

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  
RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE PEDRAS  
PRECIOSAS PARA REFORÇO EM UM SOLO ARENOSO

Vanuza L. Bonetti

Passo Fundo



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**VANUZA LORENZET BONETTI**

**DESEMPENHO DE GEOCÉLULAS PREENCHIDAS COM RESÍDUO DO**  
**BENEFICIAMENTO DE PEDRAS PRECIOSAS PARA**  
**REFORÇO EM UM SOLO ARENOSO**

**PASSO FUNDO**

**2020**

**VANUZA LORENZET BONETTI**

**DESEMPENHO DE GEOCÉLULAS PREENCHIDAS COM O RESÍDUO DO  
BENEFICIAMENTO DE PEDRAS PRECIOSAS PARA  
REFORÇO EM UM SOLO ARENOSO**

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 a obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob orientação do prof. Dr. Márcio Felipe Floss.

**PASSO FUNDO**

**2020**

CIP – Catalogação na Publicação

---

B712d Bonetti, Vanuza Lorenzet

Desempenho de geocélulas preenchidas com resíduo do beneficiamento de pedras preciosas para reforço em um solo arenoso / Vanuza Lorenzet Bonetti. – 2020.

102 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Felipe Floss.

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

1. Geotécnica. 2. Mecânica do solo. 3. Solos - Testes.

I. Bonetti, Vanuza Lorenzet, orientador. II. Título.

CDU: 624.131

---

Catalogação: Bibliotecário Luís Diego Dias de S. da Silva – CRB 10/2241

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO  
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a dissertação de mestrado **DESEMPENHO DE GEOCÉLULAS PENCHIDAS COM O RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE PEDRAS PRECIOSAS PARA REFORÇO DE UM SOLO ARENOSO**, elaborada por VANUZA L. BONETTI, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Membros da Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Márcio Felipe Floss**

Orientador

**Prof. Dr. Luizmar da Silva Lopes Junior**

Universidade de Passo Fundo

**Prof. Dr. Maciel Donato**

Universidade de Passo Fundo

**Prof. Dr. Gregório Luís da Silva Araújo**

Universidade de Brasília

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a toda comunidade acadêmica, ao meu esposo, demais familiares e amigos pelo apoio durante esta trajetória.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela vida, saúde durante o decorrer do curso.

Ao meu esposo Ronaldo pela colaboração, que não mediu esforços para que esta etapa fosse concluída. Por todo incentivo, apoio e compressão.

Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Felipe Floss, pela disponibilidade e dedicação em me auxiliar, por todo conhecimento repassado e confiança ao longo deste trabalho.

A todos os colaboradores do CETEC, em especial ao Sr. Leunir pela paciência e colaboração durante as atividades.

Aos meus colegas de mestrado, pela amizade e convívio.

A minha colega e amiga Julia Favretto, que sempre me auxiliou durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UPF, professores e demais funcionários.

À UPF, pela bolsa de estudos concedida.

## RESUMO

Diante do acelerado processo de urbanização, há a necessidade da ocupação por áreas com características geotécnicas viáveis para a construção e implantação dos serviços que fazem parte do ambiente urbano. Atualmente, o desenvolvimento de técnicas que melhoram a capacidade do solo em receber esforços depende de materiais que agredem o meio ambiente, logo, a necessidade de alternativas mais sustentáveis para a Geotecnia e a Construção Civil é inevitável. Desta forma, esta pesquisa tem por objetivo analisar a influência que o sistema de reforço com geocélulas preenchidas com resíduos do beneficiamento de pedras preciosas exerce sobre um solo arenoso. Utilizando o ensaio de placa, investigou-se o desempenho das geocélulas com preenchimento de resíduos sobre um solo arenoso. O programa experimental proposto buscou analisar o comportamento do solo granular com densidade de 30%, sem reforço e reforçado com geocélulas de 7,5 cm e 20 cm de altura, submetidos a carregamentos estáticos. Ao efetuarmos os ensaios obtivemos aumento na capacidade de carga do solo reforçado em relação ao sem reforço em até 2 vezes, dependendo da configuração e altura da camada.

Palavras-chave: geocélula, capacidade de carga, ensaio de placa, resíduo granular.



## **ABSTRACT**

In view of the accelerated urbanization process, there is a need to occupy areas with viable geotechnical characteristics for the construction and implementation of services that are part of the urban environment. Currently, the development of techniques that improve the soil's capacity to receive, depends on materials that harm the environment, so the need for more sustainable alternatives for Geotechnics and Civil Construction is inevitable. This research aims to analyze the influence that the reinforcement system with geocells filled with residues from processing precious stones on a sandy soil. Using the plate test, the performance of the geocells with filling of residues on a sandy soil. The proposed experimental program sought to analyze the behavior of the granular soil with a density of 30%, without reinforcement and reinforced with 7.5 cm and 20 cm high geocells, subjected to static loads. When carrying out the tests, we obtained an increase in the load capacity of the reinforced soil compared to without reinforcement by up to 2 times, depending on the configuration and height of the layer.

**Keywords:** geocell, load capacity, plate test, granular residue.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de geocélula .....	23
Figura 2: Padrões utilizados para a formação de geocélulas .....	24
Figura 3: Tensões atuantes no sistema de confinamento .....	26
Figura 4: Sistema de distribuição de tensões .....	26
Figura 5: Efeito membrana no sistema de reforço .....	27
Figura 6: Controle de erosão com aplicação de geocélula .....	40
Figura 7: Reforço de subleito com uso de geocélula .....	41
Figura 8: Fluxograma da pesquisa .....	44
Figura 9: Geocélula com paredes perfuradas utilizada na pesquisa .....	45
Figura 10: Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas em seu formato bruto .....	47
Figura 11: Curva granulométrica dos resíduos de beneficiamento de pedras preciosas .....	47
Figura 12: Ensaio de Lixiviação e Solubilização .....	48
Figura 13: Composição do Ensaio de Difratometria de Raio-X.....	49
Figura 14: Areia de Osório/RS em seu estado natural .....	51
Figura 15: Configuração do material para ensaios E0 e E1 .....	54
Figura 16: Preenchimento da camada de reforço .....	55
Figura 17: Configuração das camadas na composição dos ensaios .....	55
Figura 18: Vista do posicionamento das geocélulas na caixa de acomodação do material .....	57
Figura 19: Configuração completa dos ensaios de placa .....	59
Figura 20: Ensaio de placa .....	60
Figura 21: Geometria da fundação .....	61
Figura 22: Curva tensão-deslocamento dos ensaios de referência – Ensaios E0 e E1 .....	63
Figura 23: Deslocamento relativo externo da placa - Ensaio E0 .....	63
Figura 24: Deslocamento relativo externo da placa - Ensaio E1 .....	64
Figura 25: Perfil de deformação da superfície externa - Ensaio E0 .....	64
Figura 26: Perfil de deformação da superfície externa - Ensaio E1 .....	65
Figura 27: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque – Ensaio E0 .....	65
Figura 28: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque - Ensaio E1 .....	66
Figura 29: Curva tensão-deslocamento dos ensaios sem reforço ER1 e ER2 (7,5cm) .....	67
Figura 30: Deslocamento relativo externo da placa – Ensaio ER1.....	68
Figura 31: Deslocamento relativo externo da placa - Ensaio ER2 .....	69
Figura 32: Perfil de deformação da superfície externa - Ensaio ER1 .....	69
Figura 33: Perfil de deformação da superfície externa - Ensaio ER2 .....	70
Figura 34: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque – Ensaio ER1 .....	70
Figura 35: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque - Ensaio ER2 .....	71
Figura 36: Curva tensão-deslocamento dos ensaios sem reforço – Ensaios ER3 e ER4 (20cm) .....	72
Figura 37: Deslocamento relativo externo da placa – Ensaio ER3.....	73
Figura 38: Deslocamento relativo externo da placa - Ensaio ER4 .....	73
Figura 39: Perfil de deformação da superfície externa – Ensaio ER3 .....	74
Figura 40: Perfil de deformação da superfície externa – Ensaio ER4 .....	74
Figura 41: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque – Ensaio ER3 .....	75
Figura 42: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque - Ensaio ER4 .....	75
Figura 43: Curva tensão-deslocamento do ensaio sem reforço.....	76
Figura 44: Curva tensão-deslocamento dos ensaios com reforço GCS1 e GCS2 (7,5cm) .....	77
Figura 45: Deslocamento relativo externo da placa – Ensaio GCS2 .....	78
Figura 46: Deslocamento relativo externo da placa - Ensaio GCS2 .....	79
Figura 47: Perfil de deformação da superfície externa –Ensaio GCS1.....	79
Figura 48: Perfil de deformação da superfície externa - Ensaio GCS2.....	80

Figura 49: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque – Ensaio GCS1 .....	81
Figura 50: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque - Ensaio GCS2.....	81
Figura 51: Curva tensão-deslocamento dos ensaios com reforço GCS3 e GCS4 (20cm).....	82
Figura 52: Deslocamento relativo externo da placa – Ensaio GCS3 .....	83
Figura 53: Deslocamento relativo externo da placa - Ensaio GCS4 .....	84
Figura 54: Perfil de deformação da superfície externa – Ensaio GCS3 .....	84
Figura 55: Perfil de deformação da superfície externa - Ensaio GCS4.....	85
Figura 56: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque – Ensaio GCS3 .....	85
Figura 57: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque - Ensaio GCS4.....	86
Figura 58: Curva tensão-deslocamento dos ensaios, alturas de 7,5cm e 20cm.....	87
Figura 59: Curva tensão-deslocamento dos ensaios (ER1- ER2 e GCS1-GCS2) .....	88
Figura 60: Curva tensão-deslocamento dos ensaios (ER3-ER4 e GCS3-GCS4) .....	89
Figura 61: Ruptura do material para ensaios com solo de base (referência - E0 e E1) .....	90
Figura 62: Ruptura do material para ensaios com geocélula.....	91
Figura 63: Curva tensão-deslocamento (todos os ensaios) .....	92
Figura 64: Curva tensão-deslocamento do ensaio GCS2 e GCS3.....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Arranjo de ensaios de placa .....	42
Tabela 2: Variáveis fixas da pesquisa.....	43
Tabela 3: Propriedades das geocélulas .....	46
Tabela 4: Características geotécnicas dos resíduos do beneficiamento de pedras preciosas .....	48
Tabela 5: Curva granulométrica da areia de Osório (RS).....	51
Tabela 6: Caracterização geotécnica da areia de Osório (RS) .....	52

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Funções dos geossintéticos.....	21
Quadro 2: Composição química do resíduo.....	50

## LEGENDA

$\delta$ : Deformação da superfície

$\gamma_s$ : Peso específico real dos grãos

$\sigma_h$ : Tensões horizontais

$\tau$ : Tensões de cisalhamento

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

$e_{m\acute{a}x.}$ : Índice de vazios máximo

$e_{m\acute{i}n.}$ : Índice de vazios mínimo

E0: Ensaio de referência 1

E1: Ensaio de referência 2

ER1: Ensaio Resíduo 7,5cm

ER2: Ensaio Resíduo 7,5cm

ER3: Ensaio Resíduo 20cm

ER4: Ensaio Resíduo 20cm

GCS1: Reforço 7,5cm

GCS2: Reforço 7,5cm

GCS3: Reforço 20cm

GCS4: Reforço 20cm

GCE: Geocélula

GSY: Geossintético

h: Altura da célula / espessura da camada de reforço

h/d: Fator de forma da geocélula

If: Fator de melhora da capacidade de carga

NBR: Norma Brasileira

PE: Polietileno

PEAD: Polietileno de alta densidade PET: Poliéster

PP: Polipropileno

$q_0$ : Tensão do solo não reforçado

$q_r$ : Tensão do solo reforçado

s: Deslocamento da placa

So: Deslocamentos do solo não reforçado Sr: Deslocamentos do solo reforçado

u: Profundidade de disposição do reforço w: Teor de umidade

x: Distância do eixo da placa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	16
	1.2 OBJETIVOS	19
	1.2.1 Objetivo geral	19
	1.2.2 Objetivos específicos.....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>20</b>
2.1	SOLOS REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS .....	20
2.2	GEOCÉLULA .....	22
2.2.1	Considerações Iniciais .....	22
2.2.2	Caracterização.....	23
2.2.3	Mecanismos de resistência .....	25
2.2.4	Efeito confinamento .....	25
2.2.5	Efeito membrana .....	27
2.2.6	Efeito Laje .....	27
2.2.7	Fatores que influenciam na resistência da geocélula .....	28
2.3	GERAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	30
2.3.1	Utilização dos resíduos na Engenharia.....	31
2.3.2	Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas.....	32
2.4	SOLO DE BASE.....	34
2.4.1	Comportamento de solos arenosos.....	34
2.5	PROVAS DE CARGA ESTÁTICA.....	35
2.6	ESTUDOS EXPERIMENTAIS .....	37
2.7	APLICAÇÃO EM CASOS DE OBRAS .....	39
<b>3</b>	<b>MATERIAS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
3.1	DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	42
3.2	LOCAL DE ESTUDO.....	43
3.3	MATERIAIS .....	45
	3.3.1 Geocélulas	45
3.3.2	Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas.....	46
3.3.3	Solo de Base (Areia) .....	50
	Vanuza Lorenzet Bonetti. Dissertação de Mestrado. Passo Fundo: PPGEng /UPF, 2020.	
3.4	ENSAIOS DE PLACA.....	52

---



	3.4.1	Ensaio de placa	52
3.5		PROCESSO DE MISTURA E CONSTRUÇÃO DAS CAMADAS	53
	3.5.1	Preparação do solo de base	53
	3.5.2	Preparação da camada de reforço	54
	3.5.3	Método de ensaio	56
3.6		EQUIPAMENTOS	58
<b>4</b>		<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>62</b>
4.1		CONSIDERAÇÕES INICIAIS	62
	4.1.1	Ensaio de Referência	62
4.2		ENSAIOS SEM GEOCÉLULA	66
	4.2.1	Camada de resíduo com 7,5cm	66
	4.2.2	Camada de resíduo com 20cm	71
	4.2.3	Camada de resíduo de 7,5cm com camada de resíduo de 20cm	76
4.3		ENSAIO COM GEOCÉLULA	77
	4.3.1	Camada de resíduo com Geocélula 7,5cm	77
	4.3.2	Camada de resíduo com Geocélula 20cm	81
	4.3.3	Camada de resíduo com Geocélula 7,5cm (GCS1-GCS2) com Camada de resíduo com Geocélula de 20cm (GCS3-GCS4)	86
	4.4	ANÁLISE COMPARATIVA DE ALTURAS SEM E COM O USO DE REFORÇO POR GEOCÉLULAS	87
	4.4.1	Camada de resíduo 7,5 (ER1- ER2) com geocélula 7,5cm (GCS1-GCS2).	87
	4.4.2	Camada de resíduo 20cm (ER3-ER4) com geocélula 20cm (GCS3-GCS4)	88
4.5		MECANISMOS DE RUPTURA DOS MATERIAIS	89
4.6		ANÁLISE GLOBAL	91
	4.6.1	Influência do uso da geocélula	91
	4.6.2	Influência da altura da geocélula	93
<b>5</b>		<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>95</b>
	5.1	SUGESTÕES	95
		<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>97</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Problema e relevância da pesquisa

Diante do acelerado processo de urbanização há a necessidade de ocupação por áreas com características geotécnicas inviáveis para a construção e implantação dos serviços que fazem parte do ambiente urbano. Neste contexto, surge a necessidade do desenvolvimento de técnicas que melhoram a capacidade do solo em receber esforços.

No mercado de engenharia ainda existem técnicas com materiais que em sua maioria agredem o meio ambiente, logo, a necessidade de alternativas mais sustentáveis para a Geotecnia e a Construção Civil é inevitável.

Ao longo da história, o homem aumentou sua demanda pelos recursos naturais e o que antes era restrito a poucas necessidades humanas hoje requer a apropriação de muitos e de diversos materiais. Atualmente, uma das principais preocupações da humanidade está voltada para a poluição e a preservação do meio ambiente.

Considerando a demanda ambiental de reaproveitamento dos resíduos gerados, é preciso utilizar estratégias de reaplicação dos materiais sem transformação, como é o caso dos resíduos do processo de beneficiamento de pedras preciosas.

O aumento na geração de rejeitos pelos processos industriais no processamento de pedras preciosas no estado do Rio Grande do Sul, provocou o interesse no desenvolvimento de estudos que relacione o aproveitamento deste resíduo, que é atualmente destinado a aterros em terrenos, com a necessidade de testar a capacidade de suporte de materiais provenientes deste processo, fazendo com que ele, associado à utilização de geossintéticos, aumente a rigidez do solo e o torne um método sustentável.

Com o objetivo de reaproveitar os resíduos de pedras preciosas, algumas pesquisas tem sido desenvolvidas como Miguel et al. (2016), Baruffi et al. (2016) e Favretto (2018), onde realizaram estudos na Universidade de Passo Fundo, utilizando esses resíduos como preenchimento de geocélulas, apresentando resultados satisfatórios para sistema de reforço de solos.

Quando se trata de rigidez de solos, é importante analisar as condições geológicas do local a fim de conhecer suas características geotécnicas, avaliando o tipo de estrutura que será utilizada no projeto executivo de determinadas obras. Desta forma, o comportamento dos solos depende da sua constituição e do estado que ele se encontra quando submetido a cargas.

Como o desempenho de solos reforçados depende muito da interação entre o solo e o reforço baseado nas solicitações que o conjunto pode sofrer ao longo da sua vida útil, optou-se

por aplicar o sistema de confinamento utilizando geocélulas como mecanismo para melhorar a resistência de um solo arenoso.

Vários estudos realizados no Brasil e no mundo têm relatado a eficácia dos geossintéticos no suporte de cargas em técnicas de fundações, como também em pavimentos e outros processos construtivos da construção civil. Para Shukla e Yin (2003), a utilização de geossintéticos é uma prática eficiente que vem sendo utilizada para melhorar o rendimento do solo, reduzindo recalques diferenciais de assentamentos em solos fofos.

Outros estudos, como, por exemplo, Biswas e Krishna (2017) e Hegde (2017), indicam que o uso da geocélula está evoluindo como uma técnica de reforço do solo, com aplicações em diversas áreas, como em fundações, pavimentos, sistema ferroviário, estabilização de declive, construção de aterros, talude e controle de erosão.

Os estudos com geocélula revelaram um grande desempenho quando comparados em relação às tradicionais técnicas. Considerado um sistema rentável, favorável ao meio ambiente, durável e fácil de usar, podendo ser usado em todas as condições meteorológicas sem manutenção importante.

Devido à sua natureza tridimensional, a geocélula oferece confinamento total ao solo encapsulado, o que leva à melhora geral no desempenho das camadas de fundação, de acordo com Dash e colaboradores (2003). Além disso, Oliaei (2017) mostra que além da melhoria da capacidade de carga do solo há a redução de custos na obra ou projeto.

Neste contexto, indaga-se: o sistema de reforço composto por geocélulas preenchidas com resíduos do beneficiamento de pedras preciosas pode melhorar a capacidade de carga de um solo arenoso?

O uso de novas tecnologias capazes de minimizar os impactos ambientais e a redução da produção de resíduos sólidos oriundos da industrialização é essencial para o crescimento econômico, porém, a sustentabilidade deve ir além, justificando o uso dos materiais, propondo o desenvolvimento ambiental equilibrado com a sociedade que a população está inserida.

Com o aumento do interesse na preservação do meio ambiente nos últimos anos, pesquisas vêm sendo realizadas para obter um melhor aproveitamento dos resíduos descartados (DALLA ROSA *et al.* 2014; BETAT *et al.* 2009; IPAR, 2011; EDLER *et al.* 2012; VENQUIARUTO *et al.* 2014; IPAR *et al.* 2012; WILM *et al.* 2014, Miguel *et al.* (2016), Baruffi *et al.* (2016) e Favretto *et al.* (2018), contribuindo, assim, com a redução de resíduos gerados pelas empresas, mesmo que em longo prazo.

Diante deste cenário, o material granular gerado no processo de extração de pedras preciosas é depositado em locais abertos, ocupando grandes áreas. A técnica empregada após sua extração constitui da britagem, rolagem, tingimento e polimento, onde a maior parcela da produção de resíduos ocorre no processo de rolagem. Neste caso, uma grande quantidade de resíduos é disposta na natureza e precisa de uma destinação adequada, podendo ser empregado para melhorar o desempenho de alguns sistemas utilizados na construção civil.

Uma alternativa provável para reduzir o impacto que o meio ambiente pode sofrer com a geração de resíduo de beneficiamento de pedras preciosas é utilizando o mesmo no preenchimento de geocélulas. O uso de geocélulas vem se desenvolvendo no Brasil, pois oferece agilidade e rapidez na sua aplicação, além de apresentar uma grande variedade de formas e composições, podendo ser utilizado em estruturas de contenção, estabilização de taludes, canais e obras hidráulicas, proteção contra erosão, proteção mecânica de geomembranas e também na estabilização de solos.

A verificação do comportamento da geocélula preenchida com o resíduo de beneficiamento de pedras preciosas sobre o solo pode ser verificada por meio da realização de ensaios de carga, ou seja, ensaios de placa, apresentando melhores condições de análise do conjunto, a fim verificar se o mesmo possui capacidade de melhorar o suporte de carga do solo. Vários estudos avaliam o desempenho mecânico de geocélulas quando submetidas a ensaios de placa em laboratório (MANDAL e GUPTA, 1994; MHAISKAR e MANDAL, 1996; DASH *et al.* 2001a; DASH *et al.* 2001b; DASH *et al.* 2003; MENESES, 2014; THALLAK *et al.* 2007; SIREESH *et al.* 2009; BARUFFI *et al.* 2016; MIGUEL *et al.* 2018 FAVRETTO *et al.* 2020).

O presente trabalho foi elaborado para analisar o comportamento de geocélulas preenchidas com resíduo do processamento de pedras preciosas em laboratório, tomando como base os trabalhos desenvolvidos por Miguel (2016), Baruffi (2016) e Favretto (2018), que demonstram viabilidade quanto a aplicabilidade técnica do resíduo tanto em ensaios realizados em campo quanto em laboratório. Salientamos que esta pesquisa é parte de estudos realizados

pelo grupo de estudos de geotécnica da Universidade de Passo Fundo, diante desta informação, os parâmetros de densidade relativa dos materiais utilizados foi de 30% para o solo de base e 50% para o resíduo utilizado para preenchimento do sistema de reforço, sendo que os demais componentes fizeram uso de densidades do solo de base correlacionadas sendo elas 50 e 70%.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo desta pesquisa foi investigar o desempenho que o sistema de reforço com geocélulas preenchidas com resíduos do beneficiamento de pedras preciosas exerce sobre um solo arenoso.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Identificar a capacidade de carga de um solo arenoso reforçado;
- Investigar o comportamento carga – recalque do sistema de reforço com geocélula;
- Verificar a influência da inserção da geocélula no ganho de resistência;
- Avaliar a variação de deslocamentos verticais no entorno da placa;

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Solos reforçados com geossintéticos

O processo de reforço do solo é exercido há vários séculos e de várias formas, com materiais como palha, bambu e madeira, segundo Biswas e Krishna (2017). Com o passar dos anos, devido ao aparecimento de novos produtos e com as novas tecnologias, estão sendo utilizados diferentes materiais relacionados para melhorar a qualidade do solo.

Os geossintéticos tem ganhado espaço no meio geotécnico, por apresentar vantagens em práticas técnicas, financeiras e fatores relacionados ao tempo. Almeida e Marques (2013) comentam que a técnica de melhoramento do solo mais apropriada para determinado projeto está relacionada a fatores como as características geotécnicas do local, uso da área, prazos de execução e custos envolvidos. Muitas vezes, é comum utilizar reforços de geossintéticos associados a soluções tradicionais.

Nos últimos 50 anos, o uso de materiais poliméricos para a produção de geossintéticos vem crescendo. Segundo Sarsby (2013), na última década, foi produzido 800 milhões de metros quadrados de geossintéticos no mundo. Embora as fibras sintéticas dominem o mercado com uma quantidade significativa, também são usadas as fibras naturais. Estes produtos possuem um grande potencial para contribuir de forma significativa na construção civil sustentável e são projetados para que colaborem com a melhoria das condições e de estabilidade do solo.

Vertematti (2015) destaca que a partir de 1980 os geotêxtis começaram a ser usados em obras de reforço de solos de baixa capacidade de suporte no Brasil, com alta deformabilidade e baixa resistência ao cisalhamento, principalmente em obras de pavimentação.

De acordo com Souza e colaboradores (2006), os geossintéticos (G) podem ser classificados nos seguintes tipos: geotêxteis (GT); geomembranas (GM); geodrenos (GCD); geocélulas (GL); geogrelhas (GG); georredes (GN); geocompostos (GC); fibrossolo e (GCL) – geocompostos com núcleo argiloso.

Os geossintéticos são materiais com diversas utilidades, conforme o Quadro 1, podendo ser usados com a função de reforço em diferentes tipos de obras, como muros, taludes, aterros e pavimentos sobre solos moles, inclusive em reforço de fundações (PALMEIRA; ORTIGÃO, 1982; AVESANI; BUENO, 2010; MAHDI; BUDDHIMA, 2016, ISIK *et al.* 2019).

Quadro 1: Funções dos geossintéticos

Geossintético	Separação	Proteção	Filtração	Drenagem	Erosão	Reforço	Impermeabilização
Geotêxtil	X	X	X	X	X	X	X *
Geogrelha	X	-	-	-	-	X	-
Geomembrana	X	-	-	-	-	-	X
Georrede	-	X	-	X	-	-	-
Geocomposto argiloso (GCL)	-	-	-	-	-	-	X
Geocélula	-	X	-	-	X	X	-
Geotubo	-	-	-	X	-	-	-
Geofibras	-	-	-	-	-	X	-

\* Quando impregnado com material asfáltico.

Fonte: Bueno e Vilar (2015).

Contribuindo com o desenvolvimento da engenharia geotécnica, os geossintéticos são utilizados em diversas áreas da engenharia, sendo elas muros e aterros, fundações rasas, pavimentação de estradas, ferrovias, filtros e sistemas de esgoto, tratamento e controle de erosão, reservatórios, canais e barragens de terras. Esta diversidade de aplicações é de extrema importância para o desenvolvimento tecnológico de todos os sistemas de engenharia envolvidos.

Para Shukla e Yin (2006), os geossintéticos desempenham a função de reforço, melhorando as propriedades mecânicas da massa do solo como resultado da sua utilização. Dessa forma, quando o solo e o reforço são combinados, é produzido um material compósito chamado de solo reforçado, que possui alta resistência à compressão e à tração, igualmente ao processo do concreto armado. Sendo assim, os geossintéticos aplicados como reforço têm a principal tarefa de resistir a tensões aplicadas ou de evitar deformações inadmissíveis em estruturas geotécnicas.

Shukla e Yin (2003) relatam que o método mais comum praticado durante muitos anos tem sido espalhar uma camada de material granular, como areia e/ou cascalho, sobre solos macios. Dessa forma, para avaliar o tempo de assentamento de um solo reforçado com material granular em condições de campo aprimoraram-se modelos e métodos matemáticos que trouxeram orientações para a concepção da utilização do sistema de geossintéticos para reforço de solos granulares e solos macios em diferentes condições de campo.

## 2.2 Geocélula

### 2.2.1 Considerações Iniciais

A geocélula foi originalmente desenvolvida pelo corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos da América (EUA), no início da década de 1970, para aplicações militares. Mais tarde, pesquisadores como Webster e Watkins (1977) e Webster e Alford (1978), que contribuíram para o desenvolvimento da geocélula realizando estudos em laboratório para compreender a eficácia das geocélulas e colaborar no aprimoramento do desempenho de resistência dos solos.

A geocélula consiste em uma estrutura tridimensional de confinamento que interage com o solo de forma a aumentar a sua resistência ao cisalhamento, através de uma melhor distribuição dos carregamentos FAVRETTO (2016).

O processo de utilização de geocélulas pode ser explicado através de diferentes mecanismos que acontecem simultaneamente durante o processo de recebimento de cargas no solo. Shukla e Yin (2006) relatam que a função de absorver os carregamentos oriundos da superfície e distribuí-los à camada de base abaixo da geocélula, e responsável pela sua estrutura tridimensional que apresenta um sistema de confinamento de solo gerado por um conjunto de células, cujas principais funções estão relacionadas com a proteção, controle de erosão e reforço de solos.

Webster e watkins (1977) e Webster e Alford (1978) realizaram os primeiros estudos experimentais com geocélula, motivados pela indústria e com o objetivo de investigar alternativas para a construção de estradas sobre solos moles. Os resultados obtidos mostraram a vantagem na utilização da técnica em estradas e pátios de armazenagem, apresentando uma diminuição de aproximadamente 30% na espessura da base.

Pokharel *et al.* (2018) investigaram o efeito do reforço com geocélulas sobre solos granulares com densidade de 70% através de ensaio de placa para reforço de pavimentos. Como resultados da pesquisa foi obtido fatores de melhora em relação a configuração do solo com o reforço celular entre 1,2 e 2,0, mostrando a eficiência do sistema.

Shandmand *et al.* (2018) realizaram ensaios comparando dois métodos de posicionamento de geocélulas como reforço para um solo arenoso. Sendo que para cada configuração de ensaio foram monitorados parâmetros como a altura da geocélula, abertura do colchão, profundidade da geocélula e número de camadas do reforço sobre o solo. Entre os



métodos avaliados, obtiveram resultados de melhora de capacidade de carga entre ambos de 6% a 8% apresentando a viabilidade do sistema proposto.

Siabil *et al.* (2019) o estudo utilizou ensaio de placa para avaliar a capacidade de carga de geocélulas preenchidas com EPS, simulando carregamentos em pavimentos. Os testes foram válido mostrando melhoria com o sistema de reforço em 50% da capacidade de suporte de cargas, diminuindo os recalques sobre o material pesquisado como preenchimento.

Favretto *et al.* (2020) realizaram estudos com uma alternativa para preencher a geocélula através do uso de resíduos preciosos de processamento de gemas. O desempenho do reforço de geocélulas preenchido com esse resíduo granular sobreposto a um subleito de areia, bem como a influência da altura do colchão da geocélula, foram estudados por testes em modelo em laboratório. As camadas foram preparadas em um tanque de teste e submetido a carga estática por uma base circular rígida. Comparando os testes na camada de resíduos não reforçada e reforçada, os resultados indicam que o fornecimento de geocélulas leva a um aumento significativo na capacidade de suporte, apresentando fatores de melhoria capacidade de até 1,7.

### 2.2.2 Caracterização

Idealizada para ser apoiada sobre solos de baixa capacidade de suporte e permitir acesso de equipamentos militares (WEBSTER *et al.* 1977), geralmente, feitas de solda termicamente ou geossintéticos de ligação mecânica, texturizada, com e sem perfuração nas paredes laterais que constituem os favos, assim chamados devido a sua aproximação com a aparência de uma colméia. Em geral, as geocélulas são confeccionadas utilizando os mesmos materiais de outros geossintéticos, como o Polietileno (PE), Poliéster (PET), Polipropileno (PP) (Figura 1) e Polietileno de Alta Densidade (PEAD) (AVESANI *et al.* 2009).

Figura 1: Tipos de geocélula



a) Sem perfuração nas paredes laterais b) com perfuração nas paredes laterais

Fonte: Bueno e Vilar (2015).

A geocélula é uma estrutura de forma tridimensional, composta de polímeros de alta resistência ultrassônicos ou liga polimérica, como polietileno, poliolefina etc. (DASH *et al.* 2007).

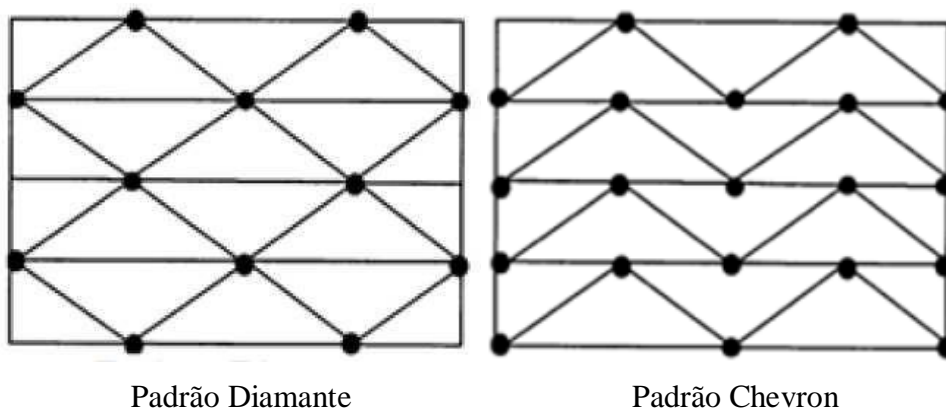
Segundo a ABNT (2001), a geocélula pode ser definida como sendo uma estrutura tridimensional, em forma de casa de abelha, permeável, confeccionada com material polimérico e tiras soldadas entre si.

Koerner (1994), define geocélula como uma caixa composta por tiras rígidas de polímeros, com formato celular, utilizando um arranjo horizontal, estas células preenchidas com solo para gerar um confinamento capaz de criar um colchão forte e estável.

A caracterização geral da geocélula inclui a determinação da espessura da tira, sua densidade, dimensões como altura e abertura de uma célula, tipo de costura e resistência à tração. Além disso, o conhecimento sobre as propriedades do material de composição da geocélula, como, por exemplo, a durabilidade e os fatores de redução ligados às características da geocélula, influenciam diretamente na sua capacidade de carga. Avesani *et al.* (2013) mencionam que as características da geocélula influenciam diretamente na capacidade de carga e no seu desempenho.

As geocélulas são encontradas de diferentes formas, apresentam-se em padrões designados pelo mercado, como Chevron e Diamante, conforme Figura 2. Elas são comercializadas, geralmente, com alturas de 50, 75, 100, 150 e 200 mm.

Figura 2: Padrões utilizados para a formação de geocélulas



Fonte: Dash e colaboradores (2001a).

O material de produção e o design de uma geocélula são essenciais para a sua durabilidade, estimada em 50 anos, é adequada para ambientes extremos em condições de

temperatura e umidade variáveis, estas condições de fabricação são determinadas por Normas Mundiais (HEGDE, 2017).

As geocélulas são fáceis de transportar, pois são constituídas de tiras sobrepostas unidas entre si, dessa forma, quando separadas ou expandidas aparecem em forma de painéis prontos para receber o material de preenchimento.

### 2.2.3 Mecanismos de resistência

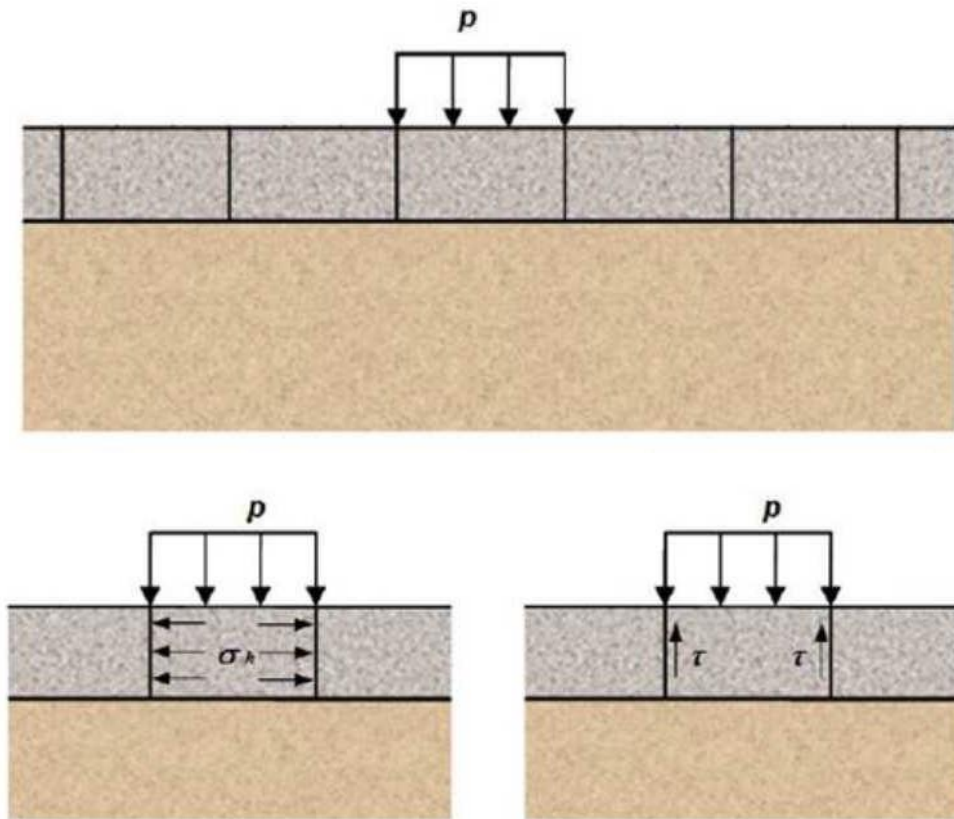
O processo de reforço nas geocélulas pode ser explicado através de diferentes mecanismos que acontecem simultaneamente durante o processo de recebimento de cargas no solo. Com a função de absorver os carregamentos oriundos da superfície e distribuí-los à camada de base abaixo da geocélula, três mecanismos de reforço com geocélula são relacionados, os quais correspondem ao efeito de confinamento, efeito laje e efeito membrana, e que estão apresentados detalhadamente a seguir a fim de entender seu funcionamento.

### 2.2.4 Efeito confinamento

O painel de geocélula, após aberto, também chamado de colchão, tem as células interligadas com alta rigidez de cisalhamento e flexão. Este mecanismo dos reforços de geocélulas pode ser chamado de várias maneiras, como confinamento (EID et al., 2009), ação da membrana (MENGELT *et al.* 2006) e distribuição do estresse (POKHAREL *et al.* 2017).

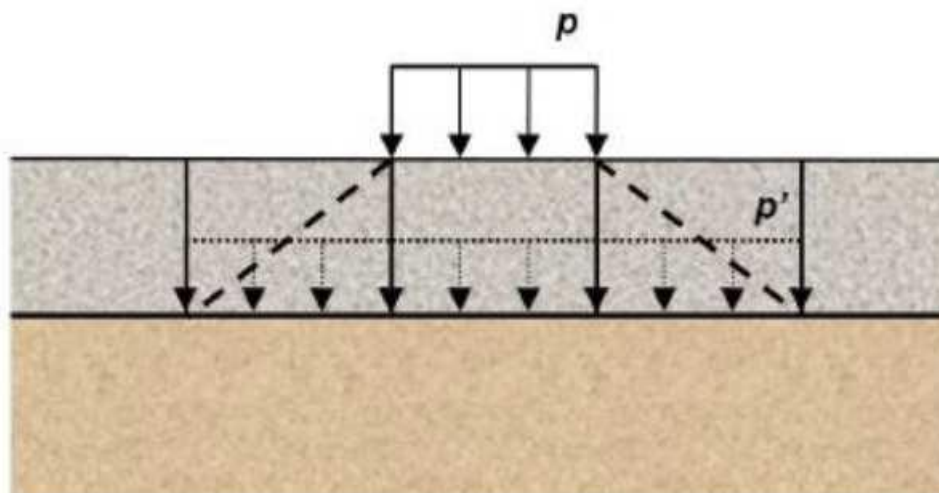
O confinamento do solo, mostrado na Figura 3 e Figura 4, é desenvolvido pela força das paredes, costuras e soldas da geocélulas, em combinação com a resistência passiva do solo introduzido na célula, resultando em uma significativa coesão do solo preenchido, com o geossintético (MENGELT *et al.* 2006).

Figura 3: Tensões atuantes no sistema de confinamento



Fonte: Avesani Neto (2013).

Figura 4: Sistema de distribuição de tensões



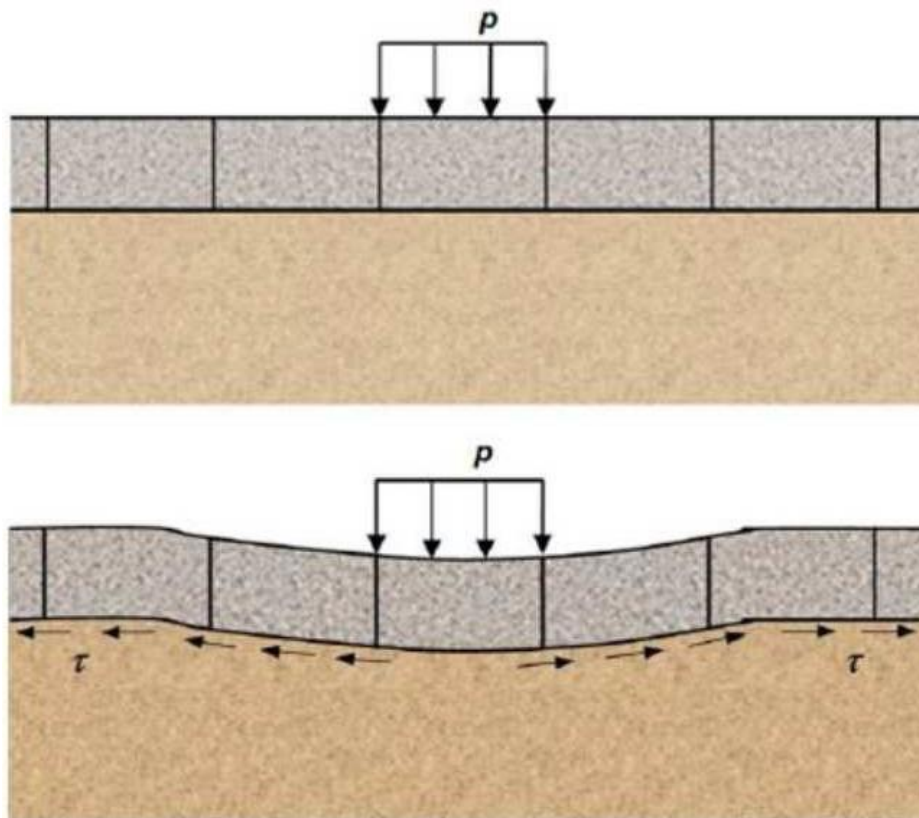
Fonte: Avesani Neto (2013).

### 2.2.5 Efeito membrana

O efeito membrana é dado através de dois fatores, um deslocamento vertical elevado e uma rigidez da geocélula através de seu formato tridimensional.

Segundo Avesani *et al.* (2013), o efeito membrana é resultante de um deslocamento vertical no solo subjacente ao reforço, que irá gerar uma forma côncava no material geossintético tensionado. Através do deslocamento sofrido, a camada de geocélula deforma para baixo, dando suporte no sentido contrário ao recebimento das tensões, logo tendo uma resistência contrária a sua deformação, desde que se mantém a ancoragem lateral, de acordo com a Figura 5.

Figura 5: Efeito membrana no sistema de reforço



Fonte: Avesani Neto (2013).

### 2.2.6 Efeito Laje

A principal função do reforço com a geocélula é confinar o solo depositado em seu interior, suportando a carga recebida. Além disso, as paredes de geocélulas cortam os planos de

falha em potencial forçando a unir cada vez mais o material, aumentando sua capacidade de suporte quando compactado, logo, os favos interligados fornecem confinamento total com o preenchimento do solo e comporta-se como uma laje semirrígida (DASH *et al.* 2003).

A configuração semirrígida melhora o desempenho da relação de resíduos e geocélula, fazendo com que o solo subjacente resista a recalques da estrutura, resultando na resistência do solo relacionada à distribuição das cargas e em uma melhora na sua capacidade de suporte.

O comportamento do solo reforçado é similar ao do concreto armado, no qual a massa reforçada pode ser considerada um material composto com propriedades melhoradas, particularmente em tração, em relação ao solo sem reforço, este mecanismo acontece devido à combinação da resistência à compressão do solo ou material granular com a resistência à tração do geossintético, resultando em uma estrutura resistente internamente, capaz de suportar cargas elevadas sem sofrer deformação excessiva, uma vez que o reforço absorverá os esforços de tração e parte das tensões de cisalhamento (AVESANI; FUTAI, 2016).

#### 2.2.7 Fatores que influenciam na resistência da geocélula

Avesani Neto (2013) apresenta cinco características que alteram a resistência do sistema: o formato, as dimensões, a quantidade de células, a geometria do reforço e o material de composição da célula. De modo geral, pode-se dizer que a eficiência da geocélula depende de sua geometria, densidade relativa do material de preenchimento e da resistência das paredes da célula.

Dash *et al.* (2001) estudaram, de forma particular, alguns fatores que influenciam na geocélula, dentre esses fatores estava o formato da geocélula, onde a forma Chevron obteve melhores resultados que o formato Diamante; isso se deve ao fato da Chevron apresentar maior número de articulação; mas esse resultado é apenas marginal, pois ambas as geocélulas possuem o mesmo tamanho efetivo das células e mesma área de plano. Dash *et al.* (2001) acrescentam que o tamanho e a orientação das nervuras da abertura da grelha usadas na geocélula demonstram elevada influencia no sistema de transporte de carga para a fundação.

Para Meneses (2004), as camadas reforçadas com geocélula, a que apresenta maior altura, fornece um reforço relativamente maior ao proporcionado por uma geocélula de altura inferior suportando um carregamento mais elevado, uma vez que a absorção dos esforços e a dissipação das tensões até a camada subsequente serão maiores resultando em recalques menores. O aumento do desempenho, neste caso, é significativo até uma altura da geocélula igual ao dobro da largura da base, em alturas maiores, que essa a melhoria é secundária, e a

largura ideal é em torno de quatro vezes a largura da base (DASH *et al.* 2001). A razão ideal entre a altura e o diâmetro da célula foi encontrada, segundo Dash *et al.* (2001), como sendo aproximadamente 1,67. Avesani e Bueno (2010) mencionam que a largura e a altura da geocélula interferem no aumento da capacidade de carga da obra.

Dash *et al.*, (2001) testaram diferentes materiais na confecção de geocélulas e puderam verificar a influência do tipo de material e suas propriedades. Apesar da grande diferença de rigidez entre os materiais empregados, eles observaram uma pequena melhora quando utilizado um material mais rígido e somente para deformações acima de 20%.

A compacidade do material de preenchimento também interfere no desempenho do reforço, devido ao fato de materiais mais compactados fornecerem melhores condições de capacidade de carga (AVESANI NETO, 2013). Solos que apresentam maior densidade relativa apresentam maior dilatação, mobilizando, assim, tensões mais elevadas na camada da geocélula (DASH *et al.* 2001).

Em relação à compacidade, Mhaskar e Mandal (1996) realizaram ensaios com areias de diferentes compacidades no preenchimento de geocélula sobre um solo argiloso mole e observaram um melhor desempenho do reforço com a utilização de areias mais compactas. No mesmo sentido, Sireesh *et al.* (2009) concluíram que a capacidade de carga da camada de fundação melhora com o aumento da densidade do material de preenchimento.

Madhavi Latha *et al.* (2006) conduziram estudos para a aplicação de geocélulas para proteção de taludes e avaliaram o desempenho de uma areia argilosa e de uma argila como materiais de preenchimento de geocélulas. Eles verificaram que o uso de solos argilosos como material de preenchimento das células, embora seja menos eficiente, também fornecem um aumento na resistência do sistema, podendo ser uma alternativa na indisponibilidade de solos granulares. Os autores atribuem o melhor desempenho do solo arenoso, principalmente, ao atrito mais elevado desenvolvido entre as partículas de areia e as paredes da célula.

Avesani Neto (2013) comenta que a conclusão obtida por Madhavi Latha *et al.* (2006) é de extrema importância para o emprego do reforço de geocélula no Brasil, uma vez que muitos locais dispõem de solos tropicais residuais e laterizados, com adequadas características geotécnicas quando compactados, os quais poderiam, segundo o autor, ser empregados no preenchimento da geocélula sem perda considerável de desempenho do reforço.

Dash *et al.* (2003) realizaram ensaios com placa circular em solos granulares reforçados com geocélula sobre uma argila mole. A fim de verificar o efeito da largura do reforço, eles conduziram os testes variando as larguras da camada de geocélula. Foi observado que o

aumento da resistência ocorreu mesmo para uma largura de geocélula próxima ao diâmetro da placa ( $b/D = 1,20$ ). O desempenho do reforço melhora com o aumento de sua largura até um valor próximo de  $5D$ , após este, o aumento não é considerável.

A geocélula, quando associada a outros materiais geossintéticos, como geotêxtil ou geogrelhas, apresenta mudança em seu comportamento e resposta frente às solicitações (AVESANI NETO; BUENO, 2010), esta associação aumenta ainda mais o desempenho do reforço em geocélulas de reduzida razão em relação a sua forma (AVESANI NETO, 2013). A camada de geotêxtil colocada abaixo da geocélula, devido à resistência de flexão do geotêxtil, aumenta a rigidez global do sistema distribuindo as tensões mais uniformemente, porém, esse efeito torna-se insignificante quando a geocélula apresentar grandes alturas (DASH *et al.* 2001).

### 2.3 Geração dos resíduos

Com o início da revolução industrial surgiu a necessidade de cuidados sobre os recursos naturais, e a sociedade, principalmente no final do século passado e início deste, passou a cobrar dos governantes e indústrias, uma maior responsabilidade para com os seres que habitam o planeta (Coelho 2006). Durante muitas décadas o homem produziu, além de bens de consumo, inúmeros poluentes que acabaram, de alguma forma ou outra, atingindo o meio ambiente.

O aumento populacional, impulsionando o consumo exagerado de materiais naturais, tem levado a uma preocupação ambiental quanto ao destino dos resíduos gerados em todas as cadeias de processos industriais, sendo o resíduo do beneficiamento de pedras preciosas um importante contribuinte para as estatísticas.

A atividade de mineração gera grandes volumes de material resultante do processo de beneficiamento, quando estes resíduos não são destinados corretamente geram prejuízos ambientais. O processo de industrialização de gemas, conhecida popularmente como pedras preciosas, é beneficiado por diversas empresas no Sul do Brasil, gerando uma grande quantidade de resíduos.

Os resíduos de pedras preciosas são muitas vezes provenientes de processos brutos, os classificados no garimpo não possuem contaminação com produtos químicos, mas os rejeitos oriundos das etapas de corte, lixamento e polimento podem estar contaminados com óleo diesel, utilizado na lubrificação e refrigeração do processo de corte, e grãos abrasivos que se desprendem das ferramentas (PICOLOTTO, 2013).



Segundo Picolotto (2013), calcula-se que haja no Brasil aproximadamente 3.500 empresas de beneficiamento de pedras preciosas, sendo que a maior parte concentrando-se especialmente em São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e Bahia.

Para Thomé (2010), é no processo de corte e lapidação das gemas que se concentra o maior volume de resíduos que são descartados pelas empresas. Nos processos de extração e beneficiamento de pedras preciosas há uma considerável quantidade de geração de resíduos sólidos, segundo Hartmann *et al.* (2010), aproximadamente 30 a 40% da pedra beneficiada torna-se resíduo.

Atualmente, grande quantidade destes resíduos é disposta nos pátios das empresas, que por muitas vezes não atendem normas relativas à deposição destes detritos nos espaços físicos, não sendo cumpridos os requisitos ambientais necessários, prejudicando o solo no qual estão sendo dispostos (TONELLO *et al.* 2017).

### 2.3.1 Utilização dos resíduos na Engenharia

A crescente escassez de materiais acessíveis para a construção civil está levando pesquisadores, engenheiros e projetistas a buscar soluções inovadoras para usar menores parcelas de matérias-primas não renováveis e utilizar resíduos em suas obras de engenharia.

As dificuldades de tratamento, destinação de grandes quantidades de materiais e a forma de reutilização de resíduos apresenta-se como uma eficaz alternativa na aplicação de obras de engenharia, juntamente com a utilização de tecnologias rápidas e mais econômicas.

O Brasil possui leis relacionadas a prevenção ambiental, a mais importante sendo a Constituição Federal de 1988, apresentando em seu artigo 225 que todos os brasileiros têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, sendo dever do governo assegurar este direito (MEDAUAR, 2009). No entanto a lei N 12.305, apresenta políticas nacionais de resíduos sólidos e em seu artigo 9, comenta que se tratando de gerenciamento de resíduos sólidos deve se obedecer a seguinte ordem de prioridades não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de residuais e disposição final adequada (Brasil, 2010).

Para o estado do Rio Grande do Sul o decreto n 38.356/98 apresenta no artigo 1 que o gerenciamento dos resíduos sólidos e de responsabilidade de toda a sociedade.

Muitos resíduos apresentam boa capacidade de carga quando compactados, porém, a possibilidade de sua utilização depende de questões ambientais, como local de inserção e dos custos de transporte. Quando o resíduo é gerado próximo ao local de aplicação, além de permitir

uma destinação correta do material residual, há uma redução dos custos de transporte para a sua disposição final.

Para Baruffi *et al.* (2016), o resíduo de pedras preciosas e semipreciosas é gerado no processo de beneficiamento da matéria prima, sendo considerado resíduo todo e qualquer rejeito que contenha impurezas ou defeito de formação.

### 2.3.2 Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas

A lapidação e a fabricação de peças e artefatos de pedras são geralmente produzidas por pequenas indústrias. Os principais centros de extração estão concentrados nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Rio Grande do Sul, Bahia e Goiás (ZANATTA, 2014).

O Brasil é conhecido como um dos principais exportadores de minerais do mundo, sendo que as pedras extraídas no estado do Rio Grande do Sul (RS) fazem parte desta cadeia produtiva. Atualmente, o Rio Grande do Sul é responsável por 46% das exportações de gemas e materiais gemológicos no Brasil, sendo que a cidade de Soledade é responsável por 95% da exportação do estado, principalmente para os EUA, Alemanha e Inglaterra, de acordo com Silva e Schneider (2015). O Rio Grande do Sul é o terceiro maior polo do Brasil em beneficiamento de pedras preciosas, como a ágata, logo o volume de resíduos gerado é bem expressivo (VENQUIARUTO *et al.* 2014).

O município de Soledade, localizado na região norte do estado do Rio Grande do Sul, no Planalto Riograndense, no alto da serra do Botucaraí, segundo a Lei Estadual n. 12.874, de 2007, é a capital das pedras preciosas. No município estão localizadas 180 empresas que desenvolvem atividades de extração mineral, com produção e comercialização dos produtos, segundo Vilasbôas *et al.* (2017). Muitas dessas empresas, de acordo com Picolotto (2017), atuam em ramos diversificados, sendo que a maioria são empresas beneficiadoras de ágatas.

Favretto *et al.* (2020) testaram um material residual, uma alternativa para preencher a geocélula, através do uso de resíduos preciosos de processamento de gemas. O desempenho do reforço de geocélulas preenchido com esse resíduo granular foi utilizado para reforço de um subleito de areia, bem como a influência da altura do colchão geocélula, foram estudados por testes em modelo em laboratório Comparando os testes na camada de resíduos não reforçada e reforçada, os resultados indicam que o fornecimento de geocélulas leva a um aumento significativo na capacidade de suporte, apresentando fatores de melhoria capacidade de até 1,7. Além disso, o reforço proporciona assentamentos mais uniformes

Thomé *et al.* (2002) realizaram a caracterização do material, derivado de uma empresa de Soledade/RS, incluindo a análise mineralógica do material, ensaios de lixiviação e solubilização. O material foi classificado como sendo de baixa periculosidade e pouco poluidor, por apresentar taxas de concentração inferiores aos valores limites permitidos.

A utilização de resíduos acompanhados com a aplicação de geossintéticos é destacada por vários autores. Floss *et al.* (2016) realizaram estudos sobre o desempenho mecânico de resíduos do processamento de ágata artificialmente cimentados, como técnica de melhoramento de solos, já, Souza *et al.* (2006), utilizando resíduos da mineração para bases de pavimentos sob solos moles. Miguel *et al.* (2019) aproveitaram resíduos do beneficiamento de pedras semipreciosas para preenchimento de geocélulas para analisar seu desempenho.

Venquiaruto *et al.* (2014) aproveitaram o resíduo de ágata em materiais cimentícios em substituição do agregado miúdo areia natural nas proporções de 10% e 20% e obtiveram como resultado que o resíduo melhora o desempenho do material cimentício, principalmente em maior proporção.

Dalla Rosa *et al.* (2014) utilizaram esse resíduo em conjunto com a cal hidratada em bases para pavimentação, realizaram ensaios laboratoriais e experimentais a campo e obtiveram resposta positiva quanto ao uso.

Na pesquisa realizada por Edler *et al.* (2012) foram feitos testes com estacas escavadas compostas por solo, cimento e resíduo, utilizaram essas estacas a ensaios de cargas e realizaram a análise de custo, como resultado, as estacas produzidas com solo, cimento e resíduo possuem resistência semelhante às estacas de concreto convencional e com um custo inferior chegando a 38%.

Segundo Betat *et al.* (2009), o resíduo foi utilizado em concreto, mas em substituição do agregado graúdo nas proporções de 25%, 50% e 75%, através de ensaios de compressão encontraram resistências mais elevadas para o traço em que o agregado graúdo era substituído com 50% pelo resíduo. Os valores em referência foram superiores ao traço utilizado que não utilizava o resíduo, obtendo também como resultado uma redução de consumo de cimento de 10%.

Baruffi *et al.* (2016) utilizaram o resíduo proveniente do beneficiamento de ágatas na verificação da camada de proteção do *Geosynthetic Clay Liners* (GCL), a fim de determinar qual a melhor razão de cobertura (altura/diâmetro do pistão), através de uma versão modificada do ensaio de penetração *California Bearing Ratio* (CBR), avaliando a deformação ocorrida no GCL. Concluíram que a deformação no GCL reduz conforme se aumenta a razão

de cobertura, para os ensaios realizados com pistão de 50 mm, a razão igual ou superior a 1.5, resultaram pequenas deformações ao GCL, já para os ensaios com pistão de 25 mm, a razão de cobertura deve ser igual ou superior a 2.0.

A utilização de resíduos acompanhados com a aplicação de geossintéticos é destacada por vários autores. Floss *et al.* (2016) realizaram estudos sobre o desempenho mecânico de resíduos do processamento de ágata artificialmente cimentados, como técnica de melhoramento de solos, já, Souza *et al.*, (2006), utilizando resíduos da mineração para bases de pavimentos sob solos moles. Miguel *et al.* (2019) aproveitaram resíduos do beneficiamento de pedras semipreciosas para preenchimento de geocélulas para analisar seu desempenho.

Em todas as pesquisas citadas acima, a reutilização do resíduo como material alternativo em obras geotécnicas e de engenharia apresentaram grandes perspectivas quanto ao modelo de aplicação e seus benefícios.

## **2.4 Solo de base**

### **2.4.1 Comportamento de solos arenosos**

Na engenharia geotécnica as areias referem-se a materiais granulares com reduzida percentagem de finos, devido a sua alta permeabilidade quando submetidas a carregamentos em projetos de engenharia, apresentam deformações significativas que interferem no comportamento mecânico do terreno (PINTO, 2006).

Para Caputo (1973), o comportamento do solo arenoso está associado a fatores como a composição da partícula e ao arranjo estrutural em que o grão está inserido, sendo que o movimento realizado pela partícula quando recebe uma tensão interfere no processo de cisalhamento.

No solo arenoso está presente o fenômeno de atrito, Velloso e Lopes (2010) descrevem que a resistência ao cisalhamento do solo é essencialmente devido ao atrito gerado pelo movimento dos grãos que se dá através de deslizamento e rolamento das partículas.

A resistência ao cisalhamento das areias depende simplesmente de parâmetros como o ângulo de atrito e a compacidade do solo relacionada às partículas. Sendo que ao receber tensões, uma areia diminui seu volume, desta forma, temos uma variação do índice de vazios do maciço que influencia em problemas de estabilidade de solos arenosos.

Segundo Pinto (2006), os parâmetros, como densidade relativa, o tamanho e o formato dos grãos, influenciam no comportamento do solo, interferindo em sua resistência. Em uma

areia, ao ser feito o carregamento axial, o terreno ou corpo de prova apresentam deformações, que crescem com o processo de cisalhamento, provocando uma acomodação das partículas, que se dá também com a redução do volume do material. Nesse caso, não há a interpolação das partículas a ser superada e a tensão cisalhante aumenta gradativamente, até um valor extremo seguido de um declínio do volume do maciço.

Quando as partículas estão dispostas em uma forma mais densa/compactada, a influência na resistência é maior. Dessa forma, para arranjos fofos onde se tem a diminuição dos ângulos de dilatação de cisalhamento, há grandes deslocamentos e deformações (HEDGE; SITTHARAM, 2015).

O comportamento global de um maciço de solo reforçado com geossintéticos está condicionado às propriedades do solo, às propriedades do reforço e, especialmente, às propriedades da interface solo-geossintético. Dentre estas propriedades, é particularmente relevante a resistência à tração do geossintético, os parâmetros de interação mecânica entre o solo e o reforço e os efeitos de confinamento do solo adjacente sobre o comportamento tensão de formação do material (GOMES, 1993).

As técnicas de preenchimento de material granular sobre a base de um maciço servem para a melhoria do comportamento do solo quando em estado frágil, referente a seu comportamento mecânico. Com o efeito de compactação do preenchimento granular, mecanismos de transferência de tensão de cisalhamento passam a ser apropriados quando utilizado em conjunto com geossintéticos. Shukla e Chandra (1995) observaram em seu estudo que a compactação do preenchimento granular por uma carga maior do que a carga de trabalho resulta em uma perda da percentagem de sua resistência.

## **2.5 Provas de carga estática**

Segundo Barata (1966), internacionalmente, as produções precursoras sobre ensaio de placa são os trabalhos de Enger (1916), Goldback (1925) e Terzaghi (1925; 1932).

Segundo Ruver e Ferreira (2012), a prova de carga consiste em um ensaio de placa em um modelo reduzido de uma fundação superficial. Portanto, não exigindo grandes sistemas de reação para a simulação de reações e equipamentos de aplicação de carga robustos. A partir das provas de carga, é possível estabelecer com maior segurança e visualizar o nível de carga suportado pelo terreno, bem como verificar o nível de recalque a ser imposto à futura estrutura quando carregada.

Para Donato (2007), as provas de carga são mais econômicas em relação às provas de carga em verdadeira grandeza, sendo que a utilização deste tipo de ensaio é mais conveniente para a análise do comportamento de fundações superficiais, verificação do comportamento e forma de ruptura do solo quando carregado. Logo, as conclusões acerca do ensaio podem ser melhor interpretadas, facilitando os processos em experimentos relacionados a interação solo – estrutura.

Os procedimentos executivos para a realização de provas de carga possuem normatização, sendo ela a Norma Brasileira, NBR 6.489: Prova de carga direta sobre terreno de fundações – procedimentos (ABNT, 1984).

A Norma Brasileira, NBR 6489:1984, apresenta uma metodologia, o ensaio de placa superficial convencional com carga controlada por períodos de tempo preestabelecidos ou até a estabilização da carga incrementada, esse método auxilia na previsão do recalque em obras ligadas à Geotecnia.

O ensaio de placa permite conhecer o comportamento real do terreno quando submetido a cargas aplicadas na tentativa de obtenção de informações sobre o comportamento e determinação de deformações e rupturas do solo (DONATO, 2012).

O ensaio de placa é realizado pelo carregamento de uma placa contra o maciço, através de macacos hidráulicos que permitem registrar as cargas aplicadas e as deformações do solo (GOMES, 1993). Esse método apresenta uma curva pressão–recalque, mostrando os estágios de cada carga aplicada sobre o maciço.

O ensaio de placa constitui-se na instalação de uma placa rígida, com uma área igual ou maior que 0,5 m<sup>2</sup>, sobre o solo natural na mesma cota prevista no projeto das fundações superficiais, onde aplicam-se cargas no centro da placa e medem-se as deformações simultaneamente com os aumentos de carga. Um estágio de carga somente é aplicado após terem praticamente interrompido os recalques do estágio anterior. As cargas são aplicadas até haver a ruptura do solo e, caso isto não aconteça, são aplicadas até que se alcance o dobro da tensão admissível presumida para o solo. Os resultados são apresentados em gráficos de pressão  $\times$  recalque, juntamente com outros dados relativos ao dia e horário do início e fim da prova, as condições relativas do local da prova e terreno informando dados e cota da superfície (NBR 6489:1984).

Para Menegotto (2004), a prova de carga em placa é o ensaio de compressão realizado diretamente na superfície ou em determinada profundidade do terreno, por meio de placa

metálica rígida, retratando o comportamento da fundação sob a ação das solicitações procedentes da superestrutura.

Segundo Donato (2007), o ensaio de placa vem sendo utilizado na Geotecnia para projetos de fundações. Ainda, de acordo com o autor, existem outros fatores que podem levar a utilização desse ensaio, como, por exemplo: o fato de que o ensaio tem se mostrado adequado para a avaliação do comportamento de fundações superficiais, uma vez que o solo é submetido ao mesmo tipo de carregamento; o ensaio também permite a observação da forma de ruptura que ocorre no solo devido ao carregamento da fundação; há uma grande quantidade de soluções matemáticas e procedimentos empíricos e semiempíricos que podem auxiliar na interpretação dos resultados experimentais.

Bastezini *et al.* (2009) realizaram a montagem e execução de ensaios de placa em laboratório, através de uma caixa de acomodação de madeira com dimensões necessárias, do ponto de vista prático, para garantir um meio homogêneo para o material arenoso utilizado, com o intuito de simular os efeitos de recalque sobre o terreno. Através dessa pesquisa foi comprovado a eficiência do método em laboratório.

Os ensaios de placa tem sido muito utilizados em pesquisas sobre a utilização de geocélulas na Universidade de Passo Fundo, onde vários estudos foram realizados demonstrando que os testes simulam a solicitação gerada por uma sapata no solo, fornecendo parâmetros para avaliação do comportamento carga recalque, bem como informações sobre a capacidade de carga dos elementos de fundação, através de medições normatizadas.

## **2.6 Estudos experimentais**

Dash *et al.* (2019) analisaram a distribuição de tensões no solo em subleitos de fundação, reforçando-o com geocélula. O estudo foi através de testes em modelo e análise numérica. Os resultados da pesquisa indicam que, com o fornecimento de reforço de geocélulas, a tensão de contato no solo do subleito reduz significativamente através da mobilização de ancoragem derivada da resistência passiva e atrito do solo;

Dash *et al.* (2004) relatam que devido a sua estrutura celular, o colchão de geocélula contém e limita a areia de forma mais eficaz que outros tipos de reforços convencionais. Os resultados de sua pesquisa demonstram que a geocélula é uma técnica de reforço de solo muito vantajosa.

Mengelt *et al.* (2006) realizaram testes com dois tipos de solos de grão grosso (cascalho e areia) e um solo de grão fino (argila) em geocélulas com e sem confinamento. O efeito da resistência da geocélula dependia do solo utilizado no seu preenchimento e da condição de compactação. Quando usado o solo mais grosso, o desempenho da geocélula aumentou apenas 1,4-3,2%, mas quanto empregado o solo de grão fino, o aumento passou a ser de 16,5-17,9%. Logo, o resultado analisado sobre o módulo resiliente foi maior quando o preenchimento de grão fino, que foi molhado e compactado com o melhor teor de água. Ocorreram maiores deformações em testes no solo de grão fino, o que provavelmente contribuiu para o aumento do módulo de resiliência quando confinado em uma geocélula. Os testes com os solos de grão grosso indicaram que a taxa de acumulação de deformação a longo prazo na areia e cascalho sob carga cíclica constante diminuiu aproximadamente 2% quando foram confinados em geocélulas do solo não reforçado.

Dash *et al.* (2007) apresentaram uma série de testes de carga sobre geocélulas reforçadas sobre leitos de areia. Estas pesquisas foram utilizadas para avaliar bancos de areais frágeis, utilizando como parâmetro de estudo várias propriedades da geocélula, como o tamanho da abertura, largura do colchão e a altura da geocélula. Com o emprego do sistema de reforço, a capacidade de suporte aumentou oito vezes em comparação com um caso não reforçado, mostrando que bancos de areias reforçados com geocélula aumentam seu desempenho, mostrando-se resistente com o uso da tecnologia.

Tafreshi *et al.* (2013) descreveram os efeitos do reforço de múltiplas camadas de geocélula em combinação com camadas de mistura de borracha e areia, comparando seu comportamento com o do reforço com geocélula multicamada. Os resultados dos testes foram obtidos apenas para um tipo de solo, um tipo e tamanho de abertura da geocélula. Os resultados foram gerados considerando essas limitações, colaborando no desenvolvimento do *design* para aplicações com geocélulas para reforço multicamadas.

Madhav *et al.* (2014) referem-se à influência de geocélula reforçada com preenchimento granular sobre um solo fofo. A partir de uma abordagem de Terzaghi (1943), para estimar a capacidade quanto ao cisalhamento diante da acomodação das partículas, foi verificado, após a análise e através de intensas investigações laboratoriais e numéricas para entender o comportamento do reforço, usando modelos de fundações para entender o comportamento de reforço geossintético para camadas granulares, desse modo, os resultados obtidos foram satisfatórios.



Suku *et al.* (2016) realizaram testes de carga de placas sob o solo granular com carregamentos repetidos para analisar os efeitos do reforço geocelular em solos de baixa capacidade de suporte utilizados em pavimentação. Os resultados mostraram que a geocélula reforça o solo e a espessura da camada agregada de estradas não pavimentadas, apresentando uma deformação menor para a camada reforçada com maior espessura. Ressalta também que o uso da geocélula, quando comparada com outros métodos, mostra impactos relevantes na redução dos custos da construção.

Biswas e Krishna (2017) apresentaram uma revisão crítica do comportamento de sistemas reforçados com geocélula, que seriam amplamente utilizadas em vários projetos de estabilização da inclinação, construção de aterros e ferrovias. Seu trabalho foi desenvolvido para estudar o melhoramento, desempenho do reforço com geocélula, demonstrando a crescente tendência e demanda da utilização do sistema.

Outros estudos utilizando a geocélula também foram realizados por diversos autores, como Zhou e Wen (2008), Avesani *et al.* (2013), Dash *et al.* (2013), Sitharam *et al.* (2013), Floss *et al.* (2016), Madhi *et al.* (2016), Hegde (2017), Zarembeski *et al.* (2017), Dharmesh *et al.* (2017), Oliaei (2017), Dalla Rosa *et al.* (2014), MIGUEL *et al.* 2016; BARUFFI *et al.* 2016; RAHIMI *et al.* 2018; Pokharel *et al.* (2019); FAVRETTO (2020), demonstrando sua eficácia e maneiras de utilização.

## **2.7 Aplicação em casos de obras**

Devido à sua natureza tridimensional, a geocélula oferece confinamento total ao solo encapsulado, o que leva à melhora geral no desempenho das camadas superficiais e de fundação. Através da sua forma e do material geossintético que a compõe, é capaz de receber esforços quando preenchida com materiais que influenciam no seu desempenho em sistemas de reforço, colaborando em seu desempenho.

A busca por áreas mais resistentes e com alto desempenho, como estradas e ferrovias, fundações, aterros, encostas íngremes e retenção de paredes fez surgir um mecanismo de auxílio nas mais diversas situações.

No controle de erosão, citamos a aplicação da geocélula em uma obra do Consórcio GYM – Contugas no Ica/Perú, em 2013 (Figura 6), onde foram utilizadas geocélulas de poliéster de 4” e 10 cm de altura, com preenchimento com pedra esmagada com aplicação em taludes, de acordo com TDM (2017).

Figura 6: Controle de erosão com aplicação de geocélula



Fonte: TDM (2017).

Em uma obra do grupo Arteris, localizada no município de Florianópolis (SC), o sistema convencional para reforço de subleito seria a execução de uma camada de 50 cm de rachão, mas devido à escassez do material granular na região e seu custo de transporte, a empresa fornecedora do material propôs um método de reforço que reduz a espessura do rachão, gerando economia na obra. Além da aplicação de geogrelha, também foram utilizadas geocélulas de PEAD, com paredes texturizadas e perfuradas, como substituição da camada de reforço de subleito, Figura 7. A utilização do método proporcionou uma melhora no desempenho em 45% na capacidade de suporte do pavimento rodoviário (GEOSOLUÇÕES, 2017).

Figura 7: Reforço de subleito com uso de geocélula



Fonte: Geosoluções (2017).

Em outra situação, a geocélula foi aplicada para contenção de solo e de muros de arrimo. Esta situação aconteceu em uma obra do grupo Arcerlor Mittal, em 2016, na cidade de Cariacica (ES). O sistema foi utilizado para aumentar a vida útil de um depósito de resíduo de escória, também ampliando sua capacidade de armazenamento (TDM, 2017).

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

#### 3.1 Delineamento da pesquisa

Com o objetivo de minimizar possíveis interferências, os ensaios foram executados em laboratório, a fim de evitar intervenções humanas e climáticas. Cabe salientar que o manuseio e controle dos materiais e equipamentos foram realizados por um único responsável em todo o desenvolvimento da pesquisa.

Foram ensaiadas amostras de resíduos sem o reforço sobre a base de solo arenoso, comparando o resultado com o uso do sistema com geocélulas preenchidas com o resíduo do processo de beneficiamento de pedras preciosas. O arranjo dos ensaios são mostrados na tabela 1, com as respectivas nomenclaturas de cada configuração.

Tabela 1: Arranjo de ensaios de placa

<b>Nomenclatura</b>	<b>Configuração</b>	<b>Altura da camada de reforço</b>
E0	Ensaio de referência 1	-
E1	Ensaio de referência 2	-
ER1	Areia + Resíduo	7,5cm
ER2	Areia + Resíduo	7,5cm
ER3	Areia + Resíduo	20cm
ER4	Areia + Resíduo	20cm
GCS1	Areia + (resíduo + geocélula)	7,5cm
GCS2	Areia + (resíduo + geocélula)	7,5cm
GCS3	Areia + (resíduo + geocélula)	20cm
GCS4	Areia + (resíduo + geocélula)	20cm

A avaliação do desempenho quanto à capacidade de resistência de um solo arenoso, utilizando geocélula preenchida com resíduos do processamento de pedras preciosas, foi realizada através da comparação de resultados, referente às variáveis fixas de controle e de resposta, que estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2: Variáveis fixas da pesquisa

<b>Fatores</b>	<b>Especificação do material</b>
<b>Variáveis fixas</b>	
Solo de base	Areia seca
	Densidade relativa: 30% ;
Substrato para reforço e preenchimento da geocélula	Resíduo de pedras preciosas
	Densidade relativa: 50%
<b>Variáveis de controle</b>	
Altura (h) reforço	7,5cm e 20cm
Camadas de resíduo	COM geocélula; SEM geocélula
<b>Variáveis de resposta</b>	
Carga de ruptura (kpa)	
Deslocamento relativo s/B (%)	

Através do valor obtido como capacidade de carga do solo, para os ensaios de referência, e valores para ensaios com a presença do resíduo do processamento de pedras preciosas com e sem geocélula foi possível comparar os resultados com dados da literatura nos quais o mesmo resíduo ou outros elementos de preenchimento foram usados. Para esta comparação foi necessário que outras condições fossem controladas, como a altura do reforço com e sem geocélula.

### 3.2 Local de estudo

Os ensaios para o presente trabalho foram realizados no Laboratório de Geossintéticos, da Universidade de Passo Fundo (UPF) localizado da cidade de Passo Fundo, região Norte do estado do Rio Grande do Sul, para a avaliação da resistência gerada pela interação entre o uso de material residual do beneficiamento de pedras preciosas como camada de reforço e o comportamento da geocélula.

A organização das etapas e sequências com quantitativo de ensaios está apresentado na Figura 8.

Figura 8: Fluxograma da pesquisa



### 3.3 Materiais

#### 3.3.1 Geocélulas

As geocélulas do tipo diamante fazem parte do sistema de reforço do solo, composto pelas camadas de resíduos de pedras preciosas com geocélula. Os ensaios foram executados com geocélula modelo MacWeb, com paredes perfuradas, produzidas em polietileno (PEAD) de alta densidade, com propriedades definidas pelo fabricante perante as normas ASTM D1505, ASTM D1693 e ASTM D5199, mostrada na Figura 9. As alturas das células ensaiadas são de 7,5 cm e 20 cm, mostradas na figura 9, sendo que a largura da célula é constante. O painel recebido do fabricante, quando aberto, mede aproximadamente 30 m<sup>2</sup>, sendo que as dimensões de abertura da célula são de 340 x 290mm. O material é de cor preta e as células estão ligadas entre si por meio de solda ultrassônica. Para a execução dos ensaios foi necessário uma amostra com as dimensões de 90 x 90 x 70 cm, conforme medidas da caixa de acomodação do material, perfazendo uma área total de aproximadamente 0,6m<sup>2</sup>. As propriedades do material estão listadas na Tabela 3.

Figura 9: Geocélula com paredes perfuradas utilizada na pesquisa.



a) Altura da geocélula 7,5cm.

b) Altura da geocélula 20cm

Tabela 3: Propriedades das geocélulas

<b>Propriedades</b>	<b>Altura da célula</b>	<b>Altura da célula</b>
	<b>h=7,5 cm</b>	<b>h=20 cm</b>
Nome Comercial	MacWeb 2507.3	MacWeb 2520.3
Matéria Prima	Polietileno de alta densidade	Polietileno de alta densidade
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,935 a 0,965	0,935 a 0,965
Distância entre juntas de solda (mm)	445	445
Altura (mm)	75	200
Dimensões da célula (mm)	340x290	340x290
Tamanho máximo do painel - expandido (m)	2,81x10,7	2,81x10,7
Área máxima do painel - expandido(m <sup>2</sup> )	30	30
Resistência mínima da solda (N)	1060 (+-5%)	2900(+5%)

Fonte: Adaptado de Maccaferri (2020).

### 3.3.2 Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas

O resíduo para preenchimento das geocélulas foi adquirido em indústrias que realizam o processo de rolagem beneficiamento de pedras semipreciosas no município de Soledade, no Rio Grande do Sul, para ensaios de placa e a constatação de sua resistência.

Neste trabalho analisamos os resíduos de característica granular, passantes na peneira #3/8 (abertura de 9,5 mm) e retidos na peneira #100 (abertura de 0,15 mm). O material peneirado resultante foi utilizado para compor a camada superior à camada de fundação.

A classificação granulométrica permitiu situar esse substrato para melhorar seu desempenho, visto que o mesmo, em sua forma bruta, apresenta-se com uma granulometria variável, logo, optou-se por realizar a separação para parametrizar os componentes em questão. A Figura 10 apresenta o material peneirado mostrando a variação granulométrica.



Figura 10: Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas em seu formato bruto



O resíduo preparado para os ensaios foi caracterizado fisicamente através dos ensaios de granulometria (ABNT NBR 7181:2016), massa específica real dos grãos (ABNT NBR 6508:1984), índices de vazios, mínimo e máximo (ABNT NBR 12051:1991 e ABNT NBR 12004:1990), cujos resultados estão apresentados conforme Figura 11 e Tabela 4.

Figura 11: Curva granulométrica dos resíduos de beneficiamento de pedras preciosas.

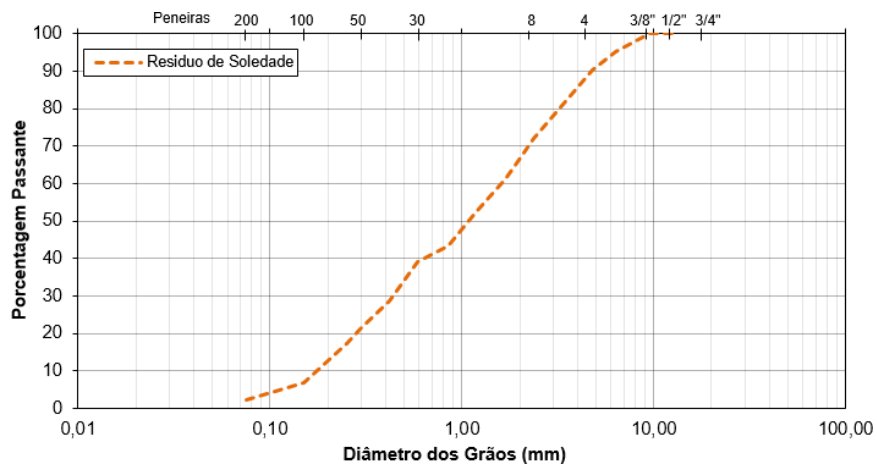


Tabela 4: Características geotécnicas dos resíduos do beneficiamento de pedras preciosas.

Parâmetro	Valor
Peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ )	25,37 kN/m <sup>3</sup>
Coefficiente de uniformidade ( $C_u$ )	9,82
Coefficiente de curvatura ( $C_c$ )	0,68
Diâmetro efetivo ( $D_{10}$ )	0,17 mm
Diâmetro médio ( $D_{50}$ )	1,12 mm
Índice de vazios mínimo ( $e_{\text{mín.}}$ )	0,33
Índice de vazios máximo ( $e_{\text{máx.}}$ )	0,54

Seguindo os procedimentos de obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos da NBR 10006:2004, foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização, conforme Figura 12, no Laboratório de Geotecnia Ambiental, onde o resíduo foi caracterizado como sendo de Classe II-B. Segundo a NBR 10004:2004, o resíduo amostrado de uma forma representativa e submetido a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada a temperatura ambiente, que não apresentou nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, alterando seu aspecto relacionado à cor, turbidez e sabor, pode ser classificado como resíduo de Classe IIB - Inertes.

Figura 12: Ensaio de Lixiviação e Solubilização



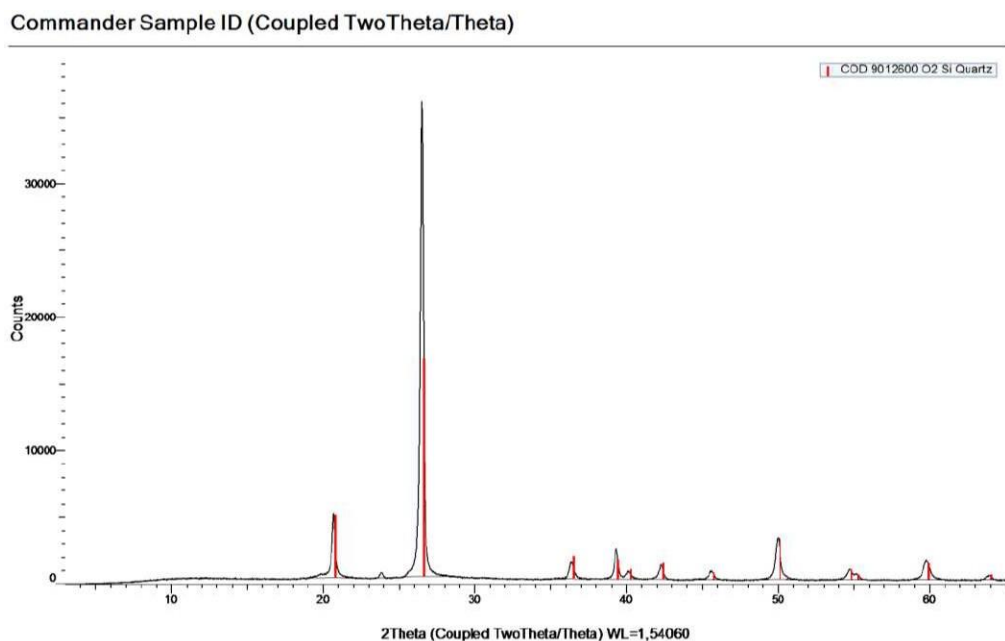
O resíduo gerado pelo beneficiamento de pedras preciosas em Soledade (RS) não apresenta qualquer contaminante, sendo que o processo industrial é realizado com água sem adição de produtos químicos, o que resulta em um material ambientalmente correto. Autores

como, como Thomé *et al.* (2002), também realizaram ensaios de lixiviação e solubilidade, constatando elementos-traço lixiviados inferiores ao limite máximo, bem como a concentração de metais inferior ao limite permitido.

O resíduo de interesse no presente estudo é resultante da rolagem de pedras preciosas, identificado no Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) como resíduo de pedras sem tingimento, caracterizado como cacos de pedra e pedra rolada, e classificado como Classe II-B não perigosos (AGDI, 2014).

Na pesquisa, realizada no Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul (CTP, 2018) através do método DRX apresenta a análise mineralógica da Ágata, rocha utilizada no processo de beneficiamento, citada em nosso estudo. O resultado desta avaliação está apresentado na Figura 13.

Figura 13: Composição do Ensaio de Difratoimetria de Raio-X.



Fonte: Centro tecnológico de Pedras, Gemas e joias do Rio Grande do Sul (2018).

Tonello *et al.* (2017) também realizaram a análise da composição química do resíduo através do equipamento de fluorescência em Raio-X, mostrando que mais de 90% da composição é dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), conhecido como sílica, sendo uma estrutura predominantemente cristalina, conforme exposto na Quadro 2.

Quadro 2: Composição química do resíduo.

<b>Fórmula</b>	<b>Concentração</b>
SiO <sub>2</sub>	92,64%
Al <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	2,24%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,45%
CaO	1,01%
P <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	0,89%
SO <sub>3</sub>	0,54%
CL	0,41%
K <sub>2</sub> O	0,36%
TiO <sub>2</sub>	0,12%
BaO	0,10%
MnO	0,05%

Fonte: Tonello et al., (2017).

Este agregado foi utilizado para compor a camada sobrejacente ao solo arenoso de base no decorrer dos ensaios de placa. Logo, foram testadas duas configurações de resíduos: (a) o resíduo como material de preenchimento da geocélula (reforço) (b) apenas uma camada de resíduo sem reforço, para comparação com o sistema de utilizando geocélulas.

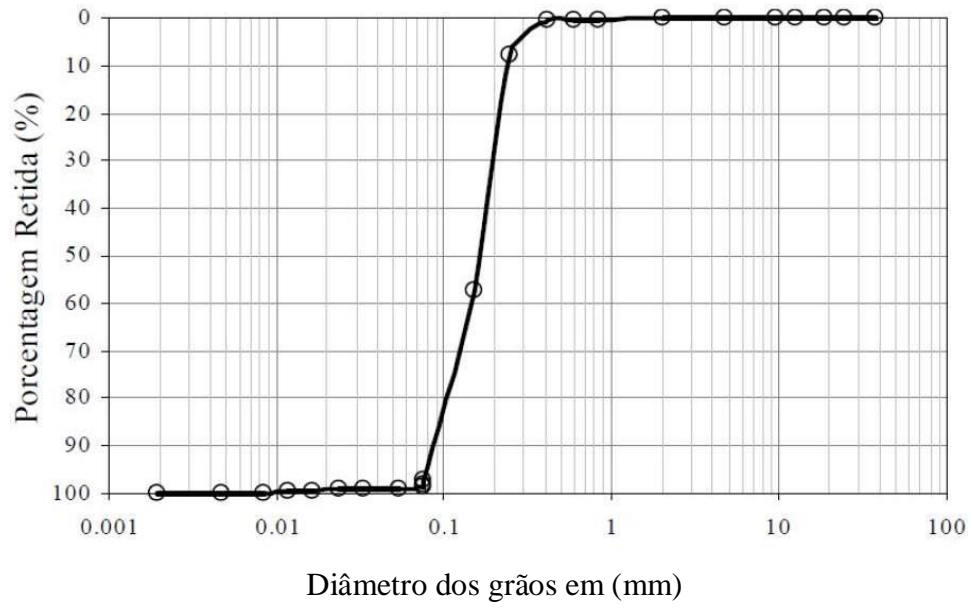
### 3.3.3 Solo de Base (Areia)

Para compor o solo de base, foram coletadas amostras do solo de uma jazida de extração, localizada no município de Osório (RS), para a composição relacionada como fundação. Este material foi utilizado em diversas pesquisas, como, por exemplo, nas de Donato (2007), Consoli *et al.* (2010; 2013), sendo conhecido por ser um material fino, limpo e por apresentar uma granulometria uniforme. Uma amostra do material pode ser visualizada na Figura 14, e sua curva granulométrica e demais índices físicos ligados ao estudo geotécnico nas Tabelas 5 e 6, conforme caracterização de Donato (2007).

Figura 14: Areia de Osório/RS em seu estado natural



Tabela 5: Curva granulométrica da areia de Osório (RS).



Fonte: Donato (2007).

Tabela 6: Caracterização geotécnica da areia de Osório (RS).

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

Fonte: Donato (2007).

### 3.4 Ensaios de Placa

#### 3.4.1 Ensaio de placa

O ensaio de placa tem se apresentado apropriado para o estudo do desempenho de fundações superficiais, em casos onde o solo é submetido a este tipo de carregamento. Dessa forma, uma das principais vantagens deste método ser utilizado é a economia, quando comparado às provas de carga em verdadeira grandeza.

Para a execução do ensaio de prova de carga foram adotados critérios técnicos da NBR 6489: 1984. O ensaio de placa consiste em simular um sistema de fundação em escala reduzida, trazendo como resposta o recalque da base através da aplicação de uma força real. O ensaio foi realizado com placa convencional de diâmetro 15cm, localizada superficialmente, e o carregamento controlado por cargas incrementais mantidas por períodos de tempo preestabelecidos até a estabilização do solo.

Com o ensaio de placa, foram medidos os deslocamentos verticais para verificação do recalque em três pontos sobre a placa, posicionados a 120° sobre a mesma, e três pontos paralelos a placa com o objetivo de coletar informações sobre deformações paralelas externas ao posicionamento da placa. Através da correlação das informações de tensão e deformação

relativa, logo, obtivemos o recalque que nos mostra a tensão admissível do solo, o quanto o solo resiste a sua tensão de ruptura ou ainda sua carga máxima de serviço.

### **3.5 Processo de mistura e construção das camadas**

#### **3.5.1 Preparação do solo de base**

Os ensaios foram realizados em uma caixa de madeira com dimensões de 90 x 90 x 70 cm. Esta caixa revestida internamente com uma camada de parafina em suas laterais e fundo, para melhor vedação e facilitar a investigação no momento do desmolde e exumação do material envolvido. A quantidade de material granular utilizado em cada camada foi obtida pelo cálculo da área e densidade do material, sendo aproximadamente 115 kg para cada 10 cm de altura, totalizando 460 kg.

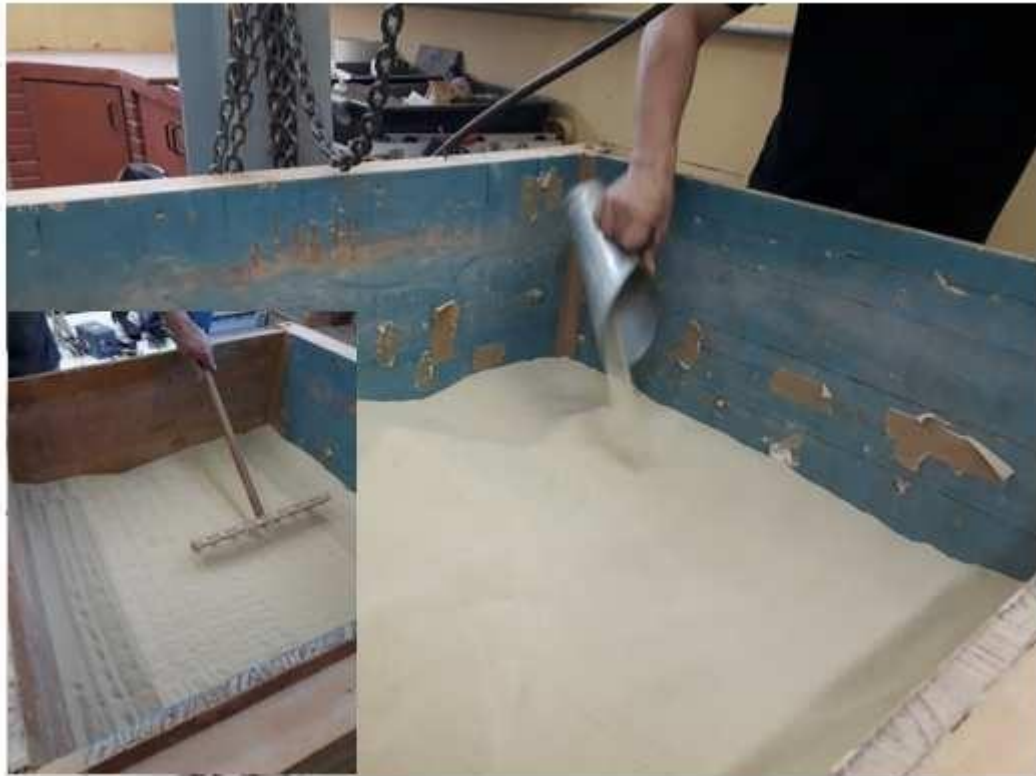
Para a preparação do solo arenoso utilizado como base dos ensaios, fixamos o parâmetro de densidade relativa ( $D_r$ ) em 30% para a areia em seu estado seco. A areia foi totalmente peneirada para a retirada de pequenas impurezas oriundas do local de acondicionamento, dessa forma, facilitando os testes de controle durante os ensaios. Para garantir que o material estava totalmente seco, realizamos a verificação da umidade de forma manual, através do método de campo conhecido também como método da frigideira no início de cada ensaio.

A preparação das camadas denominadas ensaio de referência, encobertas pela camada de reforço possui espessura total de 40 cm, sendo que acomodação do material foi realizada com concha metálica de forma manual em camadas de 10 cm, respeitando a quantidade de material previamente calculada para a densidade de 30%. Estes 40 cm foram compostos por quatro camadas de 10 cm da areia de Osório (RS), simulando o solo de base de uma fundação. Com um ancinho realizamos a homogeneização do material e padronização da densidade relativa, conforme mostra a figura 15. Após a camada de areia, adicionamos uma manta geotêxtil, sem ancoragem na área de iteração entre as camadas a fim de separar os materiais, quando adicionado o resíduo, facilitando o manuseio e a operação dos ensaios.

Todas as verificações foram realizadas através de ensaios em laboratório para a padronização dos materiais envolvidos no experimento e caso estivessem em desacordo com o especificado no momento dos ensaios foi corrigido para atingir as especificações recomendadas

Para a realização dos Ensaio de referência E0 e E1 não houve a necessidade da utilização da geocélula e resíduo.

Figura 15: Configuração do material para ensaios E0 e E1.



### 3.5.2 Preparação da camada de reforço.

As amostras de resíduo foram moldadas manualmente, visto que o parâmetro de densidade relativa (DR) do material é 50%, sendo o material essencialmente seco. As amostras foram moldadas em camada única, com densidade relativa prevista. Esta densidade controlada geometricamente, através da verificação das dimensões da camada e da caixa de acomodação utilizada para acondicionar o material e também com a utilização do método do cilindro cortante em escala reduzida.

No total, foram executadas oito provas de carga estática, conforme planejamento experimental descrito na Tabela 4. As amostras nomeadas como ER1, ER2, ER3 e ER4 são ensaios com a colocação de resíduo sobre a base com concha metálica, variando em alturas de 7,5 cm e 20 cm conforme mostrado na figura 16a. Após, as demais amostras denominadas GCS1, GCS2, GCS3 e GCS4 compostas pelo solo arenoso de base, acrescido a camada com a geocélula, preenchida com o resíduo em diferentes espessuras 7,5 e 20 cm, apresentado na figura 16b.

A camada de reforço executada sobre o solo arenoso foi composta por algumas variáveis, relacionadas com a altura da geocélula, sendo 7,5 cm e 20 cm, logo, a espessura das



camadas de resíduo tiveram a mesma variação no momento do preenchimento. A fim de quantificar o aumento da resistência devido à inserção da geocélula, também foram executados testes com o resíduo sem reforço.

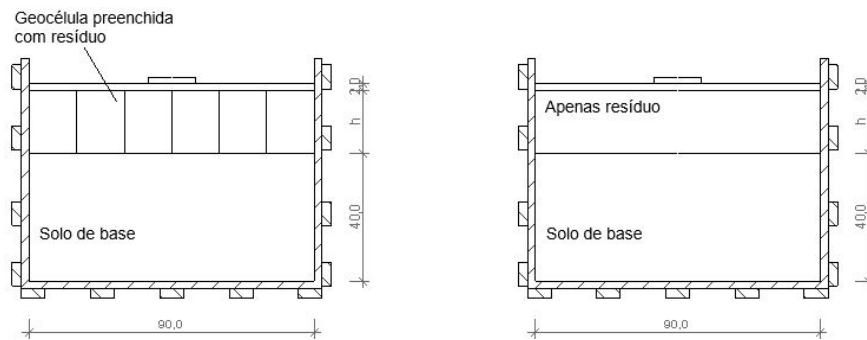
Os detalhes do posicionamento das camadas de materiais podem ser visualizado nas Figuras 17 e 18. Sobre a camada de reforço, foi adicionado também uma camada de resíduo de 2cm para ambos os testes com e sem aplicação de geocélula, para recobrimento do material e posicionamento adequado da placa.

Figura 16: Preenchimento da camada de reforço.



Figura 17: Configuração das camadas na composição dos ensaios

a) Reforço de geocélula preenchida com resíduo e b) Apenas resíduo.



Assim, foram utilizadas as camadas de 7,5 e 20cm somente de resíduos em diferentes momentos, para a comparação dos objetivos desta pesquisa, referentes às amostras ER1, ER2, ER3 e ER4.

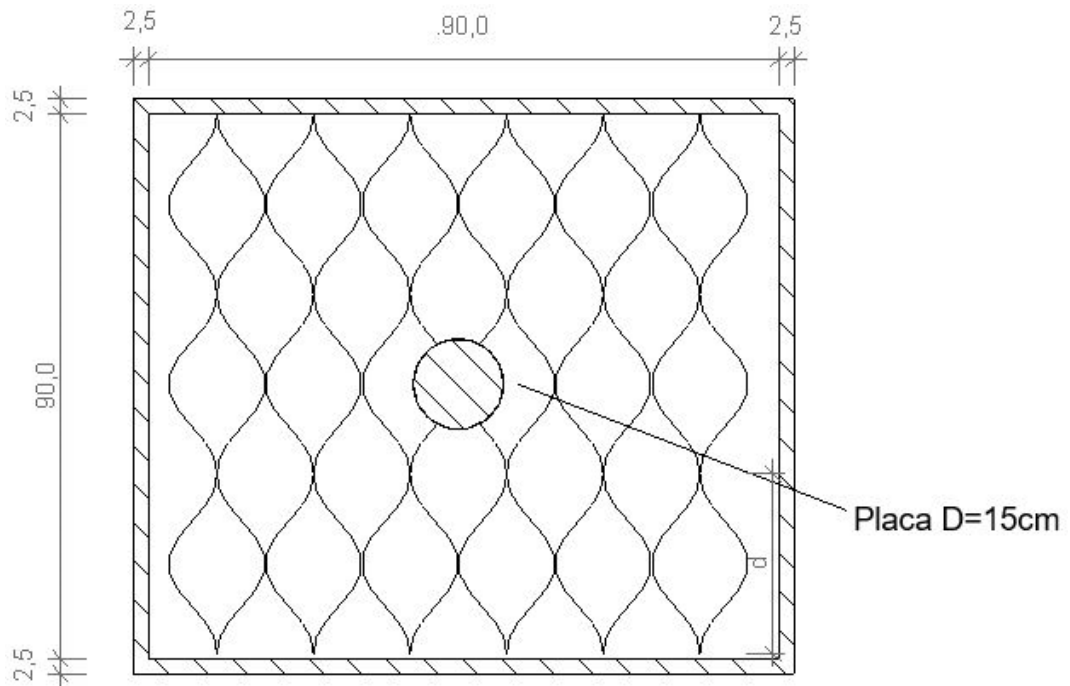
Da mesma forma, mas com a utilização de geocélula e resíduo, foram realizados os ensaios nomeados de GCS1, GCS2, GCS3 e GCS4. Finalmente, espalhado sobre o sistema uma camada de 2 cm de resíduo, para que se obtenha uma camada de trabalho para a acomodação dos equipamentos. Finalizando, instalados os equipamentos para a aplicação, leitura e medição de tensões.

### 3.5.3 Método de ensaio

Posteriormente a confecção das amostras, o sistema de reação e transmissão de carga composto como réguas resistivas, célula de carga, macaco hidráulico e relógios defletômetros, foram centralizados e fixados ao pórtico para dar início aos ensaios.

A placa foi posicionada durante os ensaios sobre o nó da geocélula, para que desta forma pudéssemos comparar as duas alturas de geocélula com a mesma posição da placa, diante do preenchimento total da sua área com resíduos, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18: Vista do posicionamento das geocélulas na caixa de acomodação do material.



A cada estágio de carga, os recalques foram lidos imediatamente e após intervalos de tempo normatizados verificou-se os critérios de estabilização pertinentes aos recalques resultantes do atual incremento. Realizamos um novo estágio de carga, obedecendo a tolerância máxima de 5% do recalque total entre as leituras anteriores. A NBR 6489:1984 estabelece como critério de paralização do ensaio a verificação de um recalque de 25 mm ou, então, quando atingido o dobro da carga máxima admitida pelo solo.

A carga transferida para a sapata foi monitorada pela célula de carga disposta entre o sistema de reação e o macaco hidráulico. A medição do sistema de deslocamentos foi composto pelas três réguas resistivas R1, R2 e R3, posicionadas a  $120^\circ$  sobre o diâmetro da placa. O sistema de medição dos deslocamentos laterais à placa foram posicionamento a uma distância do eixo da placa ( $x$ ) e o diâmetro ( $D$ ) sendo eles três relógios deflectômetros digitais D1, D2 e D3, dispostos a 12,5 cm ( $x/D=0,83$ ) - 5cm, 22,5cm ( $x/D = 1,50$ ) -15cm e 32,5 cm ( $x/D = 2,17$ ) - 25cm do eixo da placa, como pode ser visto na figura 21.

O deslocamento da placa ( $s$ ) e a deformação da superfície ( $\delta$ ) foram estabelecidos pelo diâmetro da placa, expressando os resultados no formato adimensional como  $s/D$  (%) e  $\delta/D$  (%). Em todos os gráficos gerados, os recalques são apresentados com o sinal positivo e a elevação do solo com sinal negativo. Os ensaios foram conduzidos até atingir um recalque

máximo limitado em 25mm ( $s/D= 17\%$ ), sendo estabelecida desta forma a carga máxima de serviço.

Para cada ensaio concluído realizamos a abertura da caixa para verificação, anotações, relatório fotográfico e análise dos deslocamentos através dos esforços resultantes de cargas durante o ensaio de placa. A cada novo ensaio, foram realizados todos os passos mencionados anteriormente para garantir a uniformidade dos parâmetros técnicos.

### **3.6 Equipamentos**

O sistema utilizado para transmissão de esforços simulando uma sapata circular foi composto por um pórtico perfil “I”, com carga de trabalho de até 250 kN com espessura de 12mm, confeccionado pelo Laboratório de Ensino de Sistemas Estruturais (LESE), da Universidade de Passo Fundo (UPF).

Para acomodar a areia e demais materiais utilizamos uma caixa de madeira com dimensões de 90 x 90 x 70 cm (largura, comprimento e altura). A lateral e fundo da estrutura em madeira é reforçada por cantoneiras de aço para garantir o seu desempenho na condução dos ensaios, para não haver distorção nos resultados. A caixa foi acoplada ao pórtico, desta forma, impedindo sua movimentação no momento em que o solo receber carregamentos. O desenho esquemático da Figura 18 apresenta o layout do experimento através do ensaio de placa.

Logo, os experimentos foram realizados norteados em normas técnicas e estudos científicos de referência. Os equipamentos utilizados na realização da pesquisa através do ensaio de placa foram apresentados da Figura 20.

Figura 19: Configuração completa dos ensaios de placa.

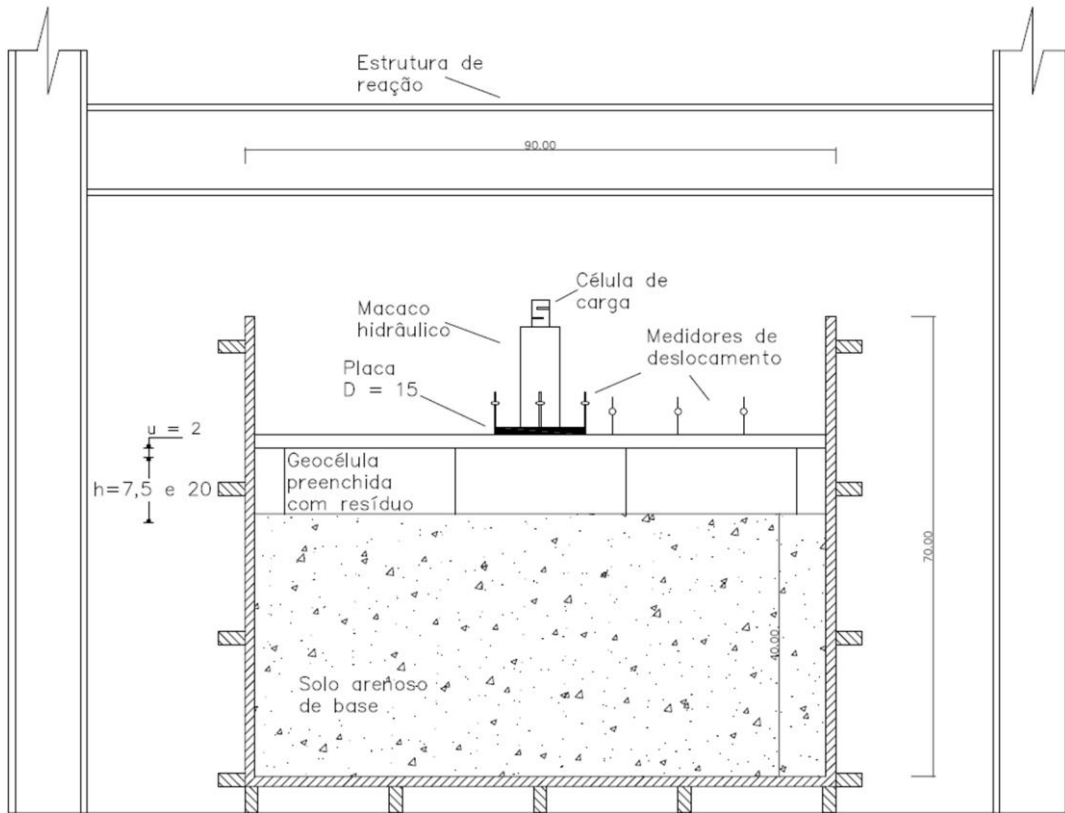
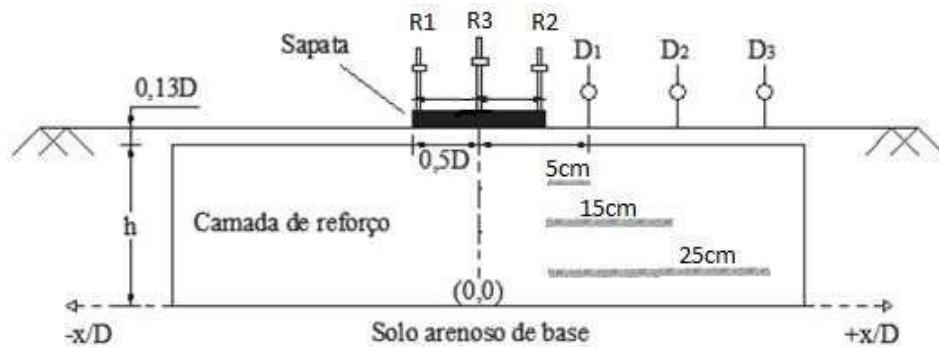


Figura 20: Ensaio de placa.



Para a realização dos ensaios utilizamos uma placa rígida de aço de 1,2 cm de espessura e 15 cm de diâmetro (D), com o objetivo de representar um sistema de carregamento em fundações superficiais. A geometria da fundação e os parâmetros testados estão ilustrados na figura 21.

Figura 21: Geometria da fundação.



O sistema de aplicação de cargas foi através da utilização de um macaco hidráulico, com capacidade de carga máxima de 300 kN, ao processo incorporamos uma bomba manual para auxiliar no funcionamento do procedimento. Adicionamos uma célula de carga com capacidade de 50kN para medição dos carregamentos disposta entre o sistema de reação e o macaco hidráulico, sendo que a aquisição dos dados foi automática.

A aquisição dos dados de carregamento, recalque e tensão foi feita de modo automático, através do equipamento de precisão, sendo uma placa conversora A/D (analógico/digital). A mesma possui 16 canais de entrada e configurações de ganho por hardware de 1x, 10x e 100x, podendo trabalhar em conjunto com os ganhos fornecidos pelo software de 1x a 500x.

Para monitorar o deslocamento vertical utilizamos três réguas resistivas R1, R2 e R3, com cursor de 55mm e 0.01mm de precisão, da marca Gefran colocadas a 120° sobre a placa circular, a fim de verificar possíveis recalques da superfície do solo relacionado a placa.

Quanto aos deslocamentos externos paralelos a placa, foi empregados três relógios defletores digitais, da marca Digimess.

Para garantir o funcionamento adequado e registro das informações de medição durante os ensaios, foram realizados os testes de calibração dos equipamentos para execução dos ensaios em laboratório, com a finalidade de aferir seu desempenho.

Para a calibração das réguas resistivas os instrumentos de medição foram conectados ao computador com o *software* para a leitura dos dados, medindo o deslocamento ocorrido na água da régua no momento em que a mesma era deslocada sobre a mesa, onde estavam sendo feitos os testes.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, os resultados dos ensaios de placa realizados conforme o plano experimental proposto, estão apresentados e discutidos. Inicialmente mostramos as curvas tensão-deslocamento do solo de base comparando esses com a adição de camada de resíduo em diferentes alturas sem o sistema de reforço. Após, apresentamos os resultados e análises pertinentes aos ensaios do sistema com a adição do sistema de reforço com geocélulas em comparação com ensaios da solo base. Na sequência, apresentamos os resultados e discussões sobre o sistema com a presença do reforço comparando com o sistema sem reforço em diferentes alturas, e posteriormente ao final uma análise global os ensaios realizados e avaliando seus resultados.

#### 4.1.1 Ensaios de Referência

Neste item é apresentado o ensaio de referência realizado no solo arenoso, também chamado de ensaios E0 e E1, através do comportamento tensão-deslocamento relativo na placa, disposto na Figura 22. Este ensaio é utilizado para todos os comparativos relacionados nos materiais e métodos desta pesquisa. O gráfico apresenta os estágios de carregamento, sendo o último incremento de tensão estimado para um recalque da placa em torno de 25 mm ( $s/D = 17\%$ ), cujos valores iguais e superiores a este caracterizam a carga máxima de serviço. Todos os pontos de leitura anteriores à estabilização dos recalques, para cada incremento de carga, foram eliminados. Os demais ensaios realizados neste estudo seguiram as mesmas premissas.

A Figura 23 e 24 é apresentado a variação da deformação da superfície em relação ao recalque da placa para as distâncias ( $x/D$ ) iguais a 0,83, 1,50 e 2,17. Para a distância de 0,83, próximo a placa é observada a elevação da superfície do solo, conforme o aumento dos recalques.

Os deslocamentos relativos externos à placa ilustrados pelos relógios defletômetros são apresentados nas figuras 25 e 26, mostrando as variações em perfil dos mesmos, sendo que nas figuras 27 e 28, realizamos uma demonstração para cada incremento de carga versus a movimentação dos respectivos relógios.



Figura 22: Curva tensão-deslocamento dos ensaios de referência – Ensaios E0 e E1.

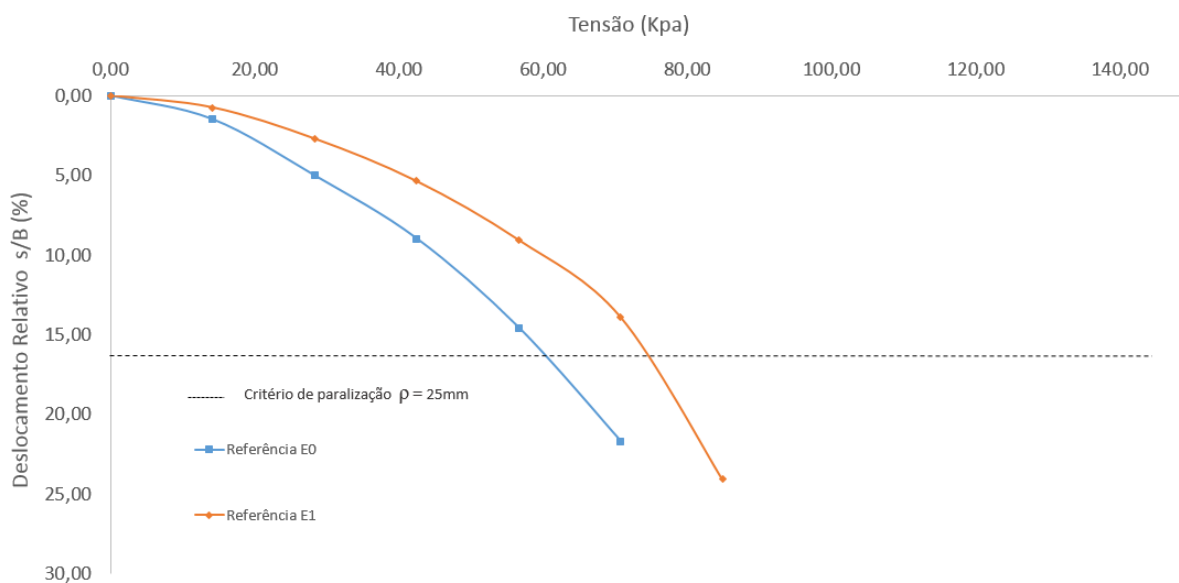


Figura 23: Deslocamento relativo externo da placa - Ensaio E0.

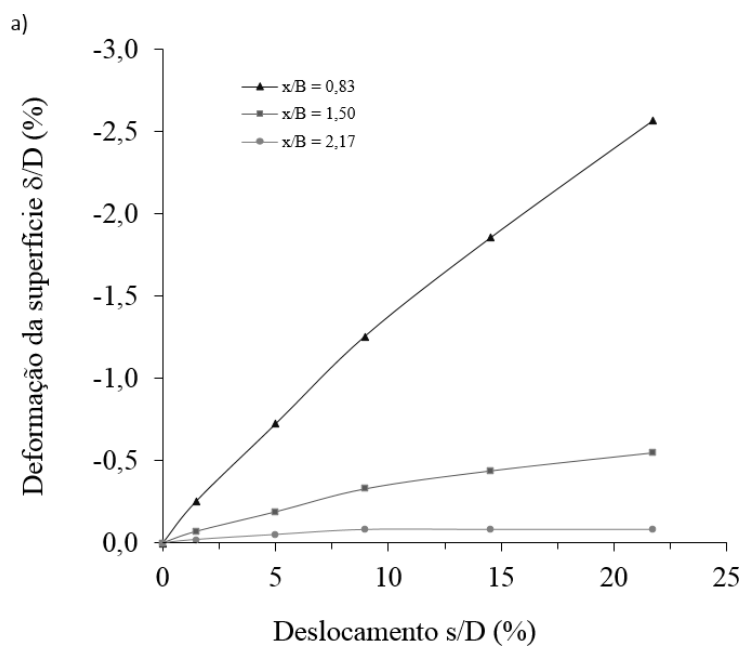


Figura 24: Deslocamento relativo externo da placa - Ensaio E1.

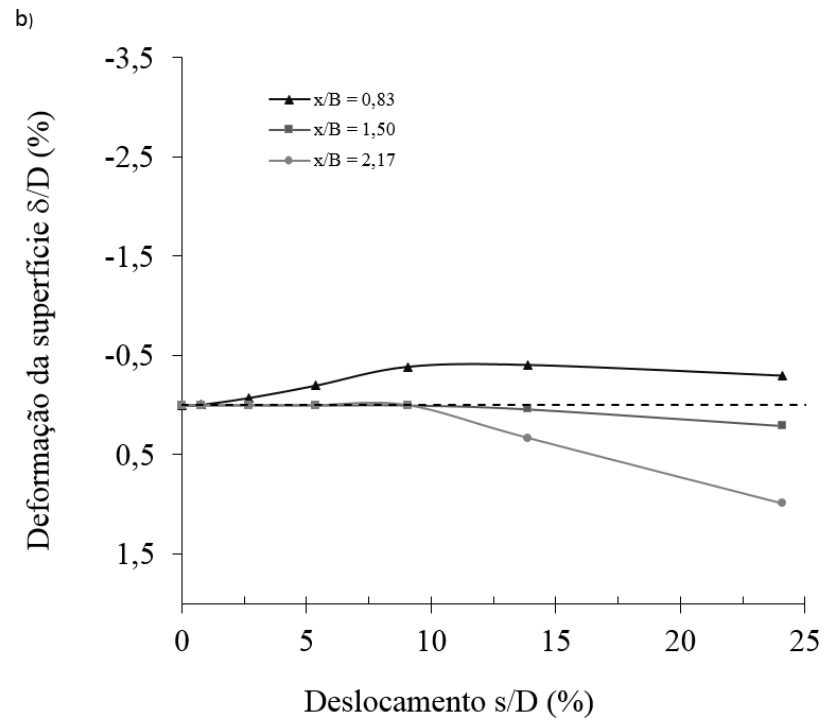


Figura 25: Perfil de deformação da superfície externa - Ensaio E0.

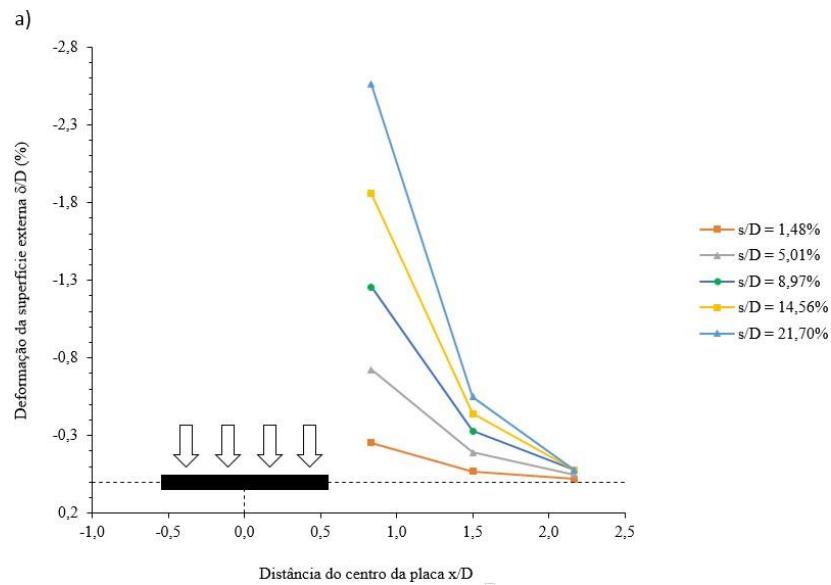


Figura 26: Perfil de deformação da superfície externa - Ensaio E1.

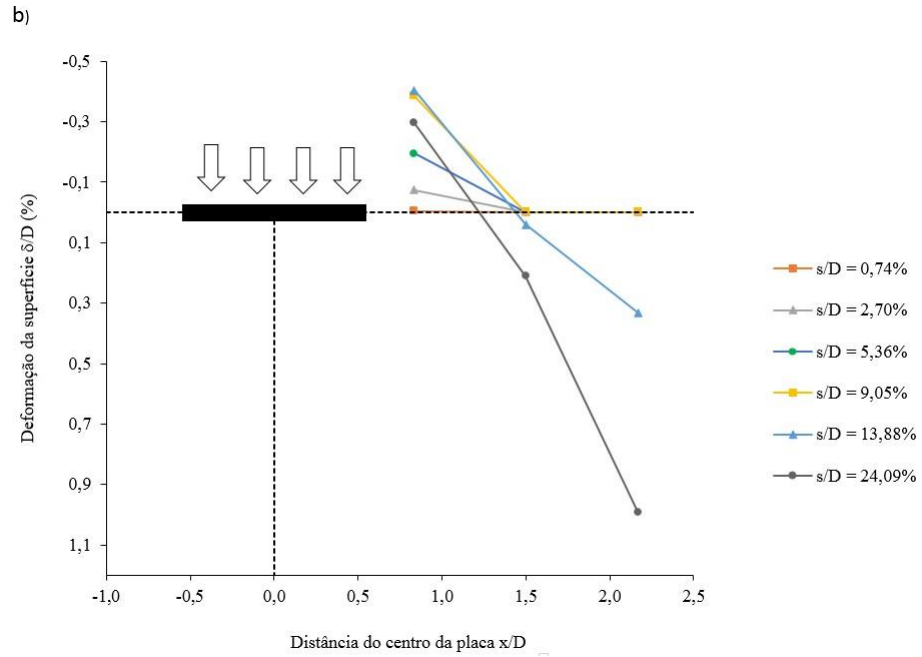


Figura 27: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque – Ensaio E0.

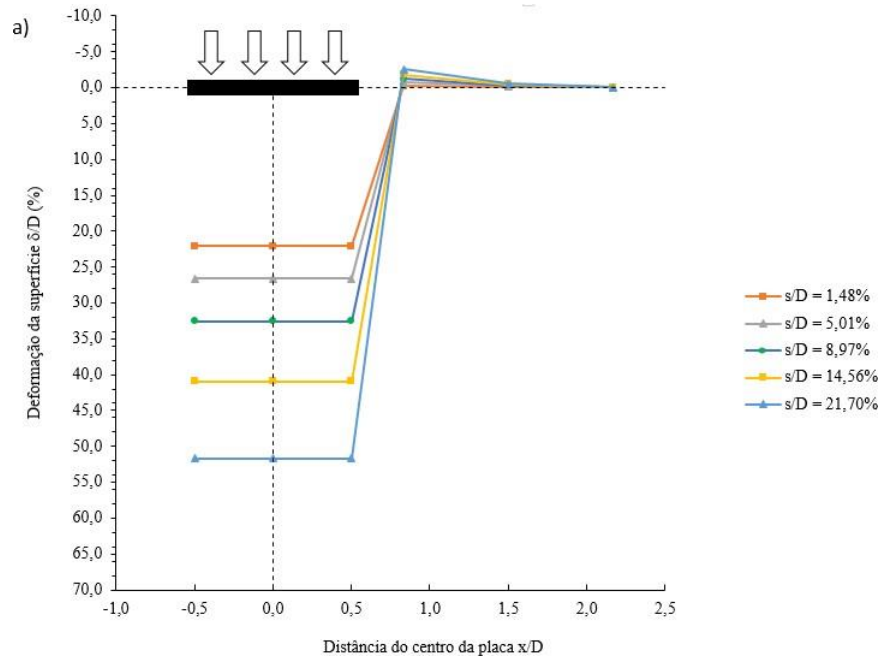
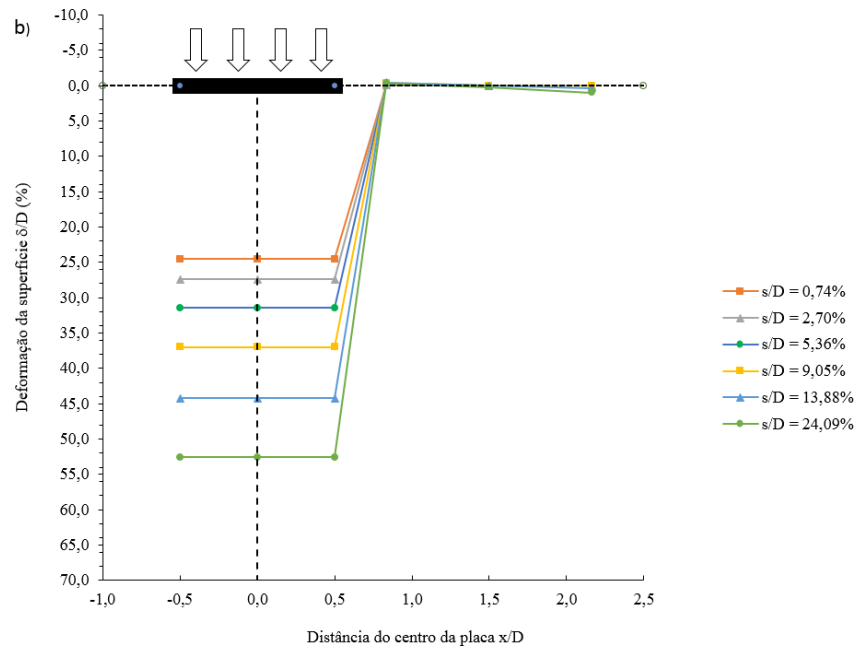


Figura 28: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque - Ensaio E1.



## 4.2 Ensaios sem geocélula

Este item expõe os resultados obtidos para os ensaios de placa realizados apenas com a adição do resíduo em diferentes camadas, sem a utilização da geocélula, também apresenta as análises dos dados obtidos nestes mesmos ensaios por meio do comportamento tensão-deslocamento relativo na placa.

### 4.2.1 Camada de resíduo com 7,5cm

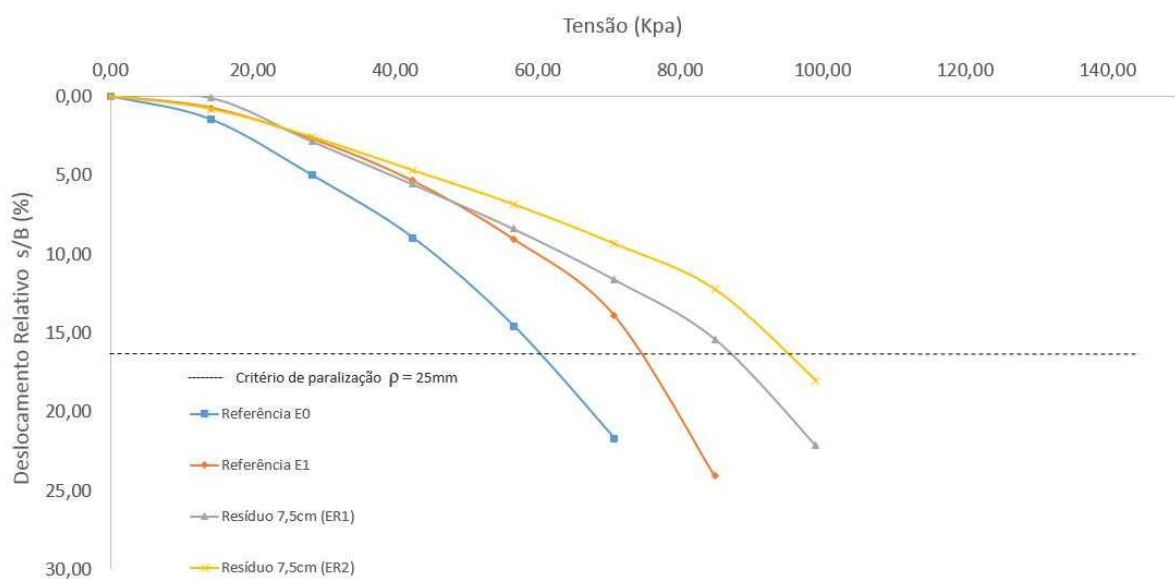
Para um melhor entendimento, apresentamos na figura 29, a curva carga-deslocamento conforme ensaio de placa com resíduo para o caso não reforçado com espessura igual a 7,5cm comparando com os ensaios de referência, conforme apresentado em materiais e métodos deste trabalho.

Os deslocamentos apresentados nas figuras 30 e 31 tratam-se dos deslocamentos medidos diretamente sobre a placa de aço por meio de três réguas resistivas, ambas posicionadas a 120 sobre a placa. O gráfico apresenta os estágios de carregamento, sendo o último incremento de tensão estimado para um recalque da placa de 25mm ( $s/D = 17\%$ ), onde valores iguais e superiores a este caracterizam a ruptura do solo. Todos os pontos de leitura anteriores para a estabilização dos recalques, para cada incremento de carga, foram eliminados. Os demais ensaios realizados neste estudo seguiram as mesmas premissas.

Observamos, nas figuras 30 e 31, que ao ser disposta a camada de resíduo sobre o solo arenoso a resistência do conjunto aumenta significativamente. Desta forma, sua utilização sobre o solo arenoso conduziu a resultados de capacidade de carga superiores aos obtidos no ensaio de referência.

Ao se tratar do deslocamento pela base, as movimentações ocorridas pelo conjunto são menores, logo percebemos que há uma diminuição no recalque sendo o resíduo responsável pelo resultado.

Figura 29: Curva tensão-deslocamento dos ensaios sem reforço ER1 e ER2 (7,5cm).



As figuras 32 e 33 expõe a variação do deslocamento relativo externo da placa em relação as distâncias horizontais dos relógios posicionados a  $(x/D)$  iguais a 0,83, 1,50 e 2,17. Observa-se no decorrer do carregamento, menores deslocamentos no ensaio de referência do que no ensaio sobre a camada de 7.5cm. Portanto, o que se pode concluir, é que por mais que tenha ocorrido um breve levantamento do solo ao entorno, o carregamento acabou tendo sua concentração abaixo da placa com nenhuma interferência a seus arredores.

Favretto *et al.* (2018) estudou a influência de geocélulas preenchidas com o resíduo do beneficiamento de pedras semipreciosas como material de preenchimento. Este material granular apresentava características granulométricas semelhantes às do resíduo estudado neste trabalho. Os materiais de estudo foram compactados com densidade relativa de 50% e os ensaios também foram realizados com Ensaio de Placa. Foram testadas duas alturas de geocélulas a fim de verificar o efeito deste parâmetro para a capacidade do solo. Os ensaios também foram realizados sobre amostras sem reforço. Os ensaios de realizados pela autora

sobre o solo arenoso não reforçado, apresentaram comportamentos referente a movimentações verticais paralelas a posição da placa análogo ao nosso estudo.

Nas figuras 34 e 35 ilustram os perfis de deformação da superfície externa, lidas em cada ponto para diferentes níveis de recalque. Neste caso podemos ver a progressão dos recalques e elevações para cada incremento de carga, expressos pelos recalques normalizados.

Figura 30: Deslocamento relativo externo da placa – Ensaio ER1.

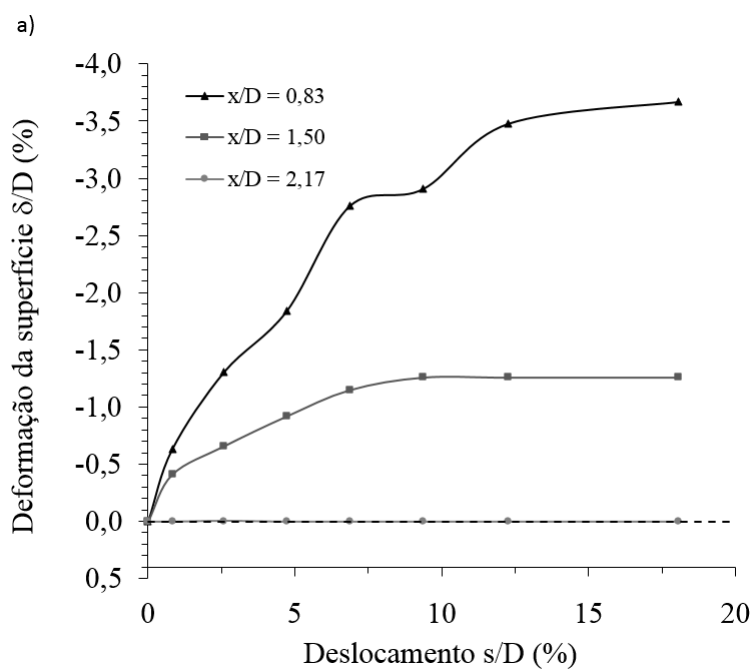




Figura 33: Perfil de deformação da superfície externa - Ensaio ER2.

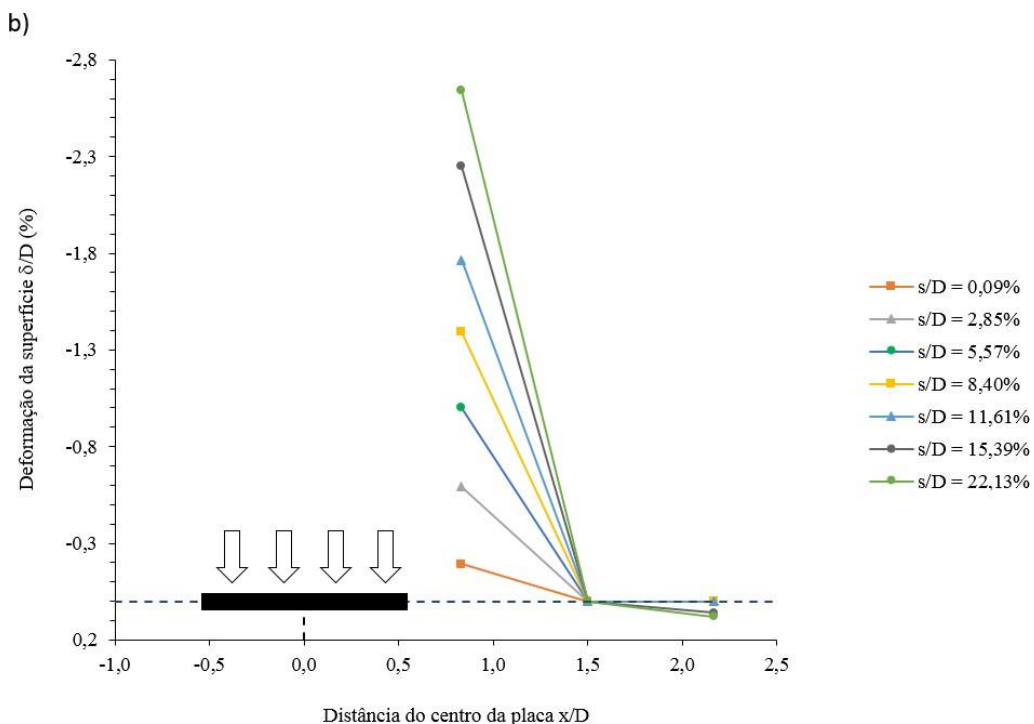


Figura 34: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque – Ensaio ER1.

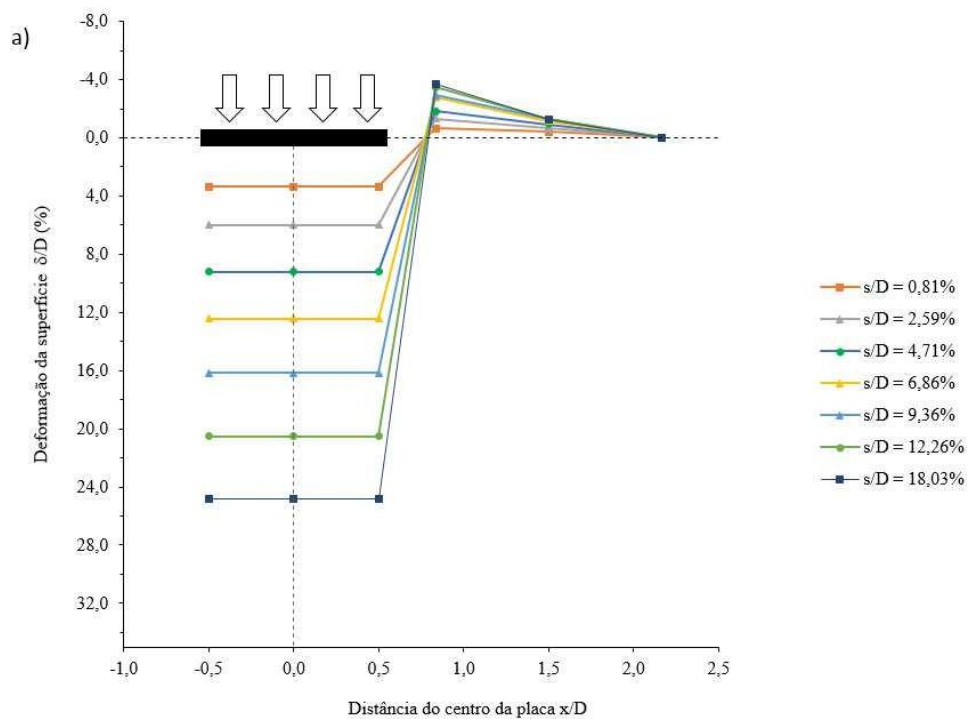
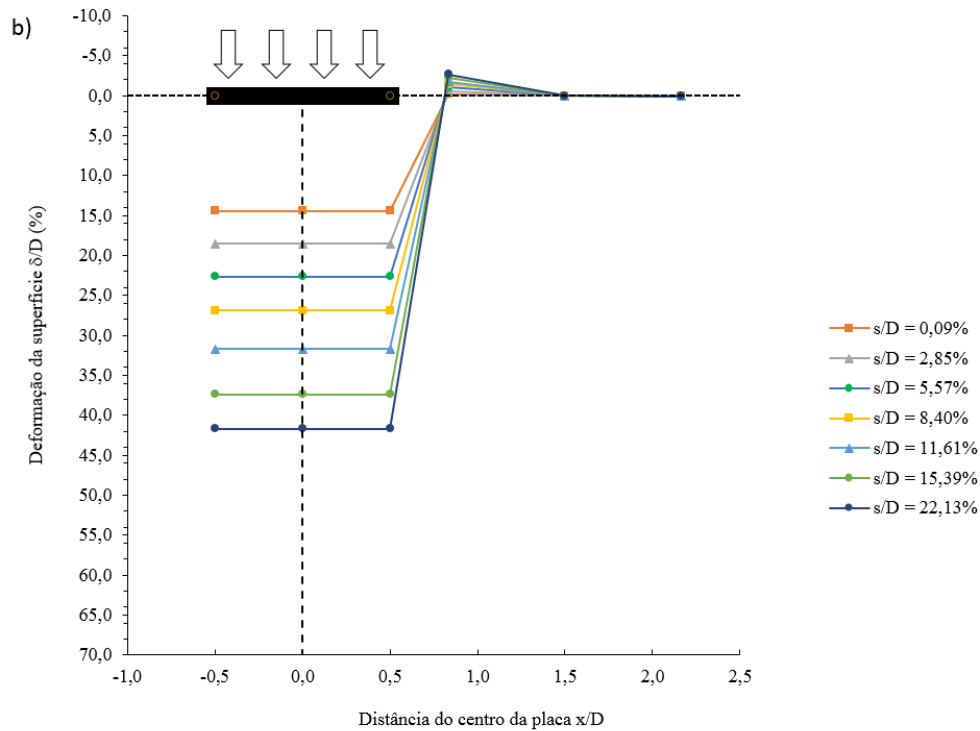




Figura 35: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque - Ensaio ER2.



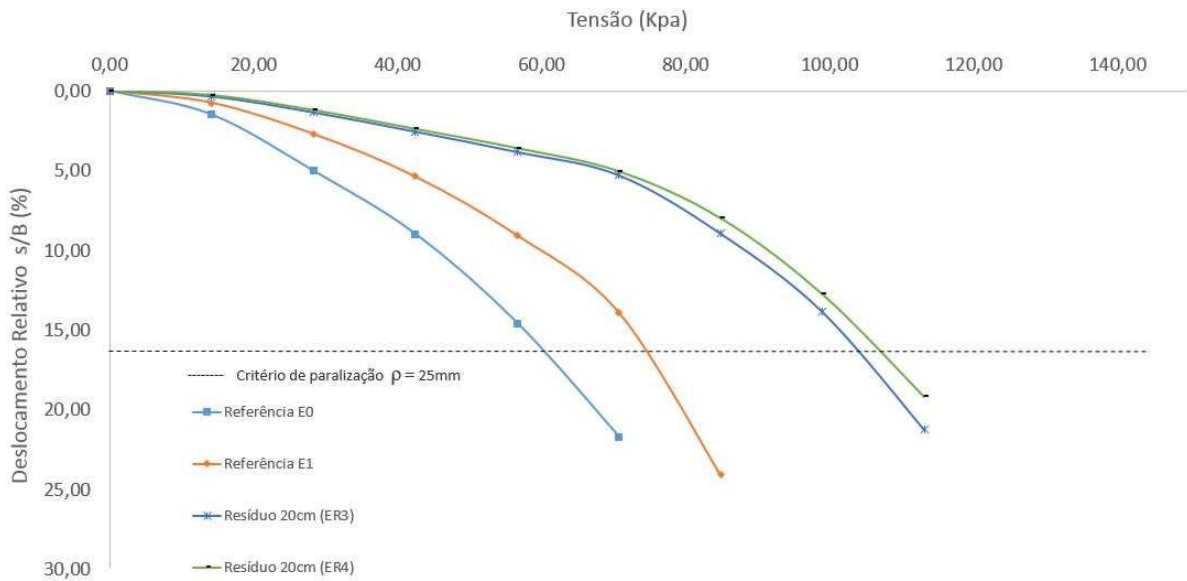
#### 4.2.2 Camada de resíduo com 20cm

A figura 36 mostra o comportamento tensão-deslocamento referente ao ensaio sobre a camada de resíduo não reforçada com espessura igual a 20cm, sendo também comparado aos ensaios de referência realizado no solo de base, apresentado anteriormente.

Idêntico ao ocorrido no ensaio anterior, realizado sobre a camada de resíduo não reforçada de 7,5cm de espessura, a figura 36 demonstra que a resistência do solo arenoso aumenta com a adição de uma camada sobrejacente de resíduo com 20cm de espessura.

Observamos também, que a variação do recalque frente ao aumento da camada de resíduo é pertinente, visto que o resíduo trata-se também de um material granular não homogêneo em relação aos grãos, podendo influenciar em maiores deslocamentos.

Figura 36: Curva tensão-deslocamento dos ensaios sem reforço – Ensaios ER3 e ER4 (20cm).



Outra informação relevante, trata-se da movimentação vertical do solo em torno da placa o que vem a caracterizar a ruptura como localizada. Nas figuras 37 e 38, apresentamos a variação do deslocamento da superfície em relação ao recalque da placa para as distâncias iguais a  $(x/D)$  0,83, 1,50 e 2,17 da borda da placa. Observa-se a elevação da superfície do solo conforme o aumento dos recalques na placa. O levantamento sugere que, enquanto abaixo da placa o solo sofrerá um recalque, o solo em seu entorno estará sujeito a um levantamento. Este fenômeno ocorre porque o solo não reforçado se move livremente em resposta a um dado carregamento.

As movimentações são pequenas, podemos destacar que para esta configuração de análise as movimentações não são relevantes, portanto, o que se pode concluir nas figuras 37 e 38 é que não houve movimentações significativas nas proximidades da placa quando analisados os ensaios E0 e E1 com ER3 e ER4.

O perfil de deformação da superfície em diferentes níveis de recalque da placa pode ser visto nas figuras 41 e 42. Observava-se as maiores elevações da superfície a uma distância  $x/D = 0,83$ . Em comparação aos deslocamentos, foram observados maiores variações com a altura de resíduo em 7,5cm do que no ensaio com altura de 720cm. Logo, à espessura da camada exerce uma determinada resistência e o solo não se move com facilidade.

Figura 37: Deslocamento relativo externo da placa – Ensaio ER3.

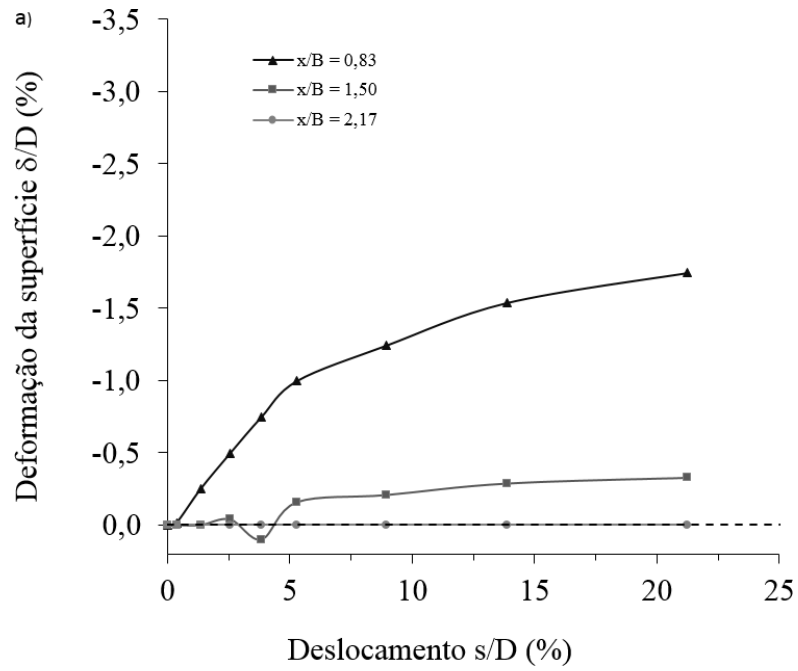


Figura 38: Deslocamento relativo externo da placa - Ensaio ER4.

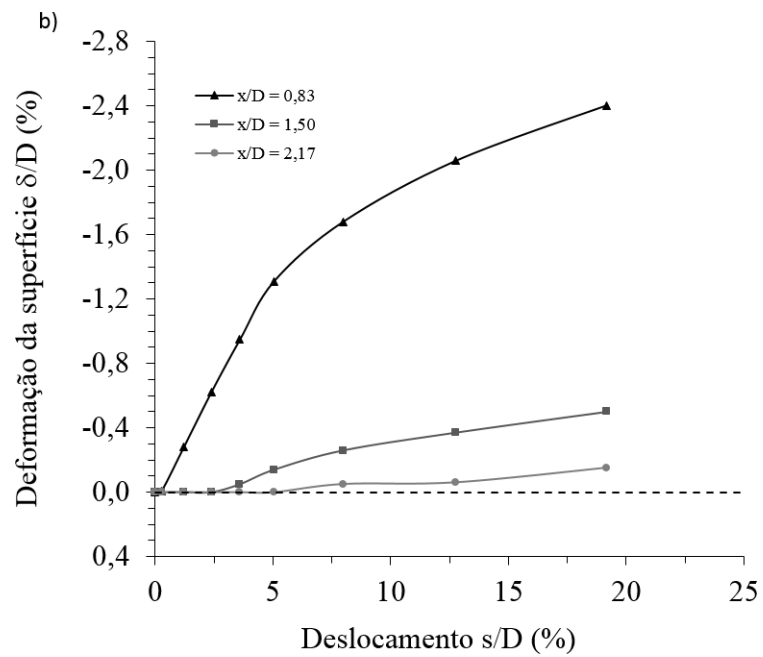


Figura 39: Perfil de deformação da superfície externa – Ensaio ER3.

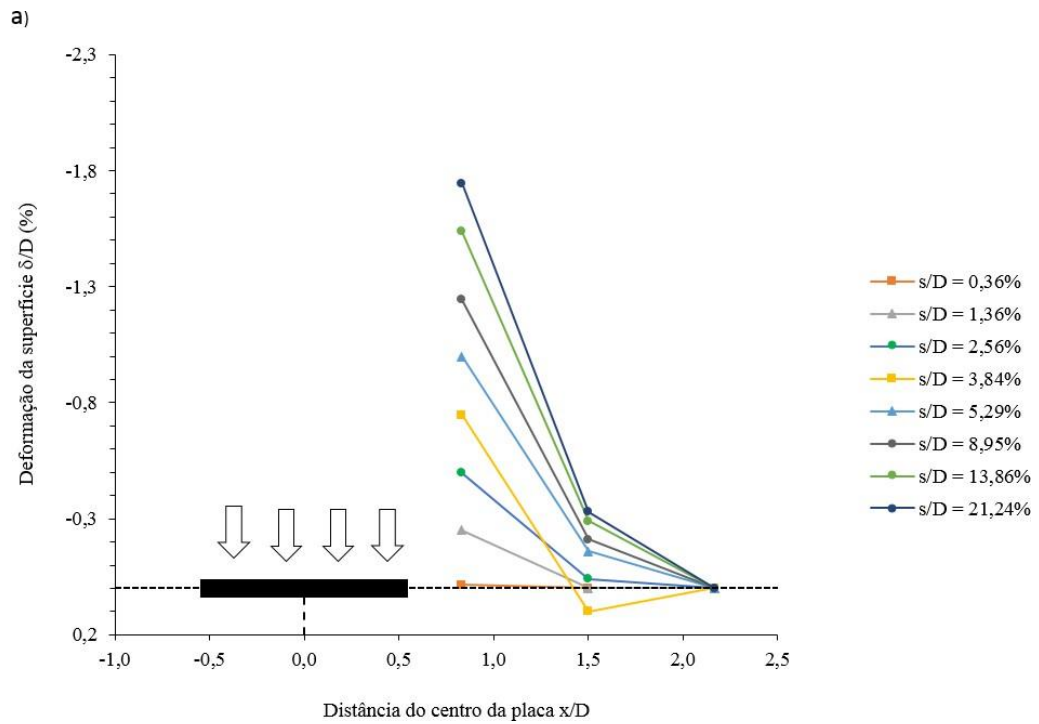


Figura 40: Perfil de deformação da superfície externa – Ensaio ER4.

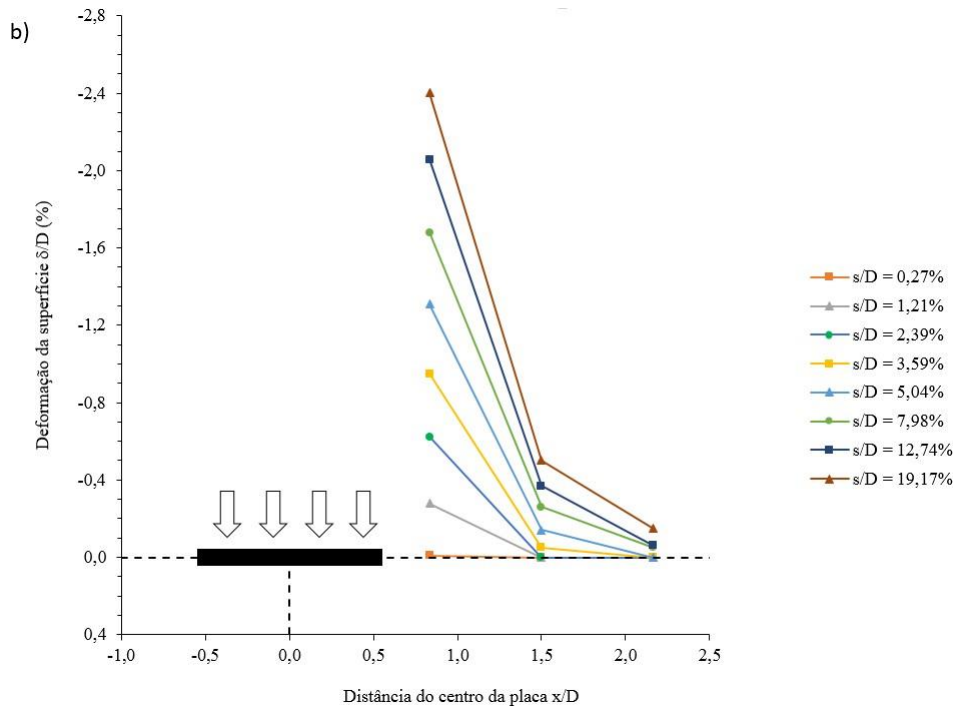


Figura 41: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque – EnsaioER3.

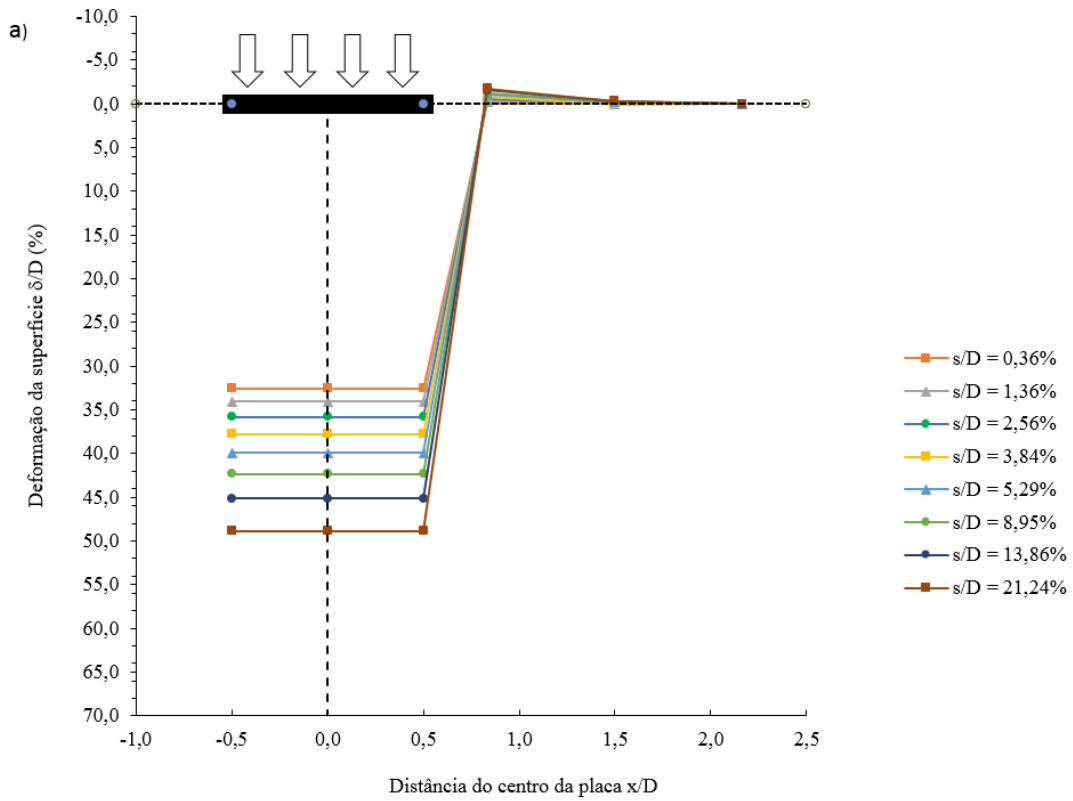
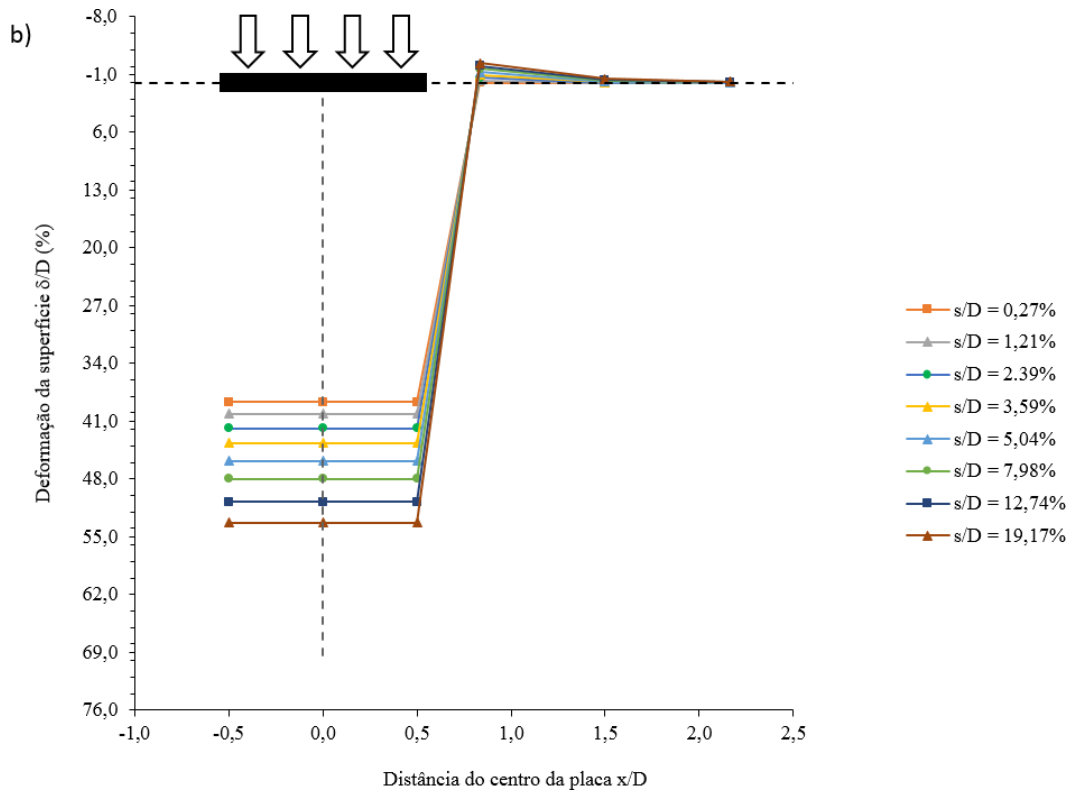


Figura 42: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque - EnsaioER4.



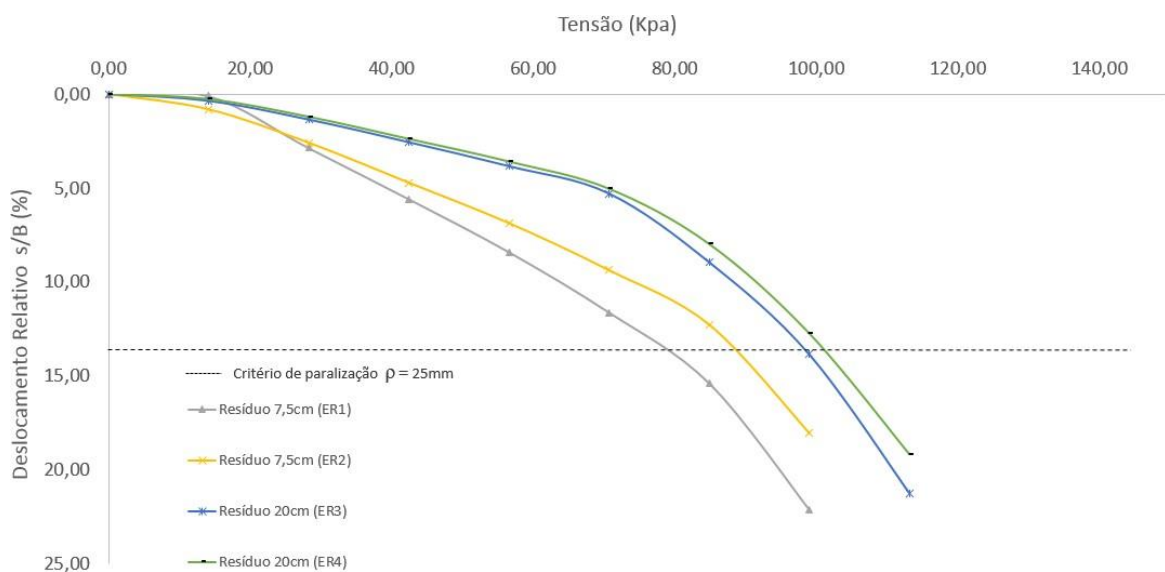
#### 4.2.3 Camada de resíduo de 7,5cm com camada de resíduo de 20cm

Na análise para os ensaios ER1 e ER2 Camada de resíduo de 7,5cm com ER3 e ER4 camada de resíduo de 20cm, figura 43, foram observados maiores deslocamentos no ensaio de altura com 7,5cm. Os maiores deslocamentos também estão associados a menor espessura da camada. Além disso, isso pode estar relacionado a problemas de compactação em determinadas áreas da caixa de teste, visto a dificuldade em manter a homogeneidade do material em relação aos tamanhos dos grãos.

Em relação a carga como pode ser observado, as tensões lidas são muito próximas, mas podemos dizer que a variação de altura neste caso trouxe uma melhora na capacidade de carga do solo de aproximadamente 12,5%. Ao analisarmos a quantidade de material utilizado (proposto) em relação a capacidade de carga, os 12,5cm é diretamente proporcional, então o reforço com espessura maior torna-se desprezível para esta configuração.

Quanto aos deslocamentos verticais na superfície, externos a placa, mostrados nas figuras 30 e 31, observamos uma pequena movimentação próxima a placa nos pontos 0,83 e 1,50 para o ensaios com altura de 7,5cm. Com o aumento da camada de material estes deslocamentos diminuíram, neste caso, podemos dizer que o aumento da camada de resíduo pode ter influenciado para diminuição dos deslocamentos, ou ainda os mesmos não puderam ser mensurados devido a acomodação das partículas do material granular.

Figura 43: Curva tensão-deslocamento do ensaio sem reforço.



### 4.3 Ensaio com geocélula

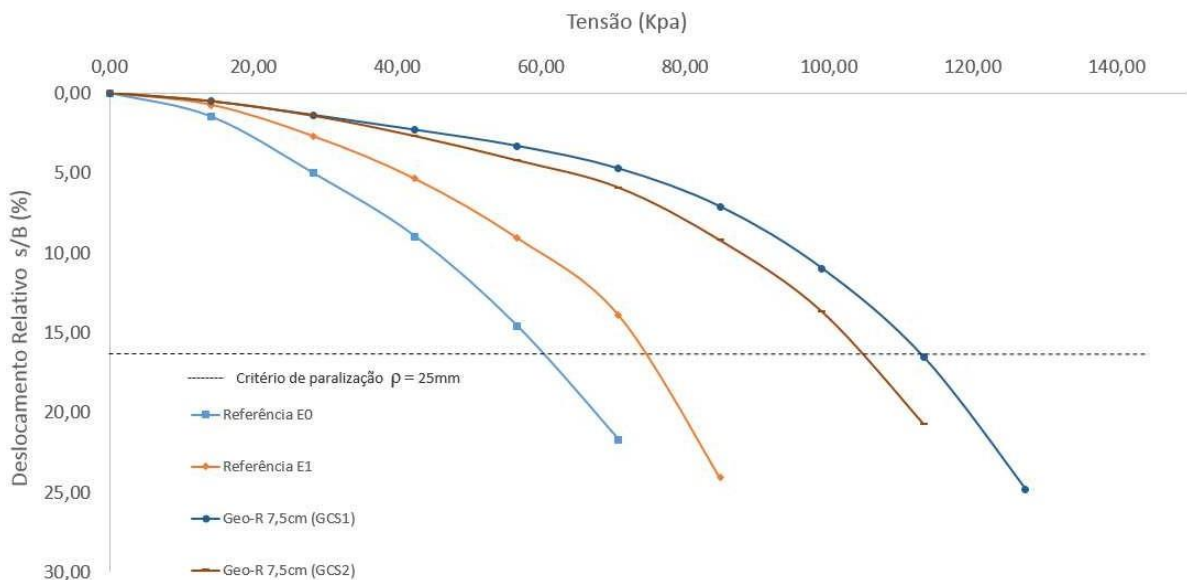
Neste item estão apresentados e analisados os resultados obtidos para as duas variações de ensaios utilizando o reforço com geocélula de altura 7,5cm e 20cm, respectivamente, a utilização de geocélula com aplicação de carga posicionada no nó de ligação de uma das células. Os resultados encontrados estão expostos através do comportamento tensão-deslocamento relativo da placa.

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

O comportamento tensão-deslocamento referente ao ensaio sobre a camada reforçada com geocélula de altura igual 7,5cm esta apresentada na figura 44.

É observado que, ao utilizarmos a camada de reforço celular, o resultado indica melhoria na capacidade de carga do solo arenoso em até 75kgf, também ao analisarmos o recalque sofrido pelo material, o conjunto apresenta uma breve melhora, sendo o recalque para o ensaio com altura de 7,5cm relativamente menor, estando associado a utilização do reforço.

Figura 44: Curva tensão-deslocamento dos ensaios com reforço GCS1 e GCS2 (7,5cm).



O deslocamento do solo ao entorno da placa (superfície externa) para esta variação dos ensaios é mostrado nas figuras 45 e 46, nelas apresentamos deformações quase que nulas nos arredores da fundação dando a entender que, a aplicação de carga no nó de ligação e com a utilização de geocélula a carga seja transmitida de uma forma mais distribuída ao longo da caixa

de acomodação em pontos distantes da placa. Detalhes podem ser observados nas figuras 49 e 50, quando apresentamos o perfil dos deslocamentos horizontais a partir do recalque da placa.

Oposto ao que ocorre em solos não reforçados, onde são verificadas maiores elevações da superfície, em solos reforçados essa elevação é muito menor. De acordo com Dash *et al.* (2001) e Avesani Neto (2013), este comportamento se deve a utilização da geocélula, que conduz a um recalque mais uniforme da superfície. Isso se deve ao efeito da distribuição das tensões, ou efeito laje, que devido a dispersão das tensões, o carregamento aplicado é distribuído ao longo de uma área maior devido a rigidez da camada de geocélula, resultando em baixas tensões transmitidas ao solo.

Figura 45: Deslocamento relativo externo da placa – Ensaio GCS2.

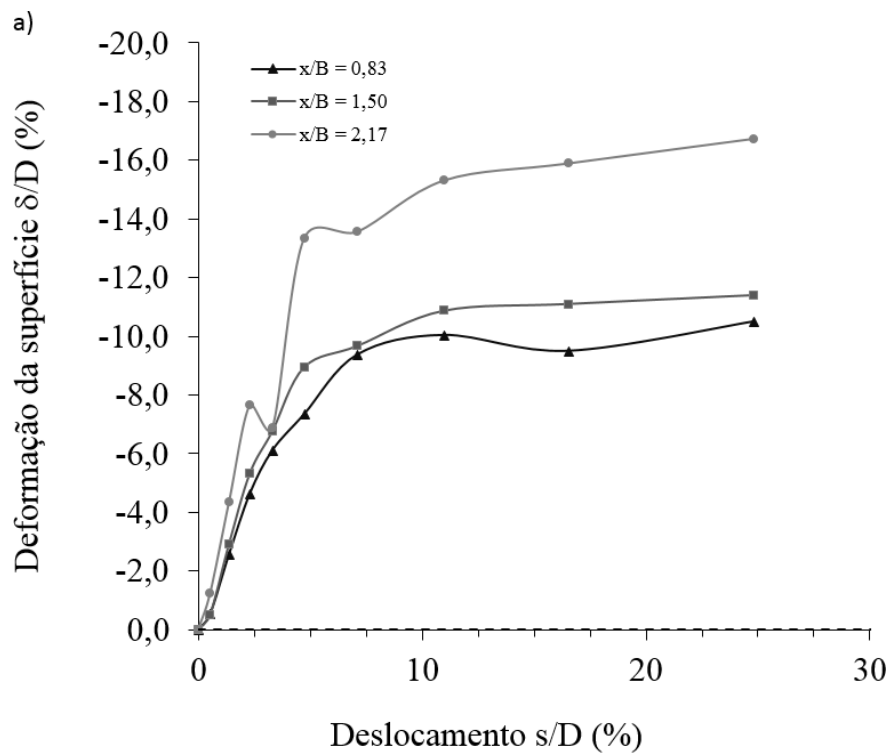




Figura 46: Deslocamento relativo externo da placa - Ensaio GCS2.

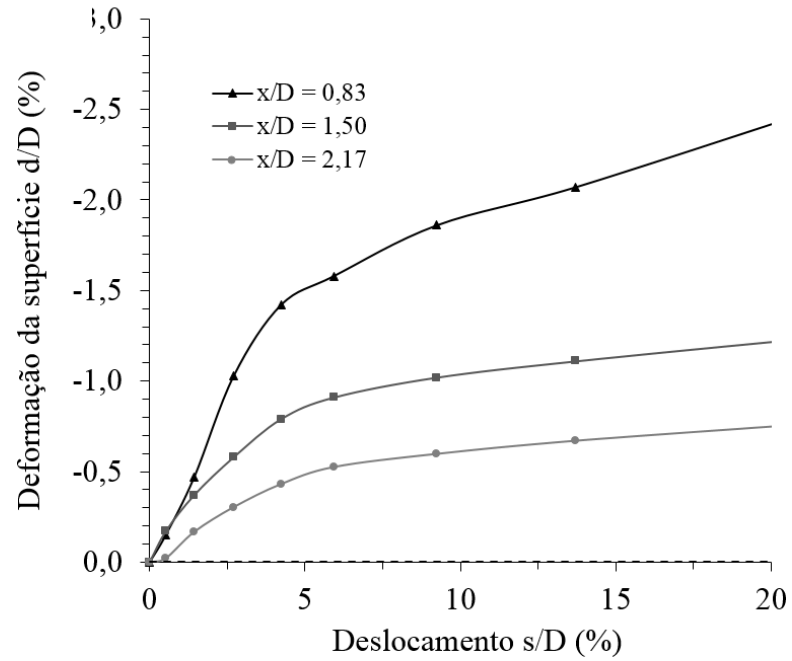


Figura 47: Perfil de deformação da superfície externa –Ensaio GCS1.

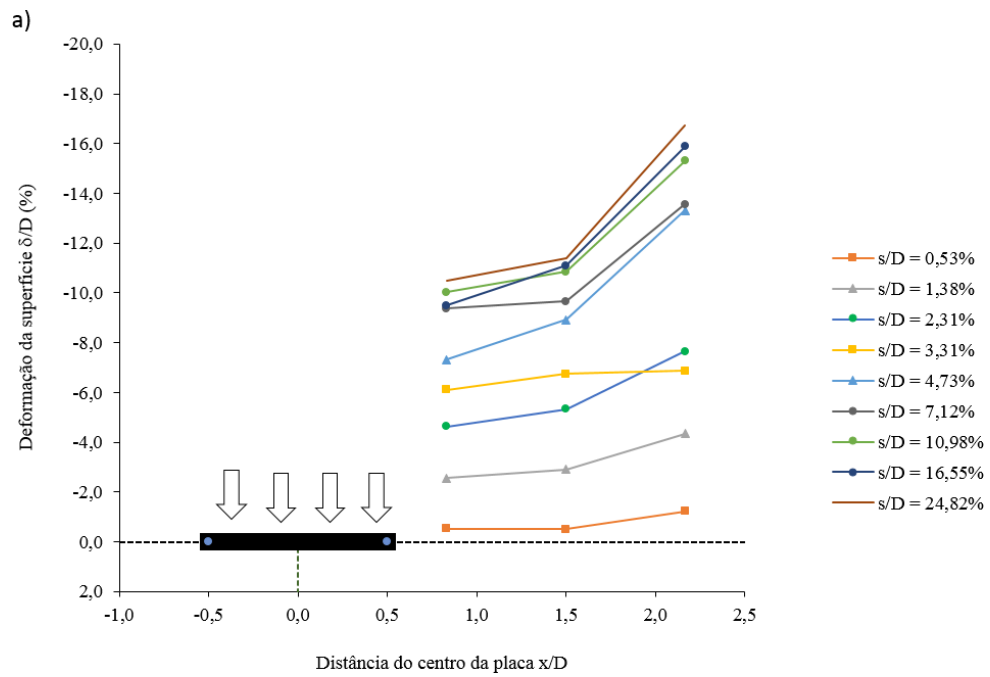


Figura 48: Perfil de deformação da superfície externa - Ensaio GCS2.

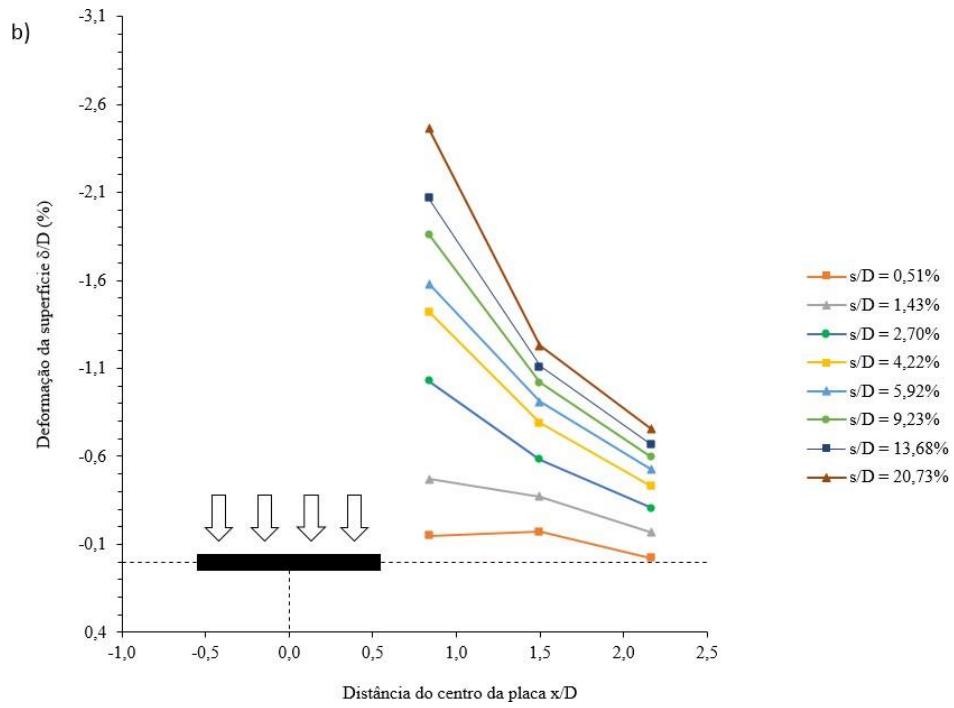


Figura 49: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque – Ensaio GCS1.

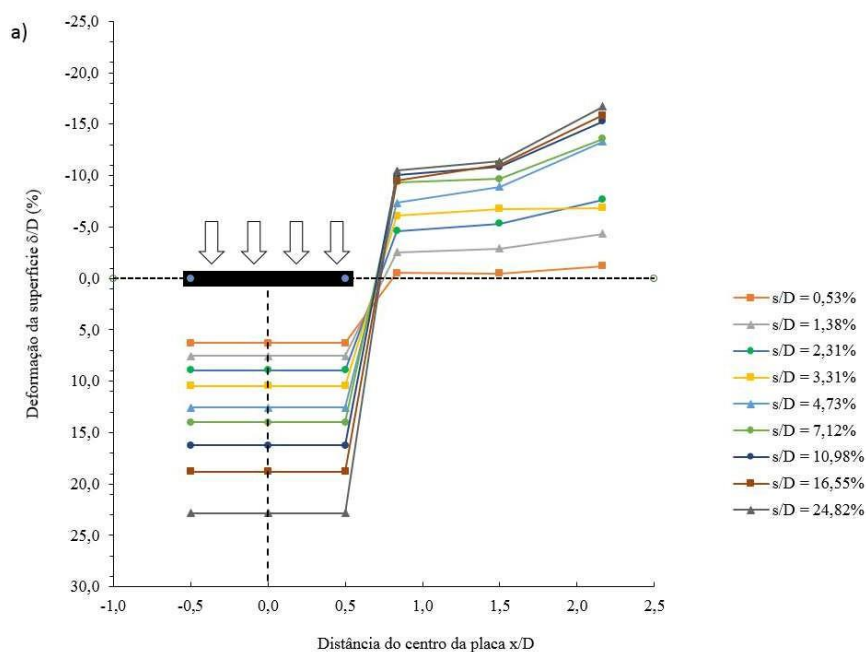
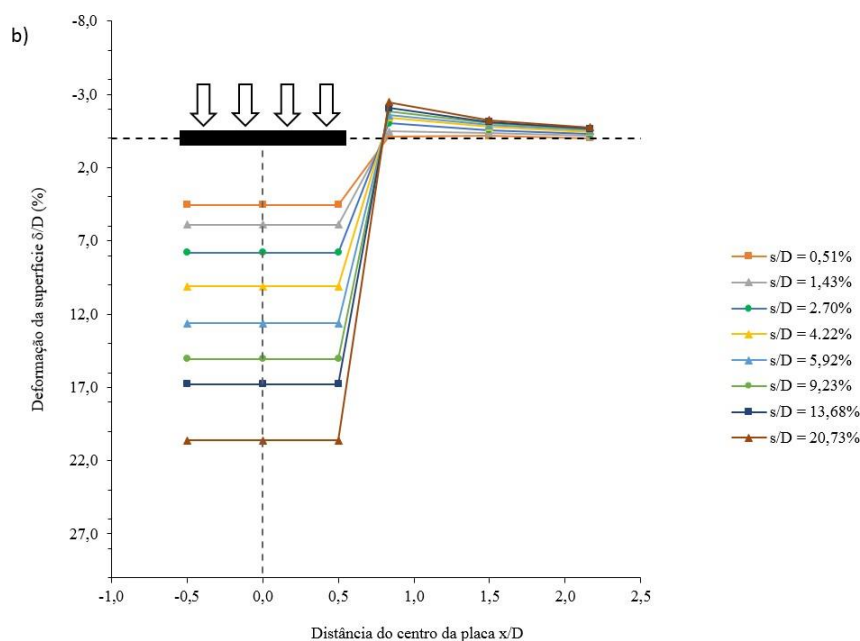


Figura 50: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque - Ensaio GCS2.

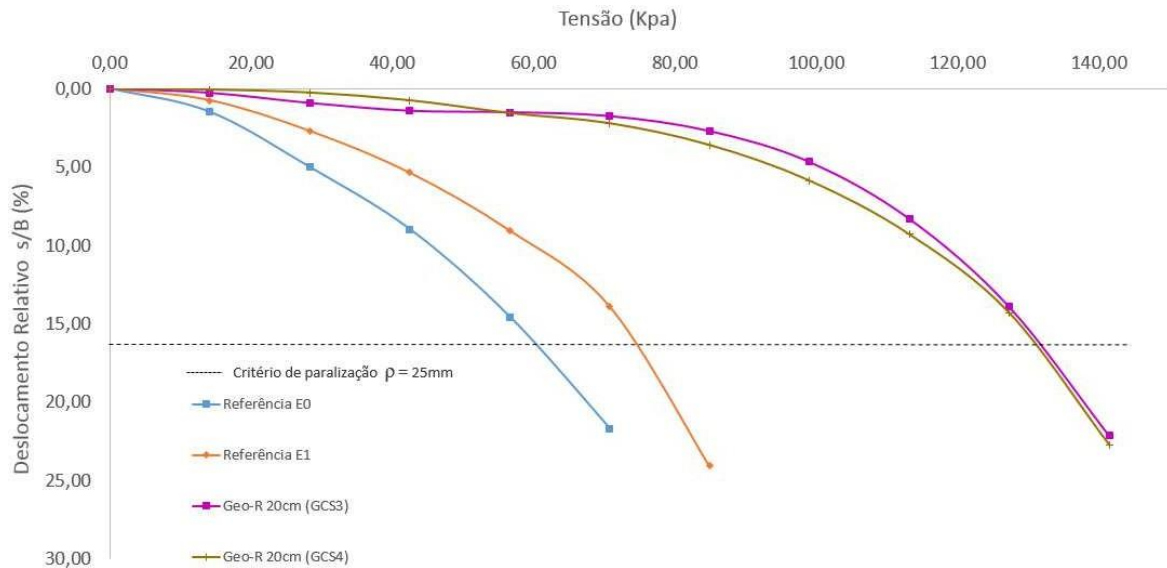


#### 4.3.2 Camada de resíduo com Geocélula 20cm

A figura 51 expõe a curva tensão-deslocamento para o comparativo entre os ensaios de referência e o solo reforçado com a geocélula de altura 20cm. O comportamento das curvas são diferentes mostrando o aumento progressivo da capacidade de carga para o solo reforçado. O

que chama muita atenção nesta análise, é o fato de ambas as curvas apresentar valores de recalque muito próximo em cada ensaio.

Figura 51: Curva tensão-deslocamento dos ensaio com reforço GCS3 e GCS4 (20cm).



As figuras 52 e 53, apontam uma nítida mudança de comportamento do solo ao entorno da placa quando utilizado a geocélula, enquanto que junto a borda da placa ocorre um afundamento, nas proximidades de seu entorno, na posições 0,83, ocorre um levantamento do solo. Este fenômeno pode ser explicado através do efeito laje já mencionado neste trabalho, onde ao aplicar uma carga no centro de uma estrutura o comportamento se dará similar a uma peça de concreto exposta a flexão, onde o ponto de aplicação da carga terá um deslocamento no sentido de cima para baixo, suas extremidades tenderão a sofrer um levantamento, nas figuras 56 e 57 mostramos detalhes em perfil dos deslocamentos.

Figura 52: Deslocamento relativo externo da placa – Ensaio GCS3.

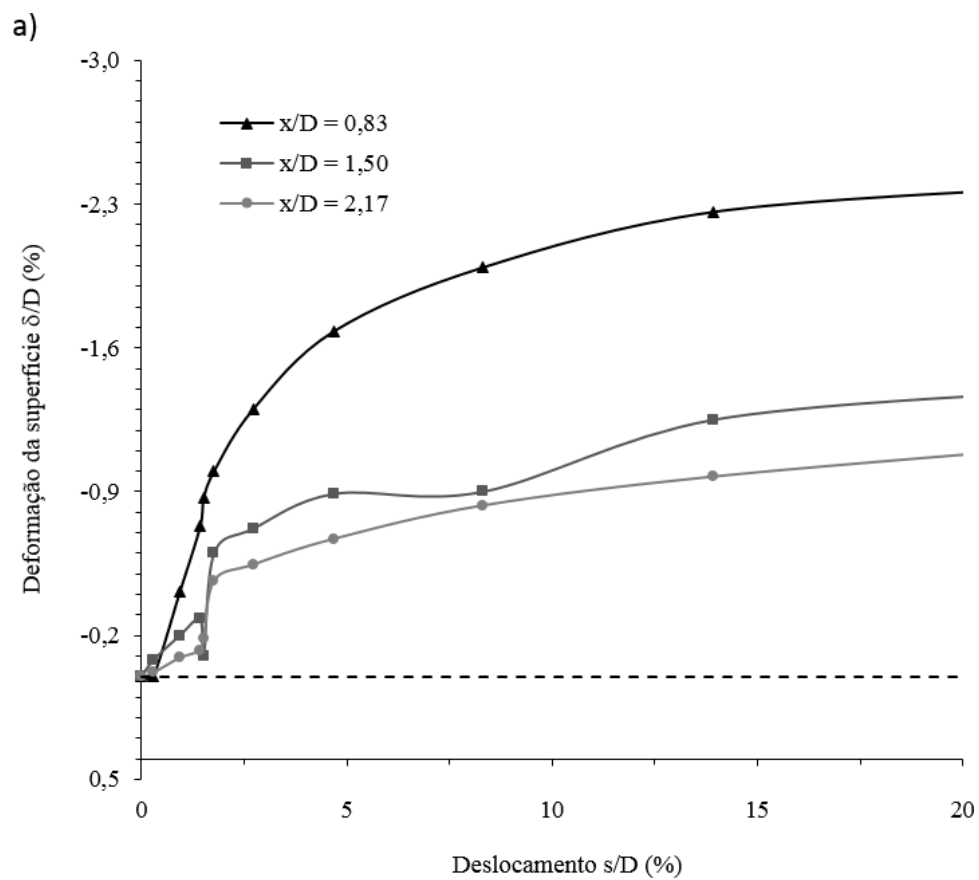




Figura 55: Perfil de deformação da superfície externa - Ensaio GCS4.

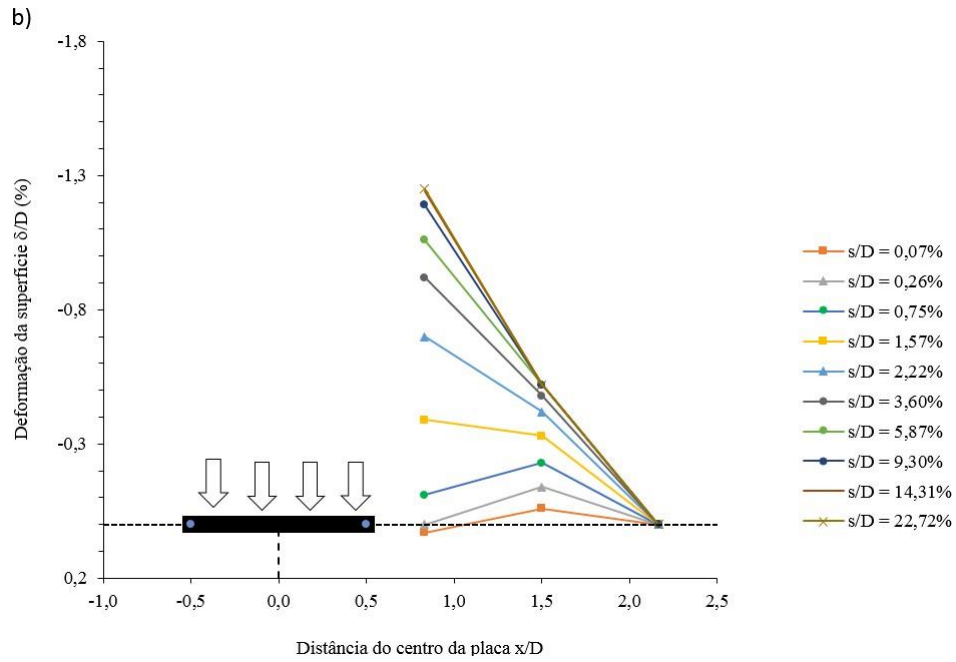


Figura 56: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque – Ensaio GCS3.

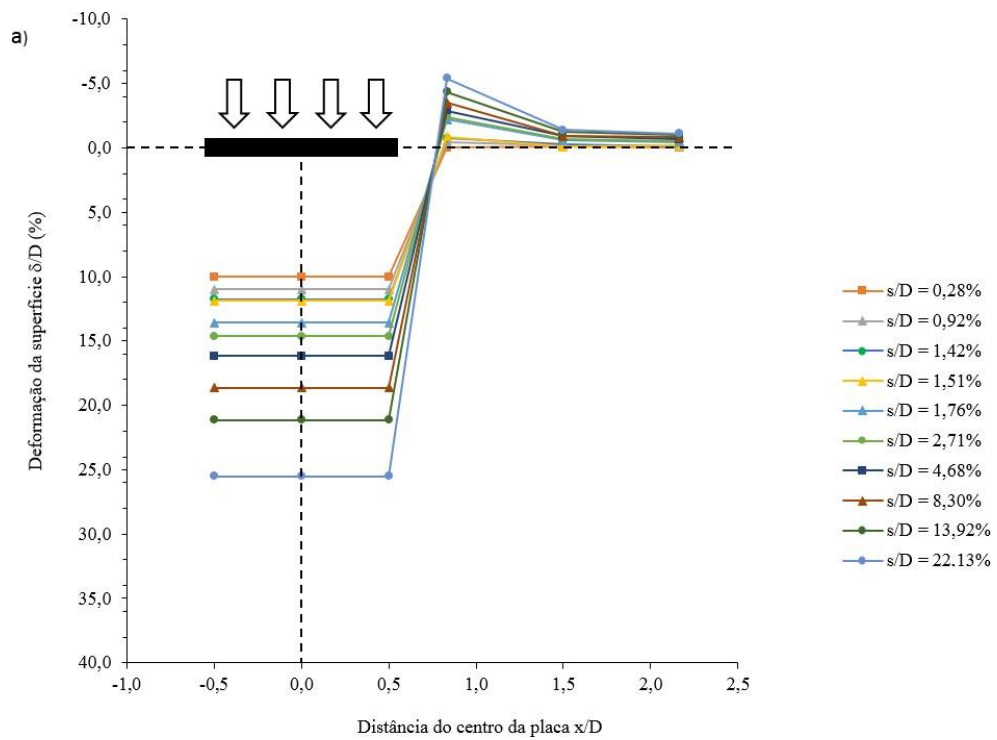
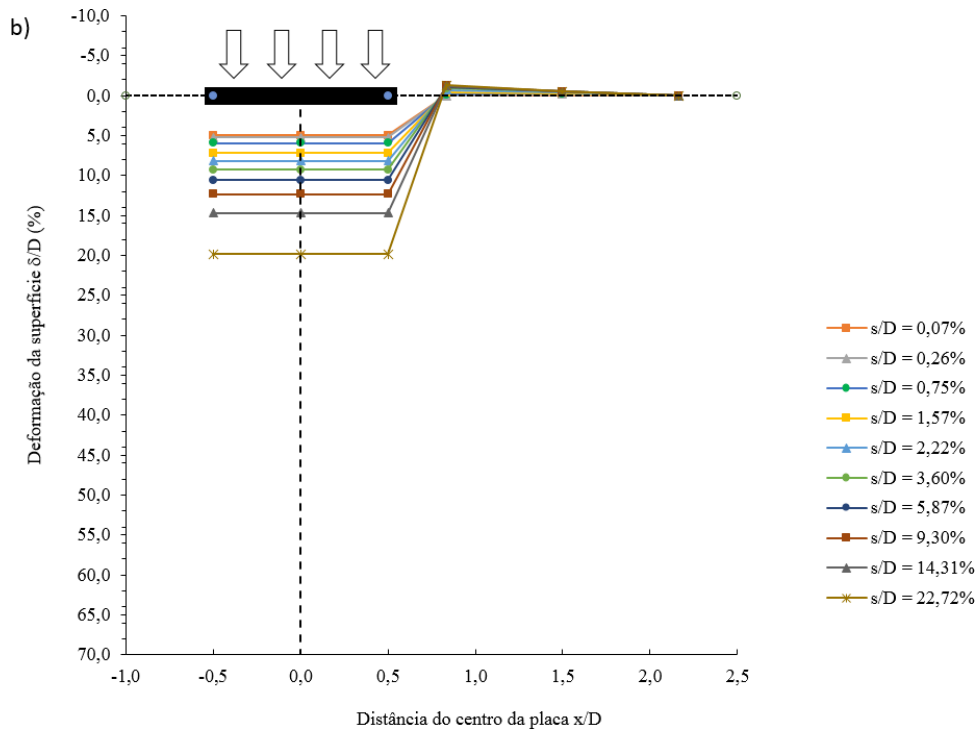


Figura 57: Perfil de deformação da superfície externa versus recalque - Ensaio GCS4.



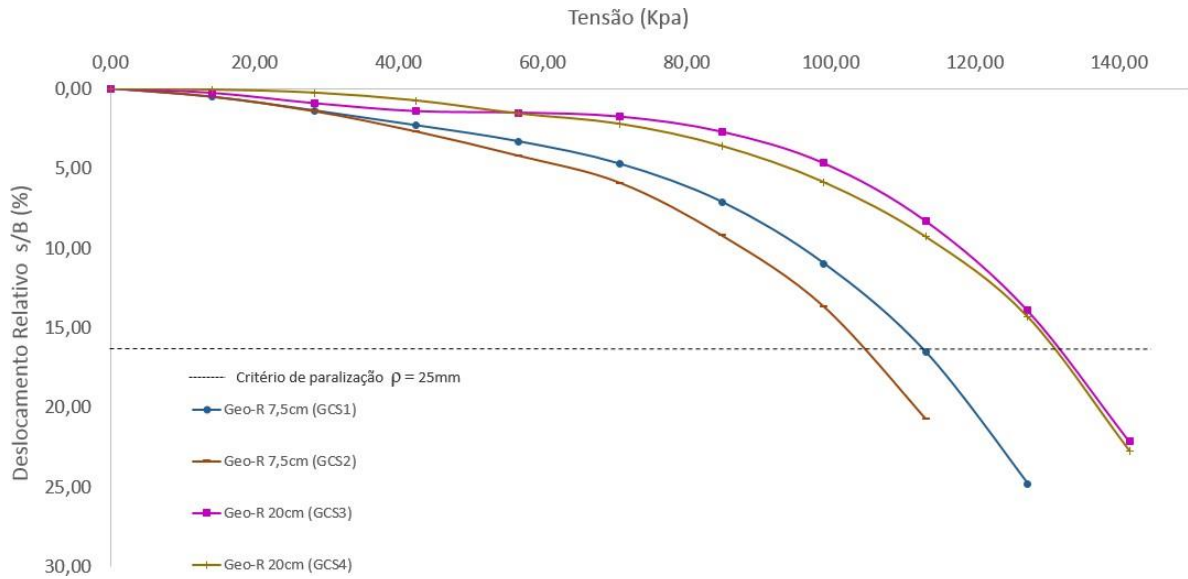
#### 4.3.3 Camada de resíduo com Geocélula 7,5cm (GCS1-GCS2) com Camada de resíduo com Geocélula de 20cm (GCS3-GCS4)

A figura 58 mostra o comportamento tensão-deslocamento referente aos ensaios com geocélula em diferentes alturas. Fica evidente que o solo reforçado com altura de 20cm apresenta uma melhora significativa em relação ao suporte de carga em 20%, semelhante ao ocorrido ao comparar com os ensaios de referência.

Analisando o recalque, foram observados variações próximas para as duas alturas, sendo que para a altura de 20cm houve uma rápida movimentação, podendo estar associada simplesmente a acomodação do material granular dentro da célula.



Figura 58: Curva tensão-deslocamento dos ensaios, alturas de 7,5cm e 20cm.



Quanto os deslocamentos na superfície em relação a superfície externa da placa, houve movimentações, mas de modo geral na região mais próxima a placa, na distância 0,83. Foram observado elevações consideráveis, podendo ser justificada pela deficiência de ancoragem do reforço. Segundo Binquet e Lee (1975, apud Palmeira 2018, p.256) o evento pode ser decorrente da falta de ancoragem (comprimento insuficiente) do reforço. Nos pontos mais afastados da placa, seguem sendo observadas elevações, porém de magnitude inferior.

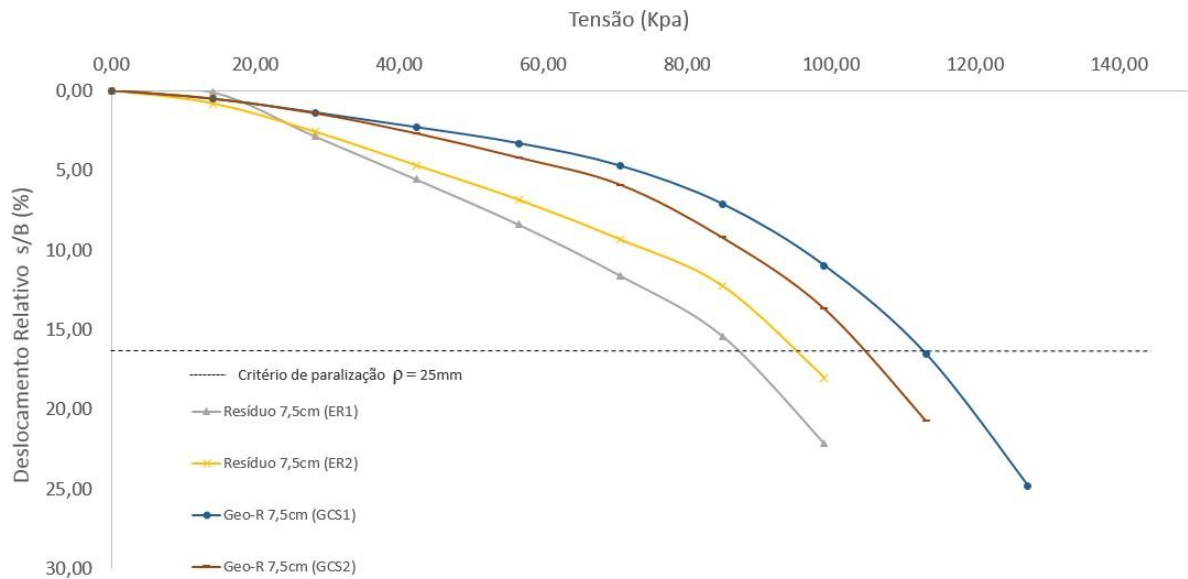
#### 4.4 Análise comparativa de alturas sem e com o uso de reforço por geocélulas.

##### 4.4.1 Camada de resíduo 7,5 (ER1- ER2) com geocélula 7,5cm (GCS1-GCS2).

Ao analisarmos a figura59, verifica-se que o desempenho da configuração composta por camada de resíduo reforçada com geocélula foi superior ao resultado do ensaio realizado apenas com o resíduo. Isso quer dizer que ao ser utilizado o sistema com geocélulas na mesma altura, o uso do geossintético proporciona uma maior rigidez comparando com a utilização somente com o material proposto para o preenchimento da células.

A baixa resistência do resíduo neste caso pode estar associada a sua granulometria devido a movimentação das partículas. Cabe ressaltar que o efeito confinamento como mecanismo de reforço produzido pela geocélula, pode ser o responsável pelo aumento do desempenho nesta análise.

Figura 59: Curva tensão-deslocamento dos ensaios (ER1- ER2 e GCS1-GCS2).

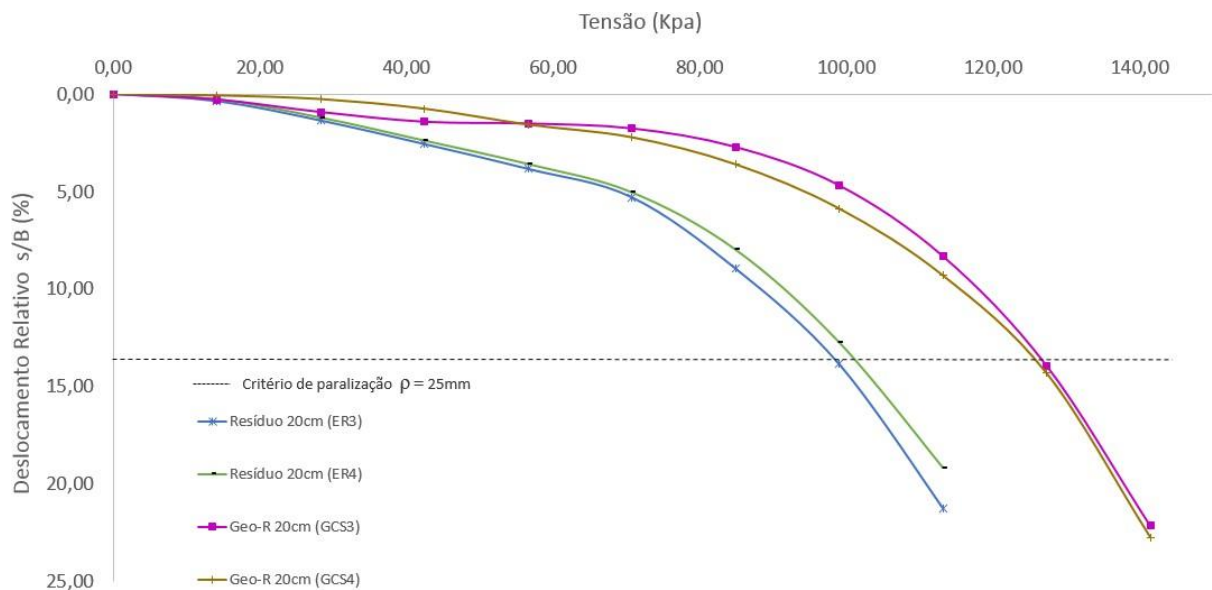


Quanto a análise do deslocamento da superfície externa da placa para a distância de 0,83, região mais próxima a placa, a superfície apresentou uma elevação aproximadamente de 1,2mm, este fato também é apresentado nas figuras 30 e 31. Nos pontos mais afastados à placa as movimentações são menores ou praticamente nulas. Associado ao recalque podemos justificar este evento aos mecanismos de ruptura, que tem como função de absorver os carregamentos oriundos da superfície e distribuí-los à camada de base abaixo da geocélula, porém conforme já mencionado um mecanismo que também pode estar associado a este tipo de fenômeno e que seja recorrente a este tipo de ensaio é a falta de ancoragem das geocélulas.

#### 4.4.2 Camada de resíduo 20cm (ER3-ER4) com geocélula 20cm (GCS3-GCS4)

Como mostrado em análises anteriores a esta as condições geotécnicas testadas do resíduo, granulometria e densidade relativa, contribuíram para o melhoramento do desempenho do solo arenoso. A figura 60 apresenta o gráfico do comportamento tensão-deslocamento resultante dos ensaios com a camada de resíduo com 20cm de altura com e sem o uso da geocélula. É possível observar que o comportamento relacionado a carga do solo reforçado por meio de geocélula foi superior ao comportamento apresentado apenas pelo resíduo em 20%, mostrando mais uma vez a eficiência da geocélula. Quanto aos recalques apresentados os mesmos são admissíveis e podem ser explicados pela movimentação e assentamento das partículas do solo de base.

Figura 60: Curva tensão-deslocamento dos ensaios (ER3-ER4 e GCS3-GCS4).



Nos deslocamentos verticais registrados próximos a placa para os ensaios sobre a camada reforçada com espessura de 20cm, observamos que a variação mais acentuada está próxima a placa a 0,83 de distância, mostrando que o confinamento e encapsulamento do resíduo não foi tão eficiente, gerando movimentações internas a célula. A justificativa para este evento pode ser explicada por Binquet e Lee (1975, apud Palmeira 2018, p.256), onde a falta de ancoragem das células provoca uma movimentação lateral do colchão de reforço ou de uma única célula, ocasionando movimentações internas.

#### 4.5 Mecanismos de ruptura dos materiais

No processo de desmolde do ensaio sendo ele um processo de exumação, observamos que quanto maior a profundidade do solo analisado, menor a influência da carga, sendo que as camadas ligeiramente inferiores a placa estavam compactadas, mas devido a sua densidade relativa de 30% não foi possível determinar o ponto de alcance das tensões, logo, não observamos maiores deformações do solo.

A figura 47 apresenta os mecanismos de ruptura ao final do carregamento do solo, sendo que o material apresentou um comportamento semelhante em todas as provas de carga realizadas. No decorrer dos ensaios observamos que houve uma movimentação do material, bem como reorganização dos grãos, tanto a baixo da placa quanto nas laterais da mesma.

Figura 61: Ruptura do material para ensaios com solo de base (referência - E0 e E1).



A configuração do material utilizado para preenchimento das geocélulas no processo de reforço não teve influência relevante na variação dos mecanismos de ruptura, sendo a camada de resíduo relativamente estável.

Quanto a situação da geocélula, verificamos que a mesma apresentou deformações no local de posicionamento da placa logo, sobre o nó da estrutura celular conforme mostramos na figura 48. Este fenômeno foi verificado para ambas as altura de geocélulas, sendo que a mesma foi descartada e para realizar um novo ensaio utilizamos outra porção do material.

Figura 62: Ruptura do material para ensaios com geocélula.



De acordo com a literatura apresentada no decorrer deste trabalho, podemos relacionar este efeito aos mecanismos de reforço, um deles sendo o efeito confinamento pois devido a geração de tensões de cisalhamento nas paredes da geocélula que vai se contrapor ao carregamento, temos uma indução de tensões na interface do material com as paredes da geocélula, AVESANI NETO (2013).

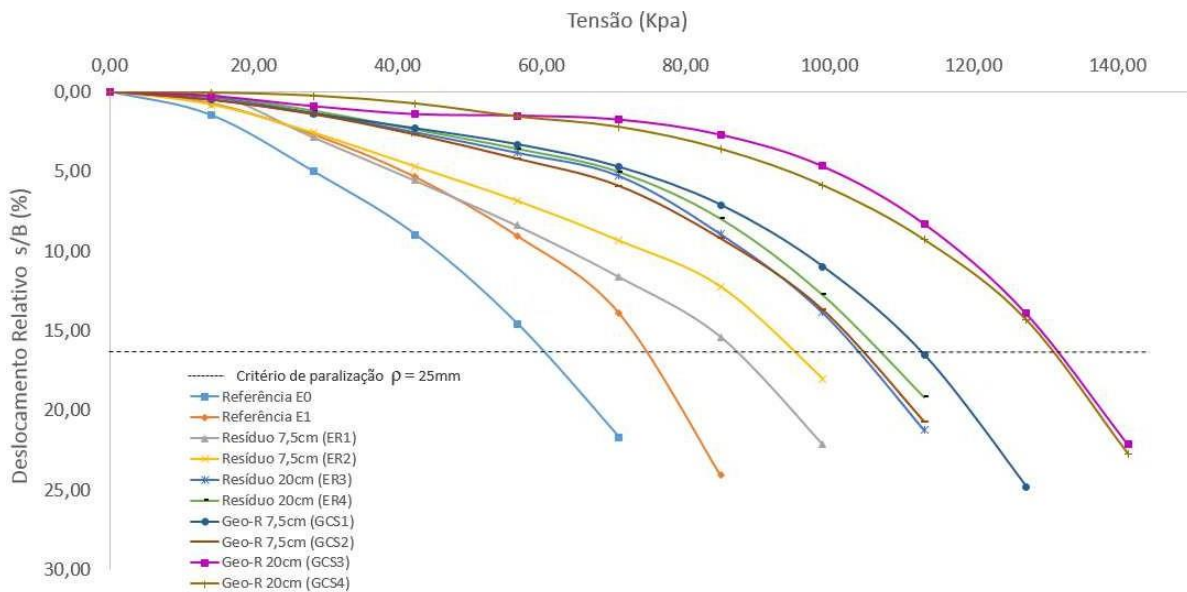
## 4.6 Análise global

### 4.6.1 Influência do uso da geocélula

Analisando a figura 49 verifica-se o aumento da capacidade de carga devido ao emprego dos materiais, sendo somente com resíduo ou então com o uso da geocélula em relação ao solo

de base. Ao analisarmos o emprego da geocélula em diferentes alturas, temos um aumento próximo a 15% na capacidade de carga da fundação com o uso da geocélula com altura de 20cm em relação a de 7,5cm. Logo, destacamos a altura da geocélula como um dos parâmetros geométricos que influenciam na ação do reforço nesta pesquisa.

Figura 63: Curva tensão-deslocamento (todos os ensaios).



Outro fator de influência da geocélula como reforço pode ser o do fator de melhora de capacidade de carga ( $I_f$ ), que segundo Dash *et al.* (2003), é definido como sendo a razão entre a tensão do solo reforçado ( $q_r$ ) para um recalque definido e a tensão do solo não reforçado ( $q_o$ ) para o mesmo recalque. De acordo com Avesani Neto (2013), esse fator pode ser calculado para qualquer ponto da curva, sendo que se ele for determinado para deslocamentos após ruptura do solo não reforçado, é utilizado o valor da capacidade de carga última deste solo não reforçado e a relação passa a ser denominada razão da capacidade de carga BPR.

Para análise do fator de melhora utilizamos os valores médios entre os ensaios, que neste caso apresentam-se em duplicatas, definidos para cada configuração de altura com e sem a utilização do sistema de reforço. Ao analisarmos a relação solo de base com as camadas de material sugeridas, houve uma melhora na capacidade de carga em todas as configurações, (com e sem o emprego do geossintético). Também, observamos que houve melhoria na capacidade de carga ao se utilizar a geocélula preenchida com o resíduo como reforço para o solo arenoso, pois os valores de  $I_f$  referentes aos ensaios com geocélula comparados aos ensaios de referência ficaram acima da unidade de ruptura. Para a altura de 20cm em relação ao ensaio de referência

obtivemos uma melhora de capacidade de carga próxima a dois, mostrando que a capacidade de carga aumentou em 100%. Para a altura de 7,5cm o resultado é de um  $I_f$  de 60%, conforme apresentado na tabela 6, mostrando a viabilidade da utilização do reforço.

Segundo Avesani Neto (2013) os ensaios com geocélulas onde as alturas (h) são maiores há um aumento na capacidade de carga, logo, um  $I_f$  maior.

Tabela 7: Resultados do fator de melhora na capacidade de carga

<b>Fator de melhora da capacidade de carga (<math>I_f</math>)</b>							
<b>Valores de <math>I_f</math> em função do Ensaio de Referência</b>							
<b>Ensaio</b>	<b>h/D</b>	<b>Recalque normalizado s/B (%)</b>					
		<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>17</b>
E0 e E1	-	-	-	-	-	-	-
ER1 e ER2 (7,5cm)	0,50	1,82	1,94	1,59	1,6	1,78	1,78
ER3 e ER4 (20cm)	1,33	2,44	3,15	2,5	1,64	2	2
GCS1 e GCS2 (7,5cm)	0,50	2,87	2,78	2,11	1,94	1,86	1,86
GSC3 e GCS4 (20cm)	1,33	3,2	5,55	3,74	2,88	2,35	2,35

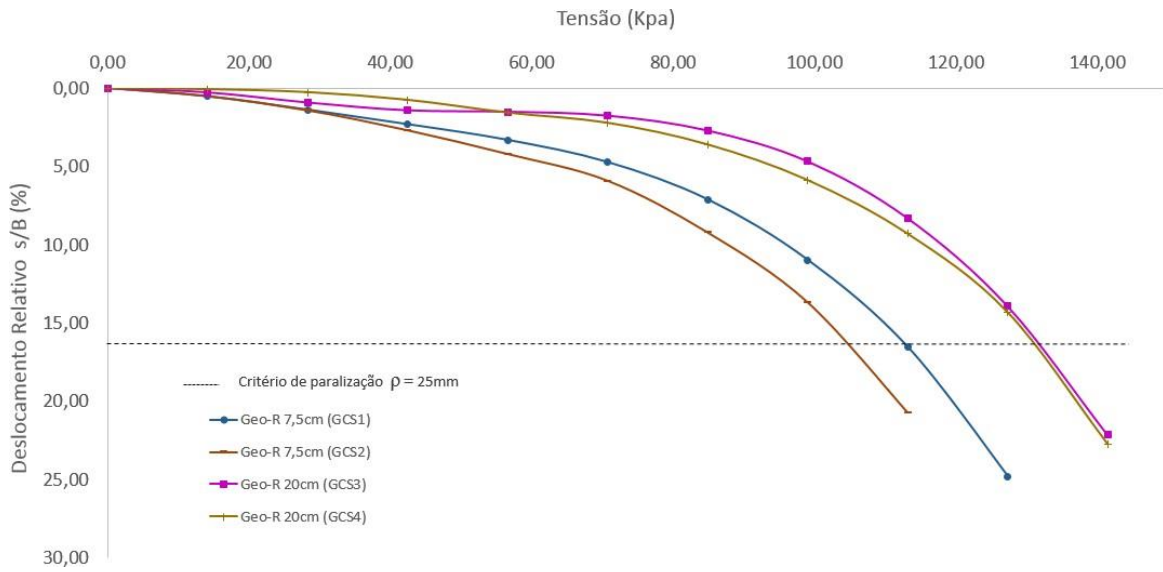
  

<b>Valores de <math>I_f</math> em função do Reforço</b>							
<b>Ensaio</b>	<b>h/D</b>	<b>Recalque normalizado s/B (%)</b>					
		<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>17</b>
ER1/ER2 x GCS1/GCS2 (7,5cm)	-	1,31	1,76	1,49	1,75	1,18	1,18
ER3/ER4 x GCS3/GCS4 (20cm)	-	1,57	1,44	1,33	1,22	1,05	1,05

#### 4.6.2 Influência da altura da geocélula

Na figura 50, é realizada a comparação entre as curvas dos ensaios com a utilização do reforço, estes com relação ao ensaio de referência quando utilizado somente a camada de base com solo arenoso. Esta análise é importante para avaliação dos acréscimos da utilização da geocélula. Para o ensaio com maior espessura, obtivemos o melhor resultado de capacidade de suporte de carga. Podemos explicar o ocorrido pelo fato da altura da célula ser maior, logo o sistema torna-se mais rígido, ocasionando um fortalecimento do material de base.

Figura 64: Curva tensão-deslocamento do ensaio GCS2 e GCS3.



Como pode ser observado nos estudos de Mandal e Gupta (1994) e Dash et al., (2001), o fator forma  $h/D$  (altura da geocélula em relação ao diâmetro da célula) exerce influência no desempenho do solo, e que valores mais altos desse fator conduzem a aumentos mais expressivos de resistência.

Analisando o efeito da altura da geocélula na resistência da fundação, verificamos que as curvas possuem comportamento similar mas atingem cargas diferentes ao longo de todo o ensaio, inclusive na ruptura. Portanto, em função do material de preenchimento testado possuir boa resistência, o aumento da altura da geocélula trouxe uma melhora ainda maior na capacidade de carga do sistema.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embasado nos resultados dos ensaios e análises realizadas no decorrer deste estudo, apresentamos conclusões conforme descrito a seguir:

- Ao efetuarmos os ensaios obtivemos aumento na capacidade de carga do solo reforçado em relação ao sem reforço de 2 vezes, dependendo da altura da camada. Logo, os percentuais de acréscimo são próximos a 100 % quando comparado ao solo sem o sistema de reforço.
- A utilização da geocélula, nas duas alturas propostas como reforço, melhora a capacidade de carga de um solo arenoso.
- A distribuição das tensões verticais ocorreu entorno da placa nas proximidades da mesma, sendo observadas maiores elevações para casos com o reforço.

Embora tenha ocorrido deslocamento vertical a inserção da geocélula como camada de reforço aumentou a capacidade de carga do sistema. Sendo assim, o sistema de reforço, devido aos mecanismos de resistência fornecidos pelo geossintético, torna também o solo de base mais rígido.

Portanto, concluímos que a geocélula tem potencial para aplicação em reforços e de fato influencia para ganhos relativos ao sistema de reforço proposto. Podemos ainda notar que o material de preenchimento utilizado auxilia na capacidade de carga do conjunto, bem como, justificando o uso do mesmo, sua utilização é um importante aliado para o sistema de reforço com geocélulas, admitindo é claro, as características utilizadas do material para esta pesquisa.

### 5.1 Sugestões

Nas etapas realizadas deste trabalho verificamos a possibilidade de diferentes situações que podem ser abordadas nesta mesma linha de pesquisa, como citamos a seguir:

- Utilização de diferentes materiais de preenchimento para as geocélulas com a finalidade de verificação de sua capacidade de carga.
- A viabilidade econômica quanto a utilização do resíduo como material de preenchimento, não só para obras relacionadas a fundações como demais formas de reforço como pavimentação, etc. Para obras próximas as indústrias de

beneficiamento do resíduo o custo do sistema pode ser atrativo para o setor geotécnico.

- Questões ambientais podem ser exploradas, como o ciclo de vida dos materiais, situações como local de destino e espaço para depósitos do resíduo.
- Possibilidade de ensaios utilizando placas com maiores diâmetros para comparação dos resultados.
- Variação do tipo de solo de base pode ser uma alternativa interessante por se tratar de um ensaio relacionado a fundações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINT. Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos. **Curso básico de geotêxteis**. Comitê Técnico Geotêxtil. São Paulo: Rooka'z, 2001.

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

\_\_\_\_\_. **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.

\_\_\_\_\_. **NBR 6484:2001**. Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 6459:2016**. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180:2016**. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7182:2016**. Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

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.

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

AVESANI N. J. O; FUTAI M.M. **Aspectos gerais do uso de geossintéticos em reforço de aterros sobre solos moles**. In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Belo Horizonte, Minas Gerais, 19-22 out. 2016.

AVESANI NETO, J. O.; BUENO, B. S. **Estabilização de encostas com muros de gravidade de geocélula**. In: V CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, São Paulo, 2009.

AVESANI NETO, J. O.; BUENO, B. S. **Capacidade de carga de solos reforçados com geocélula**. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Gramado, Rio Grande do Sul, 2010.

\_\_\_\_\_. **Reforço de solos moles com geossintéticos.** In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Gramado, Rio Grande do Sul, 2010.

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.

BARATA, F. E. **Ensaio de placa para fixação de taxa admissível de fundações diretas.** In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS, v. 1, p. III-1-37, São Paulo: ABMS, 1966.

BARUFFI, A.; MIGUEL, G. D; FLOSS, M. F. **Geocélulas Preenchidas com Resíduo de Pedras Semipreciosas.**In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Belo Horizonte, Minas Gerais, 19-22 out. 2016.

BATEZINI, R.; DONATO, M.; THOMÉ, A.; CONSOLI, N. C. **Montagem e execução de ensaios de placa em laboratório.** São Paulo: ABMS, 2009.

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

BISWAS A.; KRISHNA A. M. Geocell-Reinforced Foundation Systems: A Critical **Review.** **Int. J. of Geosynth. e Ground Eng**, v. 3, n. 17, 2016.

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

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 3. ed. Brasília: INL, 1973.

DALA ROSA, F.; THOMÉ, A. Obtenção das características de Resistência e Deformabilidade de um solo residual de Basalto através de Ensaio de Placa. In: XXXI JORNADA SUD-AMERICANAS INGENIERIA ESTRUCTURAL, 2004.

DASH, S. K; SIREESH, S.; SITHARAM, T.G. Behavior of geocell-reforced sand bends under circular footing. **Ground Improvement**, v. 7, n. 3, p. 111-115, 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.; 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.; 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. Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations. **Geosynthetics International**, v. 11, n. 1, p.35–42, 2004.
- DHARMESH L.; SANKAR, N. S.; CHANDRAHARAN, S. **Behaviour of square footing on sand reinforced with geocell**. 2017.
- DONATO, M. **Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno**. Tese (Doutorado em Engenharia) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007.
- DONATO, M.; MUHAMMAD, D.; THOMÉ, A; CONSOLI, N. Ensaio de placa com medidas diretas de tensão. In: GEOSUL, Porto Alegre, 2012.
- EDLER, P. et al. Comportamento de estacas compostas de solo-cimento e resíduo de beneficiamento de pedras preciosas a partir de provas de carga estática. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 147-157, 2012.
- EID, H. T. et al. Comparative study on the behavior of square foundations resting on confined sand. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 46, n. 4, p. 438-45, 2009.
- FABY MOLE, P. et al. Prediction Of Limit Bearing Capacity Of Footings On Geocell Reinforced SOILS. In: **Geo-Congress 2014 Technical Papers**, ASCE Library, 2014.
- FAVRETTO, J. et al. Utilização do resíduo da rolagem de pedras preciosas como material de preenchimento de células para reforço de solos. **Avanços Técnicos- Científicos no setor de Gemas, Joias e Mineração. Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2018.
- FAVRETTO, J. et al. **Circular Footing on Geocell-Reinforced Granular Residue from Precious Gem Processing over a Sand Bed**. *Soils and Rocks*, São Paulo, 43, (1) 151-158 January-March, 2020.
- FLOSS, M. F. et al. 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.
- GOMES, R. C. (1993). Parâmetros de Projetos em Estruturas de Solos Reforçados com Geotêxteis. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 267-278.
- HARTMANN, L.A.; SILVA, J.T. **Tecnologias para o setor de gemas, joias e mineração**. In: IGEO, Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2010. 320 p.
- HUABAO, Zhou; XUEJUN, Wen. Model studies on geogrid- or geocell-reinforced sand cushion on soft soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 26, p. 231–238, 2008.
- HEGDE, A. Geocell reinforced foundation beds-past findings, present trends and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 658-674, 2017.
- HEGDE, A.; SITHARAM T.G. Dimensional numerical modelling of geocell reinforced sand beds. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 43, p. 171-181, 2015.

IPAR, C.E de A. e L.et al. Revisão da metodologia para desenvolvimento de matéria prima para impressão tridimensional. **Revista CIATEC-UPF**, Passo Fundo, v. 4, p. 33-47, 2012.

SUKO, Lekshmi et al. **Behavior of geocell-reinforced granular base under repeated loading**. *Transportation Geotechnics*, 2016.

MANDAL,J.N.;GUPTA,P. Stability of geocell-reinforced soil.Constrution Building Materials. **Geosynthetics International**, v. 8, n. 1, p. 55-62, 1994.

MAHDI, M. B.; INDRARATNA, B.; NGO, N. T. Modelling of geocell-reinforced subballast subjected to cyclic loading. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 44, n. 4, p. 489-503, 2016.

MHAISKAR,S.Y.;MANDAL,J.N. Investigations on soft clay subgrade Strengthening using geocells. **Construtuion and Building Materials**, v. 10 n. 4, p. 281-286, 1996.

MENEGOTO, M.L. **Previsão da curva de tensão-recalque de ensaios de placa em solo não saturado**. 2004.

MENESES,L.A.**Utilização de geocélulas em reforó de solo mole**. 2004. 86f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MENGELT, M.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H. Resilient modulus and plastic deformation of soil confined in a geocell. **Geosynthetics International**, v. 13, n. 5, p. 195–205, 2006.

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, Porto, Portugal, 2016.

MOGHADDAS TAFRESHI, S. N., Khalaj, O.; Dawson, A. R. Pilot-scale load tests of a combined multilayered geocell and rubber-reinforced foundation. **Geosynthetics International**, v. 20, n. 3, p. 143–161, 2013.

OBER. **Catálogo Fortcell Geocélula**. nov. 2014. Disponível em: <[http://www.obergeo.com.br/catalogo/catalogo\\_fortcell.pdf](http://www.obergeo.com.br/catalogo/catalogo_fortcell.pdf)>. Acesso em: jun. 2018.

OLIAEI M., Kouzegaran S. Efficiency of cellular geosynthetics for foundation reinforcement **Geotextiles and Geomembranes**, v. 45, p. 11-22, 2017.

ORTIGÃO, J. A .R; PALMEIRA, E.M. Geotextile Performance at na acess road on soft ground near Rio de Janeiro. **Conferência Internacional de geotêxtis**, Las Vegas, v. 1, p. 353-358, [s.d.].

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 (Graduação em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo (UPF), Passo Fundo, 2013.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

- POKHAREL, Sanat K. et al. Experimental evaluation of geocell-reinforced bases under repeated loading. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 9, n. 1, p. 1-14, mar. 2018.
- RUVER, Cesar Alberto Ruver; FERREIRA, Rafael Sandrini. **Modelo reduzido para a realização de provas de carga**. In: COBENGE, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Escola de Engenharia, 2012.
- SHADMAND, A. et al. Load-settlement characteristics of large-scale square footing on sand reinforced with opening geocell reinforcement. **Geotextiles and Geomenbranes**, 2018.
- SHUKLA, S. K.; YIN, J. **Fundamentals of Geosynthetic Engineering**. Leiden: Taylor & Francis, 2006.
- SIABIL, GHOTBI S.M.A. et al. Response of pavement foundations incorporating both geocells and expanded polystyrene (EPS) geofoam. **Geotextiles and Geomenbranes**, 2019.
- SIREESH, S.; SITHARAMB, T.G.; DASH, S.K. Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlying clay bed with void. **Geotextiles and Geomenbranes**, n. 27, p. 89-98, 2009.
- SILVA, R. A.; SCHNEIDER, I. A. Geração de resíduos no processamento de ágatas. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 2, n. 1, p. 11-16, 2015.
- SHUKLA, S. K.; CHANDRA, S., 1995. Modelling of Geosynthetic-Reinforced Engineered Granular Fill on Soft Soil. **Geosynthetics International**, v. 2, n. 3, p. 603-618, [s.d.].
- SHUKLA, S. K. & YIN, J. H. (2003). Time-dependent settlement analysis of a geosynthetic-reinforced soil. **Geosynthetics International**, v. 10, n. 2, 70-76, [s.d.].
- SARSBY, R. W. **Environmental Geotechnics**. 2. ed. London: ICE Publishing, 2013.
- SOUSA, G. M. et al. **Determinação dos parâmetros de interação mecânica de interfaces de resíduos de mineração com geossintéticos**. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais: Brasil, 2006.
- SITHARAM, T G ; HEGDE A. Design and construction of geocell foundation to support the embankment on settled red mud. **Geotextiles and Geomembranes**, nov. 2013.
- THALLAK, S.G.; SIREESH, S.K. Performance of surface footing on geocell reinforced soft clays beds. **Geotech Geol Eng**, n. 25 p.509-524, 2007.
- THOME, A. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais**. Tese (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, jul. 1999.

TONELLO R. et al. **Uso de resíduo da rolagem de pedras ágata como adição mineral em blocos para pavimentação de baixo custo.** Ações aplicadas á cadeia produtiva de gemas e joias do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CTP, 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, São Paulo, 2002.

THOMÉ, Antônio et al. **Diagnóstico dos resíduos gerados pelo setor de pedras preciosas do município de Soledade/RS.** Porto Alegre: IGEO/UFR-GS, 2010.

VERQUIARUTO, S. et al. Aproveitamento de resíduos de ágata reciclada em materiais cimentícios sustentáveis. p. 99-106. In: Hartmann, L. A. et al. **Tecnologias e Inovações em gemas, joias e mineração.** Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações:** critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

VERTEMATTI, J. C. Aplicações em reforço de solos. p. 85-245. In: \_\_\_\_\_. **Manual brasileiro de geossintéticos.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015b.

VERTEMATTI, J. C. **Manual brasileiro de geossintéticos.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015a.

WEBSTER S. L.; WATKINS, J. E. Investigation of construction techniques for tactical bridge approach roads across soft ground. Report S-77-1. **Soils and Pavements Laboratory,** U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1977.

WILM, M. et al. Design e Tecnologia: estudo de viabilidade da reutilização de rejeitos de quartzo Rosa com uso de corte por jato da água. p. 77-84. In: Hartmann, L.A. et al. **Tecnologias e Inovações em gemas, joias e mineração.** Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014.

ZANATA, A. L. **Plano de desenvolvimento com metodologia participativa APL pedras, gemas e joias.** Passo Fundo: Graffoluz Editora e Indústria Gráfica Ltda, 2014.

ZHOU, H., WEN, X.; Model Studies On Geogrid-or Geocell-reinforced Sand Cushion On Soft Soil. **Geotextiles and Geomenbranes,** v. 26, p. 231-238, 2007.





# 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)