estudos experimentais relacionados a capacidade de suporte pela geocélula submetido ao carregamento estático.

<b>Pesquisadores</b>	<b>Solo de fundação</b>	<b>Material de preenchimento</b>	<b>Tipo da geocélula</b>	<b>Parâmetro variado</b>
Rea and Mitchel (1978)	Areia	Borracha/areia	Papel	D/b; b/h; K
Bathurst and Jarrett (1988)	Turfa	Agregado triturado	Polietileno	t
Mandal and Gupta (1994)	Argila macia marinha	Areia	Geotêxtil	h/B
Krishnaswamy et al. (2000)	Solo Macio	Solo macio	Geogrelha	GM
Dash et al. (2001)	Areia	Areia	Geogrelha	b/B; h/B; u/B; d/B
Dash et al. (2003)	Argila siltosa	Areia	Geogrelha	b/D; h/D; BG
Dash et al. (2004)	Aria	Areia	Geogrelha	BG
Sitharam and Sireesh (2005)	Areia e argila	Areia e argila úmida	Geogrelha	b/D; h/D; u/D
Sitharam and Sireesh (2006)	Areia e argila	Areia	Geogrelha	h/D; BG
Thallak et al. (2007)	Argila siltosa	Argila Siltosa	Geogrelha	b/D; h/D; u/D;
Madhavi Latha and Somwanshi (2009)	Areia	Areia	Geogrelha e georede	GM
Sireesh et al. (2009)	Argila	Areia	Geogrelha	b/D; h/D; RD
Dash (2010)	Areia	Areia	Geogrelha	RD
Pokharel et al. (2010)	Base firme	Areia	Geogrelha, PEAD, Neoloy	h, IM, GS, GM
Han et al. (2010)	Base firme	Areia, agregado e resíduo	Neoloy	IM
Dash (2012)	Areia	Areia	Geogrelha	GM
Hegde and Sitharam (2012)	Areia e argila	Areia	Neoloy	BG
Hegde and Sitharam (2015)	Argila macia	Areia, argila e agregado	Neoloy	IM
Hegde and Sitharam (2015)	Argila macia	Areia	Neoloy, bambo	GM

B: largura equilíbrio; D = diâmetro do pé; h = altura da geocelula; d = diâmetro de bolso geocélula; u = profundidade geocélula; b = largura da geocélula; t = espessura do subleito; K = espessura do subleito; GM = material da geocélula; GS = forma da geocélula; IM = material de preenchimento; RD = densidade relativa do solo; BG = geogrelha Basal.

Fonte: Adaptado de Hegde (2017).

De acordo com a revisão do estado de arte realizado por Hegde (2017), o reforço com geocélulas transmite aparente resistência coesiva até ao solo sem coesão. Zhang *et al.* (2006) relata que a inclusão do reforço tridimensional aumenta tanto a coesão aparente e o ângulo de atrito interno do solo.

Chen *et al.* (2013) executou os ensaios de compressão triaxial na areia com reforço de geocélula. Em seu estudo, utilizou diferentes formas de geocélulas (circular, retangular e o hexagonal). Dentre todas as formas testadas, a forma circular foi encontrada mais eficaz aumentando a coesão aparente.

Biswas *et al.* (2017) diz que além do suporte de carga (especialmente em pavimentos e fundações), as geocélulas também tem sido amplamente utilizadas em várias estações de estabilização, construção de aterro e trilhos ferroviários.

### **2.2.1.2 Estudos de campo**

As geocélulas são utilizadas para a construção de canais, aterros, muros de contenção, e estradas (Dash *et al.*, 2003 e Bathurst e Jarrett, 1998). Aplicações de campo mostraram o benefício do uso de sistemas de reforço geocelulares. “A geocélula possui atributos capazes de destacá-la em diversas aplicações geotécnicas como revestimento de taludes, proteção de canais e corpos d’água e reforço de solos” (AVESANI NETO, 2013).

Filgueira (2016) estudou a aplicação em campo de geocélulas de polipropileno como reforço de fundações diretas (sapatas) para a execução de um trecho de obra de um estacionamento na cidade de Natal-RN. As aplicações foram analisadas técnica e economicamente, comparando o solo sem reforço com o solo reforçado com geocélula. O solo local foi caracterizado como areia fina. Nos resultados as dimensões das bases das sapatas mostraram-se, em média, 52% menores na condição com o geossintético e com uma economia de 55% quando comparado ao caso sem reforço.

Baruffi (2016) realizou estudo de campo, utilizando as geocélulas para reforço de solo argiloso, onde o mesmo apresentou redução no recalque de até 76% quando submetido a tensão superior a 800kPa.

Estudo de campo realizado por Al-Qadi e Hughes (2000), utilizaram a geocélula de polietileno de alta densidade para reforço do solo de um trecho reconstruído com subestrutura fraca em uma estrada de alto tráfego, na Pensilvânia. O sistema de geocélulas foi utilizado em combinação com outros geossintéticos (geogrelhas ou geotêxteis, ou ambos). No período de avaliação de 3 anos a estrada não mostrou deformações

significativas. O módulo resiliente com a camada de reforço aumentou quase duas vezes devido ao material confinado.

### 2.2.1.3 Casos de obras

Bush *et al.* (1990) relataram a construção dos aterros com geocélulas em solo mole no Reino Unido. Os pesquisadores usaram a geocélula com altura de um metro com solo local como material de preenchimento. Com as geocélulas, cerca de 33% de assentamentos menores foram observados após 4 anos em comparação com sistemas sem reforço. Além disso, as economias de custos de mais de 31% foram observadas devido à capacidade de espalhamento de carga do colchão rígido de fundação de geocélulas.

O Brasil Terminal Portuário (BTP) localizado no Porto Alemoa em Santos/SP, estava com problemas de elevadas deformações no pavimento dos transtêiners (RTG), reduzindo sua eficiência de trabalho e causando impactos na operação do terminal. A LPE Engenharia concebeu uma solução alternativa usando geocélulas como reforço da base. Foram empregadas células PEAD com 20 cm de altura, paredes rugosas e perfuradas, preenchidas com Brita Graduada Simples (BGS), e sobre essa a re-execução do pavimento intertravado. Foram executados aproximadamente 200 m<sup>2</sup> de reforço por dia. Segundo o método de Avesani Neto (2013), esta técnica deve absorver maior parte dos carregamentos aplicados transmitindo apenas cerca de 10% destes para as camadas inferiores. Essa técnica forneceu melhoria na capacidade de suporte, evitando assim problemas futuros de deformações plásticas (GEOSOLUÇÕES, 2017).

Sitharam e Hegde (2013) apresentam em seu estudo a construção de um aterro de 3 metros de altura e 20 metros de largura e 680 metros de comprimento reforçado com geocélula preenchidas com solo granular. O solo na área do aterro era lama vermelha macia e sedimentada, localizado em Lanjigarh (Orissa) na Índia. O trabalho de reforço de mais de 15.000 m<sup>2</sup> de fundação foi concluído dentro de 15 dias usando trabalhos e equipamentos disponíveis localmente. O excelente desempenho do geocélula foi observado sem fissuras, infiltrações ou assentamentos nos aterros.

Lavoie *et al.* (2016), descreve quatro experiências de uso de geocélulas de polipropileno em obras na América Latina. Dentre estas está a utilização das geocélulas com a função de aumento na capacidade de carga das vias de acesso aos poços de gás e óleo na bacia do Urucu, área da Petrobrás dentro da Selva Amazônica. Neste local, além do solo não possuir boa capacidade de suporte, ocorrem precipitações diárias ao longo de

todo o ano, dificultando a execução de processos construtivos convencionais. A solução adotada foi a aplicação de geocélulas de polipropileno preenchidas com um solo arenoso retirado de rios próximos do local. Neste projeto foram instalados em torno de 55.000 m<sup>2</sup> de geocélulas de polipropileno, aumentando a capacidade de suporte da via de acesso. O autor relata que as vias de acesso são feitas de forma provisória, para permitir o acesso das máquinas para a construção dos poços gás e óleo, caso o poço não os localize, a pista deve ser desativada retornando ao estado anterior com vegetação. Neste caso, o sistema com geocélulas torna-se atrativo, pois é possível reaproveitar facilmente a areia em outro local.

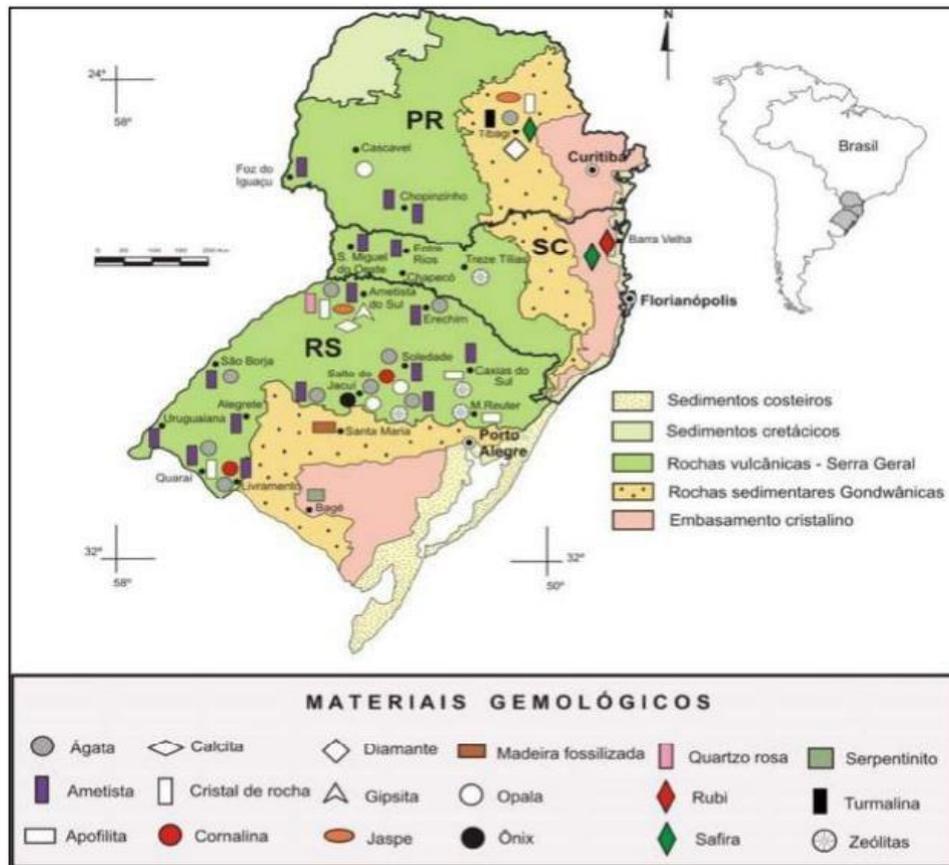
### **2.3 A indústria e os resíduos de pedras preciosas**

O Brasil é um país rico em recursos naturais e minerais como é o caso de pedras preciosas. Reconhecido internacionalmente pela diversidade e grande ocorrência destes em seu território. Está entre os principais produtores em larga escala de citrino, ágata, ametista turmalina, água-marinha, topázio, cristal de quartzo e esmeraldas, além de ser o único produtor de topázio imperial (PICOLOTTO, 2013).

As maiores produções localizam-se nos Estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Bahia, Goiás, Pará e Tocantins, sendo extraídas normalmente por garimpeiros e pequenas empresas de mineração. O setor de beneficiamento de pedras preciosas é preponderante na economia do Rio Grande do Sul, nas regiões do Alto Uruguai e Planalto Médio, incluindo os municípios de Soledade, Salto do Jacuí com principal produção de ágata.

O Rio Grande do Sul destaca-se no Brasil e no mundo como sendo um produtor importante de gemas coradas, sobretudo de ágatas e ametistas. Inclusive, o Estado é considerado o maior produtor mundial desses minerais, com extração de cerca de 400 toneladas por mês (HARTMANN, 2014). A Figura 8 mostra a localização geográfica dos principais depósitos de materiais gemológicos que ocorrem nos principais estados do sul do país, bem como seu contexto geológico.

Figura 8: Mapa gemológico da região sul do Brasil.



Fonte: Juchem *et al.* (2009, *apud* COSTA, 2016).

No processo de beneficiamento das pedras preciosas resíduos são descartados, formando grandes pilhas com dezenas de toneladas nos pátios das empresas (Figura 9), os quais são, algumas vezes, depositados sem controle ou proteção ambiental, demandando soluções quanto ao destino do acumulado (FLOSS *et al.* 2016). Estes rejeitos são originários de refugos, peças semiacabadas e peças que apresentam impurezas ou defeitos de formação natural e de fabricação.

Figura 9: Pilha de rejeitos de Pedras Preciosas em uma empresa de Soledade/RS.



Fonte: Ipar *et al.* (2012).

Alguns rejeitos classificados no garimpo, provenientes do processo muitas vezes são brutos, em geral sem qualquer contaminação com produtos químicos. Por outro lado, os rejeitos oriundos das etapas de corte, lixamento e polimento podem conter óleo diesel (utilizado na lubrificação e refrigeração do processo de corte) e grãos abrasivos que se desprendem das ferramentas.

Segundo Thomé *et al.* (2010), dentre os resíduos resultantes do processo de beneficiamento de pedras, são gerados, normalmente, o pó de pedra, o lodo e os restos de pedra. Ainda de acordo com o autor, 70% das empresas do município de Soledade-RS, estocam os principais resíduos sólidos (cascalho e pó de pedra) no próprio pátio, destacando-se negativamente por não possuir conhecimento quanto a destinação destes resíduos ou onde eles possam ser reaproveitados.

No decorrer dos processos, especificadamente na técnica de rolagem, esses resíduos tornam-se granulares, posto isso, conforme descrito no item 2.2.2.2, diversos autores relatam o bom desempenho de geocélulas preenchidas com solos granulares, deste modo, a utilização dos resíduos do processamento de pedras preciosas como material alternativo de preenchimento de geocélulas faz-se interessante.

A sustentabilidade ambiental é uma necessidade incontestável. A utilização de resíduos e subprodutos industriais na Construção Civil apresentam-se como uma excelente alternativa para diminuição do impacto ambiental e contribuição para o desenvolvimento sustentável. Pesquisas recentes realizadas por Betat *et al.* (2009), Dalla Rosa *et al.* (2014), Floss *et al.* (2016), Miguel *et al.* (2016), Baruffi *et al.* (2016), Favretto (2018) e Pedro *et al.* (2017), se direcionam para o reaproveitamento dos resíduos e para a diminuição do impacto ambiental de processos de produção.

Betat *et al.* (2009) pesquisaram sobre a produção de concretos utilizando resíduos do beneficiamento de ágata em sua composição. Avaliaram a influência da utilização do resíduo de ágata como agregado graúdo na resistência à compressão e no consumo de cimento de concretos. Os teores de substituição do agregado graúdo foram de 25%, 50% e 75%. O teor de 50% de substituição apresentou melhor desempenho, com resistência a compressão 10% maior do que os concretos de referência.

Dalla Rosa *et al.* (2014) analisaram a viabilidade técnica da aplicação do resíduo da rolagem de pedras preciosas na pavimentação, através da construção de um trecho experimental aplicando uma mistura de resíduo/cal como material de base. Floss *et al.* (2016) realizaram pesquisas sobre o comportamento mecânico de resíduos do

processamento de ágata artificialmente cimentados, como técnica de melhoramento de solos.

Já Miguel *et al.* (2016), Baruffi *et al.* (2016) e Favretto (2018) conduziram estudos sobre a utilização dos resíduos do beneficiamento de pedras preciosas, diferenciados na granulometria, como material de preenchimento de geocélulas para reforço de solos. Pedro *et al.* (2017) utilizaram os resíduos de pedras preciosas na fabricação de blocos de concreto espumado celular substituindo completamente a areia natural, resultando blocos com resistência à compressão de 1,07 MPa. Os autores relatam que os resultados são promissores, que apesar da resistência à compressão ser 11% menor do que os requisitos do padrão brasileiro para blocos de concreto aerado autoclavados.

Tonello *et al.* (2017) em sua pesquisa empregou resíduos do processo de rolagem de pedra ágata como uma adição mineral, substituindo parcialmente o cimento Portland, para a fabricação de blocos para pavimentos de baixo custo. Esta pesquisa está em andamento, e os próximos estudos estarão centrados em quantificar o aspecto econômico desta técnica.

Estas pesquisas incentivam a continuidade de estudos acerca dos benefícios e viabilidade técnica quanto a reutilização dos resíduos como novo material na engenharia, possibilitando a redução do uso de matéria-prima e criando alternativas de mercado.

### **3 METODOLOGIA**

As etapas do programa experimental proposto estão detalhadamente descritas neste capítulo, bem como os materiais empregados, equipamentos e metodologias utilizadas para preparação dos ensaios. Os ensaios de placa foram conduzidos no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Passo Fundo, com base em normatização técnica e estudos de referência.

#### **3.1 Planejamento experimental**

Os experimentos bem planejados desempenham um papel de fundamental importância no projeto e no desenvolvimento de engenharia e na melhoria dos processos de fabricação. De acordo com Montgomery (2003), mesmo quando se tem boa teoria científica, é de fundamental importância conduzir testes ou experimentos para confirmar que essas teorias funcionam no ambiente no qual está sendo aplicada.

Quando um experimento é otimizado têm-se a redução da variação do processo, melhor concordância entre os valores (obtidos e pretendidos), reduzindo o tempo e o custo operacional, bem como um processo mais eficiente (NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2003).

Na realização dos experimentos, diversos fatores de ruído podem ter efeito sobre o experimento, posto isto alguns foram fixados em todas as amostras evitando assim influência sobre a variável de resposta. Partindo dessa premissa, o planejamento desta pesquisa foi preparado de modo a minimizar estes ruídos, para isto, a realização dos ensaios foi em local fechado, livre de efeitos climáticos como chuva, vento e temperatura; os testes de placa foram conduzidos por um único operador, desde a preparação da caixa até sua exumação; todos os dispositivos de medição foram calibrados.

As alterações nas variáveis controladas do experimento foram feitas propositalmente viabilizando as possíveis alterações sofridas pela variável de resposta, pois quando associado ao uso de métodos estatísticos na análise dos dados resultará em objetividade científica nas conclusões. Dessa forma, para o planejamento experimental, foram definidas as variáveis fixas, as variáveis controláveis e de respostas do experimento estão descritas na Tabela 2. A avaliação de comportamento dos diferentes arranjos amostrais foi através da comparação dos resultados obtidos nos ensaios de placa e deslocamento.

Tabela 2: Variáveis fixas, controláveis e de resposta no experimento

Variáveis fixas		Variáveis controláveis		Variáveis de resposta
Fatores	Especificações	Fatores	Especificações	
Agregado de preenchimento das células	Resíduo de pedras preciosas Dr: 50%	Altura do reforço	7,5 cm; 20 cm	Carga de ruptura
Geocélula		Camada de resíduo	Sem geocélula e com geocélula	Recalque final
Material	PEAD			
Largura do reforço	90 cm			
Diâmetro da placa	15 cm			
Solo de fundação	Areia de Osório w: 10% ; Dr: 70% ; espessura: 40 cm			
Caixa de acomodação	Dimensões 90 x 90 x 70 cm			

Fonte: Autor (2020).

Conforme planejamento experimental disposto na Tabela 3, foram executados 10 ensaios de carga estática. Dois ensaios foram realizados somente com uma camada de solo (S1 e S2) que foi tomado como referência. Já as demais amostras foram definidas pela camada de solo acrescida de uma camada de resíduo (SRA1-7,5cm/ SRA2-7,5cm SRB1-20cm SRB2-20cm) e amostras reforçadas com geocélula (GCLA1-7,5cm / GCLA2-7,5cm/ GCLB1-20cm/ GCLB2-20cm). Todos os testes foram realizados em duplicata.

Tabela 3: Plano experimental dos ensaios de placa.

Ensaio	Denominação	Configuração	Altura da camada de resíduo	Número de ensaios
A	S1 e S2	solo	-	2
B	SR1- 7,5cm SR2- 7,5cm	solo + resíduo	7,5 cm	2
C	SR1- 20cm / SR2- 20cm	solo + resíduo	20 cm	2
D	SG1- 7,5cm / SG2- 7,5cm	solo + geocélula+ resíduo	7,5 cm	2
E	SG1- 20cm / SG2- 20cm	solo + geocélula+resíduo	20 cm	2
<b>Total de ensaios</b>				<b>10</b>

Fonte: Autor (2020).

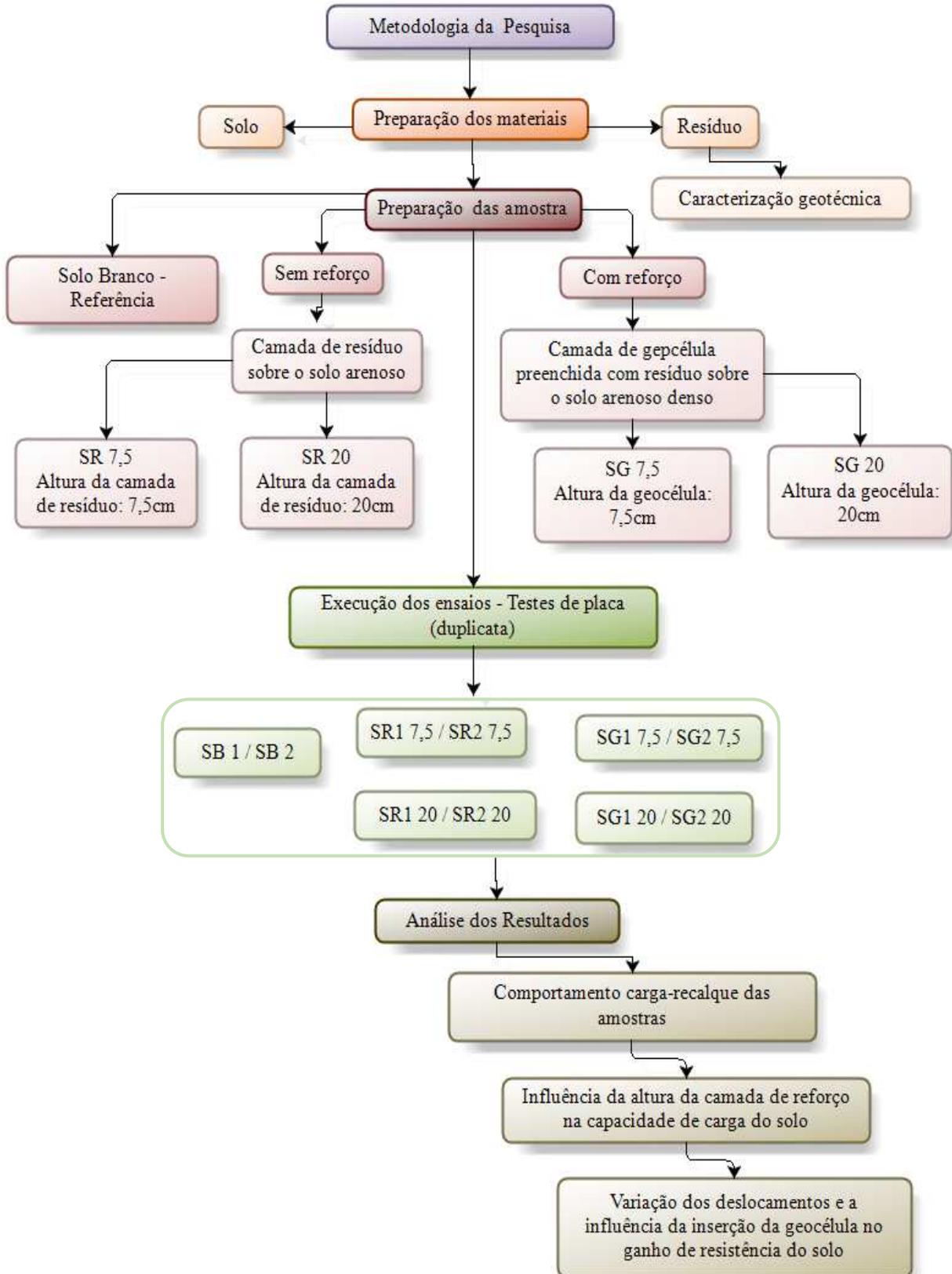
### 3.2 Delineamento da pesquisa

Com o objetivo de contribuir técnica e ambientalmente acerca da utilização de geocélulas como reforço de solo, e tendo em vista a possível oportunidade de uso de

resíduos industriais como um novo material para a Engenharia, o estudo consiste na análise comportamental de um sistema de confinamento utilizando geocélulas preenchidas com resíduos do beneficiamento de pedras preciosas, como alternativa para o melhoramento da capacidade de carga de superfície, com posterior avaliação do conjunto por ensaios de placa.

Trata-se de uma pesquisa baseada em experimentos laboratoriais, onde foram variadas as alturas das geocélulas para posterior análise. Todos os ensaios necessários foram realizados no Centro Tecnológico de Engenharia Civil, Ambiental e Arquitetura - FEAR (CETEC Serviços), vinculado a Universidade de Passo Fundo (UPF), especificadamente no Laboratório de Geossintéticos (LABGEO). O organograma apresentado na Figura 10 descreve o delineamento deste estudo e suas respectivas variáveis experimentais.

Figura 10: Organograma das fases do estudo.



Fonte: Autor (2020).

### 3.3 Materiais e métodos

#### 3.3.1 Geocélulas

Para a execução dos ensaios de placa, foram utilizados dois tipos de geocélulas como parte integrante do sistema de reforço de solo, produzidas a partir de cintas poliméricas rígidas perfuradas e conectadas através de soldas, formando uma estrutura tridimensional de confinamento. As dimensões das células permanecem constantes, diferindo entre elas apenas no que diz respeito às alturas. Na Figura 11 e Tabela 4 são apresentados as geocélulas disponibilizadas pelo fabricante e suas especificações. Foram testadas geocélulas com alturas de 7,5cm e 20cm.

Figura 11– Amostra das geocélulas a) geocélula (altura 7,5cm) b) geocélula (altura 20cm).



Fonte: Autor (2020).

Tabela 4: Especificações técnicas das geocélulas.

<b>Especificações Técnicas</b>		
Altura da célula (cm)	7,5	20
Dimensão média da célula (cm)	34x29	34x29
Área nominal da célula (cm <sup>2</sup> )	986	986
Tamanho máximo do painel expandido (m)	2,81x10,7	2,81x10,7
Área máxima do painel expandido (m <sup>2</sup> )	30	30
Distância entre as juntas de solda (cm)	44,5	44,5
Resistência mínima da solda em curto prazo (N)	1060	2900

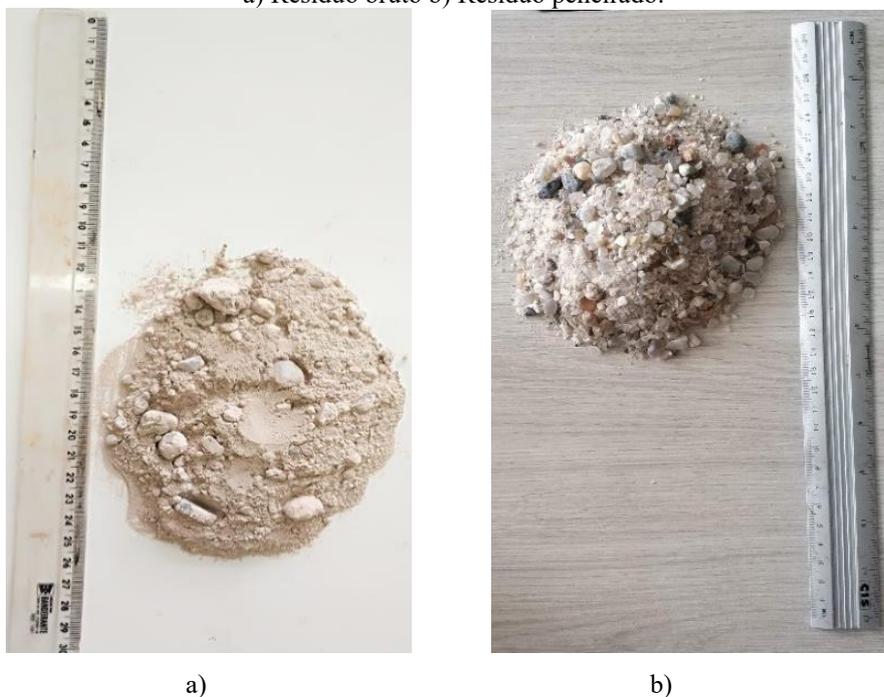
Fonte: Adaptado catálogo Maccaferri (2017).

### 3.3.2 Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas

Proveniente do município de Soledade, localizado no Rio Grande do Sul, um dos maiores polos em beneficiamento de pedras preciosas, o resíduo aplicado nesta pesquisa refere-se ao resíduo do processo de rolamento de pedras gerado por empresas do setor de gemas e jóias.

No estudo realizado por Barufi (2017), o resíduo bruto é classificado como areia e silte, com 35% de materiais finos. Favretto (2018) em sua pesquisa utilizou resíduos granulares de pedras preciosas passantes na peneira #3/8 (abertura de 9,5 mm) e retidos na peneira #40 (abertura de 0,42 mm), porém dentro desta faixa granulométrica, o sistema de reforço apresentou-se ineficiente, ocorrendo elevados deslocamentos na camada de resíduo do conjunto, visto que este move-se com maior facilidade devido à baixa rigidez. Nesta pesquisa foi utilizado o material passante e retido nas peneiras #3/8 (abertura 9,5mm) e 100 (abertura 0,15mm) respectivamente, visto que conforme observado por Biswas *et al.* (2012), materiais granulares como areia e pedregulho são os mais indicados para preenchimento de geocélulas. Uma amostra do resíduo de estudo está ilustrada na Figura 12.

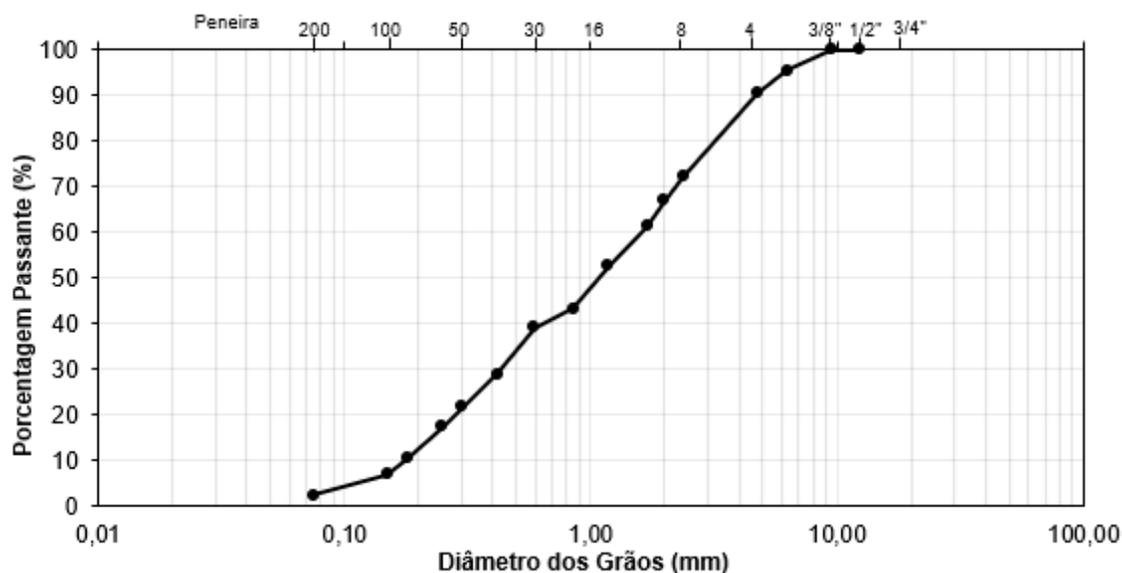
Figura 12: Amostra do resíduo do beneficiamento de pedras preciosas  
a) Resíduo bruto b) Resíduo peneirado.



Fonte: Autor (2020).

Ensaio de caracterização granulométrica e índices físicos (ABNT- NBR 7181:2016) do resíduo foram realizados e os resultados estão apresentados na Figura 13 e na Tabela 5.

Figura 13: Curva granulométrica do resíduo peneirado.



Considerando os dados da curva granulométrica, observa-se o diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ) como sendo 0,17mm e o Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) igual a 10, classificando o resíduo em medianamente uniforme. O Coeficiente de Curvatura ( $C_c$ ) é igual a 0,07, possuindo má graduação. Os índices de vazios mínimos e máximos são 0,33 e 0,54, respectivamente. Na Tabela 5 é apresentado o resumo dos índices físicos do material.

Tabela 5: Caracterização geotécnica do resíduo.

Parâmetro	Valor
Peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ )	25,37 kN/m <sup>3</sup>
Coeficiente de uniformidade ( $C_u$ )	10
Coeficiente de curvatura ( $C_c$ )	0,07
Diâmetro efetivo ( $D_{10}$ )	0,17 mm
Diâmetro médio ( $D_{50}$ )	1,1 mm
Índice de vazios mínimo ( $e_{\min}$ )	0,33
Índice de vazios máximo ( $e_{\max}$ )	0,54

Fonte: Autor (2020).

Nota-se também que de acordo com ABNT (2016) o resíduo é composto por 95% de material arenoso (Tabela 6). O material granular com granulometria variada é atrativo

para o preenchimento das células visto no item 2.2.2.2 (Interação solo/geocélula) este tipo de material poderá resultar em uma melhoria na resistência do solo.

Tabela 6: Composição do resíduo.

<b>Resultado (%)</b>	
Argila	0%
Silte	0%
Areia Fina	33%
Areia Média	45%
Areia Grossa	17%
Pedregulho	5%

Fonte: Autor (2020).

No Laboratório de Microscopia Eletrônica do Parque Científico e Tecnológico da Universidade de Passo Fundo foi realizada uma análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) a fim de complementar a análise morfológica do material. As amostras foram previamente secas, preparadas e recobertas por material condutor de Ouro (Figura 14). Na Figura 15 são apresentadas as dimensões dos diversos tamanhos de grãos com aumento de 50 vezes.

Figura 14: Preparação de amostra para o ensaio MEV.

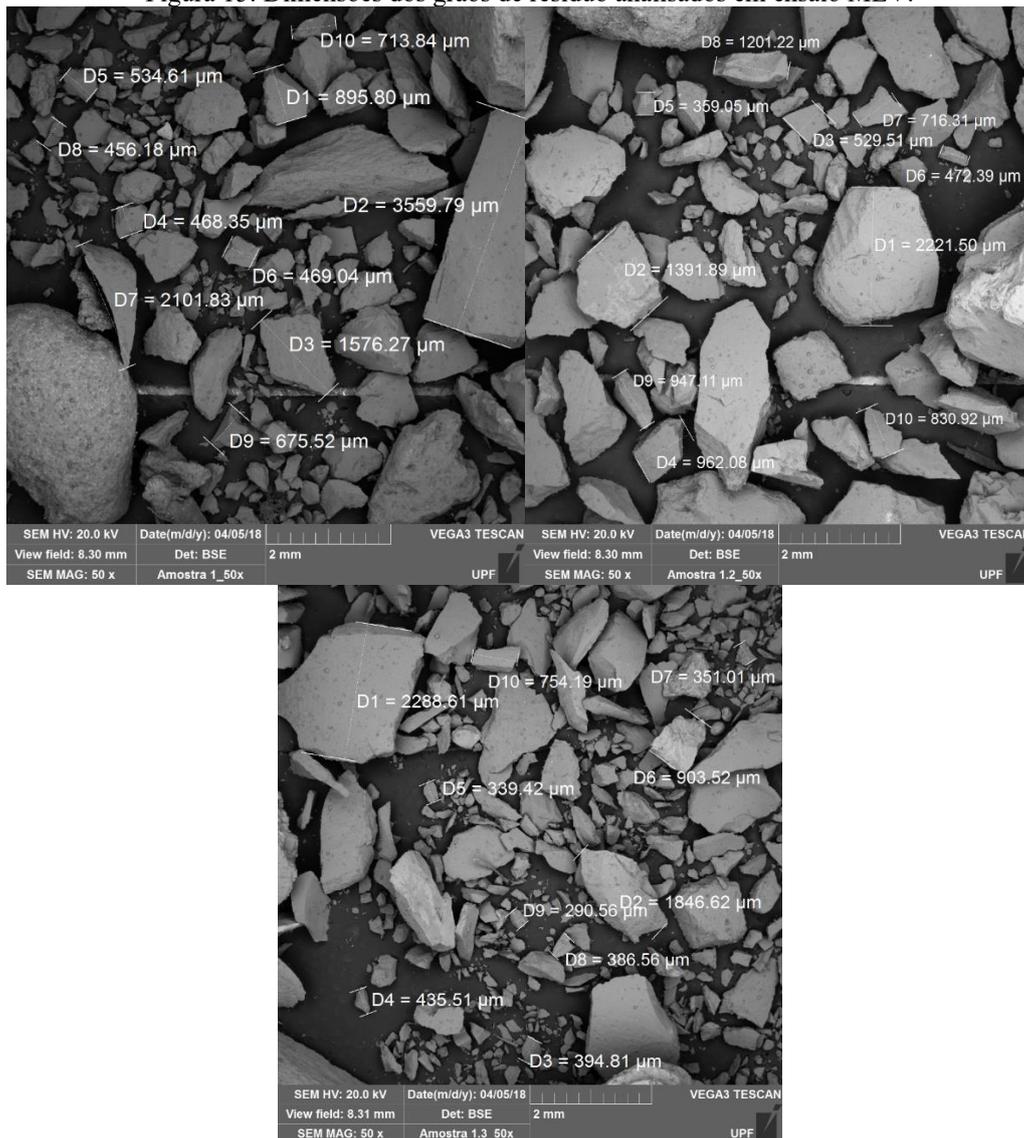


a) Resíduo sem recobrimento

b) Resíduo com recobrimento condutor

Fonte: Autor (2020).

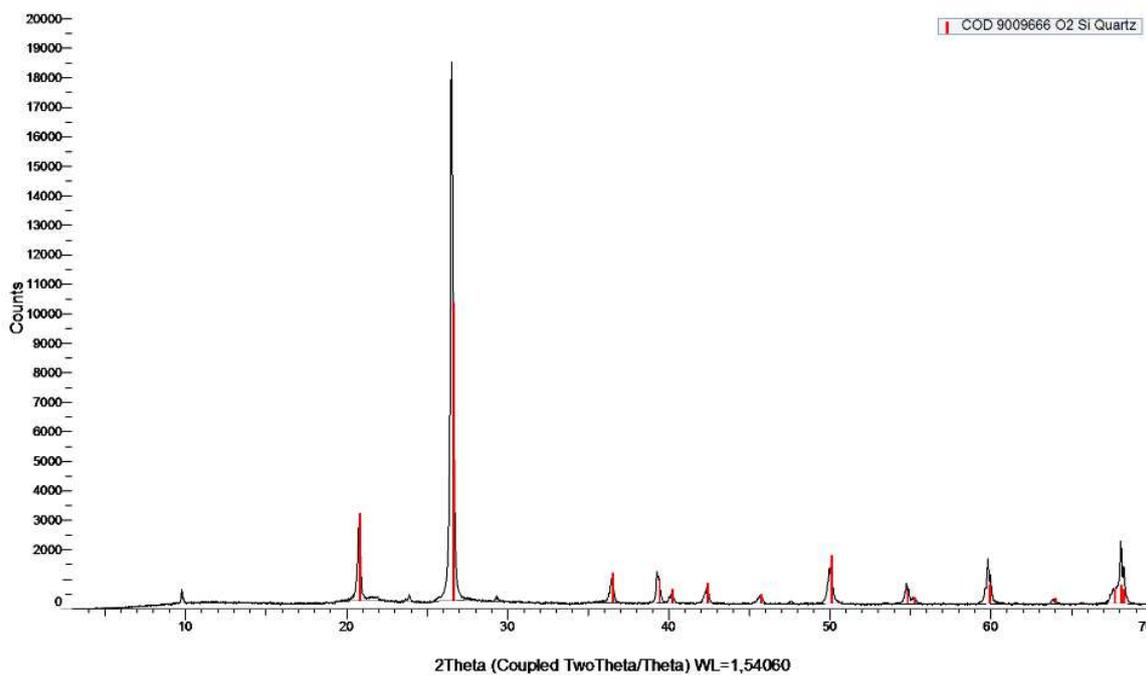
Figura 15: Dimensões dos grãos de resíduo analisados em ensaio MEV.



Fonte: Autor (2020).

Dalla Rosa *et al.* (2014), realizaram ensaio de difração de raio X para o resíduo, onde, identificaram que o mesmo possui em sua composição 98% de sílica. A fim de analisar os elementos químicos presentes no resíduo, o ensaio de difratograma (Figura 16) foi realizado novamente no laboratório do Centro Tecnológico Pedras, Gemas e Jóias, localizado na cidade de Soledade/RS e seus resultados analisados no laboratório de Uso e Manejo do Território e de Recursos Naturais da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo. A análise mineralógica revelou um elevado percentual de silício (Si), caracterizado pelo mineral Quartzo, verificando e constatando a composição deste resíduo.

Figura 16: Ensaio de difração de raio X para o resíduo de pedras preciosas.



Fonte: Autor (2020).

Com a finalidade de garantir que a utilização deste resíduo não apresente riscos à saúde e ao meio ambiente, buscou-se averiguar quanto ao potencial contaminante. De acordo com a norma 5520 Oil and grease - Standard Methods for the examination of water and wastewater foi realizado o ensaio para extração de óleos e graxas. Para isso foi utilizado o extrator Soxhlet juntamente com o solvente n-hexano, normalmente utilizado para os exames relacionados na engenharia sanitária. A resolução CONAMA nº 430 de 2011, complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357, descrevendo padrões e condições sobre o lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora diretamente no corpo receptor, sendo assim, os valores obtidos no ensaio estão inferiores ao máximo permitido (óleos minerais até 20 mg/L; óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg/L). Os resultados obtidos no ensaio encontram-se nas Tab. 7 e 8.

Tabela 7: Resultados ensaio Óleos e Graxas extrato solubilizado

Amostra	Solubilizado		
	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Resultado (mg óleo e graxa/ L)
1	127,46	127,46	0
2	146,35	146,35	0
3	123,01	123,01	0

Fonte: Autor (2020).

Tabela 8: Resultados ensaio Óleos e Graxas extrato lixiviado

Amostra	Lixiviado		
	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Resultado (mg óleo e graxa/ L)
1	107,69	107,69	0
2	139,77	139,77	0
3	111,32	111,32	0

Fonte: Autor (2020).

O Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) para o Arranjo Produtivo Local Gaúcho (APL) de Pedras, Gemas e Joias, caracteriza o resíduo como cacos de pedra e pedra rolada sem tingimento, enquadrando-se na Classe II-B como resíduos sólidos não perigosos e inertes, conforme norma vigente NBR 10004:2004. Foi realizado o ensaio de leitura de absorção atômica para os metais, no Laboratório de solos da Universidade de Passo Fundo (UPF). Quanto à classificação do resíduo frente ao seu potencial poluidor e periculosidade, também observaram elementos-traço lixiviados ou solubilizados inferiores aos limites máximo, de acordo com Tabela 9.

Tabela 9: Resultados ensaio leitura de absorção atômica para os metais.

Metais	NBR 10004-2004		Fator de concentração	Valor médio lixiviados (mg/l)	Valor médio solubilizados (mg/l)
	Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação	Padrões para o ensaio de solubilização			
Cadmio	0,5	0,005	0,003	0,027	0,004
Cobre	-	2	0,008	0,019	0,009
Chumbo	1	0,01	0,074	0,094	0,047
Cromo	5	0,05	0,061	0,038	0,038
Ferro	-	0,3	0,027	2,200	0,224
Manganês	-	0,1	0,008	0,220	0,009

Fonte: Autor (2020).

### 3.3.3 Solo de base

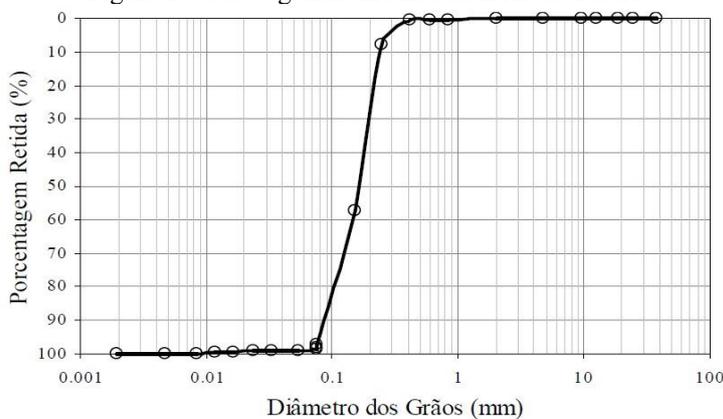
O solo utilizado como base foi extraído da cidade de Osório, localizada no litoral norte no Estado do Rio Grande do Sul. O atual estudo não tem por objetivo determinar os índices físicos deste material, visto que se trata de um solo granular, cuja caracterização geotécnica torna-se bem consolidada, pois foi objeto de estudos de diversos pesquisadores como por exemplo Consoli et al. (2010), Consoli et al. (2013), Donato (2007), Cruz (2008), Spinelli (1999). Embasado nesses estudos, este solo é caracterizado como uma areia fina com ângulo de atrito de  $35^\circ$ , sem presença de matéria orgânica, com granulometria uniforme composição mineralógica constituída por 99% de quartzo. Desta forma adotou-se os resultados encontrados em laboratório por Donato (2007). Na Figura 17 uma amostra da areia pode ser visualizada. Estão representados na Figura 18 e na Tabela 10 a curva granulométrica e os índices físicos do material, respectivamente.

Figura 17: Amostra da areia de Osório.



Fonte: Autor (2017).

Figura 18: Curva granulométrica da areia de Osório.



Fonte: Donato (2007).

Tabela 10: Caracterização geotécnica da areia de Osório.

Parâmetro	Valor
Peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ )	26,30 kN/m <sup>3</sup>
Coefficiente de uniformidade ( $C_u$ )	2,10
Coefficiente de curvatura ( $C_c$ )	1,00
Diâmetro efetivo ( $D_{10}$ )	0,09 mm
Diâmetro médio ( $D_{50}$ )	0,16 mm
Índice de vazios mínimo ( $e_{\min.}$ )	0,59
Índice de vazios máximo ( $e_{\max.}$ )	0,88

Fonte: Adaptado de Donato (2007).

### 3.3.4 Equipamentos para ensaio de placa

Uma caixa de madeira para acomodação do solo e o resíduo com dimensões 90 cm de largura, 90 cm de comprimento e 70 cm foi utilizada, uma vez que do ponto de vista prático de trabalhos já realizados, estas dimensões permitirão conduzir os ensaios sem interferência das faces da caixa nos resultados. Esta caixa de acomodação está sobre um Sistema de reação composto por um pórtico de perfis metálicos do tipo “I”, que tem aproximadamente 12mm de espessura e carga de trabalho de até 250 kN. Pokharel *et al.* (2010) realizaram uma pesquisa testando duas configurações de caixa, uma com área igual a 80 x 80 cm e a outra com 60 x 60 cm. Foram realizados ensaios com placa circular de 15 cm de diâmetro sobre seções não reforçadas e reforçadas avaliando o efeito de escala do tamanho da caixa. Os resultados não apresentaram diferenças significativas, de forma que não houve influência das dimensões das caixas.

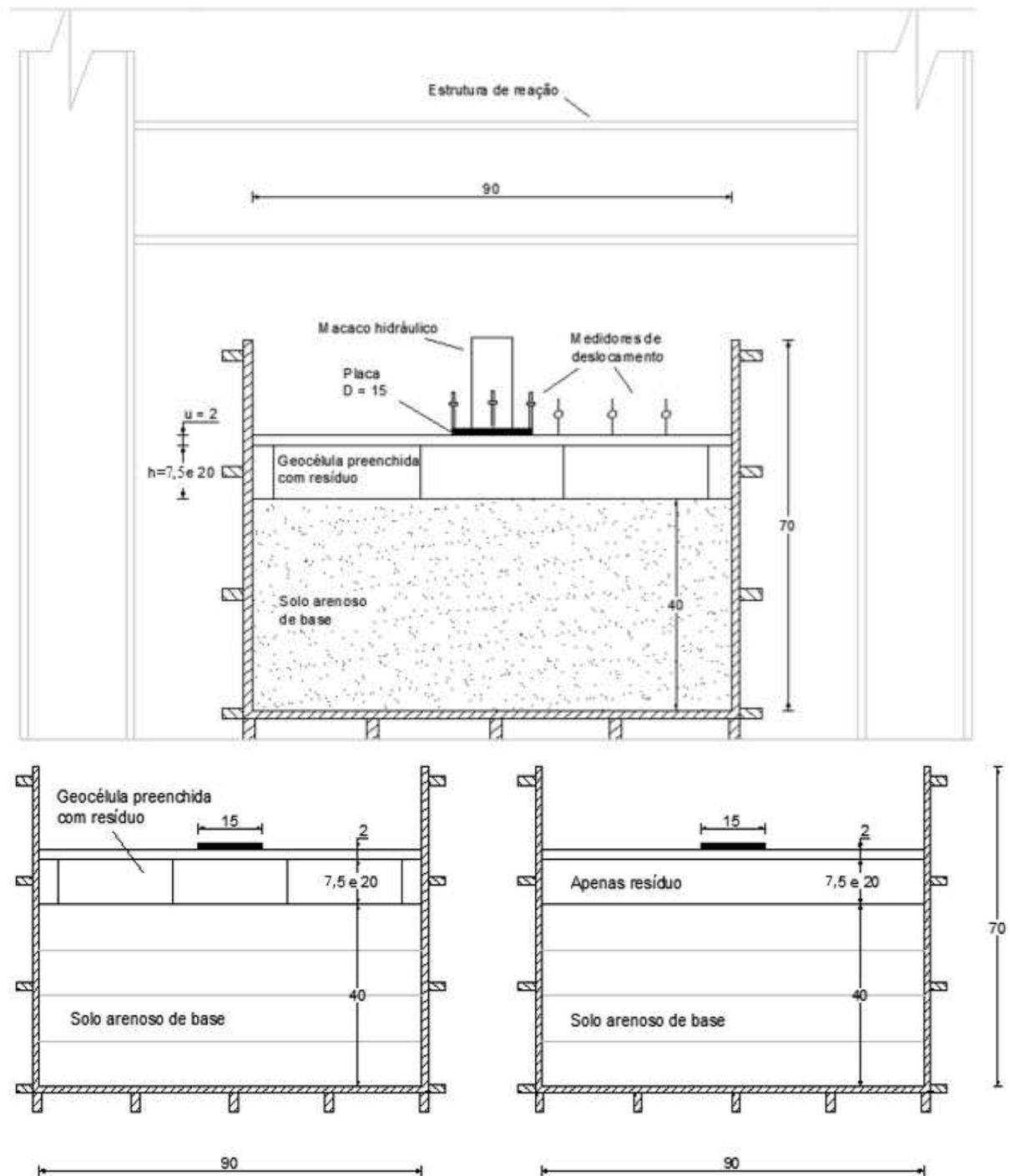
A transmissão dos esforços ao solo foi dada através de uma placa rígida de aço, com 15 cm de diâmetro (D) e 12 mm de espessura, simulando a ação de uma sapata circular sobre o solo de fundação. A placa foi locada no centro da caixa. O sistema de medição de deslocamento foi composto por 3 réguas resistivas com curso de 55 mm e 0,01 mm de precisão, da marca Gefran e 3 extensômetros digitais.

A aplicação de carga foi feita através de um macaco hidráulico com capacidade de carga de 300kN acoplado a uma bomba manual. Para medição dos carregamentos uma célula de carga da marca KRATOS com capacidade de 50kN foi disposta entre o macaco e o pórtico. Uma esquematização da configuração dos ensaios de placa está ilustrado na Figuras 19.

Os dados de cargas e recalques foram digitalizados através do sistema da Measurement Computing 16HS, oferece aquisição de dados multifuncional, com 16

canais de entrada analógica, sendo que cada entrada pode operar com taxa de até  $1 \times 10^6$  amostras por segundo e com resultados atualizados de forma síncrona a uma taxa máxima de  $1 \times 10^{-6}$ .

Figura 19: Esquematização da configuração dos ensaios de placa.



Fonte: Adaptado de Favretto (2018).

### 3.3.5 Procedimentos de moldagem das amostras para os Ensaios de Placa

Para a preparação do solo, primeiramente foram fixadas a umidade ( $w$ ) e a densidade relativa ( $D_r$ ) sendo respectivamente 10% e 70%. O controle de umidade foi através do método da frigideira, ajustando quando necessário adicionando-se água de abastecimento público ou submetido ao processo de secagem ao ar, até atingir a umidade desejada para melhor trabalhabilidade e moldagem. O material foi homogeneizado em uma betoneira com capacidade de 260 litros.

A moldagem da caixa de acomodação se deu com o espalhamento e compactação do solo em camadas de 10cm, totalizando 4 camadas com espessura total de 40cm. A compactação foi realizada manualmente por meio de um soquete. Para cada camada única compactada, foi realizada a verificação da densidade relativa por meio do ensaio de cilindro cortante, findando este processo, como forma de separação entre as camadas para a posterior verificação da deformação ocorrida no solo foi peneirada uma fina camada de areia colorida (Figura 20).

Figura 20: Montagem das amostras



Fonte: Autor (2020).

Foram confeccionadas quatro amostras com camada de reforço compostas por geocélula, sendo duas amostras com geocélulas de 7,5 cm de altura e duas amostras com altura de 20 cm, ambas preenchidas com resíduo de pedra preciosa. Em outras quatro amostras utilizaram-se somente camada de resíduo sobre o solo arenoso denso, sendo o resíduo de espessura igual ao valor das alturas das geocélulas (7,5cm e 20cm). Foi utilizado um geotêxtil para efeito da separação, impedindo o deslocamento descendente

do material de preenchimento das células. Dash et al. (2001) pesquisaram a influência do recobrimento ( $u$ ) da camada de reforço com o diâmetro da placa ( $D$ ) e obtiveram bons resultados com razões de  $u/D$  entre 0 e 0,25, sugerindo uma relação  $u/D = 0,1$ , desta forma em todas as amostras foi efetuado um recobrimento ( $u$ ) com resíduo na espessura de 2 cm tomando como razão  $u/D$  igual a 0,13. A Figura 21 mostra a montagem da camada de reforço com geocélula.

Figura 21: Montagem da amostra com geocélula.



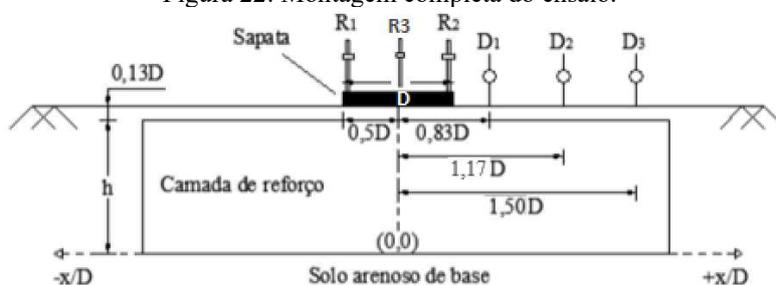
Fonte: Autor (2020).

De forma similar a densidade relativa para a moldagem da camada com o resíduo foi fixada em 50% para posterior análise e comparação com resultados de outras pesquisas já realizadas. Duas amostras de referência contendo apenas o solo foram ensaiadas a fim de verificar realmente qual é o aumento proporcionado pela adição das diferentes camadas de reforço. O programa experimental está descrito na Tabela 3.

### 3.3.5.1 Execução dos ensaios de placa

Findando a moldagem das amostras, inicia-se o processo para execução do ensaio de placa seguindo as instruções de normatização do ensaio de provas de cargas diretas, estabelecidas pela ABNT NBR 6489:1984. A aplicação de carga para a sapata através da placa circular com diâmetro de 15cm efetuou-se no nó da geocélula, ambos posicionados ao centro da caixa de acomodação. Conforme apresentado na Figura 22, para verificar possíveis recalques ou levantamentos do solo foram instalados 3 deflectômetros (D1, D2 e D3) nas distâncias 12,5 cm ( $x/D = 0,83$ ), 17,5 ( $x/D = 1,17$ ) cm e 22,5cm ( $x/D = 1,50$ ) considerando assim a distância do eixo da placa ( $x$ ) e o diâmetro da placa ( $D$ ).

Figura 22: Montagem completa do ensaio.



Fonte: Adaptado de Favretto (2018).

Para verificação de levantamento, recalques ou possíveis rotações da placa foram alocadas três réguas resistivas (R1, R2 e R3) em lados opostos ao diâmetro da placa, ou seja, na posição  $x/D = 0,5$ . Estes equipamentos de medição de recalque são fixados a uma viga de aço de referência independente da caixa de acomodação e pórtico, a fim de evitar interferências nos resultados, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23: Montagem completa do ensaio.



Fonte: Autor (2020).

A aplicação do carregamento foi de forma lenta em estágios sucessivos com incrementos de carga que seguiram as recomendações da NBR 6489, limitando-se no máximo a 20% da carga de ruptura prevista. Somente após a verificação de estabilização dos recalques anteriores, com tolerância máxima de 5% do recalque total neste estágio, houve um novo carregamento. Todos os ensaios foram paralisados quando verificado um recalque máximo limitado em 25mm ou  $s/D = 17\%$ , sendo o deslocamento da placa (s) normalizado pelo diâmetro (D) da placa.

Como forma de complementação das informações obtidas pelos equipamentos de medição, no final de cada ensaio, com a caixa aberta na parte frontal um corte longitudinal foi executado na amostra para análise visual da deformação ocorrida, possibilitada pela aplicação da película arenosa de corante.

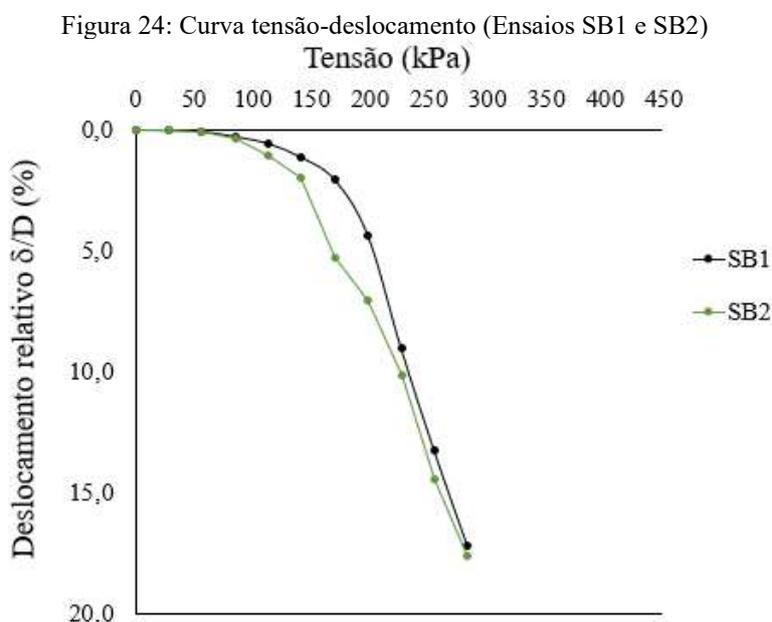
## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes a todos os ensaios realizados no presente trabalho conforme listados na Figura 10. São apresentados os resultados e análises de tensões, recalques e deslocamentos na superfície referentes aos ensaios com o solo de referência (também chamado de ensaio branco), sem reforço e reforçados com geocélula. Por fim, é realizada uma análise global para avaliar o comportamento dos conjuntos.

### 4.2 Ensaios solo de referência (ensaio branco)

Os resultados dos ensaios de placa em solo branco (SB1 e SB2) são exibidos na Figura 24. Pode-se perceber que ruptura do solo ocorreu com uma tensão de cerca de 282 kPa e deslocamento relativo ( $s/D$ ) de 17,37%.

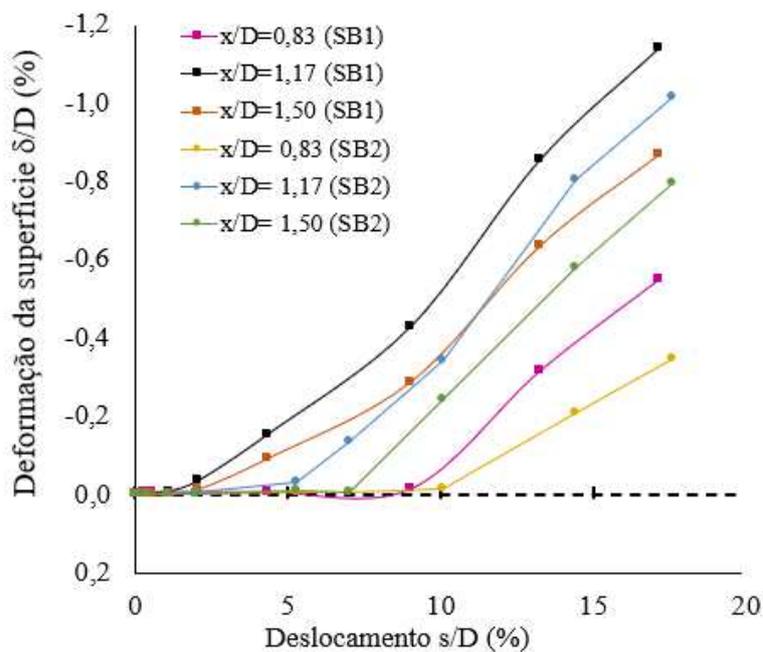


Fonte: Autor (2020).

As variações dos deslocamentos da superfície em relação ao recalque da placa para as distâncias ( $x/D$ ) iguais a 0,83, 1,17 e 1,50 são apresentadas na Figura 25. É observada a elevação da superfície do solo conforme o aumento dos recalques na placa

com ênfase para o medidor locado em  $x/D=1,17$  sendo o que sofre maior influência, pois o solo com maior compactação tem o arranjo dos grãos mais agrupados, sem espaços para maiores movimentações, ocorrendo assim um rearranjo e acomodação dos grãos.

Figura 25: Variações dos deslocamentos normalizados da superfície com o recalque da placa (Ensaio SB1 e SB2).



Fonte: Autor (2020).

Os perfis de deslocamentos médios normalizados ocorridos abaixo da placa e os deslocamentos (recalque ou levantamento de solo) ocorridos na superfície para os ensaios SB1 e SB2 podem ser visualizados nas Fig. 26 e 27, respectivamente. Para cada incremento de carga podem ser vistos os avanços de recalques ou levantamentos do solo, o sentido das deformações e possíveis rotações da placa tendo como consequência recalque diferencial.

Figura 26: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SB1).

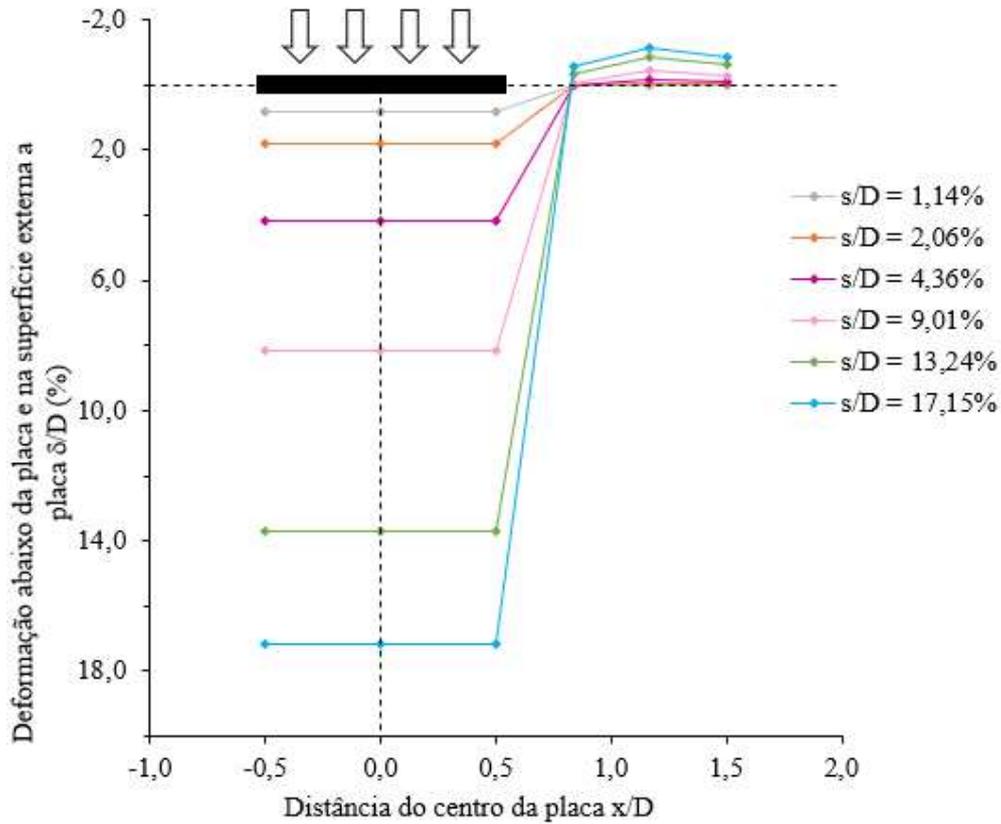
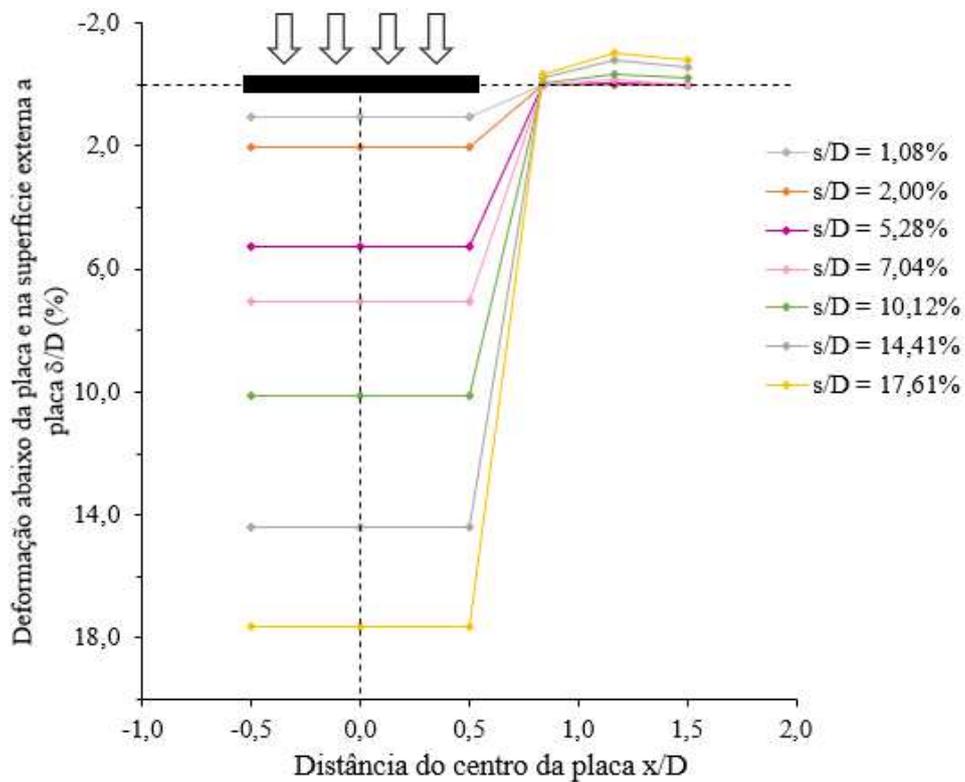
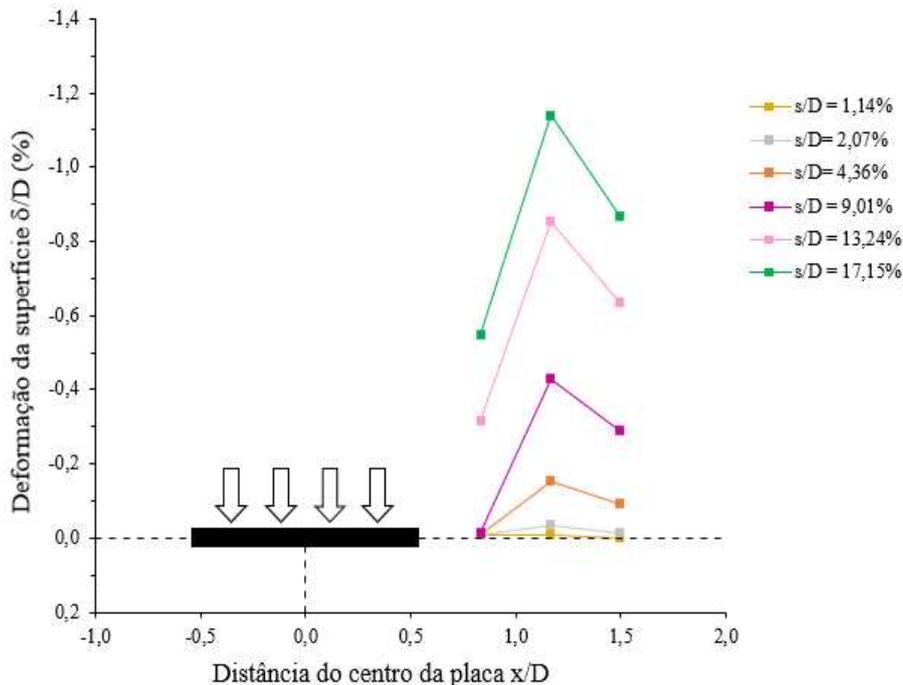


Figura 27: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SB2).



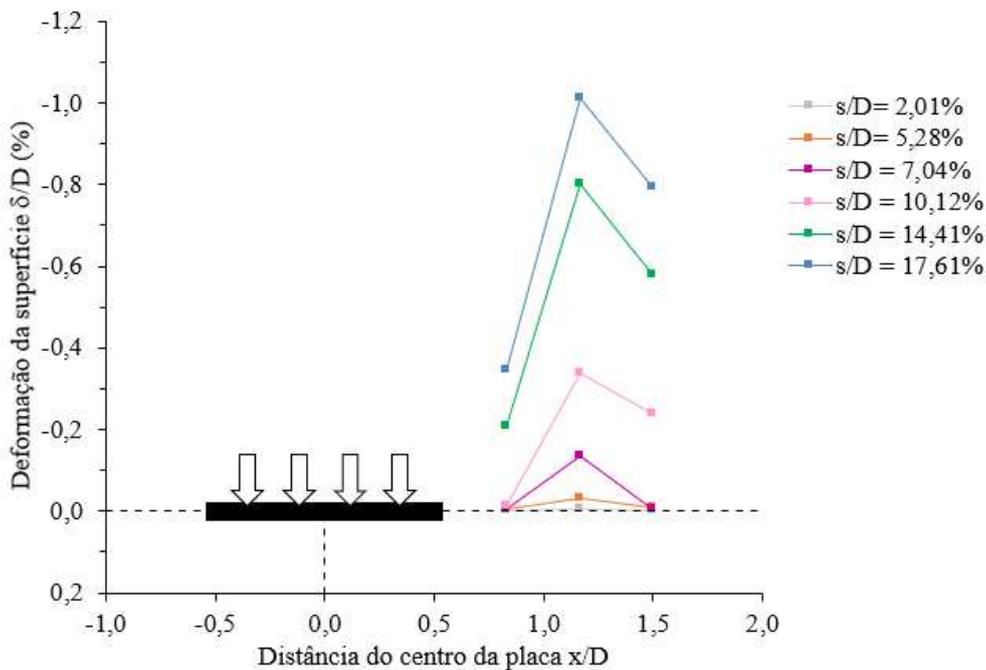
Pode ser observado que no ensaio SB1 a maior deformação média abaixo da placa ocorreu para  $s/D = 9,81\%$ , já para o ensaio SB2 foi em  $s/D = 10,12\%$ . Os deslocamentos externos a placa podem ser vistos com mais clareza na Figura 28 e 29, onde ambos tiveram o maior deslocamento em  $x/D = 1,17$ .

Figura 28: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SB1)



Fonte: Autor (2020).

Figura 29: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SB2)



Fonte: Autor (2020).

Para verificação das deformações do solo de referência (SB) foram realizadas as exumações das amostras logo após o encerramento dos ensaios garantidas pela umidade existente no solo ( $w = 10\%$ ), as rupturas caracterizaram-se pelo afundamento da placa e levantamento do material ao redor desta, conforme mostram as Fig. 30 e 31.

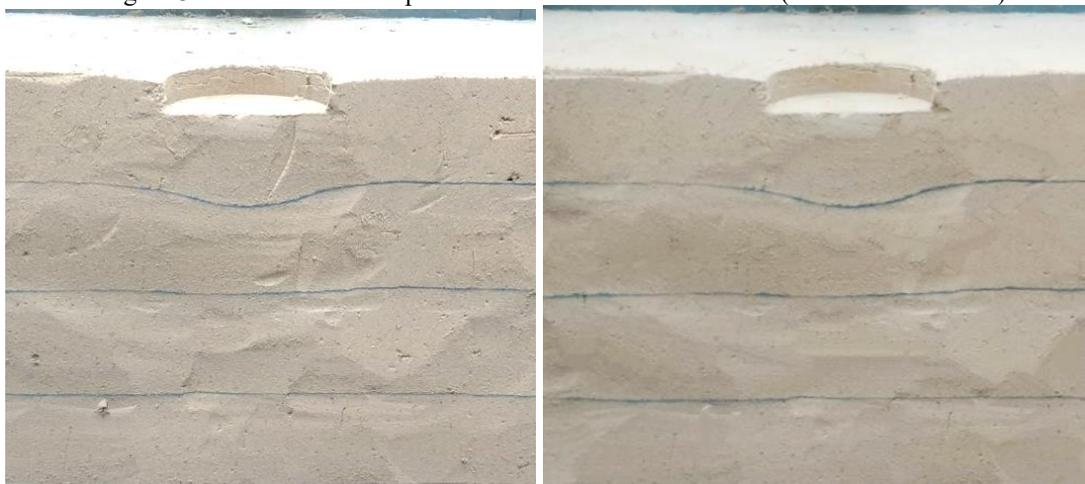
Na exumação com vista frontal (Figura 31) nota-se uma elevada deformação na primeira camada de solo na região abaixo da placa de aço, sendo que não são observadas deformações visíveis nas camadas mais profundas. A utilização de finas camadas de areia tingida entre as camadas compactadas de solo se mostrou eficiente na visualização das deformações do solo.

Figura 30: Mecanismo de ruptura dos ensaios com solo branco (Ensaio SB1)



Fonte: Autor (2020).

Figura 31: Mecanismo de ruptura dos ensaios com solo branco (Ensaio SB1 e SB2)



a) Ensaio SB1

b) Ensaio SB2

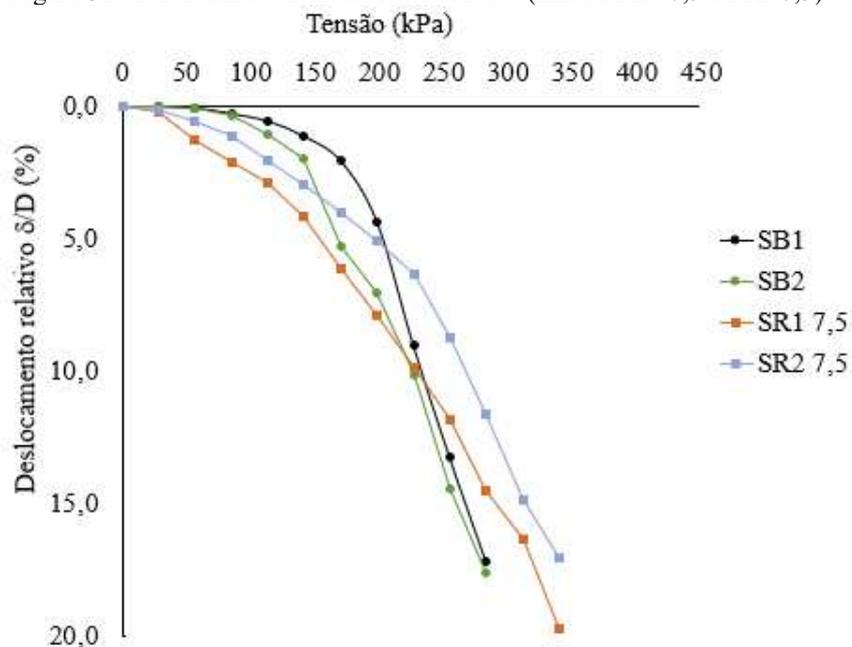
Fonte: Autor (2020).

### 4.3 Ensaios sem geocélula

#### 4.3.1 Camada de resíduo com 7,5 cm

Na Figura 32, estão apresentadas as curvas tensão-deslocamento relativas registradas na placa para os ensaios SR1 7,5 e SR2 7,5, realizados sobre camada de resíduo não reforçada com espessura de 7,5 cm. Os resultados mostram que em comparação ao ensaio de referência a resistência deste é aumentada, sua utilização sobre o solo arenoso conduziu a resultados de capacidade de carga superiores aos obtidos no ensaio de referência, isso se deve ao fato de que o resíduo possui uma comodidade maior dos grãos com deformações progressivas, visto que o solo de referência tem uma ruptura brusca.

Figura 32: Curva tensão- deslocamento relativo (Ensaio SR1 7,5 e SR2 7,5)



Fonte: Autor (2020).

Com materiais e métodos semelhantes a esta pesquisa, no estudo realizado por Favretto (2018), ocorreu um aumento da elevação da superfície com o aumento do deslocamento da placa, e os deslocamentos da superfície foram maiores quanto mais próximo da placa, visto que o resíduo com má granulometria se move livremente, esse fenômeno pode ser analisado na Figura 33. Diferente do que ocorre com os ensaios de referência, no ensaio SR2 7,5, ocorreu uma elevação da superfície maior em  $x/D = 0,83$ . Este fenômeno ocorre em  $x/D = 1,17$  para o ensaio SR1 7,5. Esta diferença pode ter ocorrido devido à instabilidade do resíduo.

No gráfico apresentado nas Fig. 34 e 35, nota-se uma significativa deformação média abaixo da placa após aplicado os últimos incrementos de carga. Nas Fig. 36 e 37 observa-se mais detalhadamente os deslocamentos da superfície externa a placa sendo que os mesmos aumentam com cada novo incremento de carga.

Figura 33: Variações dos deslocamentos normalizados da superfície com o recalque da placa (Ensaio SR1 7,5 e SR2 7,5)

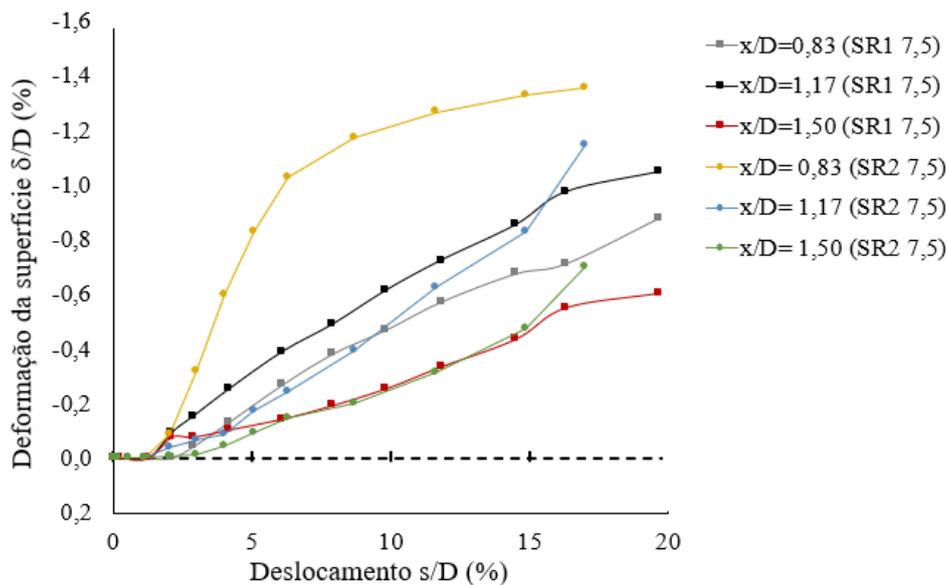


Figura 34: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SR1 7,5)

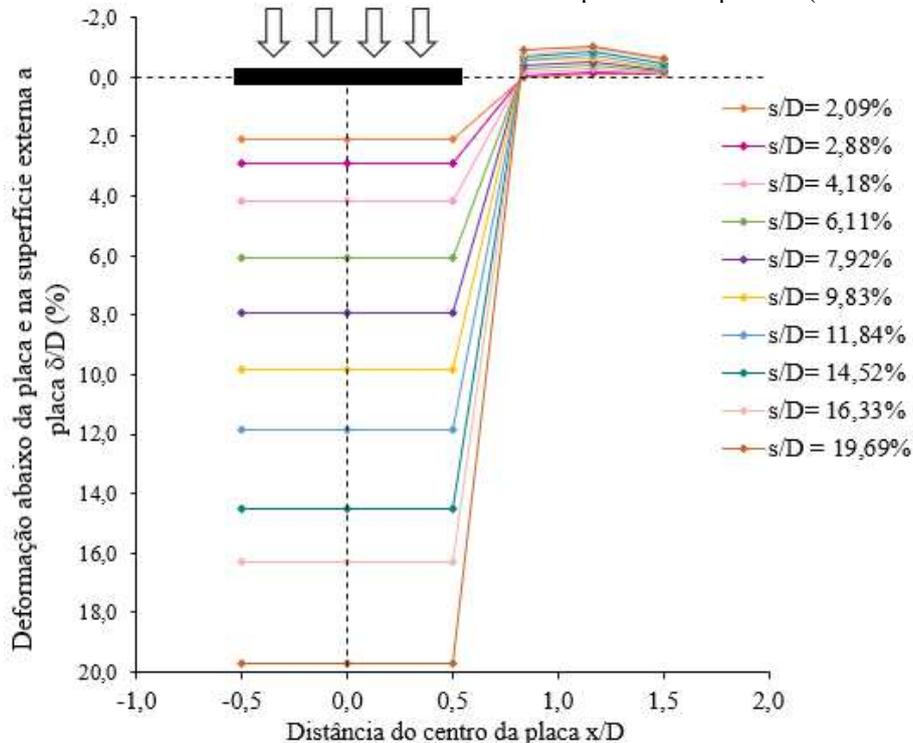
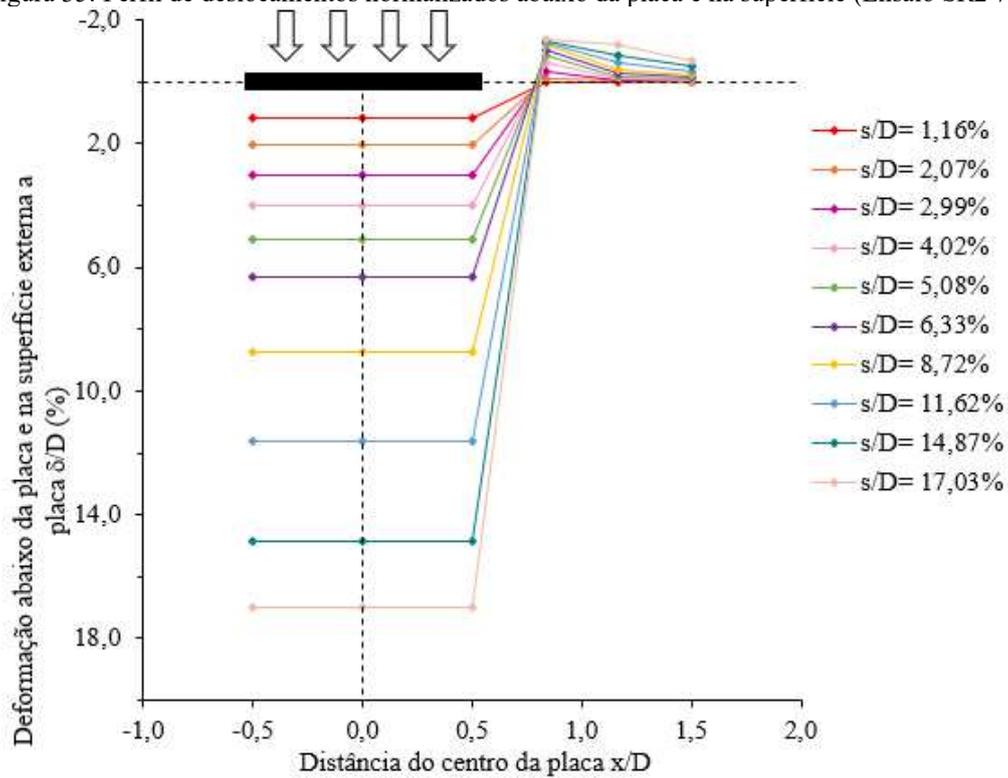
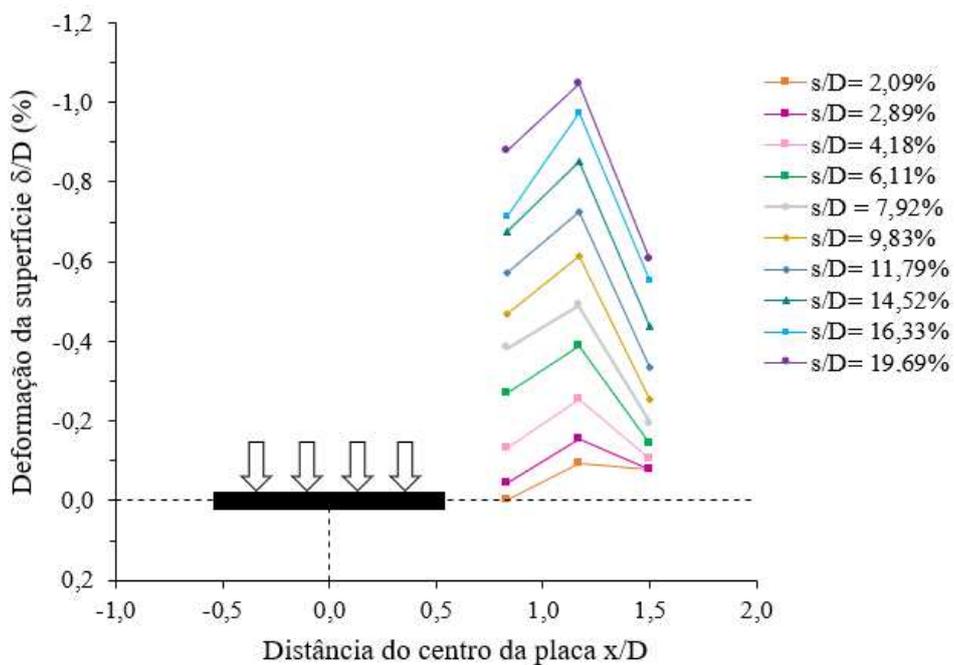


Figura 35: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SR2 7,5)



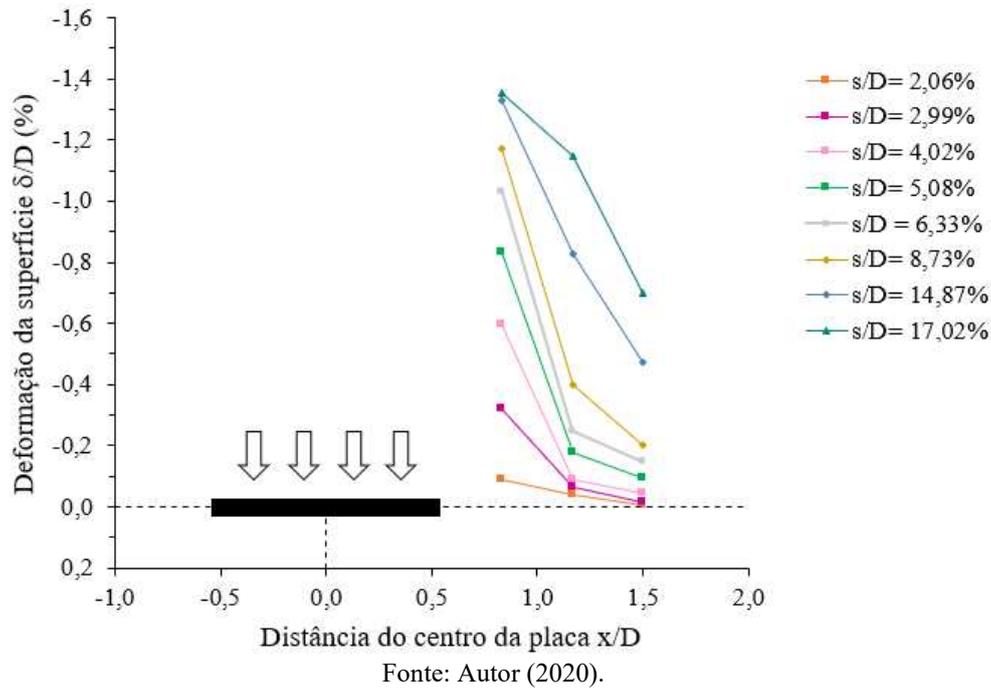
Fonte: Autor (2020).

Figura 36: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SR1 7,5)



Fonte: Autor (2020).

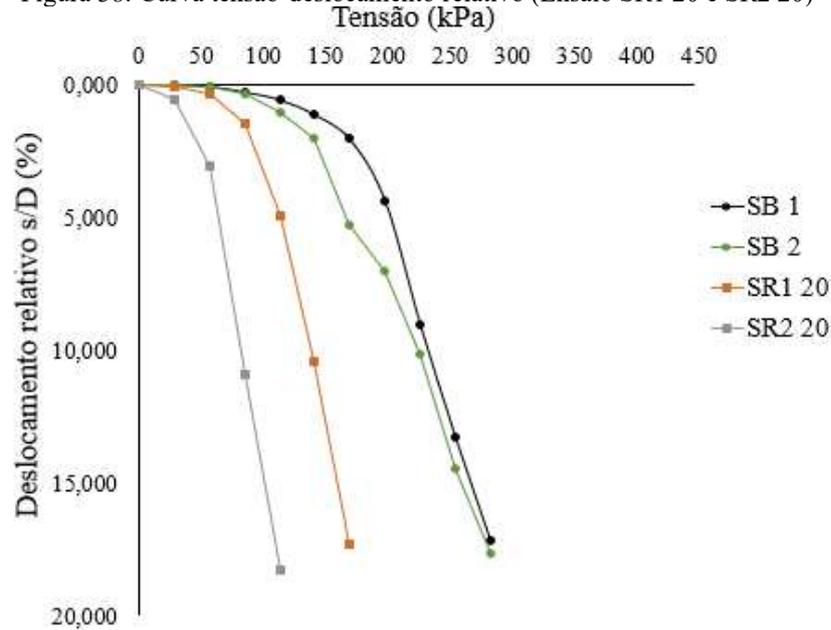
Figura 37: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SR2 7,5)



#### 4.3.2 Camada de resíduo com 20 cm

O comportamento tensão-deslocamento relativo referente ao ensaio (SR1 20 e SR2 20) sobre camada de resíduo com espessura igual a 20 cm também é comparado com o ensaio de referência (SB1 e SB2) realizado no solo de base. Na Figura 38 percebe-se que a resistência do solo arenoso diminui com a disposição de uma camada sobrejacente de resíduo com 20 cm de espessura. Evidencia-se também menor resistência de capacidade de carga quando comparado com o ensaio sobre camada de resíduo de 7,5cm de espessura. Os ensaios realizados apresentaram resultados médios de capacidade de carga na ordem de 142 kPa para um recalque de 25mm da placa ( $s/D = 17\%$ ), ou seja, aproximadamente 50% de redução de capacidade de carga em comparação com os ensaios SB1 e SB2.

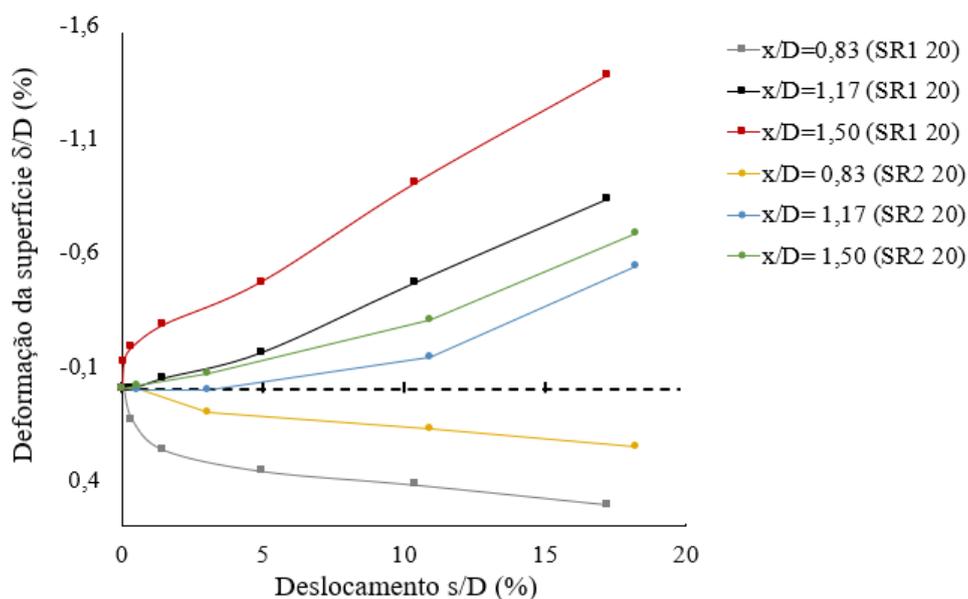
Figura 38: Curva tensão-deslocamento relativo (Ensaio SR1 20 e SR2 20)



Fonte: Autor (2020).

A Figura 39 apresenta a variação do deslocamento da superfície em relação ao recalque da placa para as distâncias ( $x/D$ ) iguais a 0,83, 1,17 e 1,50 nos ensaios SR1 20 e SR2 20. Observa-se que a uma distância  $x/D = 0,83$  houve recalque do solo, já os deslocamentos lidos nas distâncias  $x/D = 1,17$  e  $x/D = 1,50$  foram de elevação. Estes ocorridos podem estar relacionados com problemas na compactação do solo nessa região ou pela granulometria do resíduo que se mostrou instável e de baixa resistência.

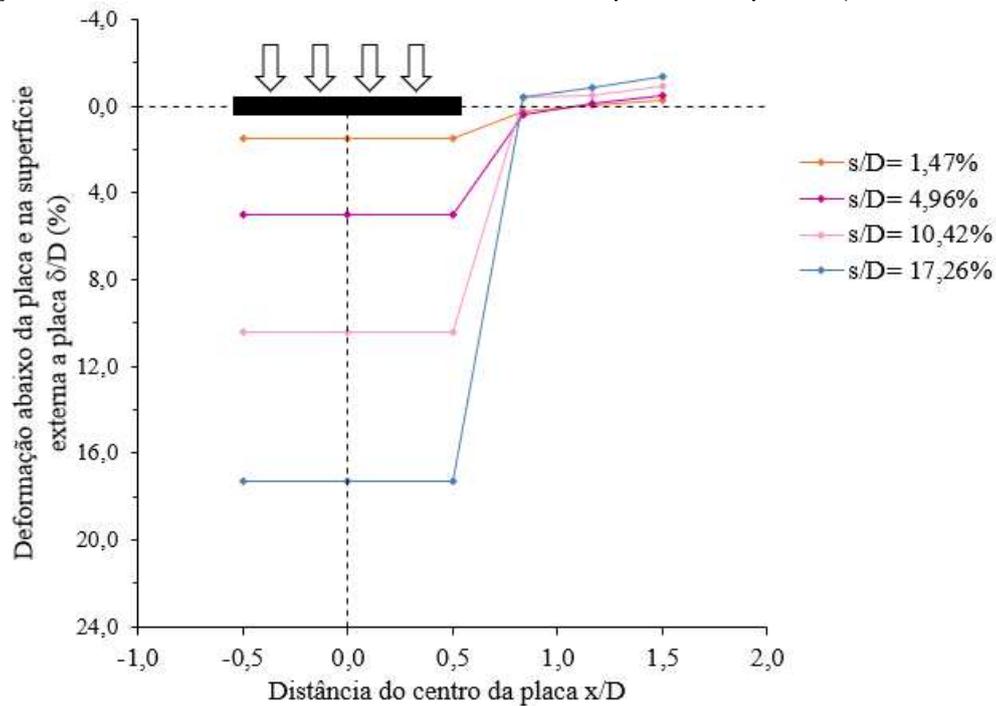
Figura 39: Variação do deslocamento normalizado da superfície com o recalque da placa (Ensaio SR1 20 e SR2 20)



Fonte: Autor (2020).

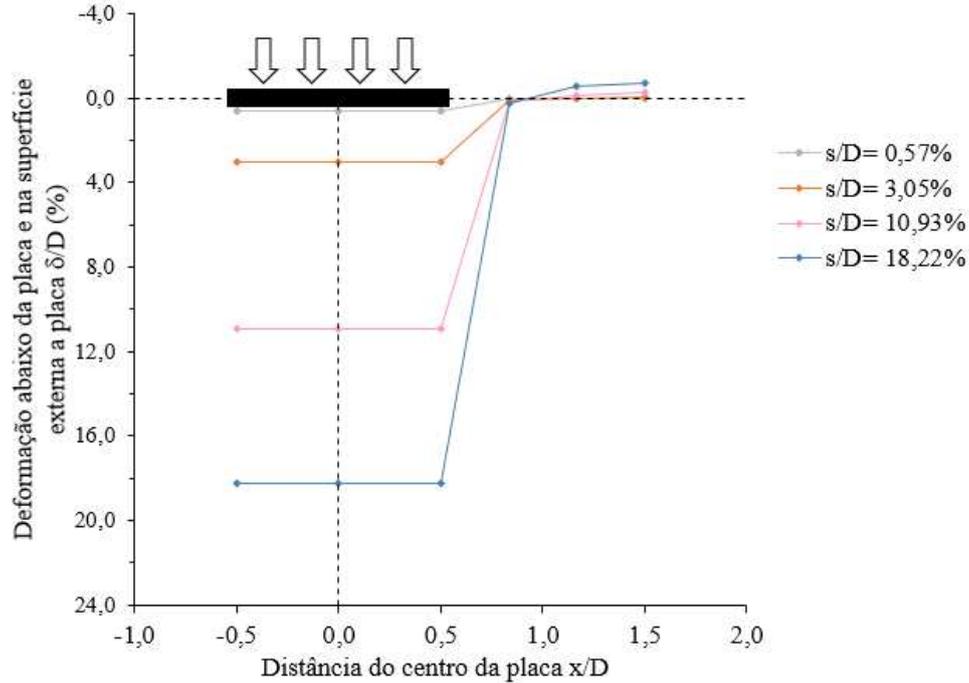
Nas Fig. 40 e 41 observam-se elevadas deformações médias abaixo da placa quando aplicados os incrementos de carga sendo que este fator pode estar associado à problemas de compactação em determinadas áreas da caixa de teste, visto a dificuldade em manter a homogeneidade do material ou também pela maior espessura da camada de resíduo. As maiores elevações da superfície estão a uma distância  $x/D = 1,50$ . Os perfis de deslocamentos da superfície externos a placa em diferentes níveis de recalques podem ser vistos nas Fig. 42 e 43.

Figura 40: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SR1 20)



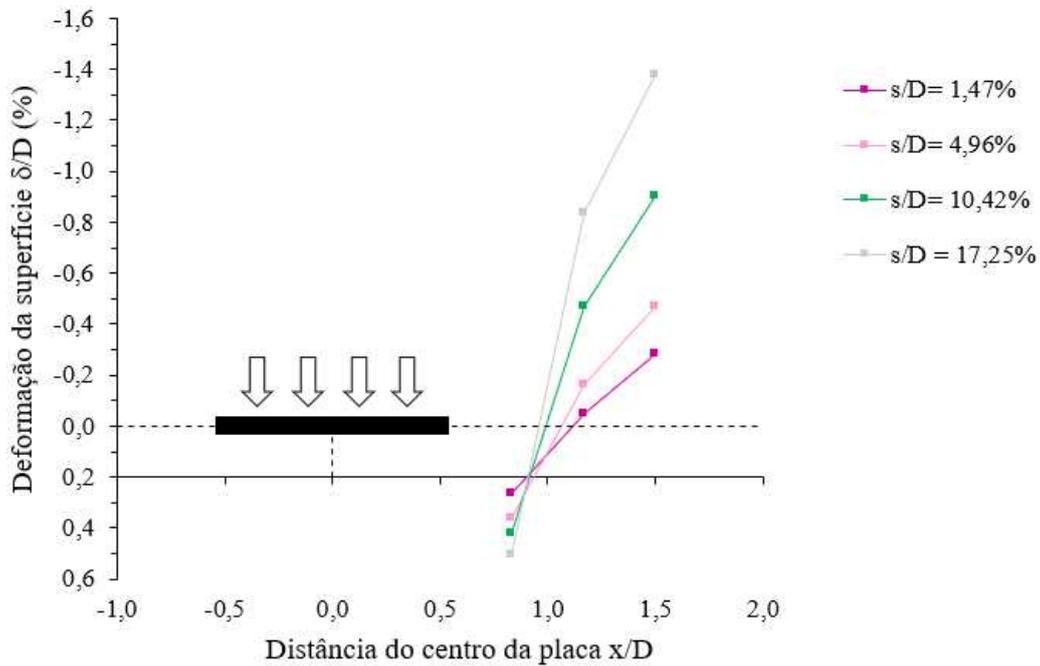
Fonte: Autor (2020).

Figura 41: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SR2 20)



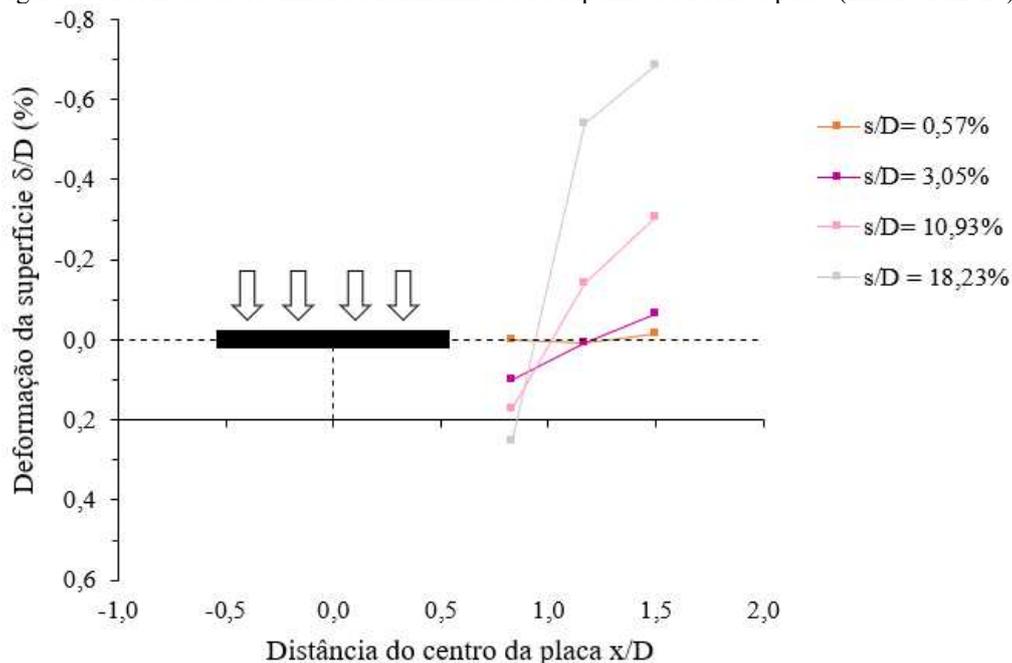
Fonte: Autor (2020).

Figura 42: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SR1 20).



Fonte: Autor (2020).

Figura 43: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SR2 20).



Fonte: Autor (2020).

### 4.3.3 Mecanismos de ruptura e exumação das camadas (SR 7,5 e SR 20)

As Fig. 44 e 45 apresentam respectivamente os mecanismos de ruptura do solo e exumação das camadas por meio de fotografias realizadas logo após o término de cada ensaio. Os mecanismos de ruptura foram semelhantes caracterizados pelo afundamento da placa e recalque ou levantamento do material ao redor desta devido a inconstância do resíduo. Conforme observou-se na Figura 39 ocorreu um recalque na distância  $x/D = 0,83$ , onde está localizado o extensômetro digital (Figura 44(b)).

Figura 44: Mecanismo de ruptura dos ensaios (a) SR1 7,5, (b) SR1 20.



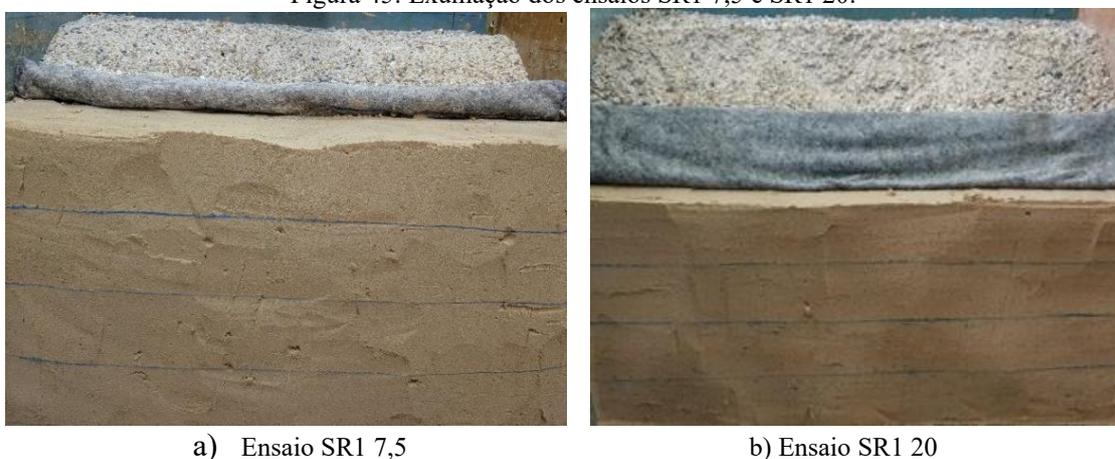
(a)

(b)

Fonte: Autor (2020).

A exumação dos ensaios (Figura 45) foi possível devido a umidade do material ( $w=10\%$ ), da mesma forma que a exumação dos ensaios SB1 e SB2. A exumação foi realizada logo após a cuidadosa retirada do resíduo sobre a camada de solo arenoso denso a fim de observar as deformações que poderiam ocorrer no decorrer do ensaio de carga estática. Verifica-se a deformabilidade do solo abaixo da placa de aço devido a transmissão das tensões e mobilização de resistência, ocorrendo em ambos ensaios com camada de resíduo com altura de 7,5cm sobrejacente a camada e solo arenoso denso. Nos ensaios SR1 20 e SR2 20 não são observadas deformações visíveis nas camadas sendo assim, a ruptura do solo aconteceu ainda na camada de resíduo.

Figura 45: Exumação dos ensaios SR1 7,5 e SR1 20.



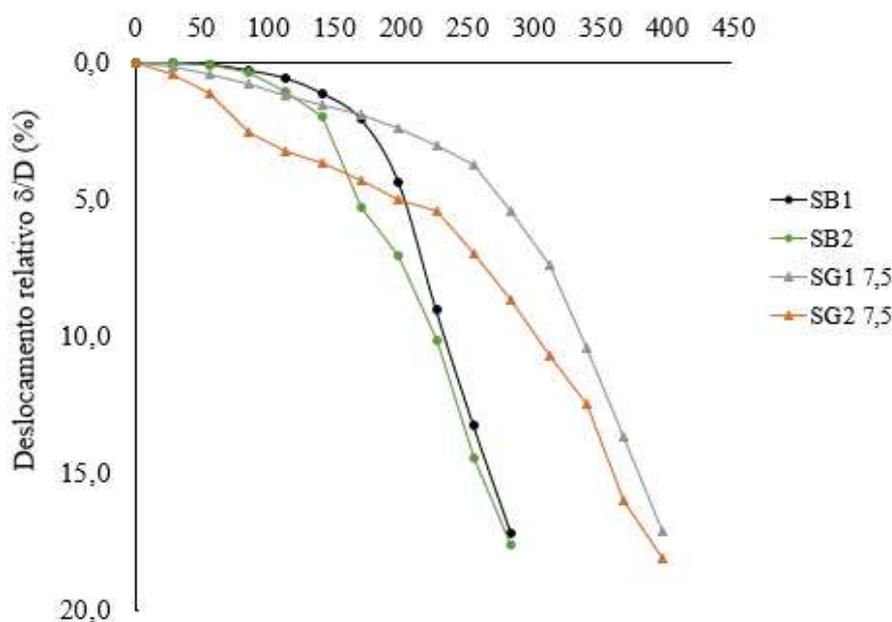
Fonte: Autor (2020).

#### 4.4 Ensaios reforçados com geocélula

##### 4.4.1 Geocélula 7,5 cm

Os resultados dos ensaios com a utilização do reforço de espessura 7,5cm podem ser vistos nas Fig. 46, 47, 48, 49 e 50. Na Figura 46 é observado o comportamento tensão-deslocamento relativo verificando uma capacidade de carga média (SG1 7,5 e SG2 7,5) da fundação de 396,12 kPa, sendo 113,18kPa superior aos resultados dos ensaios de referência. Esse resultado indica que a utilização do reforço neste experimento é adequada visto que apresenta melhoria no comportamento do solo atuando na distribuição de tensões.

Figura 46: Curva tensão-deslocamento relativo (Ensaio SG1 7,5 e SG2 7,5)



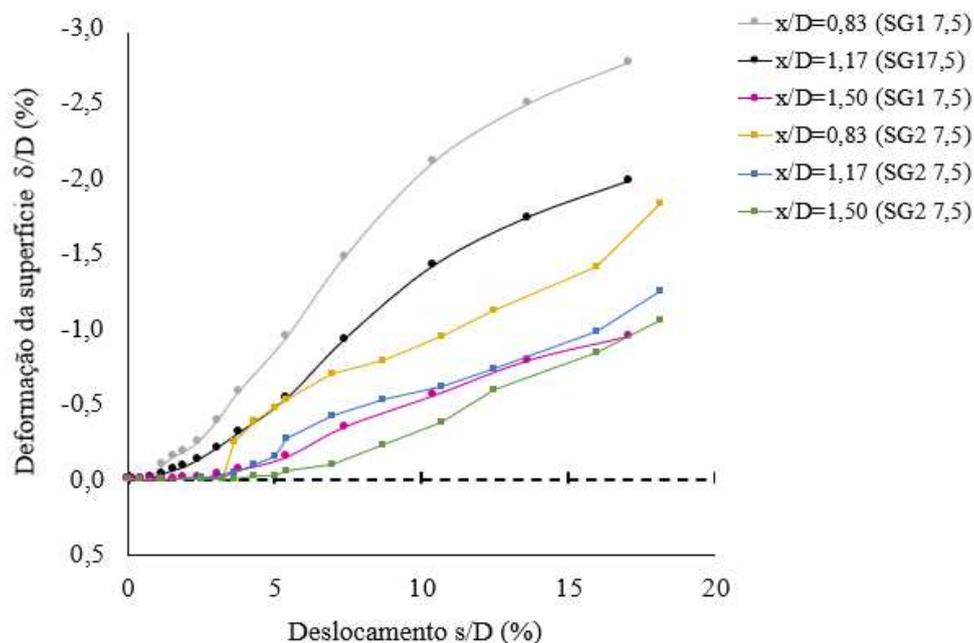
Fonte: Autor (2020).

O estudo de Favretto (2018) é tomado como uma das principais referências para esta pesquisa, porém com alguns fatores diferenciados como granulometria do material de preenchimento, tipo de geocélula e o carregamento que ocorreu no meio da célula e não no nó. Nos ensaios realizados com material de preenchimento semelhante, porém com espessura de 5cm o autor diz que “os resíduos de pedras preciosas como material de preenchimento das células, na granulometria e densidade testadas, é inadequada, visto que o sistema com geocélula não apresentou melhoria no comportamento do solo arenoso.” Pode-se concluir que o aumento da capacidade de suporte depende da forma de colocação da geocélula, do tipo da geocélula, da espessura da seção reforçada e da qualidade do material de preenchimento. (POKHAREL *et al.*, 2010)

A Figura 47 apresenta a variação do deslocamento da superfície em relação ao recalque da placa para as distâncias ( $x/D$ ) iguais a 0,83, 1,50 e 2,17. De modo geral são observadas elevações em magnitude maior do que as apresentadas no ensaio somente com o resíduo na mesma espessura. As Fig. 48 e 49 mostram os deslocamentos normalizados abaixo da placa e da superfície externa para os ensaios SG1 7,5 e SG2 7,5. Nota-se no ensaio SG1 7,5 que a partir de  $s/D= 5,40\%$  ocorre um maior deslocamento médio abaixo da placa, já para o ensaio SG2 7,5 este fato ocorreu a partir de  $s/D= 8,65\%$ . O que pode ter ocasionado isto foi a deformação que a geocélula sofreu (Figura 50) em ambos ensaios (SG1 7,5 e SG2 7,5) quando solicitada a carga e à instabilidade e movimentação do

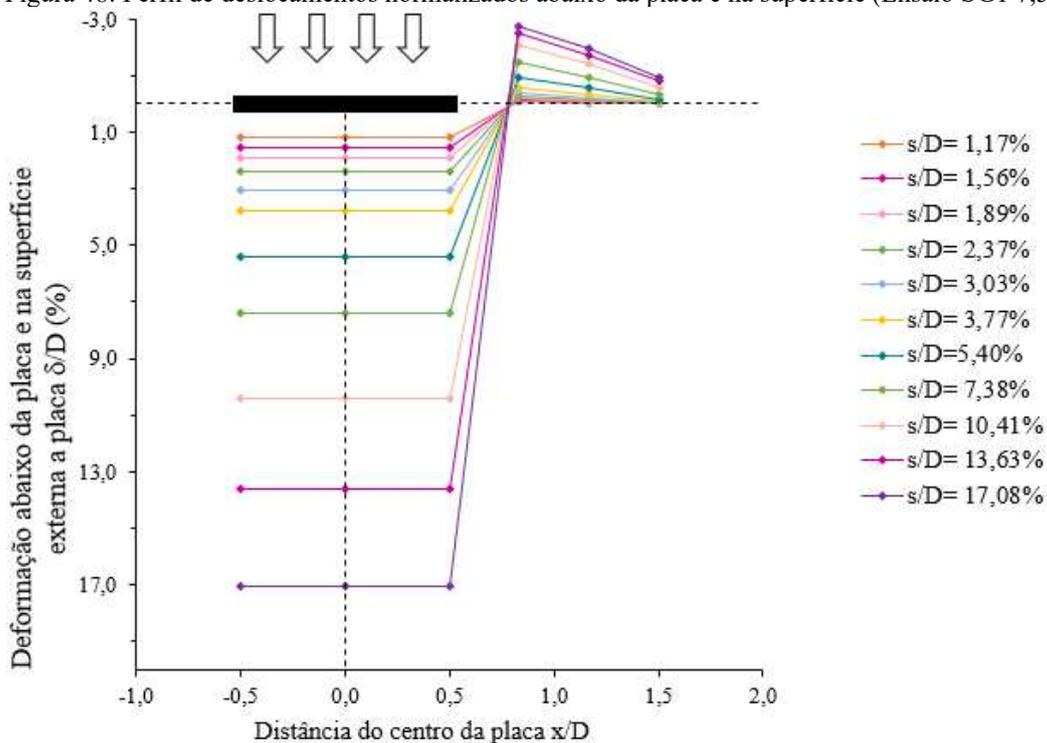
material. Os valores de deslocamentos tornam-se menos expressivos com o afastamento da placa conforme pode ser visualizado com mais clareza nas Fig. 51 e 52.

Figura 47: Variação do deslocamento normalizado da superfície com o recalque da placa (Ensaio SG1 7,5 e SG2 7,5)



Fonte: Autor (2020).

Figura 48: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SG1 7,5)



Fonte: Autor (2020).

Figura 49: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SG2 7,5)

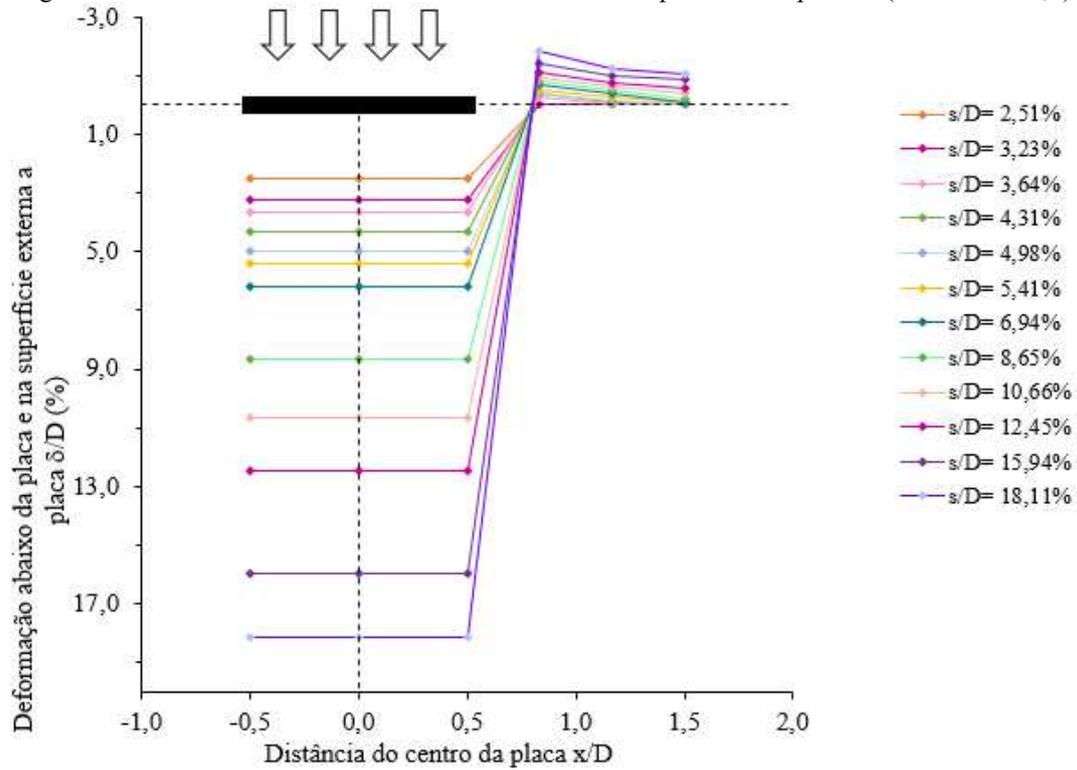


Figura 50: Deformação ocorrida na geocélula após ruptura do solo (Ensaio SG1 7,5)



Fonte: Autor (2020).

Figura 51: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SG1 7,5).

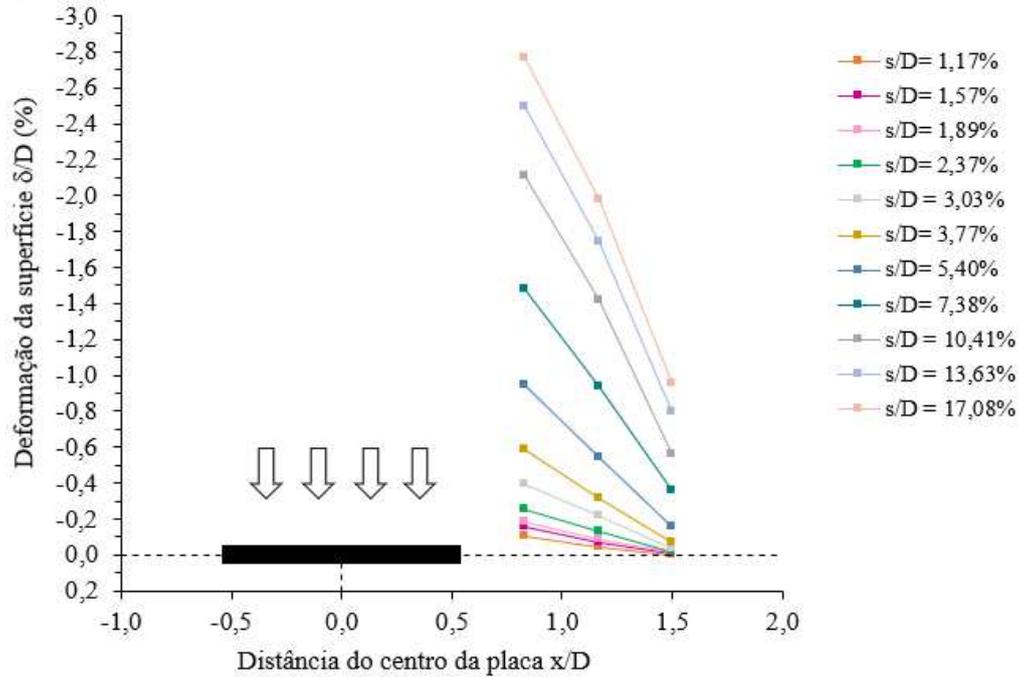
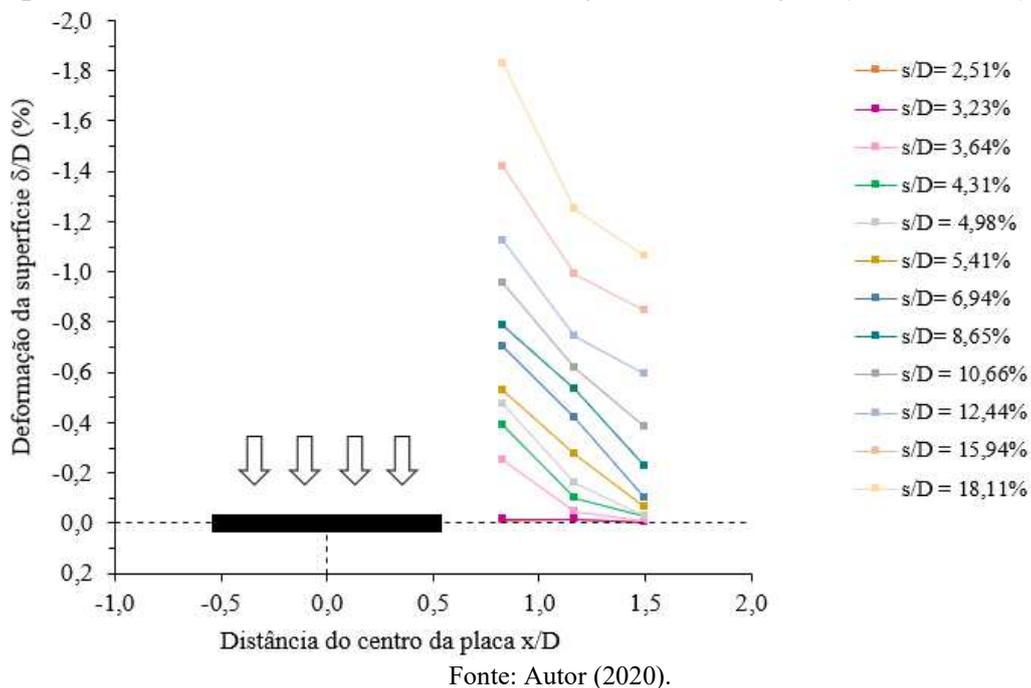


Figura 52: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SG2 7,5).

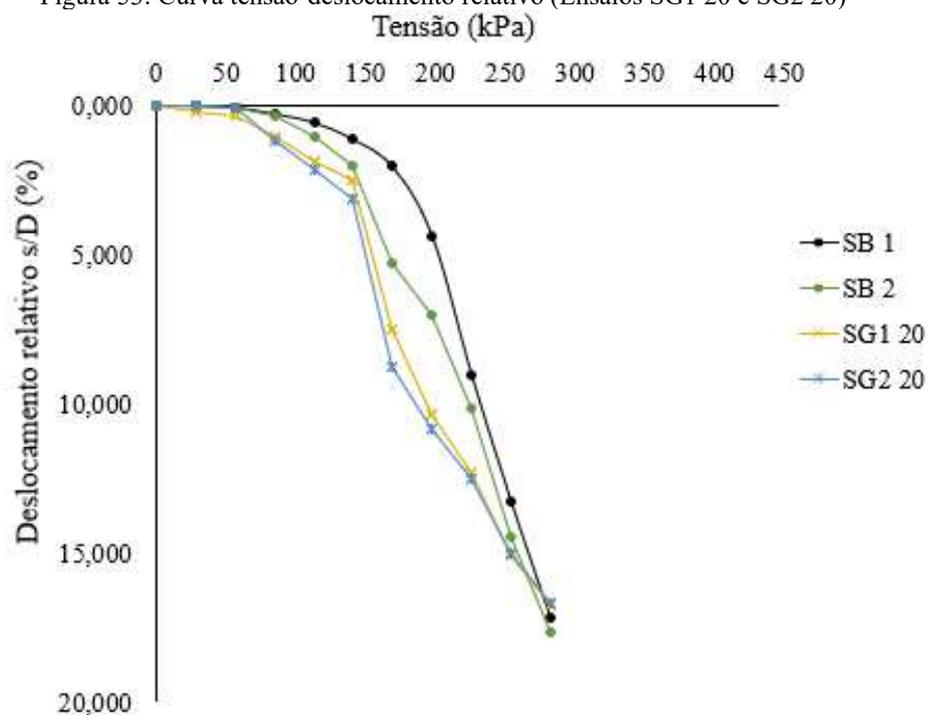


#### 4.4.2 Geocélula 20 cm

É possível observar os gráficos do comportamento tensão-deslocamento relativo resultante dos ensaios (SG1 20 e SG2 20) utilizando a geocélula com 20 cm de altura como reforço do solo comparado com o ensaio de referência na Figura 53. Contrário aos

resultados obtidos no ensaio com geocélula de 7,5cm, nota-se que a capacidade de carga do solo reforçado por meio de geocélula preenchida com resíduo na espessura de 20 cm foi semelhante ao apresentado pelo solo de referência. Percebe-se um deslocamento mais abrupto para os ensaios SG1 20 e SG2 20 quando solicitados a cargas de 169,77kPa, obtendo-se um deslocamento relativo de 7,53% e 8,76%, respectivamente. Este fato pode ter sido ocasionado devido a espessa altura da camada de reforço ou também pelo fato da geocélula ter sofrido flambagem ao decorrer do ensaio (Figura 54).

Figura 53: Curva tensão-deslocamento relativo (Ensaio SG1 20 e SG2 20)



Fonte: Autor (2020).

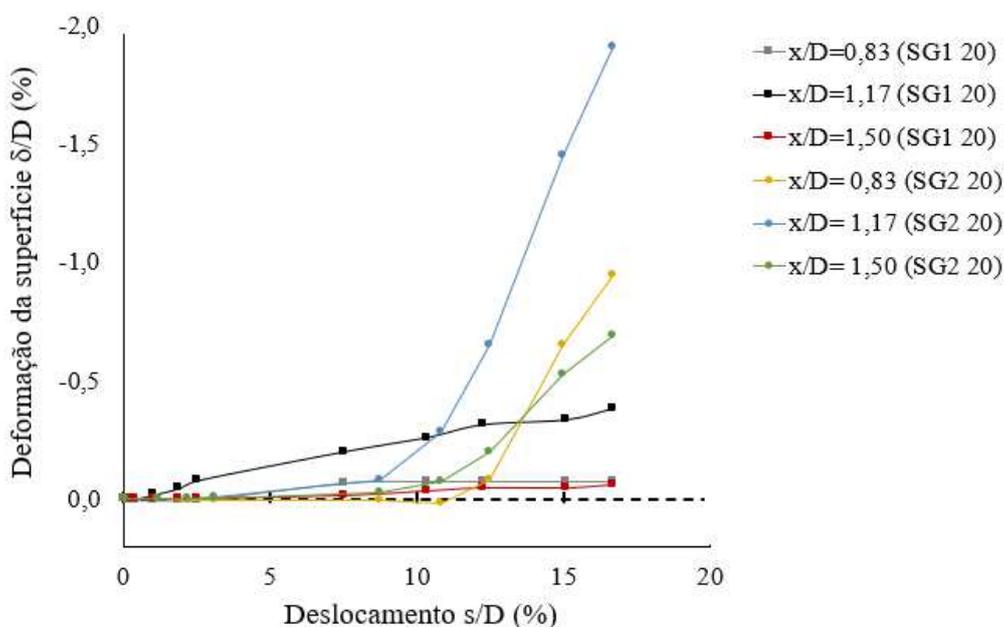
Figura 54: Deformação ocorrida na geocélula após ruptura do solo (Ensaio SG1 20)



Fonte: Autor (2020).

A Figura 55 apresenta a variação do deslocamento da superfície em relação ao recalque da placa para as distâncias ( $x/D$ ) iguais a 0,83, 1,17 e 1,50. Quando ambos os ensaios foram solicitados aos incrementos iniciais de carga ocorreram pequenos recalques. A medida que os incrementos de carga aumentaram, em todas as distâncias foram observadas elevações nas superfícies do solo em virtude da instabilidade do material, sendo mais perceptível a elevação do solo em  $x/D= 1,17$  para ambos os ensaios. Quanto mais distantes os extensômetros digitais da placa, menores são os deslocamentos da superfície. No ensaio descrito anteriormente, utilizando a geocélula com 7,5cm o solo se desloca de maneira mais uniforme devido ao efeito da distribuição de tensões ou efeito laje quando equiparado com este ensaio.

Figura 55: Variação do deslocamento normalizado da superfície com o recalque da placa (Ensaíos SG1 20 e SG2 20)

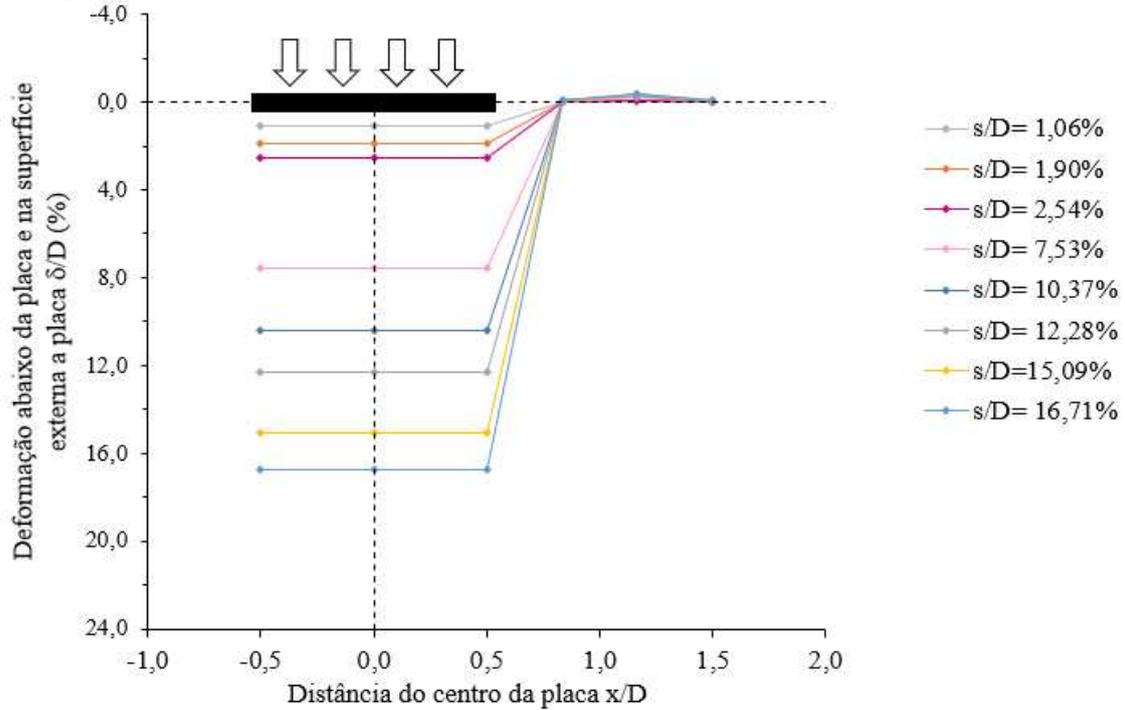


Fonte: Autor (2020).

São observados nas Fig. 56 e 57 o perfil dos deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície em vários níveis de recalque e nas Fig. 58 e 59 de forma mais clara são apresentados os perfis de deslocamentos da superfície externa a placa. Analisando os resultados da Figura 56 fica evidente que um abrupto deslocamento da placa acontece quando  $s/D= 2,54\%$  passa para  $s/D=7,53\%$ , pois como já comentado, o material de preenchimento é obtido da mineração nos processos de rolagem das pedras, suas partículas possuem forma mais arredondada, o que resulta em um material relativamente fraco aliado este ao caso da geocélula sofrer deformação no nó, local onde foi aplicado o carregamento ou pode estar relacionado a problemas de compactação e

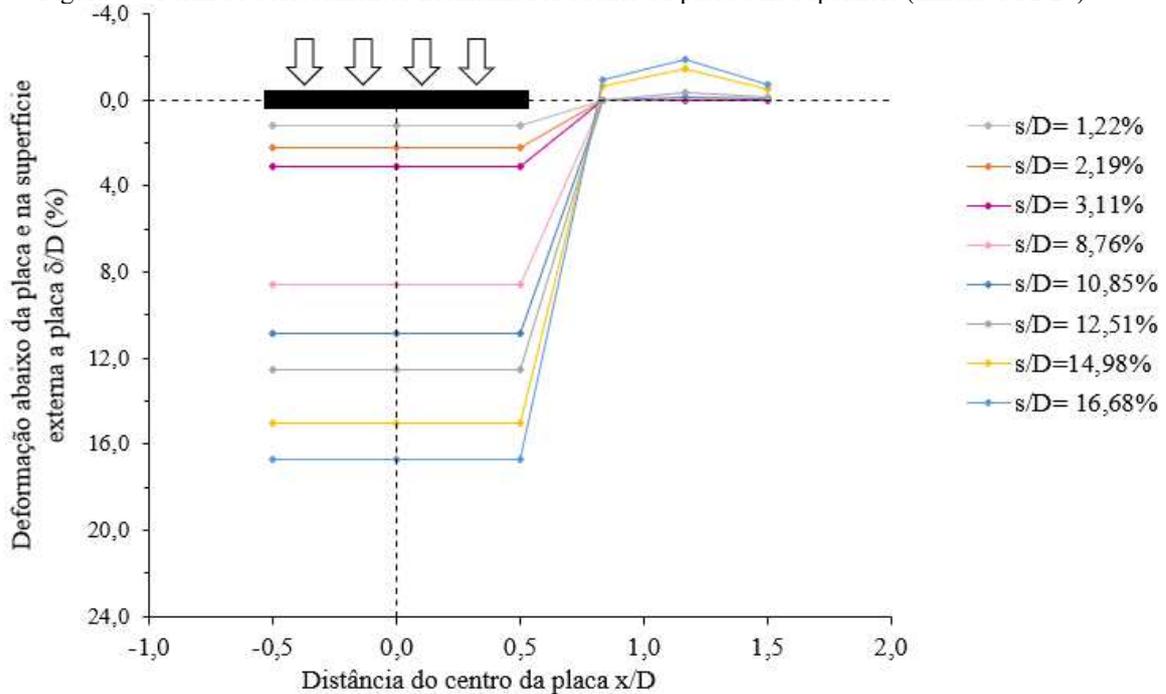
espessura da camada. O mesmo acontece para o ensaio SG2 20 que passa de um deslocamento médio normalizado de  $s/D=3,11\%$  para  $s/D=8,76\%$ , conforme pode ser verificado na Figura 57.

Figura 56: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SG1 20)



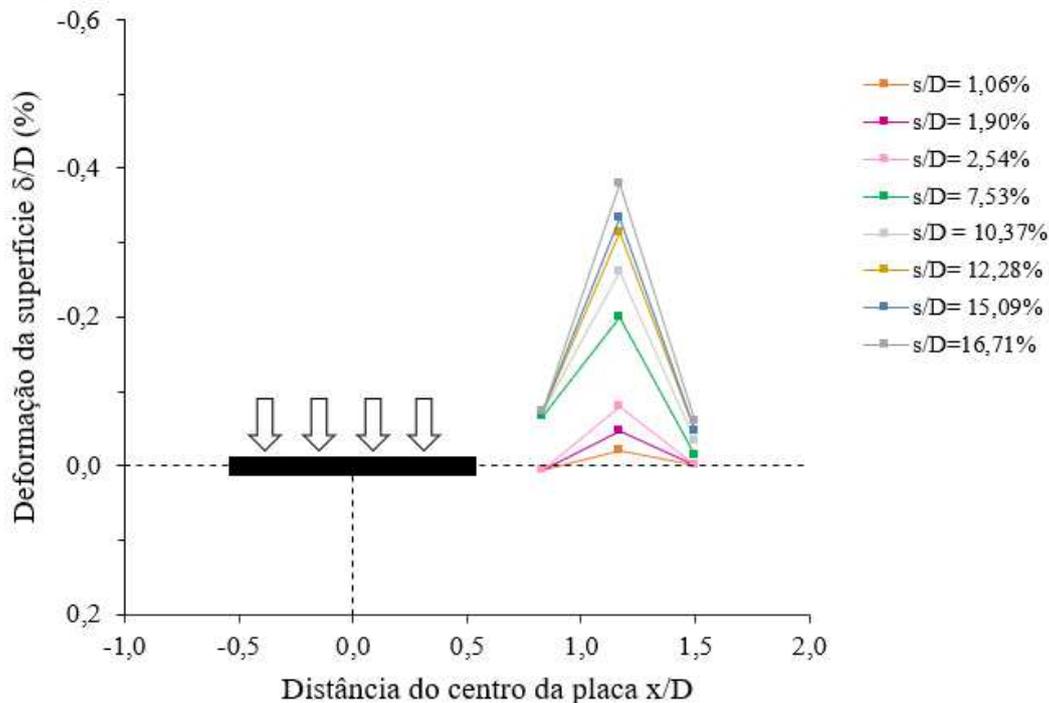
Fonte: Autor (2020).

Figura 57: Perfil de deslocamentos normalizados abaixo da placa e na superfície (Ensaio SG2 20)



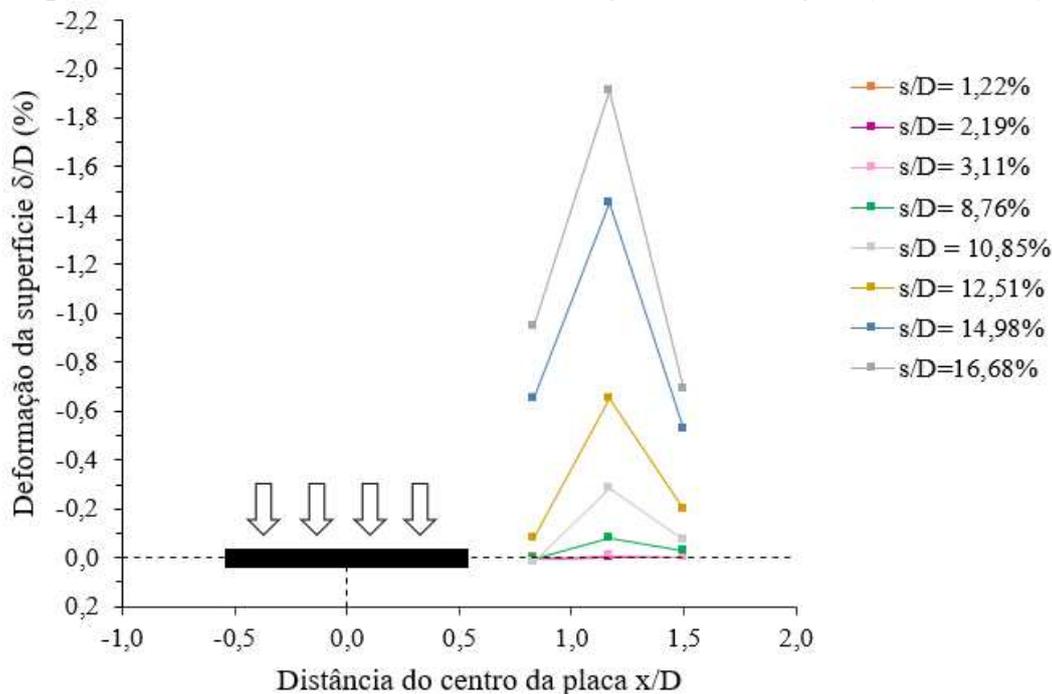
Fonte: Autor (2020).

Figura 58: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SG1 20).



Fonte: Autor (2020).

Figura 59: Perfil de deslocamentos normalizados da superfície externa a placa (Ensaio SG2 20).



Fonte: Autor (2020).

Devido ao efeito de confinamento e efeito laje exposto por Avesani Neto e Bueno (2010) a compressão do material de preenchimento das células gera tensões horizontais que são transferidas de forma mais ampla na camada acarretando menores valores de

ensões a fundação. Analisando os resultados expostos no item 4.4 estes mostram que o solo reforçado com geocélula 7,5cm apresenta maior capacidade de carga quando comparado com os demais ensaios, oposto aos resultados obtidos por Favretto (2018) que para ambas as alturas de geocélula testadas os resultados foram inferiores ao resultante do ensaio realizado apenas sobre a areia.

#### 4.4.3 Mecanismos de ruptura e exumação das camadas (SG 7,5 e SG 20)

Uma amostra dos mecanismos de ruptura dos ensaios com uso de geocélulas podem ser visualizados na Figura 60. Os mesmos mostraram-se semelhantes ao mecanismo de ruptura dos ensaios SR1 7,5, SR2 7,5, SR1 20 e SR2 20, ocorrendo o levantamento ou recalque do solo devido o material sofrer acomodações e rearranjo dos grãos.

Na Figura 61 observa-se a exumação das camadas, realizadas da mesma maneira como descrito no item 4.3.3. Comparando os ensaios utilizando resíduo com altura de 7,5cm sobrejacente ao solo arenoso denso com os ensaios utilizando geocélula de 7,5cm de altura como reforço notou-se claramente o efeito da distribuição das tensões, visto que com a utilização da geocélula há uma minimização do recalque abaixo da placa de aço e uma deformação mais uniforme da camada de areia. Para os ensaios SG1 20 e SG2 20, verificou-se um comportamento análogo aos ensaios SR1 20 e SR2 20, não sendo observadas deformações visíveis nas camadas mais profundas.

Figura 60: Mecanismo de ruptura dos ensaios (a) SG1 7,5, (b) SG1 20.



Fonte: Autor (2020).

Figura 61: Exumação das camadas de areia subjacente a camada de resíduo (a) SG1 7,5, (b) SG1 20.



Fonte: Autor (2020).

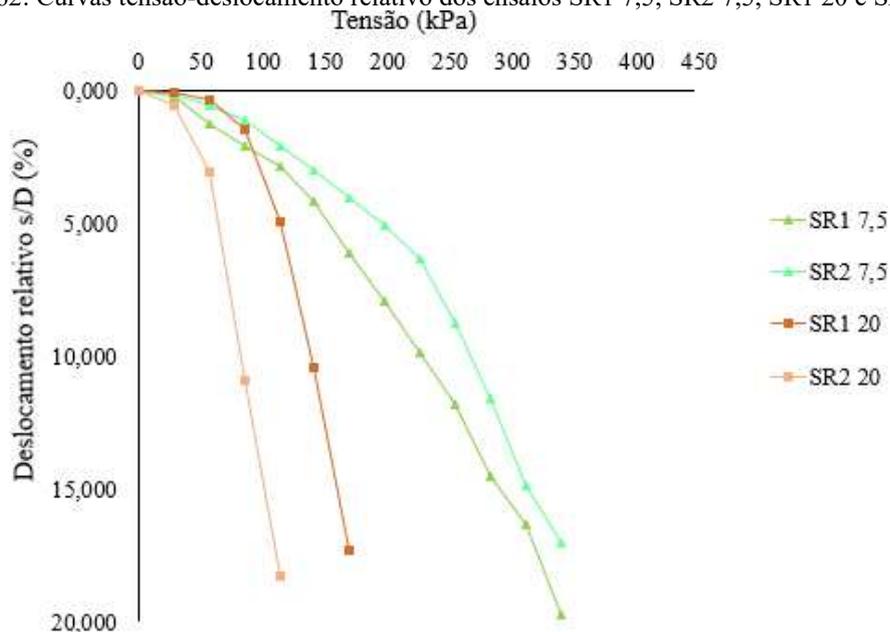
## 4.5 Análise global sobre o desempenho da geocélula

Este item apresenta os resultados e análises dos ensaios de placa agrupados. É abordado a influência da altura da geocélula na resistência do conjunto. A quantificação da melhoria do comportamento da fundação com a aplicação da geocélula foi realizada através de dois fatores. O primeiro é referente ao fator de melhora de capacidade de carga ( $I_f$ ) associado ao comportamento tensão-deslocamento e após os resultados são analisados através da porcentagem de redução no deslocamento da sapata (PRS) associado a tensão de carregamento.

### 4.5.1 Influência da altura da geocélula

Para analisar os benefícios do uso da geocélula como material de reforço, faz-se necessário avaliar o comportamento de tensão-deslocamento dos ensaios (SR1 7,5, SR2 7,5, SR1 20 e SR2 S0) somente com utilização do resíduo sobrejacente ao solo arenoso denso. O gráfico apresentado na Figura 62 mostra os resultados obtidos destes ensaios. Como trata-se de um solo arenoso denso, ou seja, um material mais resistente aos esforços solicitantes do que o resíduo, justifica o aumento da resistência nos ensaios SR1 7,5 e SR2 7,5 devido a espessura menor da camada quando comparado aos ensaios SR1 20 e SR2 20, que possuem uma espessura maior. Pokharel *et al.* (2010), diz que o solo de base compacto tendo como material sobrejacente uma areia mal graduada de menor altura aumenta a capacidade de carga do sistema.

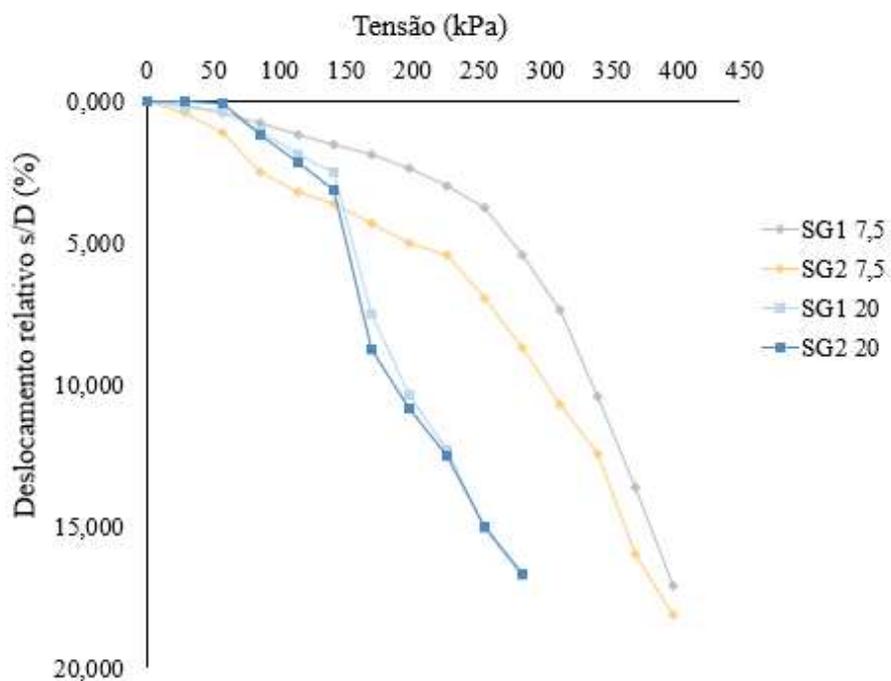
Figura 62: Curvas tensão-deslocamento relativo dos ensaios SR1 7,5, SR2 7,5, SR1 20 e SR2 20.



Fonte: Autor (2020).

As curvas tensão-deslocamento dos ensaios (SG 7,5 e SG 20) utilizando geocélulas de alturas 7,5 e 20 cm são apresentadas na Figura 63.

Figura 63: Curvas tensão-deslocamento dos ensaios SG 7,5 e SG 20.



Fonte: Autor (2020).

As geocélulas de 7,5cm e de 20cm de altura atingiram valores bem distintos. Os ensaios SG1 7,5 e SG2 7,5 obtiveram um ganho de capacidade de carga médio de 28,57%, cerca de 113,18kPa, quando comparado aos ensaios SG1 20 e SG2 20, ambos para um mesmo recalque de 25mm ou  $s/D=17\%$ . Neste caso o aumento na altura da geocélula não promoveu um aumento na capacidade de carga.

O ensaio SG 7,5 apresentou maior capacidade de suporte podendo este fato estar atribuído à elevada densidade relativa da areia ( $D_r=70\%$ ). Em estudo Dash (2010) verificou a influência da densidade relativa do solo de fundação na melhoria do desempenho do reforço geocelular. Realizou ensaios de carga em amostras de areia reforçadas e não reforçadas, com cinco densidades relativas de areia (30, 40, 50, 60 e 70%). Os resultados dos testes indicaram que o efeito benéfico do reforço da geocélula, em termos de aumento da rigidez, capacidade de suporte e dispersão de carga do solo da fundação, está presente no maior valor de densidade relativa, portanto, para a utilização efetiva do reforço de geocélulas, o solo da base deve ser compactado para maior densidade.

Um fator que pode estar relacionado a menor capacidade de suporte dos ensaios SG1 20 e SG2 20 é a espessa altura da camada, a flambagem da célula e a granulometria do material de preenchimento pois como não possui finos, não é sensível a umidade e de difícil compactação pois se movimenta com facilidade. Pesquisa realizada por Favretto (2018) apresentou comportamento tensão-deslocamento relativo semelhante aos observados nos ensaios SG1 20 e SG2 20.

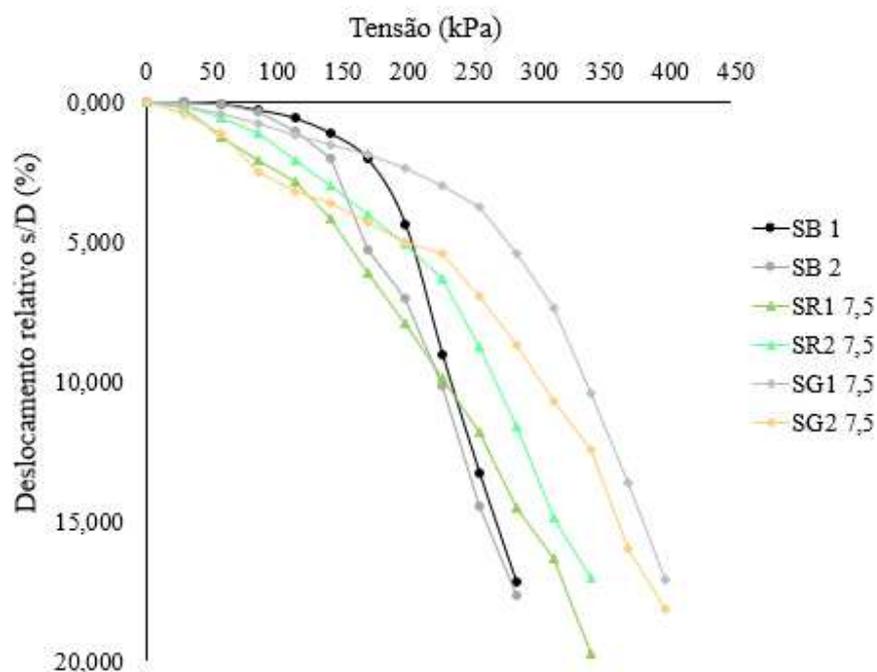
Dash et al. (2003) verificou o efeito da variação da largura do reforço onde sugerem uma relação de largura de geocélula ( $d$ ) e diâmetro da placa( $D$ ) igual a  $d/D = 0,8$ . Esse requisito não é verificado nesta pesquisa pois a placa com diâmetro de 15cm está locada no nó da célula que possui abertura de 29cm, ou seja,  $d/D= 1,93$ . Em um estudo experimental Rai (2010) verificou-se que a capacidade de carga da fundação reforçada é influenciada pela profundidade da colocação do painel de geocélulas, tamanho das bolsas e altura da célula e densidade relativa da do material de preenchimento.

#### 4.5.2 Fator de melhora da capacidade de carga (If)

As Figuras 54 e 55 apresentam os resultados comparativos de tensão-deslocamento dos ensaios (SB - SR 7,5 - SG 7,5) e (SB - SR 20 - SG 20). Analisando a Figura 64, para os carregamentos finais das curvas SR1 7,5, SR2 7,5, SG1 7,5 e SG2 7,5, verifica-se um aumento médio próximo a 15% na carga de ruptura da fundação, ou seja, um ganho de 56,50kPa com a inserção do reforço. Comparando os ensaios SB1 e SB2 com SG1 7,5e SG2 7,5 temos um aumento de resistência na ordem de 113,18kPa (28,57%).

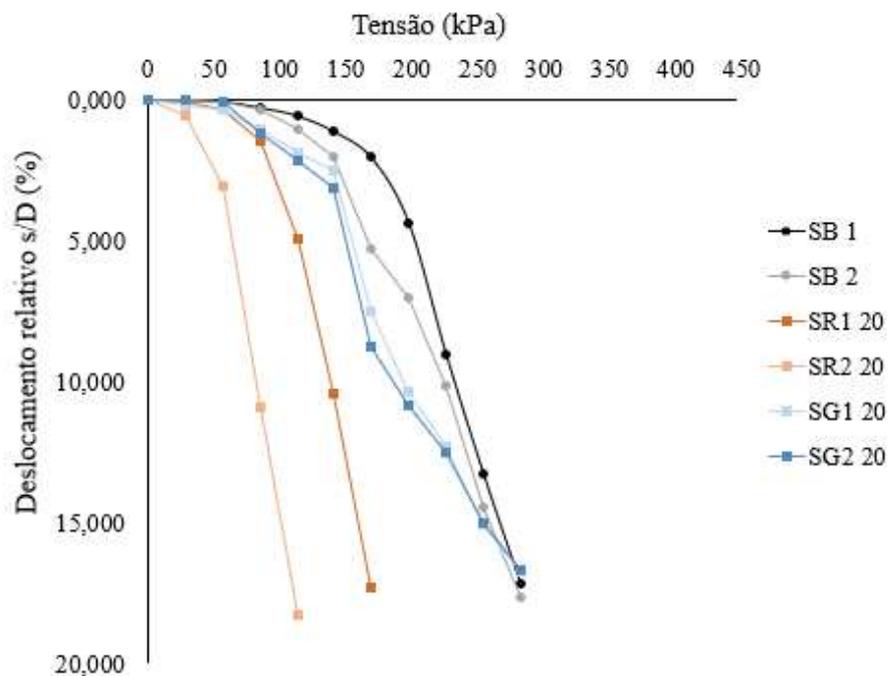
Já os resultados dos ensaios SR1 20, SR2 20, SG1 20 e SG 20 (Figura 65) o aumento da carga de ruptura fica na ordem de 50%, totalizando um acréscimo de 141,47kPa quando utilizado o reforço celular.

Figura 64: Curvas tensão-deslocamento relativo dos ensaios SB1, SB2, SR1 7,5, SR2 7,5, SG1 7,5 e SG2 7,5.



Fonte: Autor (2020).

Figura 65: Curvas tensão-deslocamento relativo dos ensaios SB1, SB2, SR1 7,5, SR2 7,5, SG1 7,5 e SG2 7,5.



Fonte: Autor (2020).

O fator de melhoria da capacidade de carga ( $I_f$ ) é um fator adimensional, obtido pela razão entre a carga aplicada sobre o sistema reforçado ( $\sigma_r$ ) e a carga aplicada sem o reforço ( $\sigma_o$ ), para um determinado valor de recalque (Dash et al., 2003), como descrito na Equação (1). Com este fator é possível avaliar o desempenho da geocélula preenchida com resíduo, sendo que pode ser calculado para qualquer ponto da curva (AVESANI NETO, 2013).

$$I_f = \frac{\sigma_r}{\sigma_o} \quad (1)$$

Onde:  $I_f$  = Fator de melhoria da capacidade de carga (adimensional);

$\sigma_r$  = Tensão aplicada no solo reforçado (kPa)

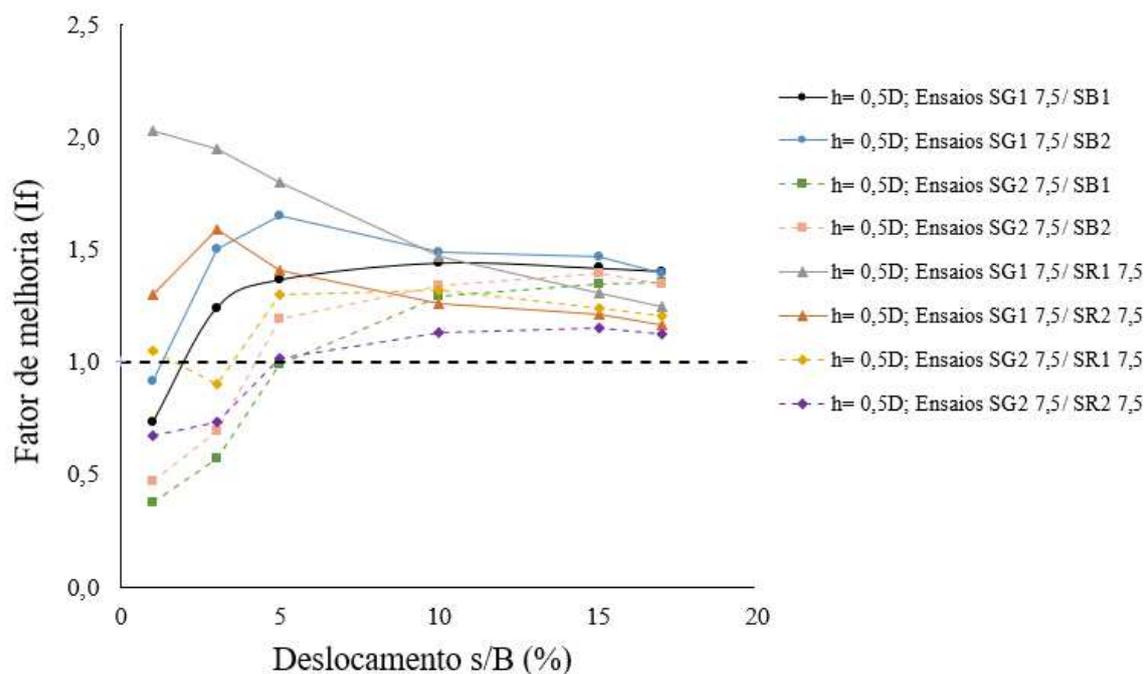
$\sigma_o$  = Tensão aplicada no solo (kPa)

O fator resultante ( $I_f$ ) deve ser analisado. Quando o mesmo for superior a um, tem-se que o solo reforçado produz melhoria na capacidade de carga, o contrário acontece quando esse valor for inferior a um (BARUFFI, 2016).

A Figura 66 representa a variação do fator de melhora de capacidade em função do recalque normalizado da placa ( $s/D(\%)$ ) para as os ensaios utilizando geocélulas com 7,5cm de altura. As comparações dos sistemas de reforço com geocélulas (SG1 7,5 (linhas

contínuas) e SG2 7,5 (linhas tracejadas)) foram em relação aos ensaios de referência realizados apenas sobre a areia SB1 e SB2 e, também, aos ensaios SR1 7,5, SR2 7,5. Nas Tab. 11 e 12 são apresentados uma síntese dos resultados em termos do fator de melhoria de capacidade de carga.

Figura 66: Variação dos fatores de melhora da capacidade de carga com o recalque da placa (If) ensaios SG1 7,5 e SG2 7,5.



Fonte: Autor (2020).

Tabela 11: Síntese dos resultados em termos do fator de melhora da capacidade de carga para os ensaios SG1 7,5.

Variáveis controláveis	Fator de melhora de capacidade de carga (If)						
	h/D	s/D (1%)	s/D (3%)	s/D (5%)	s/D (10%)	s/D (15%)	s/D (17%)
Material sem reforço							
Solo branco (SB1)	0,50	0,73	1,24	1,37	1,77	1,41	1,40
Solo branco (SB2)	0,50	0,91	1,50	1,64	1,49	1,46	1,39
Resíduo (SR1 7,5)	0,50	2,03	1,94	1,79	1,47	1,30	1,25
Resíduo (SR2 7,5)	0,50	1,30	1,59	1,40	1,26	1,21	1,17

Fonte: Autor (2020).

Tabela 12: Síntese dos resultados em termos do fator de melhora da capacidade de carga para os ensaios SG2 7,5.

Variáveis controláveis	Fator de melhora de capacidade de carga (If)						
	h/D	s/D (1%)	s/D (3%)	s/D (5%)	s/D (10%)	s/D (15%)	s/D (17%)
Material sem reforço							
Solo branco (SB1)	0,50	0,38	0,57	0,98	1,29	1,34	1,36
Solo branco (SB2)	0,50	0,47	0,69	1,19	1,34	1,39	1,35
Resíduo (SR1 7,5)	0,50	1,05	0,89	1,28	1,32	1,24	1,20
Resíduo (SR2 7,5)	0,50	0,67	0,73	1,01	1,13	1,15	1,12

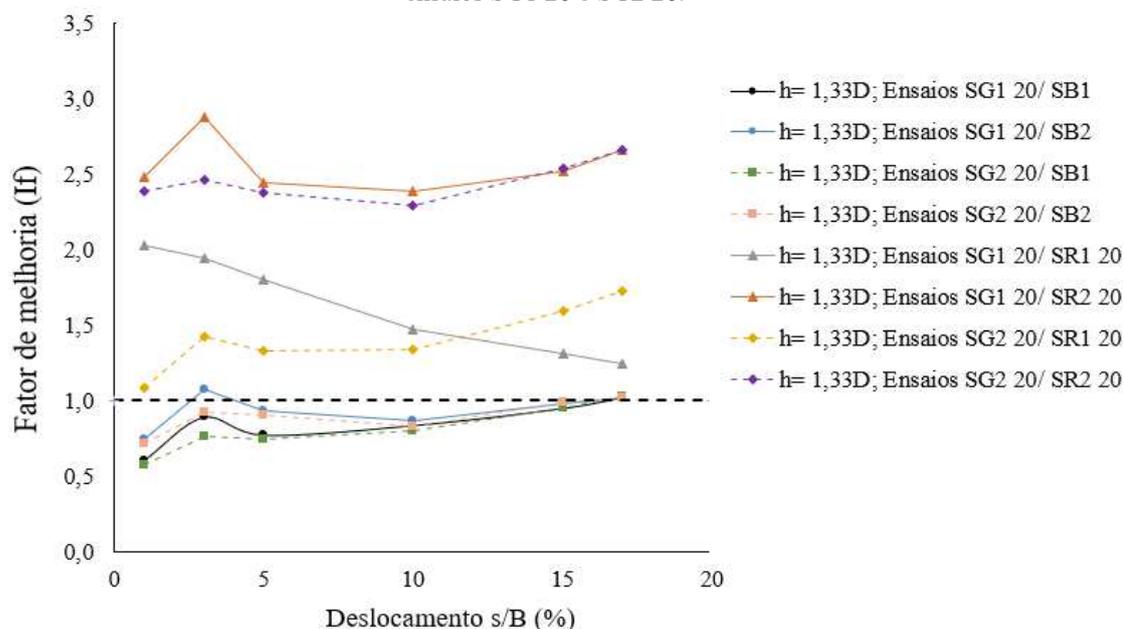
Fonte: Autor (2020).

Avaliando os dados das Tab. 11 e 12, nota-se que para os ensaios reforçados com geocélulas quando comparados aos ensaios com resíduo (SR1 7,5 e SR2 7,5) ficam acima da unidade 1, chegando a obter  $If = 1,25$ , verificando assim a melhoria de capacidade de carga de acordo com a equação proposta por Dash *et al.* (2003).

Observa-se que quando os ensaios de configuração solo reforçado com a geocélula são comparados com os ensaios de referência (SB1 e SB2), estes não apresentam melhoria para os carregamentos iniciais. A utilização da geocélula na altura de 7,5cm mostra-se ineficiente nos recalques normalizados inicialmente, após esse valor se modifica com o acréscimo das tensões, chegando a ter  $If$  de 1,40 vezes.

Na Figura 67 estão apresentadas as variações do fator de melhora de capacidade em função do recalque normalizado da placa ( $s/D(\%)$ ) para os ensaios SG1 20 (linhas contínuas) e SG2 20 (linhas tracejadas)), onde estes foram comparados aos ensaios de referência SB1 e SB2 e, também, aos ensaios SR1 20, SR2 20. Nas Tab. 13 e 14 são apresentados uma síntese dos resultados em termos do fator de melhora de capacidade de carga.

Figura 67: Variação dos fatores de melhora da capacidade de carga com o recalque da placa (If) para os ensaios SG1 20 e SG2 20.



Fonte: Autor (2020).

Tabela 13: Síntese dos resultados em termos do fator de melhora da capacidade de carga para o ensaio SG1 20.

Variáveis controláveis	Fator de melhora de capacidade de carga (If)						
	Material sem reforço	h/D	s/D (1%)	s/D (3%)	s/D (5%)	s/D (10%)	s/D (15%)
Solo branco (SB1)	1,33	0,6	0,89	0,76	0,83	0,95	1,03
Solo branco (SB2)	1,33	0,74	1,07	0,92	0,86	0,98	1,01
Resíduo (SR1 20)	1,33	1,12	1,65	1,37	1,39	1,58	1,72
Resíduo (SR2 20)	1,33	2,47	2,87	2,44	2,38	2,52	2,65

Fonte: Autor (2020).

Tabela 14: Síntese dos resultados em termos do fator de melhora da capacidade de carga para o ensaio SG2 20.

Variáveis controláveis	Fator de melhora de capacidade de carga (If)						
	Material sem reforço	h/D	s/D (1%)	s/D (3%)	s/D (5%)	s/D (10%)	s/D (15%)
Solo branco (SB1)	1,33	0,57	0,76	0,74	0,80	0,95	1,02
Solo branco (SB2)	1,33	0,72	0,92	0,90	0,82	0,98	1,01
Resíduo (SR1 20)	1,33	1,08	1,42	1,33	1,34	1,59	1,79
Resíduo (SR2 20)	1,33	2,38	2,46	2,37	2,28	2,53	2,67

Fonte: Autor (2020).

Os ensaios realizados com o solo reforçado com geocélula de 20cm confrontado com os ensaios SB1 e SB2, não ofertaram melhoria na capacidade de carga do solo inicialmente, esse valor se modificou com o acréscimo das tensões. O fator de melhoria fica em média 1,02 vezes a capacidade no último incremento de carga, se aproximando da unidade no momento da ruptura do solo.

Os resultados de  $I_f$  indicam que a influência do uso da geocélula foi mais significativa para níveis mais elevados de recalque. Os índices mais altos de  $I_f$  foram observados para a maior altura de geocélula (SG1 20 e SG2 20) quando comparados com os ensaios SR1 20 e SR 2 20 chegando a  $I_f$  médio igual a 2,20. Os ensaios executados nas configurações SG1 7,5 e SG2 7,5 mostraram-se eficazes quando avaliados com SB1 e SB2 obtendo um  $I_f$  médio de 1,38. Em sua tese, Avessani Neto (2013) diz que para pequenos recalques todas as formas de reforço possuem o mesmo desempenho, sendo este sensivelmente superior ao solo não reforçado.

#### 4.5.3 Porcentagem de redução no deslocamento da sapata (PRS).

A Porcentagem de redução no deslocamento da sapata (PRS) é uma comparação entre os recalques desenvolvidos nos ensaios com e sem reforço. É determinado pela divisão da diferença entre os recalques do solo não reforçado com o solo reforçado e o recalque do solo não reforçado, para um determinado valor de carga (Equação 2). Este parâmetro também pode ser determinado em qualquer ponto da curva.

$$PRS = \left( \frac{S_o - S_r}{S_o} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$PRS$  = Porcentagem de redução no deslocamento da sapata (%);

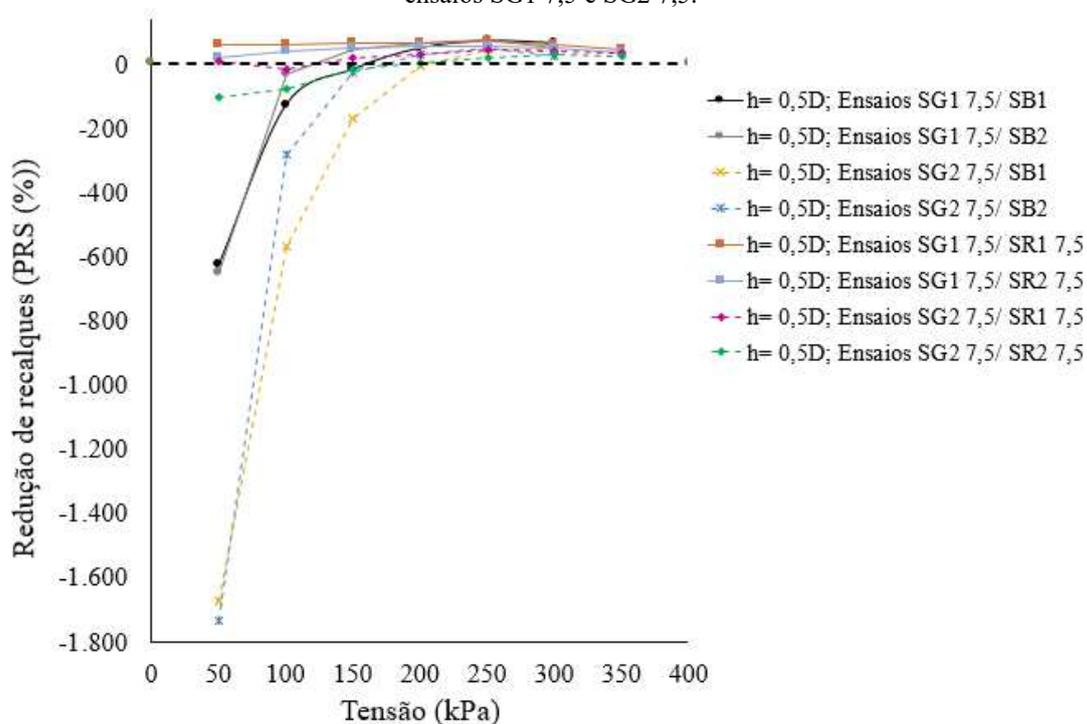
$S_r$  = Recalque do solo reforçado (mm);

$S_o$  = Recalque do solo não reforçado (mm).

As Fig. 68 e 69 mostram as curvas de PRS para as configurações de ensaios com a utilização de reforço com geocélulas nas alturas 7,5cm e 20cm, respectivamente, cujos resultados se encontram sintetizados nas Tab. 15, 16, 17 e 18. Os PRS's foram analisados da mesma forma que os fatores de melhora de capacidade de carga ( $I_f$ ). As curvas em linha contínua referem-se a comparação dos ensaios SG1 7,5 com os ensaios de referência

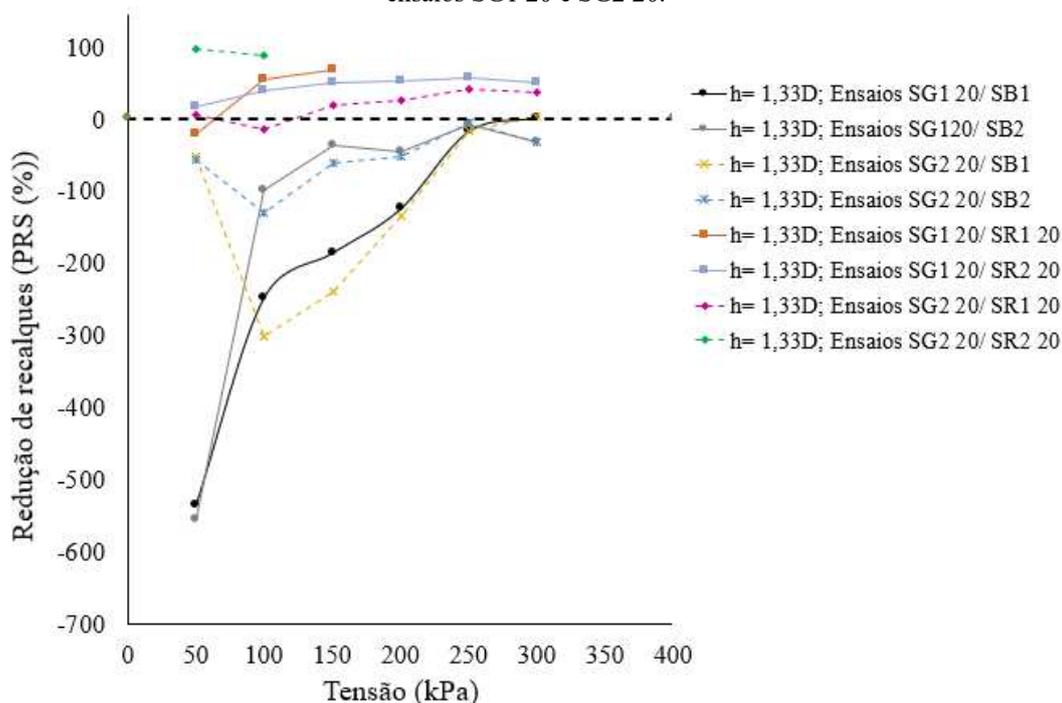
(SB1 e SB2) e com os ensaios SR1 7,5 e SR2 7,5. As curvas em linha tracejada apresentadas referem-se ao PRS quando comparados SG2 7,5 com SB1, SB2, SR1 7,5 e SR2 7,5.

Figura 68: Variações das porcentagens de redução no deslocamento da sapata com a tensão para os ensaios SG1 7,5 e SG2 7,5.



Fonte: Autor (2020).

Figura 69: Variações das porcentagens de redução no deslocamento da sapata com a tensão para os ensaios SG1 20 e SG2 20.



Fonte: Autor (2020).

Tabela 15: Síntese dos resultados em termos da percentagem de redução do deslocamento da sapata SG1 7,5.

Variáveis controláveis		Porcentagem de redução do deslocamento da sapata (PRS)							$\sigma_{rup}$
Material sem reforço	h/D	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa	250 kPa	300 kPa	350 kPa	
Solo branco (SB1)	0,50	-625,25	-128,90	-17,32	48,37	70,90	-	-	63,72
Solo branco (SB2)	0,50	-648,65	-31,54	44,40	66,67	73,37	-	-	64,67
Resíduo (SR1 7,5)	0,50	61,86	60,49	65,07	64,79	68,26	57,74	-	42,85
Resíduo (SR2 7,5)	0,50	17,38	39,56	49,67	53,18	56,13	51,41	-	33,89

Fonte: Autor (2020).

Tabela 16: Síntese dos resultados em termos da percentagem de redução do deslocamento da sapata para o ensaio SG2 7,5.

Variáveis controláveis		Porcentagem de redução do deslocamento da sapata (PRS)							$\sigma_{rup}$
Material sem reforço	h/D	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa	250 kPa	300 kPa	350 kPa	
Solo branco (SB1)	0,50	-1676,25	-567,01	-170,92	-6,99	46,69	-	-	45,73
Solo branco (SB2)	0,50	-1733,55	-283,30	-28,38	30,93	51,21	-	-	47,15
Resíduo (SR1 7,5)	0,50	6,59	-15,11	19,35	27,02	41,87	36,80	-	32,31
Resíduo (SR2 7,5)	0,50	-102,35	-76,11	-16,21	2,96	19,73	27,33	-	21,69

Fonte: Autor (2020).

Os valores negativos apresentados nas Tab. 15 e 16 indicam que a utilização do reforço não foi capaz de reduzir os deslocamentos da placa, visto que com o acréscimo de tensões a redução do deslocamento da sapata torna-se significativa.

O solo reforçado (SG1 7,5) comparado com SR1 7,5 e SR2 7,5 obteve valores significativos desde os incrementos iniciais de carga alcançando uma redução média elevada de 62,19% em 250kPa, após 250kPa, a PRS decresceu, chegando a 38,37% de redução média na carga de ruptura. Os resultados dos ensaios SG1 7,5 e SG2 7,5 referentes à comparação entre os ensaios realizados com o ensaio de referência (SB1 e SB2) mostram que ocorreu uma redução expressiva com a utilização da geocélula de altura 7,5, chegando a 55,31% a diminuição média de deslocamento da sapata.

Nas Tab. 17 e 18 pode-se visualizar os resultados de redução do deslocamento para os ensaios SG1 20 e SG2 20 comparados com SB1, SBE, SR1 20 e SR2 20.

Tabela 17: Síntese dos resultados em termos da porcentagem de redução do deslocamento da sapata para o ensaio SG1 20.

Variáveis controláveis		Porcentagem de redução do deslocamento da sapata (PRS)							$\sigma_{rup}$
Material sem reforço	h/D	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa	250 kPa	300 kPa	350 kPa	
Solo branco (SB1)	1,33	-535,93	-247,55	-185,79	-124,39	-16,64	-	-	2,52
Solo branco (SB2)	1,33	-556,45	-99,72	-35,42	-44,84	-6,75	-	-	9,28
Resíduo (SR1 7,5)	1,33	-20,37	54,71	-	-	-	-	-	67,54
Resíduo (SR2 7,5)	1,33	86,18	-	-	-	-	-	-	89,81

Fonte: Autor (2020).

Tabela 18: Síntese dos resultados em termos da porcentagem de redução do deslocamento da sapata para o ensaio SG2 20.

Variáveis controláveis		Porcentagem de redução do deslocamento da sapata (PRS)							$\sigma_{rup}$
Material sem reforço	h/D	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa	250 kPa	300 kPa	350 kPa	
Solo branco (SB1)	1,33	-51,35	-300,77	-239,48	-134,24	-16,23	-	-	2,72
Solo branco (SB2)	1,33	-56,24	-130,306	-60,87	-51,20	-6,28	-	-	9,46
Resíduo (SR1 7,5)	1,33	71,35	47,77	-	-	-	-	-	61,44
Resíduo (SR2 7,5)	1,33	96,71	-	-	-	-	-	-	88,25

Fonte: Autor (2020).

Analisando as Tab. 17 e 18, nota-se que a maior PRS no valor médio de 76,76% no instante da ruptura é referente às comparações entre os ensaios realizados com a camada de resíduo (SR1 20 e SR2 20). Não são verificadas reduções de deslocamento para os ensaios com geocélula de 20cm (SG1 20 e SG2 20) versus os ensaios em solo branco (SB1 e SB2) nos incrementos iniciais de carga, porém na ruptura ambos ensaios apresentaram uma pequena PRS.

O uso de geocélula com 7,5cm de altura promoveu um aumento da capacidade de carga do solo devido a restrição do deslocamento lateral do material de preenchimento (efeito de confinamento) promovido pela estrutura tridimensional das células. A

flambagem das células ocorreu em todos os ensaios realizados com o reforço, porém devido a isso e ao fato do material de preenchimento ter baixa resistência e ser muito instável, os ensaios com a utilização do reforço celular com 20cm de altura não se mostraram eficazes para aumento de capacidade de carga do solo, porém os recalques obtidos são minimizados com o uso deste geossintético, quando comparado ao uso da geocélula de 7,5cm.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentar-se-á as principais conclusões a respeito desta pesquisa, e no final, foram sugeridas propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

Investigou-se no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Passo Fundo através de ensaios experimentais de provas de carga o comportamento de um solo arenoso denso. Foram realizados ensaios sem reforço e reforçados com geocélulas de 7,5cm e 20cm, preenchidas com resíduo de pedras preciosas oriundos do sul do Brasil.

Após análises dos resultados as principais conclusões acerca do comportamento de geocélulas preenchidas com resíduo de pedras preciosas sobre solo arenoso denso estão dispostas abaixo.

1) A utilização da geocélula com 7,5 cm de altura, nesta pesquisa, resultou em recalques mais uniformes devido ao efeito da distribuição das tensões. O solo de base, por ser mais rígido, contribuiu para o aumento da capacidade de carga neste sistema de camada menos espessa.

2) As maiores elevações do solo ocorreram com o uso da geocélula de menor altura. As elevações menos expressivas do solo ao entorno da placa foram observadas com a utilização da geocélula de maior altura.

3) Os mecanismos de ruptura do solo foram semelhantes e independentes da utilização do reforço, apresentando levantamentos ou recalques na camada de resíduo. A baixa resistência dessa camada está relacionada com a faixa granulométrica, instabilidade e densidade em que foram testadas.

4) Os maiores deslocamentos relativos, bem como a menor resistência da fundação, foram observados nos ensaios sem reforço na camada mais espessa de resíduo.

5) O comportamento carga-recalque desassemelha-se para as alturas de geocélulas testadas, indicando que esse parâmetro influenciou no aumento da resistência do solo utilizado nesta pesquisa.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Em razão das ressalvas apresentadas nesta pesquisa, como forma de ampliação do conhecimento atual acerca de solos reforçados com geocélulas, foram formuladas algumas sugestões para pesquisas futuras:

- 1) Analisar como as geocélulas preenchidas com o resíduo de beneficiamento de pedras preciosas se comportam com diferentes tipos de fundações;
- 2) Executar provas de carga nas mesmas condições utilizando geocélulas de tamanhos e geometrias diferenciados;
- 3) Analisar a influência da localização da aplicação de carga na geocélula, ou seja, executar provas de carga nas paredes das células utilizando os mesmos parâmetros;
- 4) Adotar materiais finos como preenchimento (areia, RCC miúdo, etc), a fim de analisar a influência dos mesmos.
- 5) Estudar o comportamento de solos reforçados com geocélulas utilizando placa maior que a abertura de célula.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6489:1984. **Prova de carga direta sobre terreno de fundação**. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR6508: **Grãos de Solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7181:2016. Solo – **Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 10004:2004. **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 10005:2004. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 10006:2004. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 12004:1990. **Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1990.

\_\_\_\_\_. NBR 12051:1991. **Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1991.

AGDI. Agência Gaúcha de Desenvolvimento e Promoção do Investimento. **Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos para o Arranjo Produtivo Local – Pedras, Gemas e Joias**. Porto Alegre, 2014.

ALMEIDA, M. DE S. S.; MARQUES, M. E. S. **Design and Performance of Embankments on Very Soft Soils**. 196 p. London: Taylor & Francis Group, 2013.

Al-Qadi, I.L., Hughes, J.J., 2000. Field evaluation of geocell use in flexible pavements. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1709, 26 e 35.

AVESANI NETO, J. O.; BUENO, B. de S., Capacidade de carga de solos reforçados com geocélula. **COBRANSEG 2010: Engenharia Geotécnica para o desenvolvimento, inovação e sustentabilidade**.

AVESANI NETO, J. O. **Desenvolvimento de uma metodologia de cálculo e simulações numéricas aplicadas na melhoria da capacidade de carga de solos reforçados com geocélula**. 336 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

AVESANI NETO, J. O.; BUENO, B. S.; FUTAI, M. M. A Bering capacity calculation method for soil reinforced with a geocell. **Geosynthetics International**, v. 20, n. 3, p. 129–142, 2013.

BARUFFI, A.; FLOSS, M. F.; MIGUEL, G. D. Geocélulas preenchidas com resíduo de pedras semipreciosas. In: 18º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais do XVIII Cobramseg**, Belo Horizonte, 2016.

BARUFFI, A., 2016. Comportamento mecânico de geocélulas preenchidas com resíduo de pedras semipreciosas. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo.

BATHURST, R. J. and Jarrett, P. M., Large-scale model tests of geocomposite mattresses over peat subgrades. *Transportation Research Record*, 1988, 1188, 28±36.

BATHURST, R.J., KARPURAPU, R.. Large scale triaxial compression testing of geocell reinforced granular soils, **Geotech. Test. J.** 16 (3) (1993) 296–303.

BATHURST, R.J., 2016. Classificação dos Geossintéticos. Informações Técnicas, **International Geosynthetic Society – IGS**

BISWAS, A.; DASH, S. K.; KRISHNA, A. M. Parameters influencing the performance of geocell-reinforced foundation system: A brief review. In: **Proceedings of Indian Geotechnical Conference**. Paper B 268, Delhi, 2012.

BETAT, E. F.; PEREIRA, F. M.; DE VERNEY, J. C. K. Concretos produzidos com resíduos do beneficiamento de ágata: Avaliação da resistência à compressão e do consumo de cimento. **Revista Matéria**, v. 14, n. 3, p. 1047-1060, 2009.

BISWAS, A., MURALI K. A., DASH, S.K., 2013. Influence of subgrade strength on the performance of geocell-reinforced foundation systems. **Geosynth. Int.** 20, 376 e 388. 2013.

BISWAS, A.; KRISHNA, A. M.. Geocell-Reinforced Foundation Systems: A Critical Review. **International Journal Of Geosynthetics And Ground Engineering**, [s.l.], v. 3, n. 2, p.1-18, 12 maio 2017. Springer Nature.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. Propriedades, ensaios e normas. In: VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2 ed. São Paulo: Blucher. p. 47-84, 2015.

BUSH, D.i.; JENNER, C.g.; BASSETT, R.h.. The design and construction of geocell foundation mattresses supporting embankments over soft grounds. **Geotextiles And Geomembranes**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.83-98, jan. 1990. Elsevier BV.

CASTRO, A. T. DE, SAYÃO, A. de S. F. J., 2008. Ensaio de rampa e de cisalhamento direto em interfaces solo—geossintético. Rio de Janeiro. 119p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CHANG, T.-T., CHANG, C.-H., PEI, S.-W., 2007. Investigation of the bearing capacity and dynamic-elastic behavior of mechanical stabilization of sandy subgrade using geocells. In: **Transportation Research Board 86th Annual Meeting**. 2007.

CHEN, R.; HUANG, Y.; HUANG, F.. Confinement effect of geocells on sand samples under triaxial compression. **Geotextiles And Geomembranes**, [s.l.], v. 37, p.35-44, abr. 2013. Elsevier BV.

CONSOLI, N.; CRUZ, R.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. ASCE 136 (5), p. 759-763, 2010.

CONSOLI, N. C.; MORAES, R. R. de; FESTUGATO, L.. Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Fiber-Reinforced Cemented Soil. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 25, n. 10, p.1568-1573, out. 2013. American Society of Civil Engineers (ASCE)

COSTA, R. M. O Arranjo Produtivo Local de Pedras, Gemas e Joias do Corede Alto da Serra do Botucaraí. In: MACADAR, B. M.; COSTA, R. M. (Org.). **Aglomeraciones e Arranjos produtivos Locais no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEE. p. 140-194, 2016.

CRUZ, R. C.. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada**. 2008. 216 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DALLA ROSA, F.; THOMÉ, A.; DONATO, M. Análise da viabilidade técnica da aplicação do resíduo da rolagem de pedras preciosas em estruturas de pavimentos urbanos. In: HARTMANN, L. A. et al. **Tecnologias e Inovações em gemas, joias e mineração**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, p. 91-98, 2014.

DASH, S. K.; KRISHNASWAMY, N. R.; RAJAGOPAL, K. Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 19, p. 235-256, 2001.

DASH, S.K.; RAJAGOPAL, K.; KRISHNASWAMY, N.R. Strip footing on geocell reinforced sand beds with additional planar reinforcement. **Geotextiles and Geomembranes**. n. 19, p. 529–538, 2001a.

DASH, S. K.; SIREESH, S.; SITHARAM, T. G. Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 21, p. 197-219, 2003.

DASH, S. K.; RAJAGOPAL, K.; KRISHNASWAMY, N. R. Behavior of geocell reinforced sand beds under strip loading. **Canadian Geotechnical Journal**, Journal of National Research Council, v. 44, p. 905-906, 2007.

DASH, S. K.; REDDY, P. D. T.; RAGHUKANTH, S. T. G.. Subgrade modulus of geocell-reinforced sand foundations. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Ground Improvement**, [s.l.], v. 161, n. 2, p.79-87, Maio 2008. Thomas Telford Ltd.

DASH, S. K.. Influence of Relative Density of Soil on Performance of Geocell-Reinforced Sand Foundations. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 22, n. 5, p.533-538, maio 2010. American Society of Civil Engineers (ASCE).

DONATO, M. **Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno**. 2007. 146 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

DUTTA, S., MANDAL, J.N., 2016. **Model studies on geocell-reinforced fly ash bed overlying soft clay**. *J. Mater. Civil Eng.* 28, 04015091. 2016.

FAVRETTO, J. **Melhoramento de solos através de geocélulas preenchidas com resíduo de pedras preciosas**. 2017. 53 f. Projeto de pesquisa (Dissertação - Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2018.

FILGUEIRA, A. R. G.. **Análise técnica e econômica da aplicação de geocélulas para reforço de fundações diretas: estudo de caso**. 2016. 14 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2016.

FLOSS, M. F.; DE REZENDE, I. M.; FERREIRA, P. H. G.; THOMÉ, A.; CONSOLI, N. C. Avaliação das resistências à compressão simples e tração de resíduo de ágata artificialmente cimentado. **Ciência e Engenharia**. v. 25, n. 1, p. 01-06, 2016.

GEOSOLUÇÕES. Estudo de caso: melhora da capacidade de suporte em terminais portuários. **Geo Soluções – A Strata Company**. Disponível em <https://www.geosolucoes.com/copia-nova-pagina-strataweb>. Acesso em: Outubro 2017.

HARTMANN, L. A. Geologia da riqueza do Rio Grande do Sul em geodos de ágata e ametista. In: HINRICHS, R. (Org.). *Técnicas instrumentais não destrutivas aplicadas a gemas do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: UFRGS, 2014. p. 15-26.

HEGDE, Amarnath M.; SITHARAM, T.g.. Effect of infill materials on the performance of geocell reinforced soft clay beds. **Geomechanics And Geoenvironmental Engineering**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.163-173, 15 jul. 2014. Informa UK Limited.

HEGDE, A.. Geocell reinforced foundation beds-past findings, present trends and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 154, p.658-674, nov. 2017. Elsevier BV.

INDRARATNA, B., BIABANI, M., NIMBALKAR, S., 2014. Behavior of geocell-reinforced subballast subjected to cyclic loading in plane-strain condition. **J. Geotechnical and Environmental Engineering**. 141 (1), 04014081.

IPAR, C. E. A. L.; VILASBÔAS, F. S.; BISINELLA, J. C.; FERREIRA, N. F.; SILVA, J. T. Revisão da metodologia para desenvolvimento de matéria-prima para impressão tridimensional. **Revista Ciatec-UPF**. v. 4, p. 33-47, 2012.

ISO. International Organization for Standardization. ISO 10318-1:2015. **Geosynthetics – Part 1: Terms and definitions**. 2015.

KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics**. 3 ed. Englewood Cliffs, Nova Jersey, prentice Hall, 1994, 796p.

LAMBERT, S.; NICOT, F.; GOTTELAND, P.. Uniaxial compressive behavior of scrapped tire and sand-filled wire netted geocell with a geotextile envelope. **Geotextiles And Geomembranes**, [s.l.], v. 29, n. 5, p.483-490, out. 2011. Elsevier BV.

LAVOIE, F. L., BENJAMIM, C. V. DOS S., PALMA, S. L., BOTELHO, C., 2016. **Experiência na utilização de geocélulas de polipropileno em obras de engenharia**. Disponível em: <http://geosynthetica.net.br/wp-content/uploads/003-GeoAm-Geocelulas-de-Polipropileno-em-Obras-de-Engenharia.pdf>. Acesso em: outubro de 2017.

LOPES, M. L. Soil-geosynthetic interaction. In: SHUKLA, S.K. **Geosynthetics and their Applications**. p. 55-79. London: Thomas Telford, 2002.

MACCAFERRI, Especificação técnica – Sistema de confinamento celular Geocélula MacWeb P2507.3. Rev. 00. 01/06/2017.

MENESES, L. A. de. **Utilização de geocélulas em reforço de solo mole**. 2004. 86 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MIGUEL, G. D.; ABIDO, L. C.; BARUFFI, A.; FLOSS, M. F. Utilização de resíduo de beneficiamento de pedras semi-preciosas em geocélulas. In: 8º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia. **Anais do VIII CLBG**, Porto, 2016.

Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Brasil.

MONTGOMERY, M. D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística e probabilidade para engenheiros**. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2 ed., 2003.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos – Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Editora Unicamp, Campinas - SP, 2 ed., 2003.

OBER. **Catálogo Fortcell Geocélula**, 2017. Disponível em: <http://www.obergeo.com.br/catalogo/catalogo-FORTCELL.pdf>. Acesso em: outubro, 2017.

OLIAEI, M.; KOUZEGARAN, S.. Efficiency of cellular geosynthetics for foundation reinforcement. **Geotextiles And Geomembranes**, [s.l.], v. 45, n. 2, p.11-22, abr. 2017. Elsevier BV.

PEDRO, R. et al. Production of Aerated Foamed Concrete with Industrial Waste from the Gems and Jewels Sector of Rio Grande do Sul-Brazil. **Applied Sciences**, [s.l.], v. 7, n. 10, p.985-986, 26 set. 2017. MDPI AG

PICOLOTTO, G. **Proposta de produção mais limpa aplicada em uma empresa de beneficiamento de pedras preciosas em Soledade – RS**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013.

POKHAREL, S. K. et al. Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading. **Geotextiles And Geomembranes**, [s.l.], v. 28, n. 6, p.570-578, dez. 2010. Elsevier BV.

RAI, M. **Geocell-sand mattress overlying soft clay subgrade: Behavior under circular loading**. 2010. 261 p. Thesis (Doctor of Philosophy in Civil Engineering), Indian Institute of Technology Guwahati, Guwahati, India, 2010.

RAJAGOPAL, K.; KRISHNASWAMY, N. R.; MADHAVI LATHA, G. Behaviour of sand confined with single and multiple geocells. **Geotextiles and Geomembranes** v. 17 p. 171-184, 1999.

REA C., . MITCHELL, J.K., Sand reinforcement using paper grid cells. **ASCE Spring Convention and Exhibit**, Preprint 3130, Pittsburgh, PA, April, 24–28, 1978.

SARSBY, R. W. **Environmental Geotechnics**. 519 p. 2 ed. London: ICE Publishing, 2013.

SIREESH, S.; SITHARAM, T. G.; DASH, S. K. Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 27, p. 89-98, 2009.

SPINELLI, L.F. **Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados**. Porto Alegre, 1999. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de PósGraduação em Engenharia Civil da UFRGS.

SITHARAM, T.g.; HEGDE, A.. Design and construction of geocell foundation to support the embankment on settled red mud. **Geotextiles And Geomembranes**, [s.l.], v. 41, p.55-63, nov. 2013. Elsevier BV.

Standard Methods for the examination of water and wastewater - 5520 Oil and grease. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 1999.

TMP Geosynthetics. Products. **Textured HDPE Geocell, Smooth HDPE Geocell**. 2017. Disponível em: [http://www.tmpgeosynthetics.com/product\\_list.aspx?Pid=18](http://www.tmpgeosynthetics.com/product_list.aspx?Pid=18)  
Acesso em: setembro, 2017.

THOMÉ, A.; SCHNEIDER, I. A. H.; DALLA ROSA, F.; CONSOLI, N. C. Caracterização geotécnica de um resíduo da indústria de pedras semipreciosas e viabilidade de seu uso em estabilização de solos. In: 12º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais do XII Cobramseg**. São Paulo. p. 229-238, 2002.

THOMÉ, A.; ABREU, A. G.; BRANDLI, L. L.; FERNANDES, V. M. C.; PRIETTO, P. D. M. Diagnóstico dos resíduos gerados pelo setor de pedras preciosas do município de Soledade/RS. **Tecnologias para o setor de gemas, joias e mineração**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, p. 90-105, 2010.

TONELLO, R. et al. Uso do residuo da rolagem de pedr ágata como adição mineral em blocos para pavimentação de baixo custo. **Ações aplicadas a cadeia produtiva de gemas e jóias do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre: IGEO/UFRGS. 2017, p.118-129, 2017.

Greenfix Soil Stabilisation & Erosion Control. **The History of Geocells**. 2016. Disponível em: <http://greenfix.co.uk/wp-content/uploads/2016/06/The-History-of-Geocells.pdf> Acesso em: setembro, 2017.

VIEIRA, L. C. et al. Avaliação dos impactos ambientais do beneficiamento de pedras preciosas. **3º Congresso Internacional de Tecnologias Para O Meio Ambiente**, Bento Gonçalves, p.1-9, Abr. 2012.

YU, Y., BATHURST, R.J., ALLEN, T.M., NELSON, R., 2016. Physical and numerical modelling of a geogrid reinforced incremental concrete panel retaining wall. *Can. Geotech.* 2016.

ZHANG, M; A JAVADI,; MIN, X. Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions. **Geotextiles And Geomembranes**, [s.l.], v. 24, n. 4, p.201-209, ago. 2006. Elsevier BV.



# UPF

UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)