

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

Julia Favretto

INFLUÊNCIA DA GEOCÉLULA PREENCHIDA COM RESÍDUOS DE
PEDRAS PRECIOSAS NO COMPORTAMENTO DE UM SOLO ARENOSO

Passo Fundo

2018

Julia Favretto

INFLUÊNCIA DA GEOCÉLULA PREENCHIDA COM RESÍDUOS DE
PEDRAS PRECIOSAS NO COMPORTAMENTO DE 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 obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob orientação do Prof. Dr. Márcio Felipe Floss e coorientação do Prof. Dr. Maciel Donato.

Passo Fundo

2018

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

A Comissão Examinadora abaixo aprova a dissertação de mestrado intitulada “Influência da geocélula preenchida com resíduos de pedras preciosas no comportamento de um solo arenoso”, elaborada por Julia Favretto, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Aprovada em 27 de abril de 2018.

Comissão Examinadora:

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

Prof. Dr. Maciel Donato - Coorientador
Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Antônio Thomé
Universidade de Passo Fundo

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

Prof. Dr. Michéle Dal Toé Casagrande
Universidade de Brasília

Passo Fundo
2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda comunidade acadêmica, aos meus familiares e amigos por estarem ao meu lado no decorrer desta trajetória.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela proteção, direcionamento e iluminação de meus pensamentos.

A minha família, que não mediu esforços para que esta etapa fosse concluída. Por todo incentivo, apoio e compreensão.

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.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Maciel Donato, pelas ideias e colaboração.

A todos os meus queridos amigos, por serem compreensivos e me proporcionarem alegrias, carinho e motivação. Aos meus colegas de mestrado, pela amizade e convívio.

Aos meus colegas e amigos, Bolívar Zanella Ribeiro e Tassia Fanton, por dividirem comigo todas as experiências vividas no mestrado.

Ao meu colega e amigo Gustavo Dias Miguel, que sempre esteve disponível para me ajudar.

Aos laboratoristas, estagiários e bolsistas de iniciação científica.

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

À CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

RESUMO

O rápido desenvolvimento urbanístico, juntamente com a expansão de polos industriais e o crescimento das obras de infraestrutura, têm resultado em um aumento da demanda por espaço. Como consequência, surge a necessidade de as indústrias da construção trabalharem com técnicas de melhoramento de solos, de modo a viabilizar obras em locais, até então, inadequados e com condições geotécnicas desfavoráveis. Uma das alternativas para conferir maior resistência a fundações é a utilização de geocélula de reforço, que consiste em uma estrutura tridimensional de confinamento, cuja principal função é melhorar o desempenho e aumentar a capacidade de carga do solo. Visando a redução do consumo de agregados de origem primária e a reutilização de um material residual, o preenchimento das geocélulas pode ser dado com o resíduo do beneficiamento de pedras preciosas. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar a influência de geocélulas preenchidas com tal resíduo no comportamento de um solo arenoso, através de provas de carga realizadas em laboratório. O sistema de reforço foi instalado sobre o substrato arenoso e submetido a carregamento estático em placa circular. Foram testadas duas alturas de geocélula a fim de verificar o efeito desse parâmetro na capacidade de carga do solo. Os ensaios de placa também foram realizados sobre amostras sem reforço, nas mesmas alturas, para fins de comparação e análise do desempenho da fundação. Os resultados das provas de carga indicam que o emprego da geocélula conduz a um aumento significativo na resistência do solo, não sendo observada influência da altura do reforço.

Palavras-chave: capacidade de carga, ensaios de placa, geossintéticos, resíduo granular.

ABSTRACT

Rapid urban development, associated with the expansion of industrial poles and the growth of infrastructure works, have resulted in increased demand for space. As a consequence, there is a need for the construction industries to work with soil improvement techniques, in order to enable works in inadequate places and with unfavorable geotechnical conditions. One of the alternatives to improve the resistance of foundations is using geocell reinforcement, which consists in a tridimensional confinement structure, whose main function is to improve the performance and to increase the load capacity of the soil foundation system. In order to reduce the consumption of natural aggregates and to reuse residual materials, the geocells can be filled with precious gem processing waste. In this context, the present work aimed to study the influence of geocells filled with this residue on the behavior of a sandy soil, through plate load tests carried out in the laboratory. The reinforcement system was installed over the sand subgrade and submitted to static loading in a circular plate. Two geocell heights were tested in order to verify the effect of this parameter on the bearing capacity of the soil. Unreinforced tests, in the same heights, were also performed to compare and analyze the performance of the foundation. The results indicate that the use of geocell leads to a significant increase in the soil resistance, with no influence of reinforcement height.

Keywords: bearing capacity, plate load tests, geosynthetics, granular residue.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema e relevância da pesquisa	15
1.2	Objetivo geral	17
1.2.1	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	Considerações iniciais.....	18
2.2	Solos reforçados com geossintéticos	18
2.3	Geocélulas.....	21
2.3.1	Considerações iniciais	21
2.3.2	Caracterização	22
2.3.3	Aplicações	23
2.3.4	Mecanismos de resistência	25
2.3.4.1	Efeito do confinamento	25
2.3.4.2	Efeito da distribuição das tensões.....	26
2.3.4.3	Efeito membrana.....	27
2.3.5	Fatores que influenciam o comportamento da geocélula	28
2.4	Resíduos do beneficiamento de pedras preciosas	32
2.4.1	Contextualização do setor de pedras, gemas e joias do sul do Brasil.....	32
2.4.2	Geração dos resíduos	34
2.4.3	Utilização dos resíduos na Engenharia Civil.....	36
2.5	Provas de carga estática	37
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
3.1	Delineamento da pesquisa.....	39
3.2	Materiais	40
3.2.1	Areia	40
3.2.2	Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas	41
3.2.3	Geocélulas	43
3.3	Ensaio de placa.....	44
3.3.1	Equipamentos	45
3.3.2	Processo de mistura e construção das camadas	47
3.3.2.1	Preparação do solo de base.....	47
3.3.2.2	Preparação da camada de resíduo	48

3.3.3	Método de ensaio.....	50
3.4	Planejamento experimental.....	51
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
4.1	Considerações iniciais.....	53
4.2	Ensaio sem geocélula.....	53
4.2.1	Camada de resíduo com 5 cm.....	53
4.2.2	Camada de resíduo com 20 cm.....	56
4.3	Ensaio com geocélula.....	59
4.3.1	Camada de resíduo com 5 cm.....	59
4.3.2	Camada de resíduo com 20 cm.....	63
4.4	Mecanismos de ruptura e exumação dos ensaios.....	67
4.5	Análise global.....	70
4.5.1	Influência do uso da geocélula.....	70
4.5.2	Influência da altura da geocélula.....	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
5.1	Conclusões.....	80
5.2	Sugestões.....	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geocélula de PP.	22
Figura 2: Geocélula de PEAD (a) com parede lisa e (b) com parede perfurada.	23
Figura 3: Formatos padrão das geocélulas.	23
Figura 4: Mecanismo do efeito de confinamento.	26
Figura 5: Mecanismo do efeito da distribuição das tensões.	27
Figura 6: Mecanismo do efeito membrana.	27
Figura 7: Parâmetros geométricos de um sistema de reforço por geocélula.	28
Figura 8: Mapa gemológico da região sul do Brasil.	33
Figura 9: Pilha de rejeitos em empresa de pedras preciosas.	34
Figura 10: Fluxograma da pesquisa.	39
Figura 11: Amostra da areia.	40
Figura 12: Curva granulométrica da areia.	41
Figura 13: Resíduo da rolagem de pedras preciosas.	42
Figura 14: Curva granulométrica do resíduo.	43
Figura 15: Geocélulas utilizadas (a) $h = 5$ cm (b) $h = 20$ cm.	44
Figura 16: Diagrama esquemático da configuração dos ensaios de placa.	45
Figura 17: Configuração completa dos ensaios de placa.	46
Figura 18: Moldagem das camadas de areia.	48
Figura 19: Configuração das camadas de resíduo sobre o solo de base (a) Reforço de geocélula preenchida com resíduo e (b) Apenas resíduo.	49
Figura 20: Moldagem da camada de resíduo.	49
Figura 21: Geometria da fundação.	51
Figura 22: Curva tensão-deslocamento do ensaio sem reforço SR-5.	54
Figura 23: Variação do deslocamento da superfície com o recalque da placa – Ensaio SR-5.	55
Figura 24: Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR-5.	55
Figura 25: Perfil de deslocamento da superfície externa à placa – Ensaio SR-5.	56
Figura 26: Curva tensão-deslocamento do ensaio sem reforço SR-20.	57
Figura 27: Variação do deslocamento da superfície com o recalque da placa – Ensaio SR-20.	58
Figura 28: Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR-20.	58
Figura 29: Perfil de deslocamento da superfície externa à placa – Ensaio SR-20.	59
Figura 30: Curva tensão-deslocamento do ensaio com reforço GCE-5.	61

Figura 31: Variação do deslocamento da superfície com o recalque da placa – Ensaio GCE-5.	61
Figura 32: Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio GCE-5.	62
Figura 33: Perfil de deslocamento da superfície externa à placa – Ensaio GCE-5.	62
Figura 34: Curva tensão-deslocamento do ensaio com reforço GCE-20.	64
Figura 35: Variação do deslocamento da superfície com o recalque da placa – Ensaio GCE-20.	65
Figura 36: Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio GCE-20.	65
Figura 37: Perfil de deslocamento da superfície externa à placa – Ensaio GCE-20.	66
Figura 38: Mecanismo de ruptura dos ensaios (a) sem reforço SR-5, (b) sem reforço SR-20, (c) com reforço GCE-5 e (d) com reforço GCE-20.	68
Figura 39: Exumação das camadas de areia subjacente a uma camada de 5 cm de resíduo (a) sem reforço SR-5, (b) com reforço GCE-5.....	69
Figura 40: Exumação das camadas de areia subjacente a uma camada de 20 cm de resíduo (a) sem reforço SR-20, (b) com reforço GCE-20.....	70
Figura 41: Curvas tensão-deslocamento dos ensaios para $h = 5$ cm.	72
Figura 42: Curvas tensão-deslocamento dos ensaios para $h = 20$ cm.	72
Figura 43: Variação dos fatores de melhora da capacidade de carga com o recalque da placa.	74
Figura 44: Variação das porcentagens de redução no deslocamento da sapata com a tensão..	76
Figura 45: Curvas tensão-deslocamento dos ensaios sem reforço.	77
Figura 46: Curvas tensão-deslocamento dos ensaios com reforço.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização geotécnica da areia.....	41
Tabela 2: Caracterização geotécnica do resíduo.....	43
Tabela 3: Propriedades das geocélulas.	44
Tabela 4: Plano experimental dos ensaios de placa.....	52
Tabela 5: Síntese dos resultados em termos do fator de melhora da capacidade de carga.....	74
Tabela 6: Síntese dos resultados em termos da porcentagem de redução do deslocamento da sapata.	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Funções dos geossintéticos.....	20
---	----

LEGENDA

δ : Deslocamento da superfície

γ_s : Peso específico real dos grãos

σ_h : Tensões horizontais

τ : Tensões de cisalhamento

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

b: Largura do reforço

B: Largura do carregamento

BPR: Razão da capacidade de carga

C_c : Coeficiente de curvatura

C_u : Coeficiente de uniformidade

d: Abertura da célula

D: Largura do carregamento

D_{50} : Diâmetro médio das partículas

D_{10} : Diâmetro efetivo das partículas

D_r : Densidade relativa

$e_{máx.}$: Índice de vazios máximo

$e_{mín.}$: Índice de vazios mínimo

GCE: Geocélula

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

ISO: International Organization for Standardization

NBR: Norma Brasileira

PE: Polietileno

PEAD: Polietileno de alta densidade

PET: Poliéster

PP: Polipropileno

PRS: Porcentagem de redução no deslocamento da sapata

q_o : 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

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problema e relevância da pesquisa

O intenso processo de urbanização e a expansão das obras de infraestrutura resultaram no desenvolvimento das indústrias da construção. Estas, a fim de atender o acréscimo na demanda por agregados, têm contribuído negativamente com o meio ambiente por meio das atividades crescentes de extração de materiais, promovendo o esgotamento de recursos primários e o aumento da geração de resíduos.

O montante de resíduos produzidos não está restrito aos setores da construção. O desenvolvimento da economia e da indústria em geral, tornou diversos setores coadjuvantes nesse processo. Dentre eles, enquadram-se as indústrias de beneficiamento de pedras preciosas, atividade de grande influência econômica na região norte do Estado do Rio Grande do Sul.

Devido ao processo de extração e beneficiamento das pedras, quantidades expressivas de rejeitos gemológicos são geradas, as quais permanecem armazenadas nos pátios das empresas na forma de refugos, peças semiacabadas ou pouco beneficiadas.

Sabe-se que muitos dos resíduos gerados no processamento de insumos ou subprodutos industriais são potencialmente capazes de desempenhar funções similares às dos agregados naturais (SARSBY, 2013). Em vista disso, parte da alta demanda por agregados pode vir a ser substituída por materiais residuais. Além de permitir a redução do consumo de matérias-primas, a utilização de rejeitos industriais como novo material de engenharia promove uma destinação correta dos mesmos.

Com o objetivo de reaproveitar os resíduos de pedras preciosas, algumas pesquisas têm sido desenvolvidas visando à utilização desse material na engenharia civil. Miguel *et al.* (2016) e Baruffi *et al.* (2016) conduziram estudos na Universidade de Passo Fundo, empregando esses resíduos como material de preenchimento de geocélulas, cujos resultados apresentaram indicativos de viabilidade técnica para sua utilização como agregado constituinte de sistemas de reforço de solos.

Se tratando de solos, um aspecto de grande importância a ser considerado nos projetos de engenharia é a condição geotécnica do local de implantação de determinada obra. Muitas vezes, é necessário construir ou realizar obras de infraestrutura em locais desfavoráveis, cujo solo apresenta baixa resistência ou recalques excessivos.

Em consequência disso, setores da engenharia, com destaque ao da engenharia geotécnica, têm sofrido intenso desenvolvimento. O constante aprimoramento das técnicas de

intervenção ou melhoramento de solos tem buscado viabilizar construções em certos locais que, em sua condição original, não teriam capacidade de suportar determinadas estruturas, devido à baixa resistência e/ou alta deformabilidade do solo.

Nesse contexto, está inserido o conceito de solo reforçado, que constitui de um ganho significativo de resistência ao ser empregada determinada técnica de estabilização. Soluções de reforço de solos são necessárias, por exemplo, para o aumento da capacidade de carga de fundações, em projetos de estabilidade de taludes, barragens, aterros, etc.

Diversas são as técnicas utilizadas para conferir maior resistência a um solo. Elas variam desde soluções como a remoção e substituição do substrato, até soluções menos convencionais, porém altamente competitivas, relacionadas ao emprego de geossintéticos.

Um dos principais desenvolvimentos da indústria de geossintéticos para sistemas de reforço é a geocélula, que consiste em uma estrutura tridimensional aberta para confinamento de solo. Essa técnica tem se mostrado eficiente no melhoramento das características mecânicas de solos, pois promove um aumento substancial em sua capacidade de suporte. Embora ainda haja uma carência de pesquisas científicas a respeito dessa técnica, os benefícios de sua utilização têm sido estudados e exaltados por diversos pesquisadores.

Estudos realizados em solos reforçados com geocélulas, tomando como exemplo os conduzidos por Mandal e Gupta (1994), Dash *et al.* (2001) e Dash *et al.* (2003), sugerem que o efeito do confinamento do solo de preenchimento das células resulta em um sistema de reforço mais rígido, capaz de melhorar o desempenho e atribuir maior resistência à fundação. Essa hipótese pode ser testada por meio de provas de carga estática.

Em vista disso, o presente estudo busca investigar a influência de geocélulas preenchidas com o resíduo do beneficiamento de pedras preciosas no comportamento de um solo arenoso, através de ensaios de prova de carga em placa circular. Essa avaliação é feita por meio dos resultados de medidores de carga e de deslocamento, que permitem a análise do comportamento carga-recalque da fundação.

A combinação desses dois materiais, geocélula e resíduo, é uma proposta que visa o atendimento a necessidades tanto técnicas, quanto ambientais, de forma a apresentar uma alternativa de reforço de solo aliada à inserção de um resíduo industrial como um novo material de engenharia.

1.2 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é investigar a influência de sistemas de reforço compostos por geocélulas preenchidas com resíduos do processamento de pedras preciosas no comportamento de um solo arenoso.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Estudar o comportamento de solos reforçados e não reforçados com geocélulas, através da relação carga-recalque resultante de ensaios de placa;
- b) Avaliar a influência da inserção da geocélula no ganho de resistência;
- c) Investigar a variação dos deslocamentos com a utilização do reforço;
- d) Verificar a influência que a altura da camada de reforço exerce sobre a capacidade de carga do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, é apresentada a revisão da literatura acerca dos principais assuntos abordados no estudo. Inicialmente, é tratado sobre soluções que visam o aumento da capacidade de carga de fundações com a aplicação de geossintéticos, seguidas da síntese dos principais conceitos e mecanismos relacionados ao emprego de geocélulas como técnica de melhoramento de solos. Na sequência, é versado sobre a utilização de resíduos de pedra preciosas como material alternativo na engenharia civil. Por fim, são apresentadas generalidades sobre ensaios de prova de carga em placa.

2.2 Solos reforçados com geossintéticos

Os desafios envolvidos em projetos geotécnicos, como falta de suporte da fundação e recalques excessivos, podem ocasionar problemas estruturais durante a execução, comprometendo a qualidade das construções ao longo de sua vida útil. Frente a isso, algumas técnicas para reforço de solos devem ser aplicadas (KEMPFERT e GEBRESELASSIE, 2006).

O melhoramento ou estabilização de solos consiste em procedimentos que visam melhoria e estabilidade de suas propriedades (resistência, compressibilidade, permeabilidade, etc.), por meio de intervenções mecânicas, físicas, químicas e biológicas. O termo solo reforçado é atribuído àqueles que apresentam ganho significativo de resistência ao ser empregada determinada técnica de estabilização.

Há uma variedade de soluções passíveis de serem empregadas para incrementar a capacidade de suporte de um solo. As técnicas variam desde as mais clássicas, como a substituição total ou parcial do solo local por um material de maior resistência, até as menos tradicionais, que é o caso da utilização de geossintéticos de reforço.

Os geossintéticos têm ganhado espaço no meio geotécnico, em função de suas vantagens no âmbito técnico, financeiro e de prazo. Eles podem desempenhar funções variadas a fim de atender às exigências técnicas de projeto, contemplando soluções como o uso de geogrelhas e geotêxteis em reforços basais e aterros sobre estacas, geodrenos em aceleração de adensamento e geocélulas em aumento da capacidade de carga (AVESANI NETO, 2010).

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 construção e custos envolvidos. Muitas vezes, é comum utilizar reforços de geossintéticos associados a soluções tradicionais.

Ao longo das últimas décadas, os geossintéticos se tornaram uma importante ferramenta de substituição ou aprimoramento de técnicas existentes na engenharia, capazes de permitir soluções mais rápidas, mais leves, mais esbeltas, mais confiáveis e mais econômicas (VERTEMATTI, 2015b).

A norma ISO 10318-1:2015 define geossintético (GSY) como termo genérico, que designa um produto do qual ao menos um de seus componentes é produzido a partir de um polímero sintético ou natural. Apresenta-se na forma de manta, tira ou estrutura tridimensional, sendo utilizado em contato com o solo ou outros materiais, em aplicações de engenharia geotécnica e civil.

De acordo com Shukla e Yin (2006), geossintético é o termo utilizado para representar uma ampla gama de produtos produzidos a partir de materiais poliméricos, tendo como exemplos os geotêxteis, geogrelhas, geocompostos, geocélulas e geomembranas, utilizados em contato com o solo, rocha ou outro material relacionado com a engenharia civil como parte integrante de um projeto, estrutura ou sistema produzido pelo homem. Eles possuem uma versatilidade quanto ao seu uso, sendo adaptáveis a diferentes situações, além da possibilidade de combinação com diversos outros materiais construtivos, podendo constituir soluções de engenharia para melhoramento de solos, controle de erosão, estabilidade de taludes, impermeabilizações, entre outras. Destaca-se, ainda, a importância dos geossintéticos em sua capacidade de substituir parcial ou totalmente materiais de fontes primárias, como cascalho, areia, argila, bentonita, etc.

Outras inúmeras vantagens podem ser atribuídas à utilização de produtos manufaturados como parte das soluções de um problema de engenharia, como a velocidade de execução, controle da qualidade na fabricação e redução de custos.

Em obras de engenharia, os geossintéticos podem exercer, concomitantemente, uma ou mais funções. As principais funções podem ser observadas no Quadro 1.

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: Adaptado de Bueno e Vilar (2015).

A utilização de materiais geossintéticos é destacada nas áreas de geotecnia, transportes, hidráulica, meio ambiente e engenharia costeira, tendo como objetivos melhorar o desempenho de projetos e se tornar uma alternativa economicamente viável frente a outros materiais e soluções tradicionais (KOERNER, 2005).

Na engenharia geotécnica, o uso de geossintéticos é crescente. Em projetos que visam à construção de aterros sobre solos moles, o geossintético pode atuar como elemento de reforço basal a fim de aumentar a estabilidade da estrutura, permitindo, assim, uma construção mais acelerada e a utilização de taludes mais íngremes (PALMEIRA e ORTIGÃO, 2015).

O reforço de solos consiste na disposição de elementos devidamente orientados no solo que, em função de suas características, conferem uma melhoria nas propriedades mecânicas do novo material, denominado solo reforçado (LOPES, 2002).

A principal função do reforço é inibir o desenvolvimento de deformações no solo e, conseqüentemente, resistir aos esforços de tensão que o solo não é capaz de suportar. Tais esforços dependem da resistência ao cisalhamento mobilizada no solo e das tensões de tração mobilizadas no reforço. As tensões suportadas pelo reforço melhoram as propriedades

mecânicas do solo, resultando no aumento de sua resistência ao cisalhamento à medida que o esforço normal age sobre a superfície. (LOPES, 2002).

2.3 Geocélulas

2.3.1 Considerações iniciais

A geocélula consiste de 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 e da deformação.

A norma ISO 10318-1:2015 classifica a geocélula (GCE) como uma estrutura tridimensional polimérica (sintética ou natural), permeável, em forma de uma colmeia ou estrutura celular similar, produzida a partir de tiras de geossintéticos ligadas entre si.

Para Shukla e Yin (2006), geocélulas são estruturas tridimensionais que apresentam 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.

O uso de geocélulas na engenharia ocorreu, originalmente, com objetivo de reforçar solos granulares de baixa capacidade de carga, utilizando o próprio solo a ser reforçado como material de preenchimento das células tridimensionais.

O desenvolvimento das geocélulas ocorreu em meados da década de 70 por motivações militares. O *United States Army Corps of Engineers* pesquisava técnicas para a rápida construção de uma base sólida e firme o suficiente para servir de estradas e pistas de pouso e decolagem em praias e desertos. A tecnologia desenvolvida foi rapidamente assimilada para fins civis de modo que, nas décadas subsequentes o produto passava a ser produzido comercialmente.

Devido à assimilação da técnica de confinamento celular por parte da indústria, estudos acadêmicos começaram a ser desenvolvidos. Webster e Watkins (1977) e Webster e Alford (1978) conduziram os primeiros experimentos na área, e tinham como objetivo investigar alternativas para construção de estradas sobre camadas de solos moles. Os resultados obtidos em suas pesquisas confirmaram o potencial da técnica de utilização de geocélulas como base de estradas e pátios de armazenamento, observando uma diminuição de, aproximadamente, 30% na espessura de projeto da base.

Dash *et al.* (2003) mencionam que, quando comparados os sistemas de reforço planares e tridimensionais, atuando separadamente, a geocélula se mostra mais eficiente.

2.3.2 Caracterização

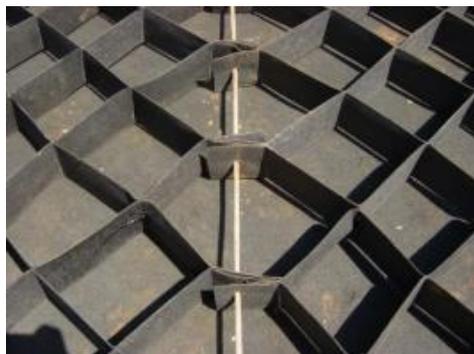
Devido ao intenso desenvolvimento das indústrias de geossintéticos nas últimas décadas, o mercado conta com um vasto conjunto de geocélulas pré-fabricadas, contemplando diversas marcas, modelos e variadas dimensões. Aliado a isso, tem-se a vantagem operacional, que é atribuída ao fato de as mesmas chegarem até o consumidor em painéis esbeltos, facilitando o transporte e armazenamento do material.

As geocélulas são encontradas nas mais diversas formas, variando quanto ao material constituinte, tipo de solda das tiras, formato e dimensões da célula – abertura (d), altura (h), relação de forma (h/d). Elas são comercializadas, geralmente, com alturas de 50, 75, 100, 150 e 200 mm.

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) (Figura 2). A fim de conferir o aspecto celular às geocélulas, as tiras de dimensões pré-definidas são unidas através de solda ultrassônica ou por termofusão para os materiais PE e PEAD e por meio de costuras para PET e PP (AVESANI NETO e BUENO, 2009).

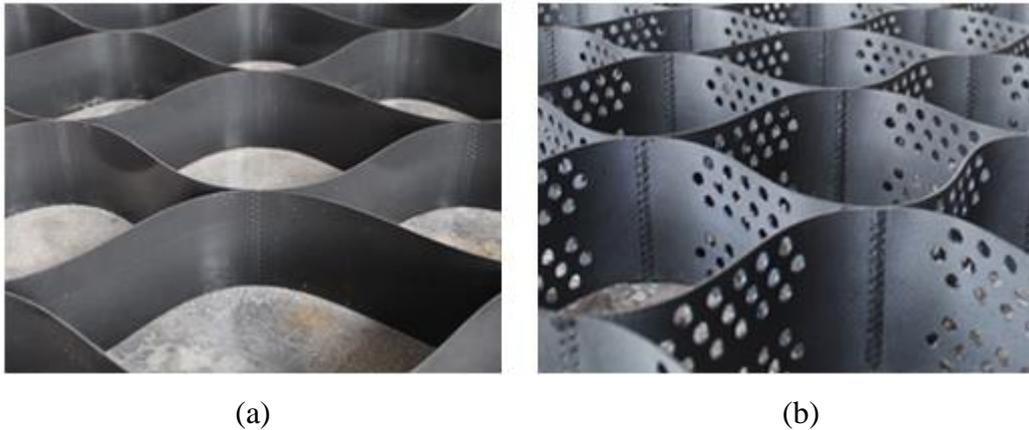
No caso de projetos que preveem, além do confinamento, a drenagem do solo, as células apresentam perfurações nas paredes para permitir o fluxo de água no plano, conforme ilustrado na Figura 2b.

Figura 1: Geocélula de PP.



Fonte: Moraes *et al.* (2013).

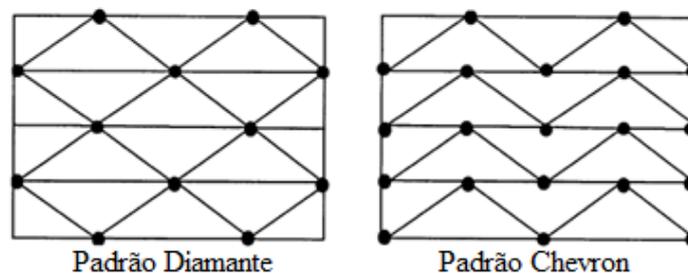
Figura 2: Geocélula de PEAD (a) com parede lisa e (b) com parede perfurada.



Fonte: TMP Geosynthetics (2016).

Quanto ao formato das células, dois padrões podem ser encontrados no mercado, que são o Diamante e o Chevron, conforme representado na Figura 3. O primeiro possui forma semelhante a um favo de mel, enquanto o segundo é arquitetado em forma de ziguezague.

Figura 3: Formatos padrão das geocélulas.



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

Quando as primeiras geocélulas começaram a ser empregadas, era comum sua produção ser realizada *in loco* no próprio canteiro de obra, de forma artesanal, utilizando geogrelhas ou geotêxteis para montagem do sistema de confinamento, como pode ser visto no trabalho de Bush *et al.* (1990). Entretanto, devido ao crescimento e aprimoramento das indústrias de geossintéticos, a utilização de sistemas de confinamento confeccionados *in loco* ficou restrita a casos especiais.

2.3.3 Aplicações

Alguns estudos acerca do confinamento tridimensional têm sido desenvolvidos, ao longo dos anos, para as mais diversas finalidades e locais de aplicação. De acordo com Bueno

e Vilar (2015), a utilização da geocélula está condicionada, basicamente a obras de proteção de encostas, controle de erosão e reforço para solos de baixa resistência.

Shukla (2002) comenta que dentre as práticas de reforço para estradas e aterros construídos sobre um solo mole, o uso de geocélulas é um método eficaz, onde a matriz celular é disposta sobre o solo de fundação com baixa capacidade de carga, de forma a suportar o carregamento imposto.

A utilização de geocélulas é uma prática que confere considerável rapidez ao processo executivo e que não necessita de áreas além da que se deseja reforçar, ao contrário, por exemplo, de projetos com bermas de equilíbrio.

Quando as soluções convencionais de reforço não atendem as necessidades de projeto, em razão de fatores como operacionalidade e prazos, ou quando os custos de sua instalação se mostrarem muito onerosos, a geocélula deve ser considerada como uma técnica alternativa de melhoramento do solo.

Para aumentar a capacidade de carga de um solo de fundação, as geocélulas são posicionadas diretamente sobre esse solo e, posteriormente, preenchidas com o próprio solo nativo ou utilizando materiais granulares, que são mais indicados, como areia ou pedregulho (BISWAS *et al.*, 2012).

A aplicação do confinamento celular na estabilização de solos de baixa capacidade de carga é desejável nas mais diversas obras de engenharia, tais como construção de ruas, estradas vicinais, pátios, fundações, subleitos rodoviários e ferroviários.

Nesses casos, a substituição das soluções tradicionais por geocélulas de reforço, além de atender de forma eficiente a demanda técnica, contribui para a preservação de recursos naturais. Isso porque sua utilização permite que seja reduzido o volume de material de origem natural (areias e pedregulhos, por exemplo) a ser extraído e utilizado como aterro, em virtude do aumento de resistência promovido pelo confinamento celular.

Para a realização de reforços estruturais de solos no perímetro urbano, o sistema tridimensional de confinamento pode se tornar vantajoso. Nesses locais, normalmente, os prazos de execução são curtos e os espaços para intervenções restritos a pequenas distâncias, devido à presença de instalações urbanas e obras de infraestrutura já consolidadas no entorno, interferências com rodovias e pontes de linha férrea, entre outras (KEMPFERT e GEBRESELASSIE, 2006).

2.3.4 Mecanismos de resistência

O desenvolvimento da resistência de uma camada reforçada com geocélula é baseado no princípio do confinamento celular. Com o objetivo de absorver e melhor distribuir os esforços de tensão gerados por um dado carregamento, essa técnica de melhoramento de solo pode ser utilizada em diversas situações, como em obras de aterros sobre solos moles, reforço de taludes e fundações.

O desempenho de solos reforçados está condicionado às características mecânicas do solo e do reforço, dos mecanismos e propriedades de interação entre os elementos, da geometria do sistema, processo de construção, entre outros. Entretanto, deve ser dada atenção especial aos mecanismos de interação e aos fatores que neles influenciam, uma vez que a eficiência da transferência de tensão do solo para o reforço depende do comportamento do sistema como um todo (LOPES, 2002).

Rajagopal *et al.* (1999) afirmam que solos granulares são indicados como material de preenchimento, pois desenvolvem uma elevada coesão aparente devido ao efeito do confinamento, resultando em um aumento da capacidade e carga e uma melhor distribuição das tensões no solo de fundação. A magnitude dessa coesão é dependente das propriedades dos geossintéticos utilizados na fabricação das geocélulas. Os autores ainda comentam que a rigidez do material granular aumenta com a utilização do reforço celular.

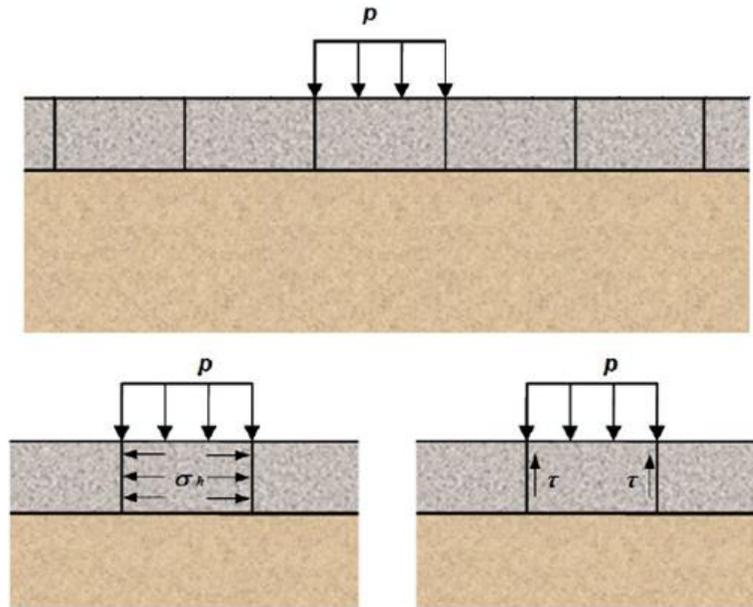
2.3.4.1 Efeito do confinamento

A utilização da geocélula melhora o comportamento carga-recalque do solo de preenchimento através do confinamento lateral das partículas. Dessa forma, o deslocamento horizontal do solo é impedido devido à tensão gerada pela massa de solo na parede das células e, também, à resistência passiva desenvolvida pelas células adjacentes. A eficiência do sistema de confinamento está fortemente relacionada com o atrito entre o material de preenchimento e a parede da geocélula (BATHURST e JARRETT, 1988).

Nesse mesmo sentido, Avesani Neto (2013) comenta que quando um carregamento (p) é aplicado, a estrutura celular do sistema aumenta a tensão de confinamento e a rigidez do seu material de preenchimento. Além disso, surgem tensões horizontais entre o material de preenchimento e a parede da geocélula (σ_h), as quais irão mobilizar tensões de cisalhamento na interface (τ).

O mecanismo de atuação do efeito do confinamento em reforços com geocélula está ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Mecanismo do efeito de confinamento.

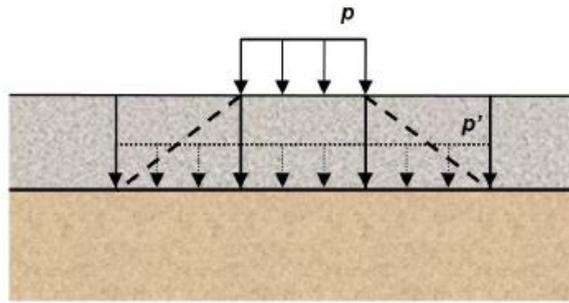


Fonte: Avesani Neto (2013).

2.3.4.2 Efeito da distribuição das tensões

Em função do confinamento, o solo de preenchimento redistribui os esforços para a fundação. Também conhecido como efeito laje, o efeito da tensão de distribuição na camada subjacente é devido à estrutura tridimensional de células interconectadas e preenchidas, que dão origem a uma estrutura capaz de resistir à flexão, compressão, tração e cisalhamento, similar a uma laje de concreto semirrígida. Devido a essa dispersão das tensões, a carga é transferida à fundação, atuando em uma superfície maior e ocasionando níveis mais baixos de tensão e recalque (AVESANI NETO *et al.*, 2013; BISWAS *et al.*, 2012). Tal efeito está esquematizado na Figura 5.

Figura 5: Mecanismo do efeito da distribuição das tensões.

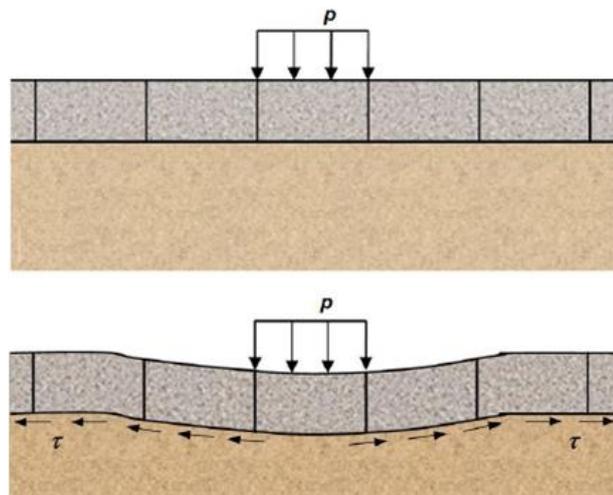


Fonte: Avesani Neto (2013).

2.3.4.3 Efeito membrana

As geocélulas também apresentam um efeito chamado membrana (Figura 6), cujo desenvolvimento é resultante de um deslocamento vertical no solo subjacente ao reforço, que irá gerar uma forma côncava no material geossintético tensionado. Devido à sua rigidez e extremidades ancoradas, o reforço atua como uma membrana, exercendo uma força para cima na tentativa de suportar o carregamento, reduzindo, assim, a tensão no solo de fundação através de sua redistribuição em direção aos pontos de ancoragem. Entretanto, para a ocorrência deste efeito de maneira satisfatória, é necessária a separação entre os materiais acima e abaixo do reforço, elevada rigidez longitudinal do material de reforço, elevados deslocamentos verticais da fundação para sua ativação, adequada interação entre reforço e solo para mobilização do atrito de interface e consequente transferência das tensões (AVESANI NETO *et al.*, 2013; ZHOU e WEN, 2008).

Figura 6: Mecanismo do efeito membrana.



Fonte: Avesani Neto (2013).

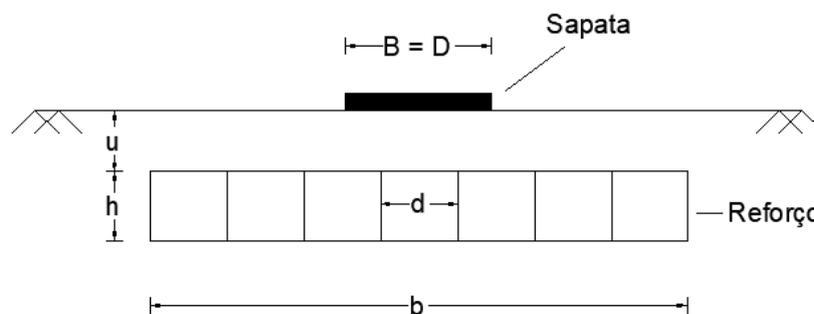
2.3.5 Fatores que influenciam o comportamento da geocélula

O sistema de reforço com geocélula tem se mostrado uma técnica eficiente no melhoramento das características mecânicas dos solos, promovendo o aumento da capacidade de carga e melhor comportamento carga-recalque. O aumento substancial na capacidade de suporte que sua utilização confere ao sistema tem inspirado pesquisadores a desenvolver estudos sobre os parâmetros associados ao seu desempenho, como material constituinte, resistência e rigidez da célula, geometria, entre outros.

Biswas e Krishna (2017) desenvolveram, recentemente, uma ampla revisão crítica acerca dos parâmetros de comportamento de sistemas de reforço com geocélula. O documento contempla as principais pesquisas já realizadas sobre o assunto, de modo a auxiliar demais pesquisadores em seus estudos.

Nos itens que seguem, será apresentado o resultado de alguns estudos, abordando a influência de diversos parâmetros no comportamento de um reforço com geocélula. Para melhor entendimento, os elementos geométricos do sistema estão representados na Figura 7.

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



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

Fonte: Autor (2018).

Dimensões das células

Na confecção de geocélulas, é comum a padronização da altura (h) e da largura das células (d) em valores fixos. Para Avesani Neto (2013), um dos parâmetros de maior importância na utilização da geocélula como reforço é o adimensional resultante da divisão destas duas grandezas (h/d), chamado de razão de forma.

Mandal e Gupta (1994) e Meneses (2004) realizaram estudos quanto ao uso de geocélulas preenchidas com areia para reforço de um solo mole de fundação e observaram que a resistência do solo aumenta solo com o aumento do fator de forma. A conclusão foi a mesma para Dash *et al.* (2001), que considerou o uso de geocélulas para reforço de solos arenosos.

Os estudos mostram que quanto menor a abertura da célula, maior é a capacidade de carga do reforço, fato que é atribuído ao aumento da rigidez da estrutura (DASH *et al.*, 2001). Células de menor tamanho conduzem a um maior confinamento do solo de preenchimento e aumentam a resistência ao cisalhamento e flexão devido ao maior número de juntas por unidade de área. Em contrapartida, a construção de pequenas células e a compactação do material de preenchimento são dificultadas em campo (BISWAS e KRISHNA, 2017).

De acordo com Rai (2010), a abertura da célula deve ser menor que a área da placa, de modo que a placa seja capaz de cobrir, pelo menos, uma célula por inteiro. É recomendado por Dash *et al.* (2003) o valor de $d = 0,8D$.

Formato das células

Dash *et al.* (2001) estudaram os dois padrões de formato das células, Diamante e Chevron, e afirmam que os resultados de capacidade de carga para ambos os formatos são praticamente idênticos para recalques abaixo de 10% da largura da sapata. Acima desse limite, o Padrão Chevron apresenta leve vantagem em comparação ao outro modelo. Os autores atribuem tal superioridade à maior rigidez do conjunto Chevron, em razão do grande número de articulações existentes entre células. Entretanto, esse resultado é apenas marginal, pois ambos os sistemas possuem o mesmo tamanho efetivo das células e mesma área de plano.

Os autores ainda explicam que a influência do formato se torna aparente após o solo já ter falhado por cisalhamento e apresentado redução de densidade. Nesse momento, parte das tensões é direcionada às paredes da geocélula, de modo que a de maior rigidez apresentará os melhores resultados.

Quantidade de células

Rajagopal *et al.* (1999) realizou ensaios triaxiais em amostras de solos reforçados com uma, duas, três e quatro células e concluíram que a resistência do solo aumenta com a quantidade de células utilizadas. Comparando a amostra reforçada por uma célula com uma amostra não reforçada, os autores observaram um acréscimo de quase 100% na resistência para uma deformação de 7%. Eles afirmam que a capacidade de carga é diretamente proporcional à

quantidade de células, entretanto, destacam que de três para quatro células o aumento na resistência é pequeno, sendo perceptível apenas a grandes deformações.

Profundidade de disposição do reforço

A pesquisa conduzida por Dash *et al.* (2001), contemplou estudos sobre a profundidade ideal de assentamento do reforço em solos arenosos, por meio da variação de coeficientes obtidos da razão entre a profundidade de disposição do reforço (u) e o diâmetro da placa (D). Os autores concluíram que conforme a profundidade vai aumentando, menor é o desempenho do sistema de reforço. Razões de u/D entre 0 e 0,25 foram as que se mostraram mais favoráveis.

Para obter os melhores benefícios, Dash *et al.* (2001) sugerem que o topo do reforço esteja localizado a uma profundidade de $0,1D$, partindo da base da placa. Essa relação pode ser explicada porque, em profundidades dessa ordem, a carga é distribuída sobre a geocélula em uma grande área, além impedir o contato direto da parede da célula com a placa, evitando uma possível flambagem inicial (fato que poderia ocorrer em profundidades menores). Aumentando a profundidade de assentamento, o solo entre a placa e a geocélula pode sofrer contração, resultando em grandes deslocamentos, diminuindo a eficiência do reforço.

Thallak *et al.* (2007) realizaram ensaios de placa sobre solos moles utilizando o próprio solo para preenchimento das geocélulas e observaram maior redução dos deslocamentos a uma profundidade menor que $0,5D$, obtendo melhores resultados quanto menor a profundidade. Segundo os autores, isso está associado ao fato de que quanto mais próximo da superfície, mais as paredes das geocélulas relativamente rígidas são capazes de interceptar os planos de cisalhamento da fundação. Dessa forma, a redução dos deslocamentos com a redução da profundidade de assentamento do reforço pode ser diretamente relacionada com o aumento substancial na rigidez da fundação devido ao reforço por meio das geocélulas. Eles recomendam que o sistema de reforço seja instalado logo abaixo da sapata, pois o solo mole livre acima da geocélula pode se espalhar com o carregamento, ocasionando maiores recalques. Em vista disso, sugerem a disposição de uma fina camada de material granular sobre a geocélula, a fim de proteger a mesma contra cargas verticais impostas diretamente sobre a parede e permitir a drenagem e consolidação do solo mole.

Material da célula

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%.

Material de preenchimento da célula

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 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.

Em relação à compacidade, Mhaiskar 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. Dash *et al.* (2001) atribui tal melhoria ao aumento no atrito entre as partículas e as paredes da geocélula, e à maior dilatação que os mesmos apresentam, de forma a transferir as tensões do solo para a geocélula. No mesmo sentido, Sireesh *et al.* (2009), Dash *et al.* (2010) e Rai (2010) concluíram que a capacidade de carga da fundação aumenta com o aumento da densidade do material de preenchimento.

De acordo com Hegde e Sitharam (2014), que realizaram ensaios com três diferentes materiais (agregado, areia e solo local), a performance da geocélula não é fortemente influenciada pelo material de preenchimento.

O preenchimento de geocélulas é dado, como prática geral, através de materiais granulares, como areia ou pedregulho, em virtude de apresentarem melhores propriedades interfaciais e alto controle no processo de enchimento das células (BISWAS e KRISHNA, 2017).

Largura do reforço

Segundo Dash *et al.* (2007), a largura da camada de geocélula atua de modo a interceptar potenciais planos de ruptura que possam ser gerados com a aplicação de um carregamento e melhorando a eficiência da ancoragem no solo. Através de ensaios de placa com sapata retangular sobre solo arenoso, eles observaram que as máximas tensões ocorrem na projeção da linha central da sapata, havendo uma diminuição com o afastamento da linha central.

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 ($b/D = 1,2$). O desempenho do reforço melhora com o aumento de sua largura até um valor próximo de $5,0D$, após este, o aumento é insignificativo.

2.4 Resíduos do beneficiamento de pedras preciosas

2.4.1 Contextualização do setor de pedras, gemas e joias do sul do Brasil

A extração de pedras preciosas no país é realizada, na sua maioria, por garimpeiros em pequeno número por empresas de mineração, localizadas nos Estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Bahia, Goiás, Pará, Tocantins, Paraíba e Piauí. Já as atividades de beneficiamento das pedras, fabricação de obras e artefatos estão concentradas nos Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Rio Grande do Sul, Bahia e Goiás, sendo praticadas, geralmente, por indústrias de pequeno porte (ZANATTA, 2014).

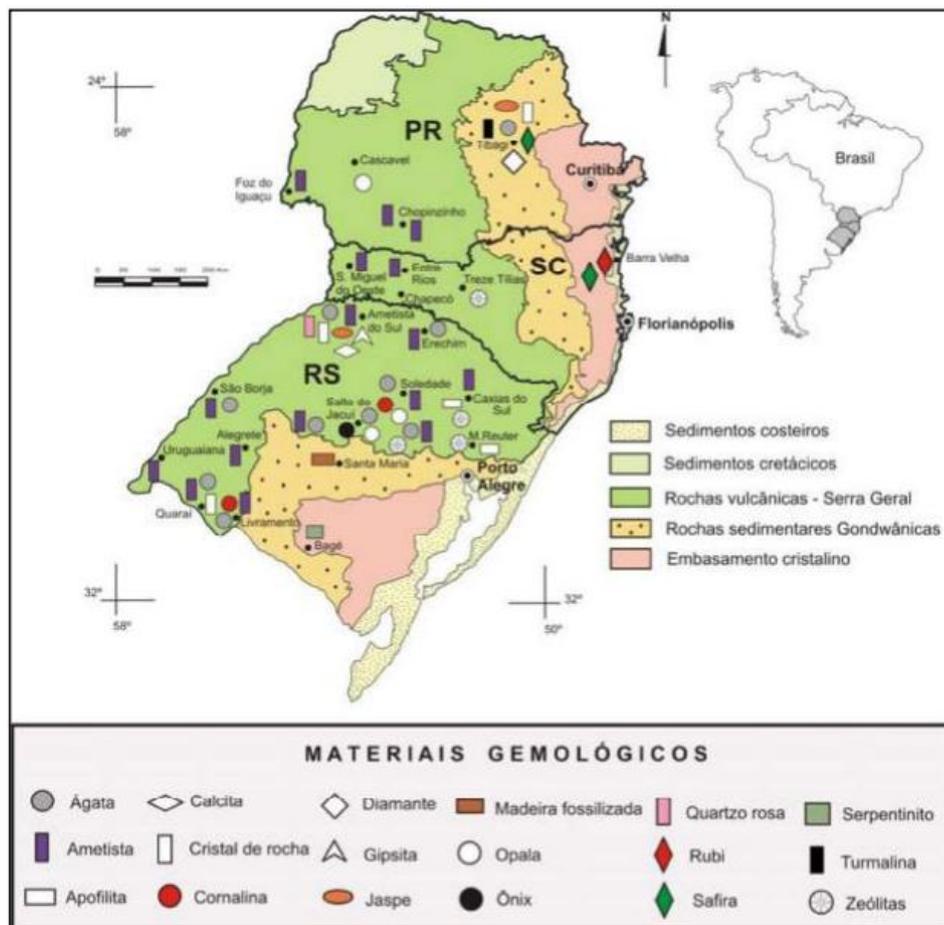
No Rio Grande do Sul, as atividades da cadeia de gemas e joias estão distribuídas em seis regiões com especializações produtivas distintas: extração e beneficiamento de gemas nos distritos minerais de Ametista do Sul (Médio Alto Uruguai), Salto do Jacuí (Alto Jacuí) e Quaraí (Fronteira Oeste); beneficiamento, lapidação e fabricação de artefatos no Alto da Serra do Botucará e Vale do Taquari; e lapidação de gemas e produção de joias e bijuterias na Serra (BATISTI e TATSCH, 2012).

O Estado é considerado o maior produtor mundial de ágata e ametista, em qualidade e volume, cuja extração é de cerca de 400 toneladas por mês, com boa ocorrência em sua metade norte e em parte da região oeste (HARTMANN, 2014). O mapa gemológico da região sul do Brasil está ilustrado na Figura 8.

O município de Soledade, localizado na região norte do Rio Grande do Sul, no Alto da Serra do Botucaraí, é o principal centro de lapidação e de comercialização de gemas do Estado, e recebe o título de Capital das Pedras Preciosas, de acordo com Lei Estadual nº 12.874 de 2007.

Soledade é cidade polo do Arranjo Produtivo Local de Pedras, Gemas e Joias do Estado do Rio Grande do Sul (APL Gaúcho Pedras, Gemas e Joias). O arranjo trata de um conjunto de empresas dos segmentos de extração mineral, produção, comercialização e exportação de produto final. Suas ações são concentradas na região de abrangência da Associação dos Pequenos Pedristas de Soledade (APPESOL) e contam com a atuação em 17 municípios da região (AGDI, 2014). Segundo Costa (2016), a estimativa é de que existam em torno de 180 empresas de diferentes portes instaladas na região atuando no setor de gemas e joias.

Figura 8: Mapa gemológico da região sul do Brasil.



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

Em relação às vendas do APL Gaúcho Pedras, Gemas e Joias, para os produtos relativamente menos elaborados, estas são realizadas, predominantemente, para países

estrangeiros. De acordo com dados coletados através de participantes de oficinas de grupo focal, de 70% a 95% da produção é exportada. O restante é dividido entre vendas com destino a outros Estados brasileiros, entre 5% e 25% do total produzido, e o atendimento da demanda do Rio Grande do Sul, contabilizando de zero a 5%. Esses produtos são exportados para empresas de beneficiamento e grandes atacadistas de fora do arranjo, com destaque para nações como China, Taiwan, Estados Unidos, Alemanha e Itália (STORTI e MAZON, 2011 *apud* COSTA, 2016).

2.4.2 Geração dos resíduos

O setor de pedras preciosas, nos seus diversos processos produtivos (corte, polimento, tingimento, etc.), gera resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas que podem se tornar um problema ambiental quando a gestão não for adequada (THOMÉ *et al.*, 2010).

Alguns rejeitos gerados se apresentam na forma bruta, quando classificados ainda no garimpo e, geralmente, não possuem qualquer contaminação com produtos químicos. Entretanto, os rejeitos oriundos das etapas de corte, lixamento e polimento podem conter óleo diesel (utilizado na lubrificação e refrigeração do processo de corte) e grãos abrasivos que se despreendem das ferramentas (PICOLOTTO, 2013).

Os processos de extração e beneficiamento de gemas geram resíduos sólidos na forma de refugos, peça semiacabadas ou pouco beneficiadas que, por conterem impurezas, defeitos de formação e fabricação, possuem valor comercial baixo. Esses rejeitos são armazenados nos pátios das empresas, resultando em grandes pilhas de material (Ipar *et al.*, 2012), conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Pilha de rejeitos em empresa de pedras preciosas.



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

De acordo com a Lei nº 12305 de 2010, que trata da política nacional de resíduos sólidos, Art. 9º, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Thomé *et al.* (2010) citam que os peças não aproveitadas são, em grande parte, estocadas e posteriormente enviadas para processamento e obtenção de pedras roladas, utilizadas em pavimentos ou como agregados, enquanto o pó de pedra gerado é, parcialmente, reaproveitado para o polimento.

Em 2014, foi desenvolvido o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) para o APL Gaúcho Pedras, Gemas e Joias. O documento descreve e sugere ações relativas ao manejo dos resíduos sólidos gerados nas atividades desenvolvidas pelo setor de beneficiamento e comercialização de pedras, gemas e joias (AGDI, 2014).

Para elaboração do plano, acima mencionado, foi realizado um diagnóstico da situação da geração de resíduos nas empresas integrantes do APL Gaúcho Pedras, Gemas e Joias, onde os resíduos foram identificados, caracterizados, enquadrados conforme os códigos e títulos estabelecidos pelo órgão ambiental estadual (FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – RS), bem como classificados segundo a NBR 10004:2004.

Uma das ações sugeridas no plano é a de reutilização dos resíduos, quando possível, de modo a atribuir nova utilidade a materiais que, na maioria das vezes, são considerados inúteis.

O resíduo de interesse no presente estudo é resultante da rolagem de pedras preciosas, identificado no PGRS como resíduo de pedras sem tingimento, caracterizado como cacos de pedra e pedra rolada e classificados como Classe II-B. De acordo com a norma vigente, essa classe abrange os resíduos sólidos não perigosos e inertes (AGDI, 2014).

Em estudos anteriores, Thomé *et al.* (2002) realizaram a caracterização do resíduo da rolagem de ágatas e ametistas, proveniente de uma empresa de Soledade, abrangendo análise mineralógica do material, ensaios de lixiviação e solubilização. A constituição do mineral foi obtida através de difratogramas de raios X, e teve como resultado uma única fase predominante de quartzo. Quanto à classificação do resíduo frente ao seu potencial poluidor e periculosidade, os pesquisadores observaram elementos-traço lixiviados inferiores ao limite máximo, bem como concentração de metais inferior ao limite máximo permitido.

2.4.3 Utilização dos resíduos na Engenharia Civil

O avanço da sociedade e o desenvolvimento de infraestruturas estão condicionados ao trabalho da indústria da construção que, por sua vez, apresenta uma demanda crescente de matérias para que sejam produzidos agregados, cimentos, concreto, asfalto, etc. A extração desses materiais provém, na sua grande maioria, de fontes primárias, o que contribui negativamente com manejo dos recursos naturais.

Em contrapartida, está o fato de que muitos dos resíduos oriundos do processamento de matéria-prima ou subprodutos industriais são potencialmente capazes de satisfazer uma parte da demanda por agregados. Com isso, a reutilização desses materiais permite que os mesmos deixem de ser apenas resíduos e passem a desempenhar uma função importante no âmbito da construção, de forma a cooperar com o meio ambiente.

Tomando como exemplo obras de infraestruturas rodoviárias e ferroviárias, se a capacidade de carga do substrato for baixa, pode haver a substituição de parte ou de toda a camada por um material que lhe confira melhores características de resistência, demandando grandes volumes de material.

As obras de engenharia devem ser projetadas visando minimizar o esgotamento dos recursos, o consumo de energia, a degradação e o impacto ambiental. Sendo assim, a utilização de resíduos ou materiais alternativos em substituição aos de origem natural é uma forma de alcançar esses objetivos. Além do atendimento às necessidades técnicas, a decisão de utilizar tais materiais se baseia em fatores econômicos e nos benefícios ambientais (SARSBY, 2013).

O autor ainda comenta que muitos resíduos apresentam boa capacidade de carga quando compactados, entretanto, a viabilidade de sua utilização depende, também, de questões ambientais e dos custos de transporte. Quando o resíduo é gerado localmente, sua utilização é altamente favorável, também, do ponto de vista econômico, pois além de permitir uma destinação correta do material residual, há uma redução dos custos de transporte para sua disposição final.

Nos estudos que abordam a interação entre o solo e os geossintéticos de reforço, os granulares são amplamente considerados, uma vez que eles são, usualmente, utilizados como materiais de preenchimento. A utilização de solos granulares como componentes de um sistema de reforço resulta na melhoria da capacidade de suporte da fundação (LOPES, 2002).

Conforme comentado no item 2.3.5, no que diz respeito ao material de preenchimento das geocélulas, os materiais granulares são preferíveis devido às melhores condições de atrito desenvolvido entre essas partículas e as paredes da célula.

Em vista disso e do fato de os resíduos do processamento de pedras preciosas, por meio da técnica de rolagem, apresentarem caráter granular, sua utilização como material de preenchimento de geocélulas de reforço é uma das possibilidades de reutilização desse resíduo.

Vários estudos visando a reutilização desse resíduo em obras de engenharia, bem como o desenvolvimento de novos materiais, têm sido desenvolvidos recentemente, podendo citar os trabalhos realizados por Betat *et al.* (2009), Dalla Rosa *et al.* (2014), Floss *et al.* (2016), Miguel *et al.* (2016), Baruffi *et al.* (2016), entre outros.

Betat *et al.* (2009) pesquisaram sobre a produção de concretos utilizando resíduos do beneficiamento de ágata em sua composição. Dalla Rosa *et al.* (2014) analisaram a viabilidade técnica da aplicação do resíduo da rolagem de pedras preciosas na pavimentação, através da construção de um trecho experimental aplicando uma mistura de resíduo/cal como material de base. Floss *et al.* (2016) realizaram pesquisas sobre o comportamento mecânico de resíduos do processamento de ágata artificialmente cimentados, como técnica de melhoramento de solos. Já Miguel *et al.* (2016) e Baruffi *et al.* (2016) conduziram estudos sobre a utilização dos resíduos do beneficiamento de pedras preciosas como material de preenchimento de geocélulas para reforço de solos.

As pesquisas, acima mencionadas, apresentaram indicativos de viabilidade técnica quanto à reutilização dos resíduos como material alternativo na engenharia civil, de forma a incentivar a continuidade de pesquisas acerca de seus benefícios.

2.5 Provas de carga estática

No Brasil, os ensaios de placa são regidos pela ABNT NBR 6489:1984, que normatiza as provas de carga direta, fixando as condições que devem ser atendidas durante os testes.

Os testes de placa simulam a solicitação gerada por uma sapata no solo, tendo como objetivo fornecer parâmetros para a avaliação do comportamento carga-recalque e estimar as características de capacidade de carga de um elemento de fundação, através de medições constantes de tensão e deslocamento no substrato.

As provas de carga em placa geram informações sobre a camada de solo de apoio das sapatas, localizada imediatamente abaixo da placa, não abrangendo o comportamento das tensões em camadas compressíveis mais profundas. De acordo com Terzaghi e Peck (1967), os resultados dos ensaios de placa somente representam as características do solo até aproximadamente dois diâmetros abaixo da placa.

A realização do ensaio consiste, basicamente, na aplicação de esforços estáticos crescentes (também chamados de incrementos de carga) e no registro dos deslocamentos correspondentes. O dispositivo de aplicação de carga é constituído por macacos hidráulicos alimentados por bombas elétricas manuais, atuando contra um sistema de reação estável. O conjunto deve ser projetado, montado e utilizado de forma que a carga aplicada atue na direção desejada, sem produzir choques ou vibrações.

Em vista disso, os ensaios de placa têm sido largamente utilizados em pesquisas sobre o emprego de geocélulas de reforço, tornando possível a obtenção de parâmetros importantes para avaliação de seu comportamento frente a uma determinada solicitação, atuando como elemento conjunto de um sistema de fundação.

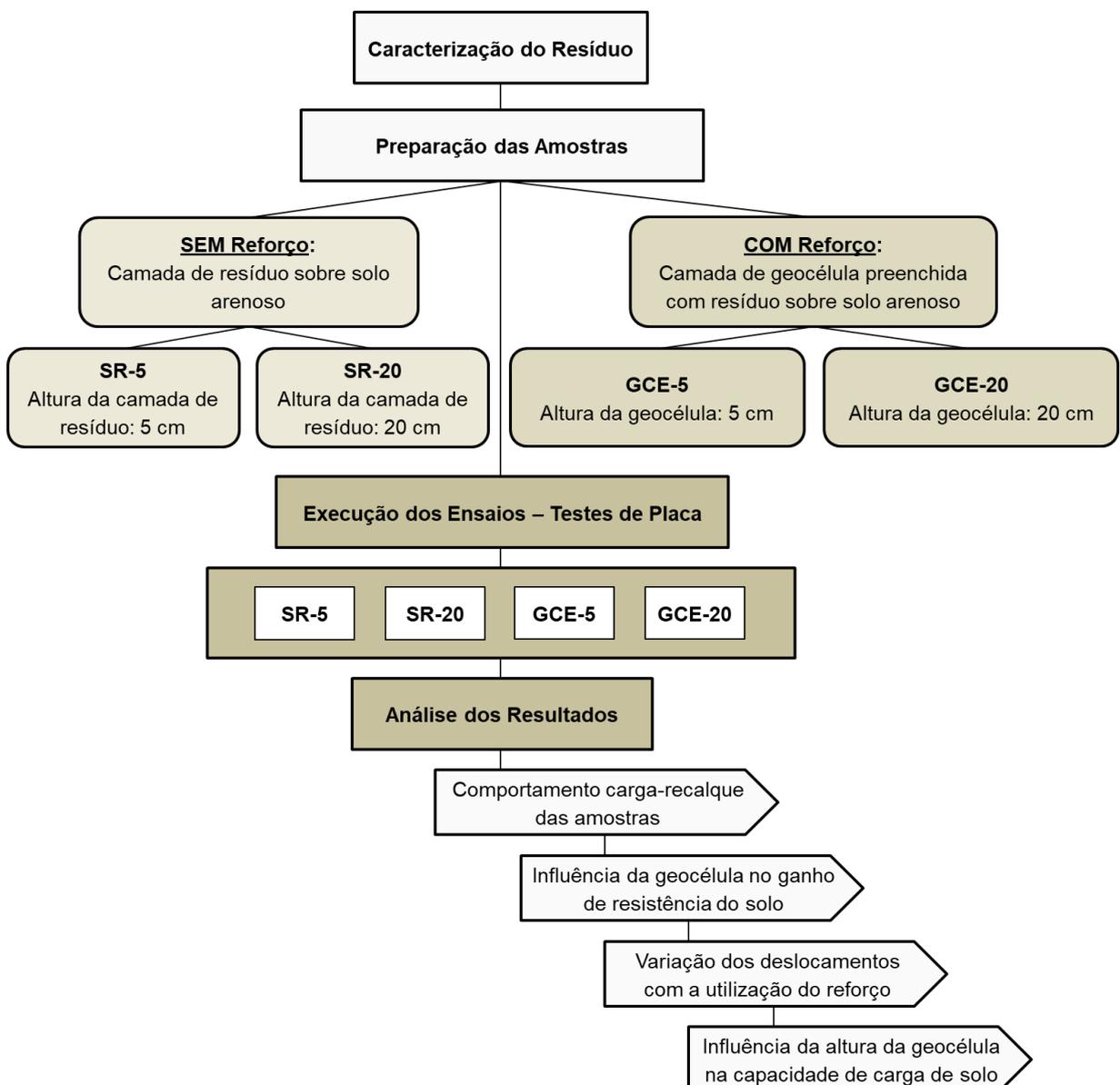
Na Universidade de Passo Fundo, diversos estudos foram desenvolvidos através de ensaios de placa. Tem-se como exemplo os trabalhos de Casagrande (2005) e Donato (2007), que estudaram o comportamento de solos reforçados com fibras, bem como os conduzidos por Miguel (2016) e Baruffi (2017), que realizaram provas de carga em solos reforçados com geocélula.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Delineamento da pesquisa

O estudo buscou analisar a influência de dois sistemas de geocélulas preenchidas com resíduos da rolagem de pedras preciosas no comportamento de um solo arenoso, através de ensaios de placa. As etapas do programa experimental proposto estão detalhadamente descritas neste capítulo, bem como os materiais empregados, metodologias para preparação dos ensaios e equipamentos utilizados. A Figura 10 apresenta o fluxograma do estudo.

Figura 10: Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autor (2018).

3.2 Materiais

3.2.1 Areia

Para compor o solo de fundação, foi utilizada uma amostra de areia proveniente do município de Osório/RS. A escolha deste material está embasada no fato de que o mesmo já foi objeto de estudo de diversos pesquisadores como, por exemplo, Consoli *et al.* (2010), Consoli *et al.* (2013), Donato (2007) e Miguel (2016), resultando em um conhecimento bastante consolidado acerca de suas características geotécnicas. Esta areia é caracterizada por ser uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme.

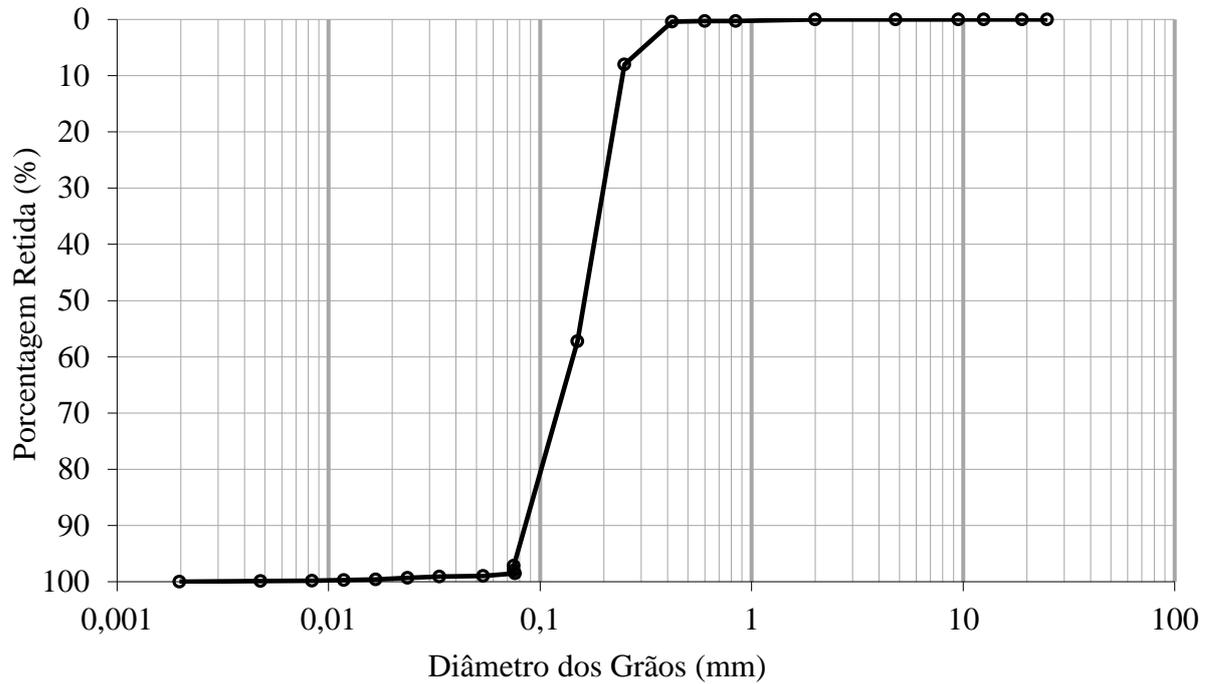
Uma amostra da areia pode ser vista na Figura 11. A curva granulométrica e os índices físicos do material estão representados na Figura 12 e na Tabela 1, respectivamente.

Figura 11: Amostra da areia.



Fonte: Autor (2018).

Figura 12: Curva granulométrica da areia.



Fonte: Donato (2007).

Tabela 1: Caracterização geotécnica da areia.

Parâmetro	Valor
Peso específico real dos grãos (γ_s)	26,30 kN/m ³
Coefficiente de uniformidade (C_u)	2,10
Coefficiente de curvatura (C_c)	1,00
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,09 mm
Diâmetro médio (D_{50})	0,16 mm
Índice de vazios mínimo ($e_{mín.}$)	0,70
Índice de vazios máximo ($e_{máx.}$)	0,91

Fonte: Adaptado de Miguel (2016) e Donato (2007).

3.2.2 Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas

O resíduo utilizado na pesquisa é resultante do processo de rolagem de pedras preciosas e provém de empresas do setor de gemas e joias do município de Soledade/RS. Conforme observado por Biswas *et al.* (2012), materiais granulares como areia e pedregulho são os mais

indicados para preenchimento de geocélulas. Sendo assim, no presente trabalho, optou-se por realizar a retirada do material mais fino contido na amostra bruta. Foram estudados os resíduos granulares passantes na peneira #3/8 (abertura de 9,5 mm) e retidos na peneira #40 (abertura de 0,42 mm), obtidos através do processo de peneiramento do resíduo bruto. Uma amostra do resíduo do estudo está ilustrada na Figura 13.

Figura 13: Resíduo da rolagem de pedras preciosas.



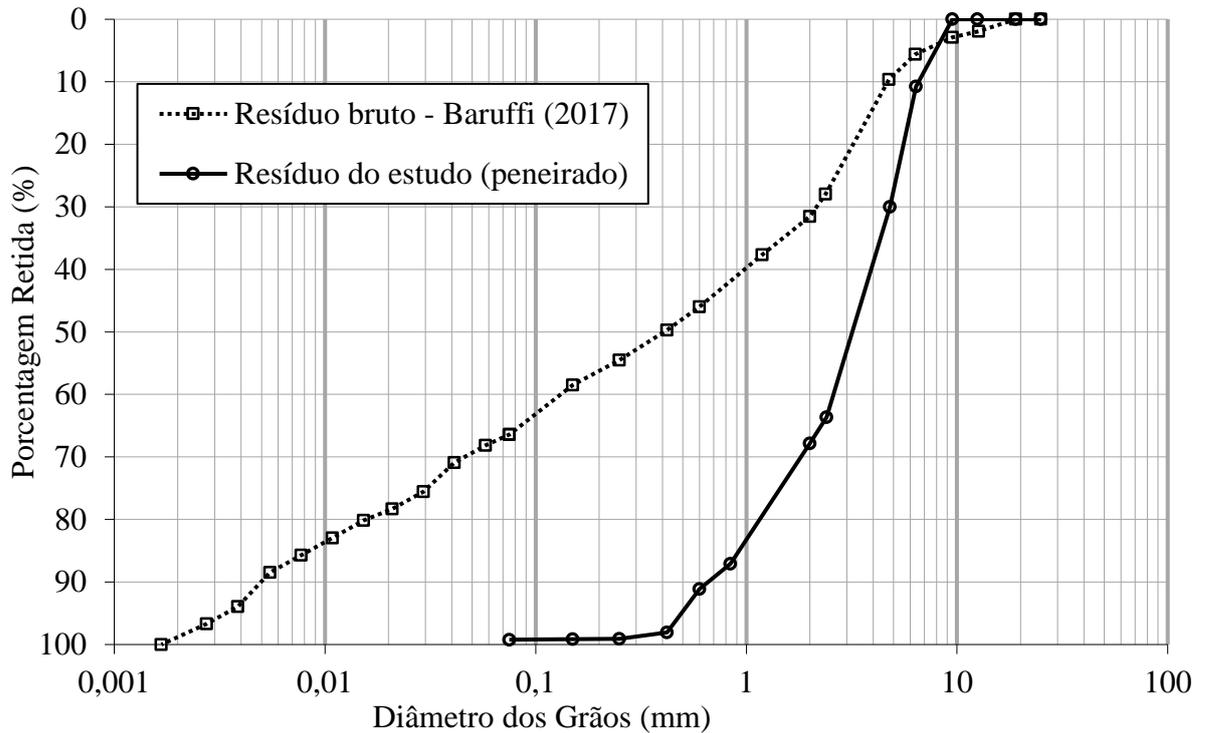
Fonte: Autor (2018).

Este agregado foi utilizado para compor a camada sobrejacente ao solo arenoso de base no decorrer dos ensaios de placa. Nesse sentido, foram testadas duas configurações de resíduo: (a) o resíduo como material de preenchimento de geocélulas (camada de resíduo reforçado) e (b) apenas uma camada de resíduo sem reforço, para avaliação do comportamento da geocélula. Essas configurações estão ilustradas na Figura 19.

Foram realizados os ensaios de caracterização granulométrica e índices físicos, cujos resultados estão apresentados na Figura 14 e Tabela 2, respectivamente. Trata-se de uma areia bem graduada, classificada através do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

De acordo com AGDI (2014), no Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) para o APL Gaúcho Pedras, Gemas e Joias, o resíduo é identificado como resíduo de pedras sem tingimento e classificados como Classe II-B, que abrange os resíduos sólidos não perigosos e inertes, conforme norma vigente NBR 10004:2004. Quanto à classificação do resíduo frente ao seu potencial poluidor e periculosidade, Thomé *et al.* (2002) observaram elementos-traço lixiviados inferiores ao limite máximo, bem como concentração de metais inferior ao limite máximo permitido.

Figura 14: Curva granulométrica do resíduo.



Fonte: Autor (2018).

Tabela 2: Caracterização geotécnica do resíduo.

Parâmetro	Valor
Peso específico real dos grãos (γ_s)	25,94 kN/m ³
Coefficiente de uniformidade (C_u)	6,15
Coefficiente de curvatura (C_c)	1,25
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,65 mm
Diâmetro médio (D_{50})	3,20 mm
Índice de vazios mínimo ($e_{\text{mín.}}$)	0,40
Índice de vazios máximo ($e_{\text{máx.}}$)	0,68

Fonte: Autor (2018).

3.2.3 Geocélulas

As geocélulas foram parte integrante de um sistema de reforço de solo, constituído de uma camada de geocélula preenchida com resíduo de pedras preciosas. As geocélulas utilizadas

são conhecidas como *FortCell*, fabricadas pela empresa Ober Geossintéticos. Tratam-se de elementos 100% polipropileno estruturados em formato diamante, com largura da célula (d) constante e altura da célula (h) variável. Foram testadas duas alturas de geocélulas: $h = 5$ cm e $h = 20$ cm, ilustradas na Figura 15. As propriedades do material estão listadas na Tabela 3.

Figura 15: Geocélulas utilizadas (a) $h = 5$ cm (b) $h = 20$ cm.



Fonte: Autor (2018).

Tabela 3: Propriedades das geocélulas.

Propriedades	Altura da célula $h = 5$ cm	Altura da célula $h = 20$ cm
Nome comercial	FC 02/30	FC 08/30
Matéria-prima	Polipropileno	Polipropileno
Dimensão média da célula (cm)	27 x 27	27 x 27
Área nominal da célula (cm ²)	729	729
Dimensão da peça expandida (cm)	mín. 3,00 x 2,60 / máx. 6,00 x 2,60	
Área da peça expandida (cm ²)	mín. 7,80 / máx. 15,60	
Peso da peça (kg)	1,7 - 3,4	6,6 - 13,4
Resistência transversal das juntas (N) - NBR 13134	900	3700

Fonte: Adaptado de Ober S.A. (2018).

3.3 Ensaios de placa

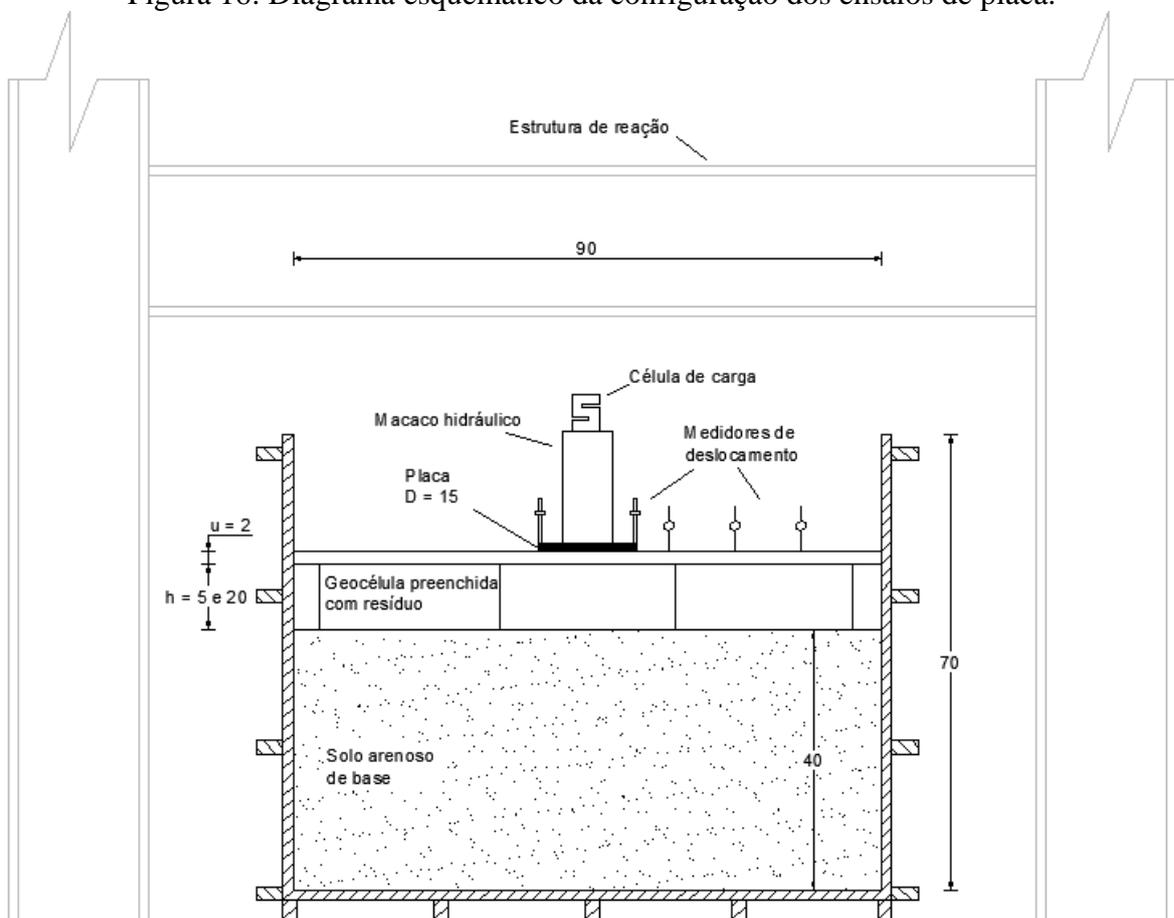
Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Passo Fundo, com base em normatização técnica e estudos de referência.

3.3.1 Equipamentos

Os ensaios de placa foram realizados sobre uma caixa de madeira para acomodação das camadas de solo e resíduo. A caixa apresenta de dimensões 90 x 90 x 70 cm (largura, comprimento e altura, respectivamente). Tais dimensões estão relacionadas com o diâmetro da placa, de forma a permitir, do ponto de vista prático, a condução dos ensaios sem que aja a interferência das paredes e do fundo da caixa nos resultados. Pokharel *et al.* (2010) avaliaram o efeito de escala do tamanho da caixa, testando duas configurações de caixa, uma com área igual a 80 x 80 cm e a outra com 60 x 60 cm. Foram realizados ensaios com placa circular de 15 cm de diâmetro sobre seções não reforçadas e reforçadas, cujos resultados não apresentaram diferenças significativas, de forma que não houve influência das dimensões das caixas.

A transmissão dos esforços ao solo foi dada através de uma placa rígida de aço, com 15 cm de diâmetro (D) e 12 mm de espessura, simulando a ação de uma sapata circular sobre o solo de fundação. A placa foi locada no centro da caixa. O diagrama esquemático e fotografias da configuração dos ensaios de placa estão ilustrados nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

Figura 16: Diagrama esquemático da configuração dos ensaios de placa.



Fonte: Autor (2018).

Figura 17: Configuração completa dos ensaios de placa.



Fonte: Autor (2018).

O sistema de reação foi composto por um pórtico de perfis metálicos do tipo “I” com espessura aproximada de 12 mm e carga de trabalho de até 250 kN, desenvolvido pelo Laboratório de Ensino de Sistemas Estruturais (LESE) da Universidade de Passo Fundo.

A aplicação de carga foi através de um macaco hidráulico com capacidade de carga de 300 kN, acoplado a uma bomba manual. Entre o macaco e o pórtico, foi disposta uma célula de carga com capacidade de 50 kN para medição dos carregamentos.

O deslocamento da placa foi monitorado através de duas réguas resistivas com curso de 55 mm e 0,01 mm de precisão, digitalizados por uma placa conversora A/D (analogico/digital).

A placa possui 16 canais de entradas analógicas e configurações de ganho por hardware de 1x, 10x e 100x, que podem trabalhar em conjunto com os ganhos disponibilizados por software de 1x a 5000x. Para os deslocamentos externos, foram instalados três deflectômetros digitais na superfície do solo ao longo da largura da caixa de ensaio.

3.3.2 Processo de mistura e construção das camadas

3.3.2.1 Preparação do solo de base

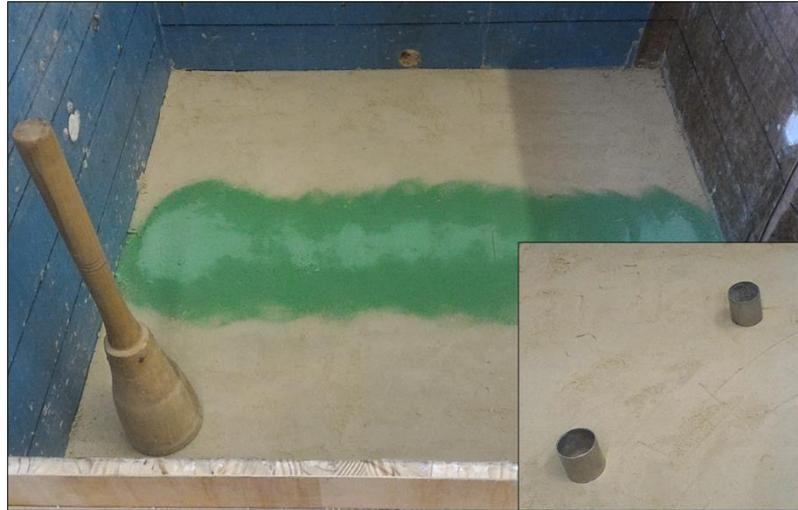
Para moldagem da caixa de acomodação, foram fixadas a umidade (w) e a densidade relativa (D_r) da areia como sendo, respectivamente, 10% e 50%. Inicialmente, foi observada a umidade em que o material se encontrava. Quando acima do limite, o material era submetido ao processo de secagem ao ar. Apresentando-se com umidade abaixo da estabelecida, era adicionada água proveniente do abastecimento público até atingir a umidade desejada. Após, o controle foi através do método da frigideira, ajustando a umidade de acordo com a necessidade.

A preparação da caixa de ensaio iniciou com espalhamento da areia homogeneizada (através de betoneira de 260 litros) em uma espessura total de 40 cm, moldada e compactada manualmente por meio de um soquete, em camadas de 10 cm. Para que garantir as premissas de teste, o controle da densidade e umidade da mistura se deu através da extração de cilindros cortantes no solo em diferentes locais da caixa e pelo método da frigideira. Tal controle foi realizado para cada uma das camadas compactadas.

A umidade foi monitorada com variação próxima a 10%. Após a compactação, as camadas eram cobertas com lona plástica a fim de evitar perdas de umidade até o momento da execução do ensaio. A diferença máxima nas densidades medidas em diversos locais da caixa de teste foi da ordem de 2%.

Ao fim de cada camada, foi disposta uma camada extremamente fina de areia tingida com corante para posterior visualização das deformações das camadas de solo frente ao carregamento imposto. A Figura 18 apresenta uma camada executada e os equipamentos utilizados para compactação e controle da mesma.

Figura 18: Moldagem das camadas de areia.



Fonte: Autor (2018).

3.3.2.2 Preparação da camada de resíduo

A camada de reforço executada sobre o solo arenoso foi composta por geocélula preenchida com resíduo de pedras preciosas. A fim de quantificar o aumento da resistência devido à inserção da geocélula, também foram ensaiadas configurações de resíduo sem reforço.

Foram confeccionadas quatro amostras de resíduo, em duas espessuras distintas. Duas amostras referentes ao sistema sem reforço celular (apenas uma camada de resíduo sobre o solo de base), nas espessuras de 5 cm e 20 cm. As outras duas amostras fizeram parte do sistema de reforço com geocélula, atuando como material de preenchimento, também nas espessuras 5 cm e 20 cm. As geocélulas foram instaladas de modo que a transmissão dos esforços ocorresse no centro de uma das células.

As espessuras das camadas de resíduo foram de igual valor às alturas das geocélulas. Sobre a camada de reforço, foi executado um recobrimento (u) com resíduo na espessura de 2 cm, obtendo razão entre profundidade da disposição do reforço e diâmetro da placa $u/D = 0,13$. Dash *et al.* (2001) tiveram bons resultados com razões de u/D entre 0 e 0,25, sugerindo uma relação $u/D = 0,1$.

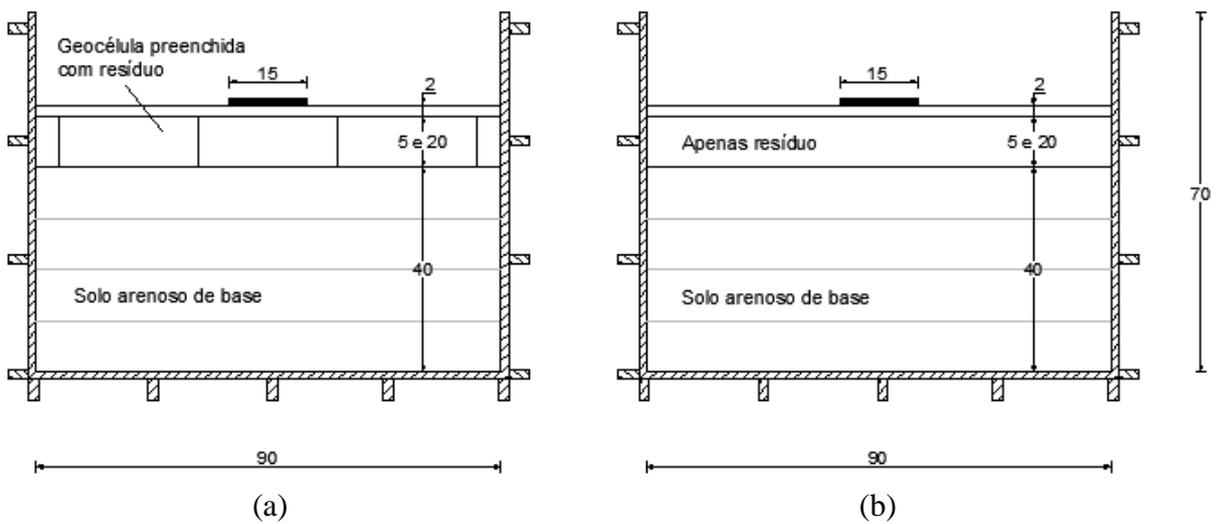
Para que não houvesse divergência nas alturas finais de teste, o recobrimento foi realizado para as camadas com e sem geocélula. Na Figura 19, estão ilustradas as configurações das camadas de resíduo sobre o solo de base.

As amostras foram moldadas e compactadas manualmente, em camada única. A densidade do material foi controlada geometricamente, através da verificação das dimensões da

camada. Como a fração granulométrica utilizada do resíduo de pedras preciosas não contém finos, ele não é sensível à umidade. Assim, foi utilizado o resíduo seco com densidade relativa (D_r) igual a 50%.

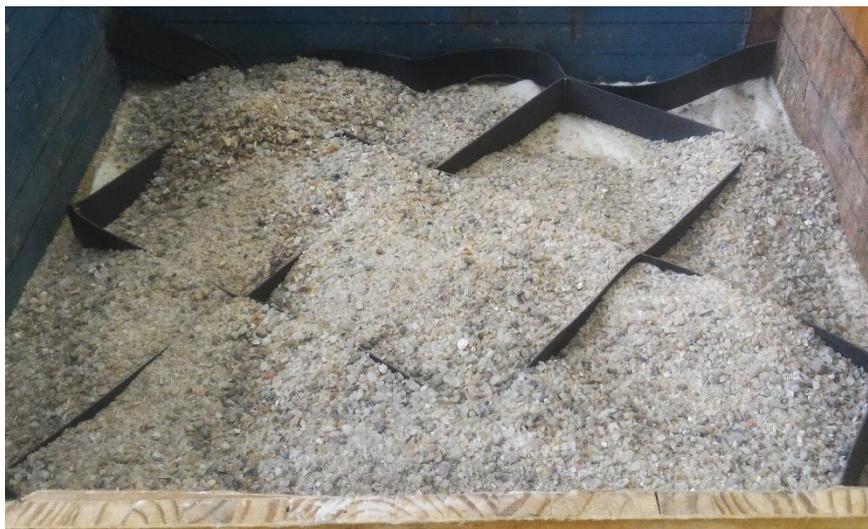
A fim de garantir a separação entre a areia e o resíduo, foi instalado um geotêxtil na interface das camadas, apenas com essa finalidade. A Figura 20 apresenta uma camada de resíduo reforçado em execução.

Figura 19: Configuração das camadas de resíduo sobre o solo de base (a) Reforço de geocélula preenchida com resíduo e (b) Apenas resíduo.



Fonte: Autor (2018).

Figura 20: Moldagem da camada de resíduo.



Fonte: Autor (2018).

3.3.3 Método de ensaio

Após a confecção das amostras, o sistema de reação e transmissão de carga foi instalado para dar início às provas de carga.

A execução do ensaio de placa seguiu as instruções da ABNT NBR 6489:1984, que normatiza as provas de carga diretas. O ensaio foi realizado com carregamento lento, com aplicação de cargas sucessivas por meio de incrementos. Um novo estágio de carregamento era realizado após verificação do critério de estabilização dos recalques resultantes do último incremento, com tolerância máxima de 5% do recalque total neste estágio, entre leituras sucessivas. A norma estabelece como critério de paralisação do ensaio a verificação de um recalque de 25 mm ou, então, quando atingido o dobro da carga máxima admitida para o solo.

A carga transferida para a sapata foi monitorada pela célula de carga disposta entre o sistema de reação e o macaco hidráulico. Já o sistema de medição dos deslocamentos foi composto por duas réguas resistivas, R1 e R2, locadas em pontos opostos ao diâmetro da placa, a fim de verificar o assentamento da mesma. Considerando a distância do eixo da placa (x) e o diâmetro da placa (D), as réguas foram locadas na posição $x/D = 0,5$. Com o intuito de verificar possíveis levantamentos ou recalques da superfície do solo ao entorno da placa, foram utilizados três deflectômetros digitais, D1, D2 e D3, dispostos a 12,5 cm ($x/D = 0,83$), 22,5 cm ($x/D = 1,50$) e 32,5 cm ($x/D = 2,17$) do eixo da placa. O posicionamento dos dispositivos pode ser visto na Figura 21.

O deslocamento da placa (s) e o deslocamento da superfície (δ) foram normalizados pelo diâmetro da placa, expressando os resultados no formato adimensional como s/D (%) e δ/D (%). Em todos os gráficos gerados, os recalques são apresentados com sinal positivo e a elevação do solo com sinal negativo. Os ensaios foram conduzidos até atingir um recalque máximo limitado em 25 mm ($s/D = 17\%$).

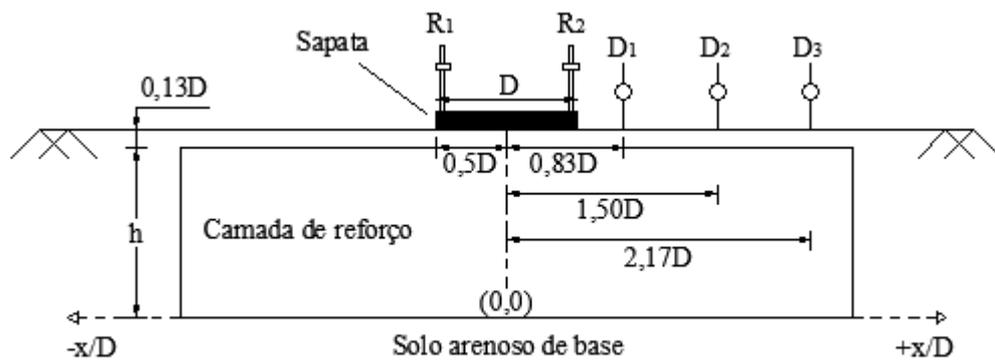
Ao final de cada ensaio, a caixa foi aberta em uma de suas laterais, onde foi possível observar a deformação ocorrida em cada camada, possibilitada pela aplicação da película arenosa de corante. Essa análise visual teve como objetivo complementar as informações obtidas pelos instrumentos de medição de pressão e deslocamento, para posterior análise dos dados.

3.4 Planejamento experimental

Os experimentos deste estudo foram planejados com o objetivo de comprovar os benefícios da utilização de geocélula. O programa experimental consistiu na variação da altura do reforço e na variação da camada de resíduo (com ou sem reforço).

Dessa forma, foram impostas variações na altura das geocélulas e, conseqüentemente, na espessura das camadas de resíduo, pois este foi utilizado como material de preenchimento. Para cada espessura, houve a inserção ou não do reforço. A geometria da fundação e os parâmetros testados estão ilustrados na Figura 21.

Figura 21: Geometria da fundação.



Fonte: Autor (2018).

No total, foram executadas quatro provas de carga, conforme planejamento experimental disposto na Tabela 4. As amostras se constituem do solo arenoso de base acrescido de uma camada de resíduo sobrejacente. As amostras SR-5 e SR-20 representam ensaios com camada de resíduo não reforçada nas alturas 5 cm e 20 cm, respectivamente. Já os ensaios denominados GCE-5 e GCE-20 foram realizados com o reforço de geocélula nas camadas de resíduo com alturas 5 cm e 20 cm, respectivamente.

A fim de avaliar a utilização desses sistemas como reforço do solo arenoso apresentado, o ensaio de referência, também chamado de ensaio branco (EB), foi realizado por Miguel (2016). O experimento consistiu de uma prova de carga estática sobre o mesmo solo arenoso utilizado neste estudo, em condições físicas idênticas.

Os ensaios foram realizados mantendo constantes a umidade (w) e densidade relativa (D_r) da areia e resíduo, o diâmetro da placa (D), a abertura da célula (d), a largura do reforço (b) e a profundidade de disposição do reforço (u). Os parâmetros variáveis dos ensaios foram a

altura da geocélula (h), 5 cm e 20 cm, e a camada de resíduo, que variou entre a utilização ou não do reforço.

A descrição completa da série de testes realizada está sintetizada na Tabela 4. Todos os parâmetros geométricos foram normalizados em função do diâmetro da placa e estão expressos na forma adimensional.

A normalização dos parâmetros permite uma comparação entre ensaios sem influência das variáveis geométricas relacionadas ao comportamento carga-recalque dos sistemas. Dessa forma, as alturas iguais a 5 cm e 20 cm passam a ser apresentadas também em função do diâmetro da placa, como $h/D = 0,33$ e $h/D = 1,33$, respectivamente.

Tabela 4: Plano experimental dos ensaios de placa.

Ensaio	Reforço	Parâmetros de teste	
		Variável	Constante
SR-5	-	SEM reforço, $h/D = 0,33$	$w_{areia} = 10\%$, $w_{resíduo} = 0\%$, $Dr = 50\%$, $d/D = 1,8$, $b/D = 6,0$, $u/D = 0,13$
SR-20	-	SEM reforço, $h/D = 1,33$	
GCE-5	Geocélula	COM reforço, $h/D = 0,33$	
GCE-20	Geocélula	COM reforço, $h/D = 1,33$	

Fonte: Autor (2018).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, os resultados dos ensaios de placa, realizados conforme o plano experimental proposto, serão apresentados e discutidos. Primeiramente, são apresentadas as curvas tensão-deslocamento do solo não reforçado, bem como os deslocamentos na superfície. Após, são apresentados os resultados e análises dos ensaios reforçados com geocélula. Na sequência, é discutido acerca dos mecanismos de ruptura observados e exumação dos ensaios. Uma análise global é apresentada no final deste capítulo, comparando os ensaios realizados e avaliando seus comportamentos.

4.2 Ensaios sem geocélula

4.2.1 Camada de resíduo com 5 cm

Na Figura 22, estão apresentadas as curvas tensão-deslocamento registradas na placa para o ensaio sobre camada de resíduo não reforçada com espessura igual a 5 cm e para o ensaio de referência realizado no solo arenoso. O ensaio de referência, também chamado de ensaio branco (EB), foi realizado por Miguel (2016), cujos materiais e métodos foram os mesmos adotados neste trabalho.

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 ruptura do solo. 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.

É observado, na Figura 22, que ao ser disposta a camada de resíduo sobre o solo arenoso, a resistência deste é reduzida. Dessa forma, sua utilização sobre o solo arenoso conduziu a resultados de capacidade de carga inferiores aos obtidos no ensaio de referência.

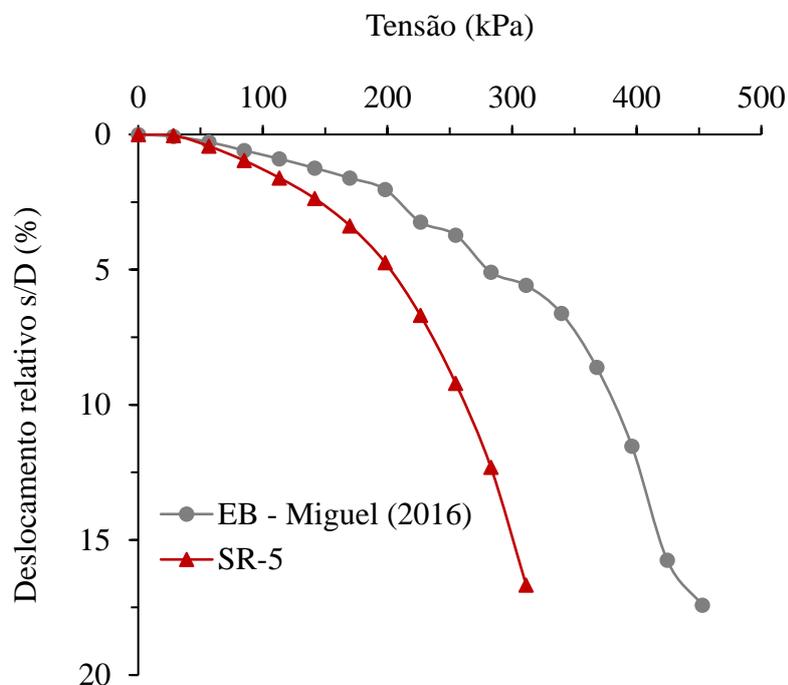
A Figura 23 apresenta a variação do deslocamento da superfície em relação ao recalque da placa para as distâncias (x/D) iguais a 0,83, 1,50 e 2,17. É observada a elevação da superfície do solo conforme o aumento dos recalques na placa. Isso ocorre porque o solo não reforçado se move livremente em resposta a um dado carregamento.

Já as Figuras 24 e 25 ilustram os perfis de deslocamento da superfície, lidas em cada ponto para diferentes níveis de recalque da placa. Como as leituras são feitas para cada incremento de carga, não é possível apresentar esses resultados em intervalos regulares de recalques. Na Figura 24, são apresentadas tanto os deslocamentos ocorridos na placa quanto na superfície. Mesmo se tratando de valores baixos, os deslocamentos da superfície externa à placa podem ser vistos com clareza na Figura 25.

Na Figura 24, pode ser vista a progressão dos recalques ou elevações para cada incremento de carga, expressos pelos recalques normalizados. Esse tipo de gráfico permite observar o sentido das deformações, de modo a verificar o recalque diferencial e rotação sofrido pela placa. Em cargas mais elevadas, uma pequena alteração na densidade da camada é suficiente para causar um recalque diferencial. De acordo com Hedge e Sitharam (2014), a inclinação da placa é um fenômeno comum em testes de laboratório em pequena escala.

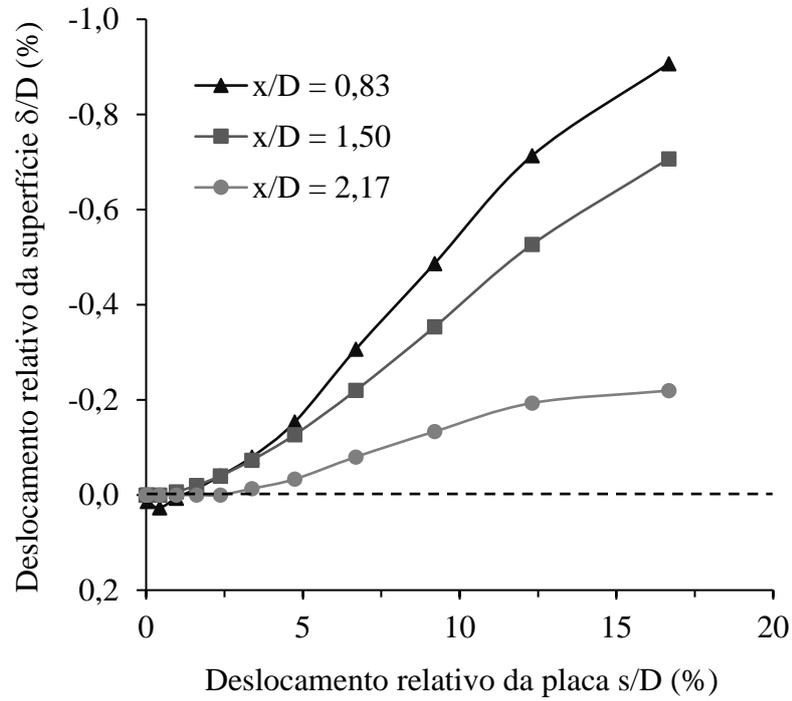
Através dos deslocamentos apresentados na Figura 25, além de reforçar o que foi evidenciado em relação ao aumento da elevação da superfície com o aumento do deslocamento da placa, é observado que os deslocamentos da superfície são maiores quanto mais próximo da placa.

Figura 22: Curva tensão-deslocamento do ensaio sem reforço SR-5.



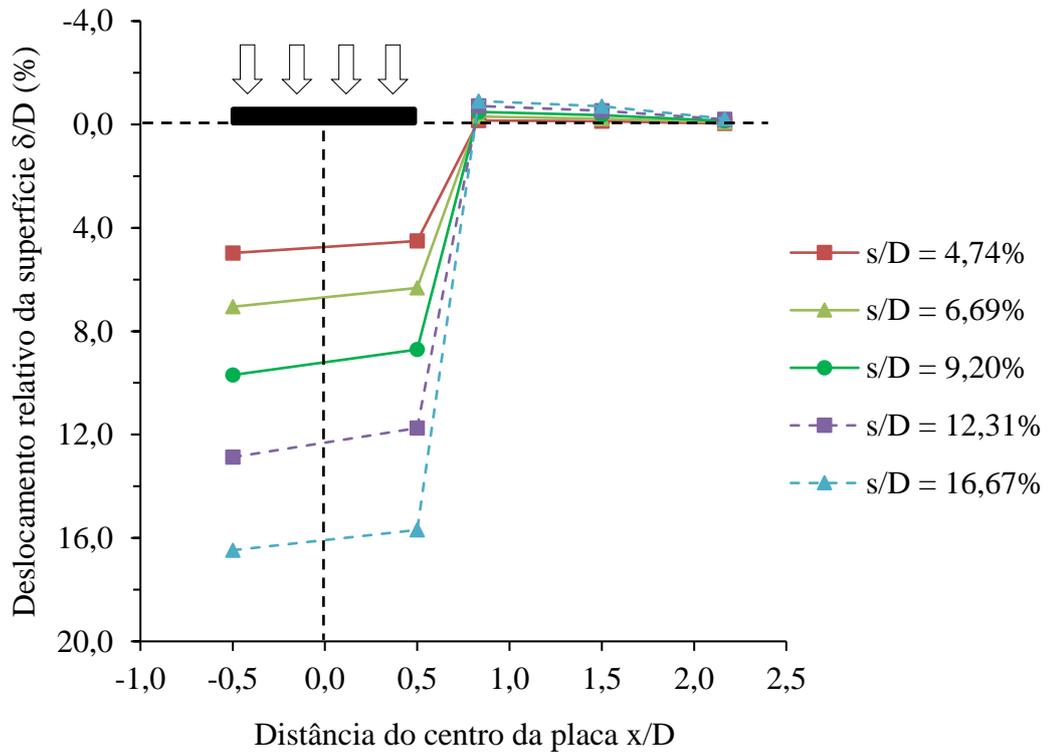
Fonte: Autor (2018).

Figura 23: Variação do deslocamento da superfície com o recalque da placa – Ensaio SR-5.



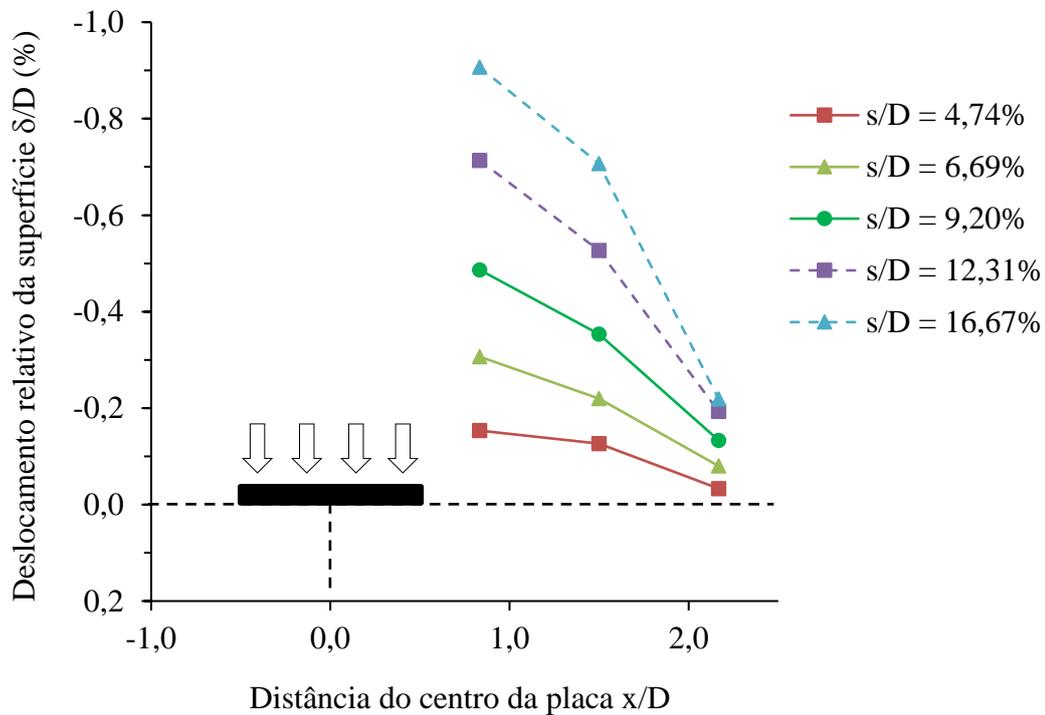
Fonte: Autor (2018).

Figura 24: Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR-5.



Fonte: Autor (2018).

Figura 25: Perfil de deslocamento da superfície externa à placa – Ensaio SR-5.



Fonte: Autor (2018).

4.2.2 Camada de resíduo com 20 cm

A Figura 26 mostra comportamento tensão-deslocamento referente ao ensaio sobre camada de resíduo não reforçada com espessura igual a 20 cm, sendo também comparado com o ensaio de referência realizado no solo de base.

Semelhante ao ocorrido no ensaio realizado sobre a camada de resíduo não reforçado com 5 cm de espessura, a Figura 26 evidencia que a resistência do solo arenoso também reduz com a disposição de uma camada sobrejacente de resíduo com 20 cm de espessura.

A Figura 27 apresenta a variação do deslocamento da superfície em relação ao recalque da placa para as distâncias (x/D) iguais a 0,83, 1,50 e 2,17. Observa-se que no início do carregamento houve recalque do solo a uma distância $x/D = 0,83$, seguido de uma elevação da superfície com o aumento dos recalques na placa. Os deslocamentos lidos nas distâncias $x/D = 1,50$ e $x/D = 2,17$ foram de elevação. O recalque da superfície, observado inicialmente, pode estar relacionado com problemas na compactação do solo nessa região.

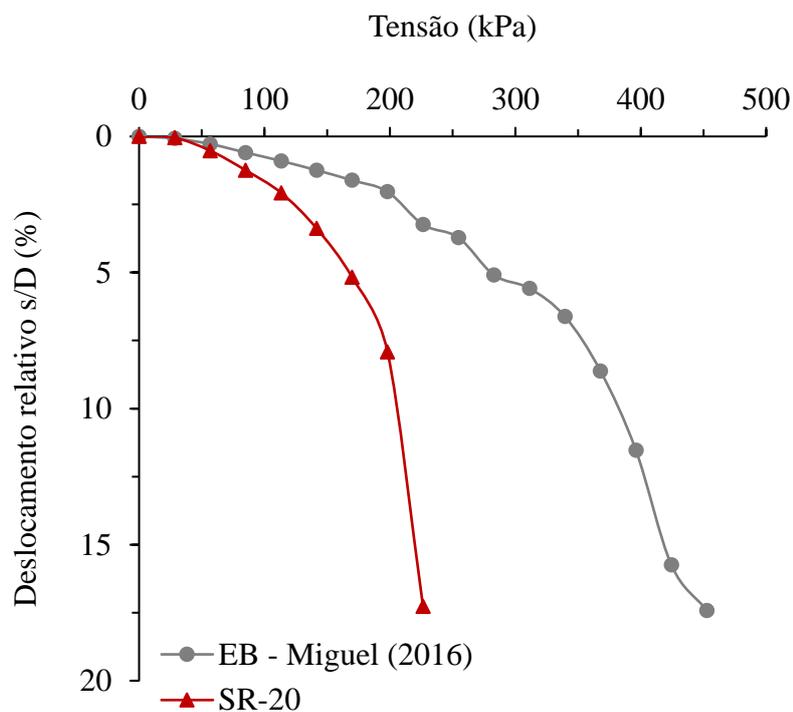
O perfil de deslocamento da superfície em diferentes níveis de recalques da placa pode ser visto nas Figuras 28 e 29. Observam-se as maiores elevações da superfície a uma distância

$x/D = 1,50$, devido ao recalque inicial apresentado em $x/D = 0,83$. Após aplicado o último incremento que carga, que levou à ruptura do solo, ocorre uma significativa rotação da placa.

Em comparação aos deslocamentos, foram observados maiores deslocamentos neste ensaio (SR-20) do que no ensaio sobre camada de resíduo com 5 cm (SR-5). Isso pode estar relacionado à problemas de compactação em determinadas área da caixa de teste, visto a dificuldade em manter a homogeneidade do material em relação aos tamanhos de grãos. Além disso, os maiores deslocamentos também podem estar associados à maior espessura da camada. Conforme mencionado anteriormente, a camada de resíduo possui baixa resistência e o solo se move com facilidade sob aplicação de carga.

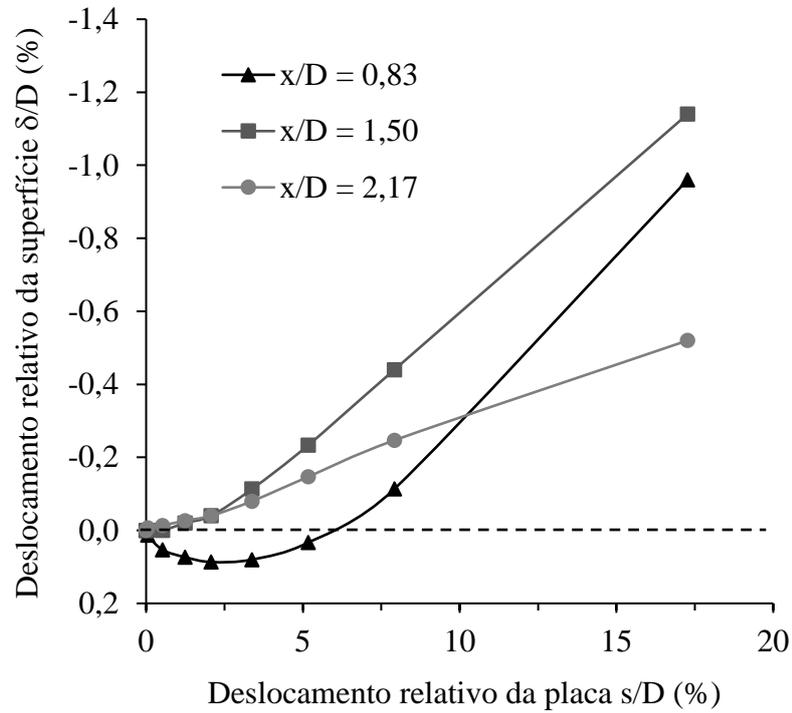
Pokharel *et al.* (2010) e Han *et al.* (2010) estudaram o comportamento de sistemas de reforço com geocélulas utilizando diferentes materiais de preenchimento. Um dos materiais, comum a ambos estudos, se tratava de uma areia mal graduada, com características granulométricas semelhantes às do resíduo estudado neste trabalho. A areia foi compactada com densidade relativa de 70% e ensaiada sob ação de sapata circular, também com área menor que a abertura da célula do reforço. Os ensaios de referência, realizados pelos autores sobre o solo arenoso não reforçado, apresentaram resultados de capacidade de carga na ruptura semelhantes ao observado no ensaio SR-20, da ordem de 230 kPa.

Figura 26: Curva tensão-deslocamento do ensaio sem reforço SR-20.



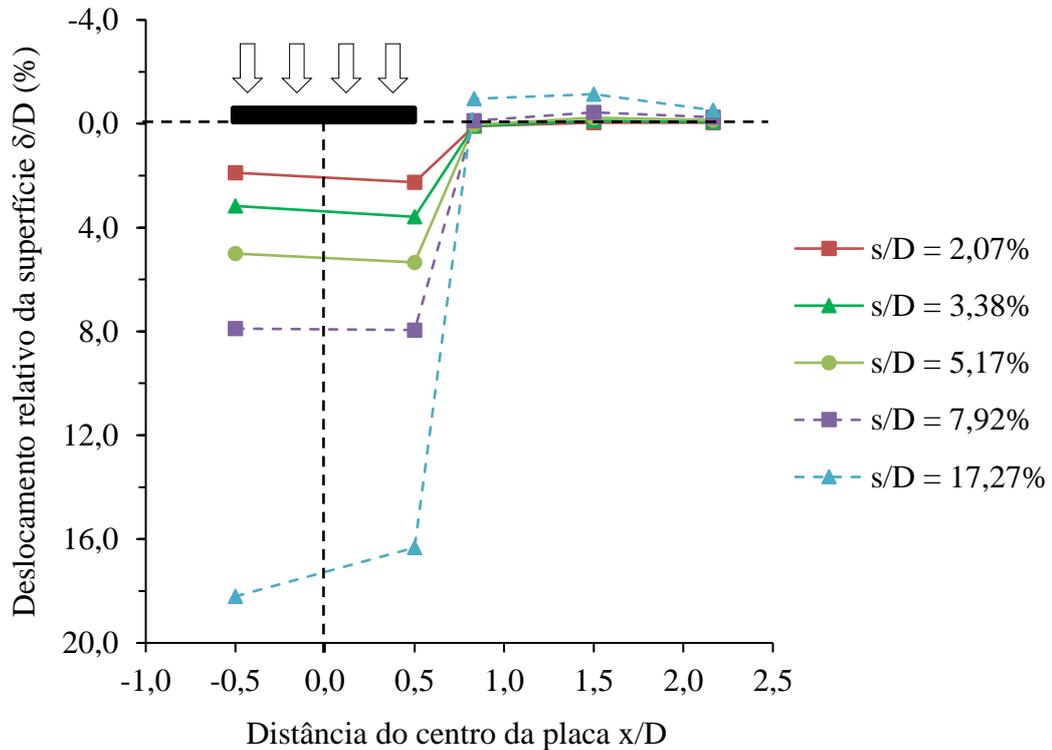
Fonte: Autor (2018).

Figura 27: Variação do deslocamento da superfície com o recalque da placa – Ensaio SR-20.



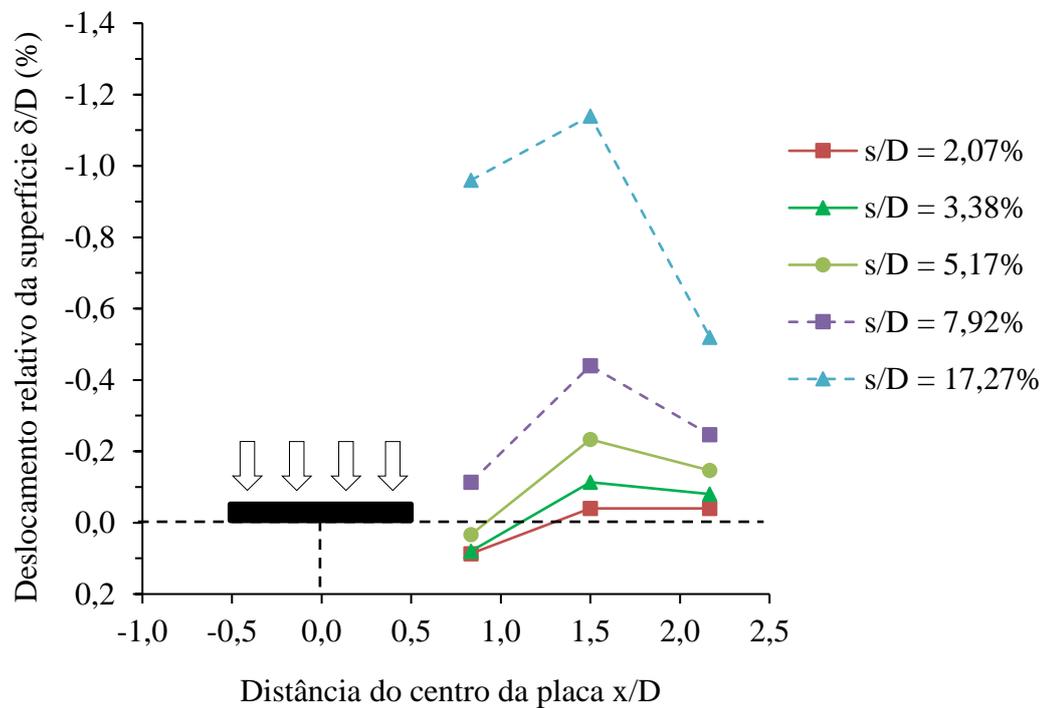
Fonte: Autor (2018).

Figura 28: Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR-20.



Fonte: Autor (2018).

Figura 29: Perfil de deslocamento da superfície externa à placa – Ensaio SR-20.



Fonte: Autor (2018).

4.3 Ensaios com geocélula

4.3.1 Camada de resíduo com 5 cm

O comportamento tensão-deslocamento referente ao ensaio sobre camada de resíduo reforçada com geocélula de altura igual a 5 cm está apresentado na Figura 30. Além disso, está apresentado para fins de comparação o resultado do ensaio de referência realizado no solo de base.

É observado que, mesmo com a utilização do reforço celular, a capacidade de carga da fundação foi inferior àquela resultante do ensaio de referência na areia. Esse resultado indica que a utilização do resíduo de pedras preciosas como material de preenchimento das células, na granulometria e densidade testadas, é inadequada, visto que o sistema com geocélula não apresentou melhoria no comportamento do solo arenoso.

A Figura 31 apresenta a variação do deslocamento da superfície em relação ao recalque da placa para as distâncias (x/D) iguais a 0,83, 1,50 e 2,17. De modo geral, na região mais próxima da placa, em $x/D = 0,83$, é observado recalque na superfície do solo. Nos pontos mais

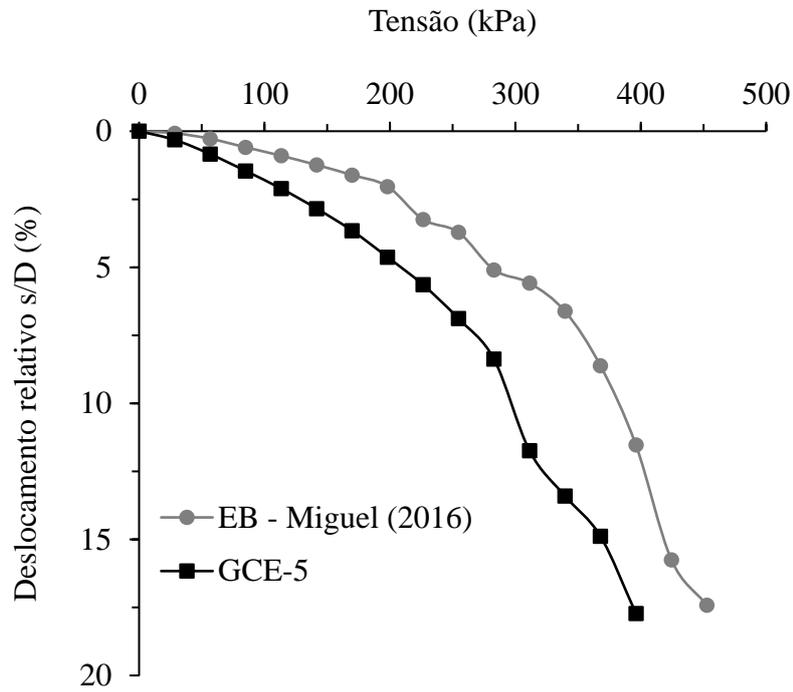
afastados da placa, seguem sendo observadas elevações, porém em magnitude inferior às aquelas apresentadas no ensaio sem reforço.

Ao contrário do que ocorre em solos não reforçados, onde são verificadas maiores elevações na superfície, em solos reforçados essa elevação é muito menor. De acordo com Dash *et al.* (2001) e Avesani Neto (2013), esse comportamento se deve à 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 tensões mais baixas transmitidas ao solo. Hegde e Sitharam (2014) notaram, para diferentes materiais de preenchimento, que enquanto a fundação não apresentava ruptura, a elevação da superfície não era observada na presença de geocélula, atribuindo tal comportamento à possibilidade de as superfícies de falha estarem presas dentro das células.

Analisando com maior detalhe as curvas de variação dos deslocamentos da superfície, em $x/D = 0,83$ é observado que, sob condição de recalque da placa na ordem de 13%, o solo apresentou discreta redução dos recalques tendendo a elevar a superfície. Isso ocorre em razão de o solo estar iniciando o processo de ruptura da camada. Já em $x/D = 1,50$ e $x/D = 2,17$, no início do carregamento, ocorre a elevação da superfície devido à instabilidade e movimentação do material. Próximo aos incrementos finais de carga e após rearranjo e acomodação dos grãos, a superfície nesses pontos apresenta redução nas elevações e conseqüente recalque.

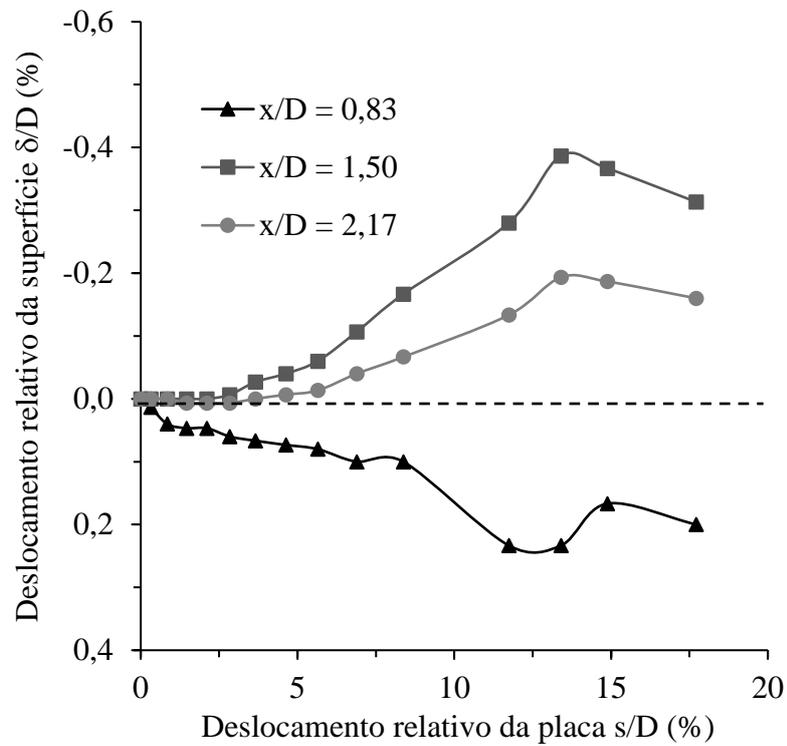
O perfil de deslocamento da superfície em diferentes recalques da placa pode ser visto nas Figuras 32 e 33. Observa-se o recalque apresentado na região próxima da placa em $x/D = 0,83$, seguido de elevações da superfície a uma distância $x/D = 1,50$ e $x/D = 2,17$, sendo menos expressivas conforme afastamento da placa. Não são observados recalques diferenciais significativos na placa.

Figura 30: Curva tensão-deslocamento do ensaio com reforço GCE-5.



Fonte: Autor (2018).

Figura 31: Variação do deslocamento da superfície com o recalque da placa – Ensaio GCE-5.



Fonte: Autor (2018).

Figura 32: Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio GCE-5.

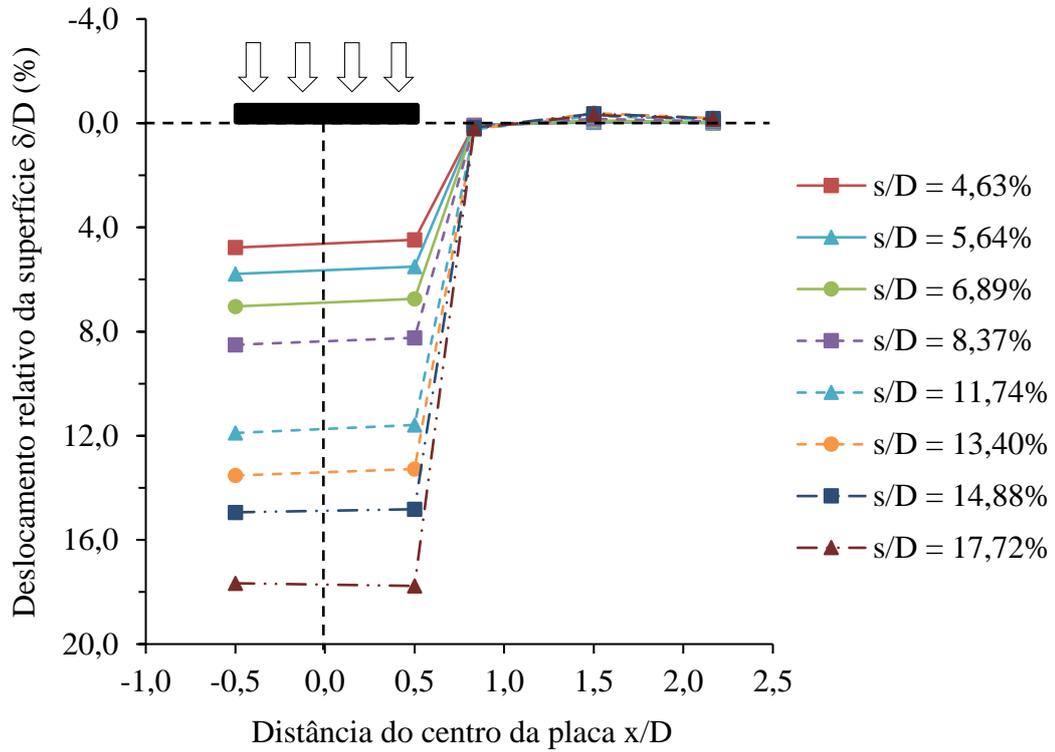
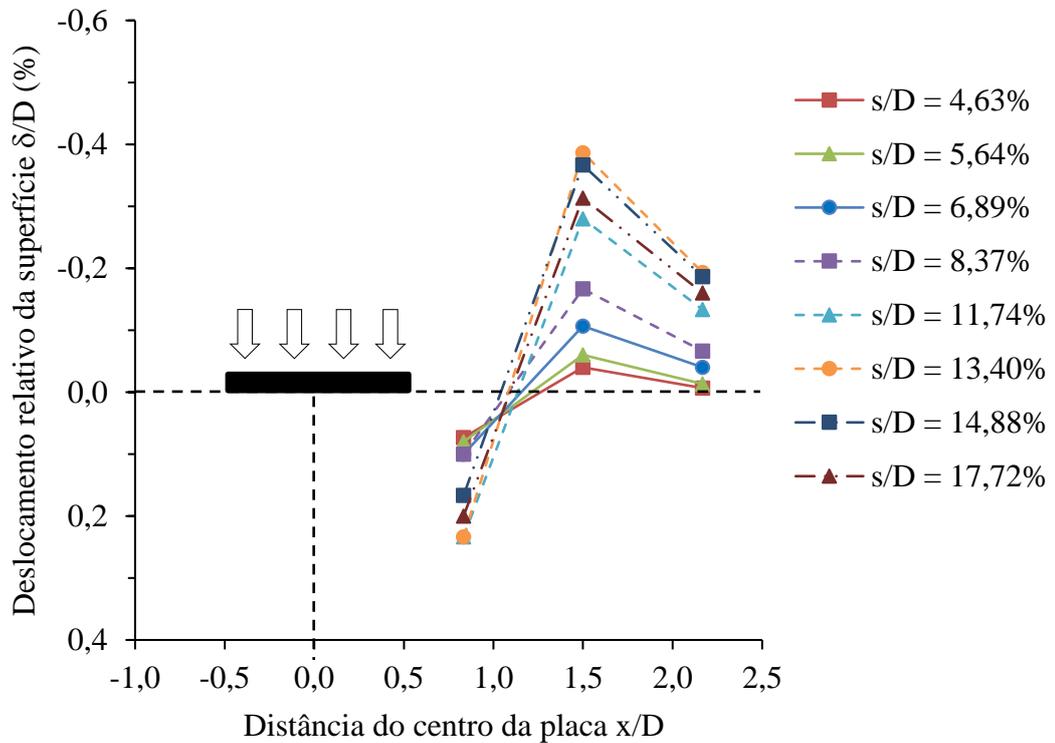


Figura 33: Perfil de deslocamento da superfície externa à placa – Ensaio GCE-5.



4.3.2 Camada de resíduo com 20 cm

Na Figura 34, estão apresentados os gráficos do comportamento tensão-deslocamento resultante do ensaio sobre camada de resíduo reforçada com geocélula com 20 cm de altura e do ensaio de referência realizado no solo de base. É possível observar que o comportamento do solo reforçado por meio de geocélula preenchida com resíduo foi inferior ao comportamento apresentado pelo solo arenoso. O mesmo ocorreu com os demais ensaios expostos anteriormente.

As condições geotécnicas testadas do resíduo, granulometria e densidade relativa, não contribuíram para o melhoramento do desempenho do solo arenoso. Pelo contrário, a resistência da fundação composta por camada de resíduo sobrejacente ao leito arenoso foi inferior, em todos os casos testados, que a resistência apresentada no ensaio realizado apenas sobre a areia.

A Figura 35 apresenta a variação do deslocamento da superfície em relação ao recalque da placa para as distâncias (x/D) iguais a 0,83, 1,50 e 2,17. A uma distância $x/D = 0,83$, na região mais próxima da placa, a superfície do solo apresentou recalque. Nos pontos mais afastados da placa, são observadas elevações na superfície do solo, as quais vão reduzindo com o distanciamento da região carregada. Conforme comentado anteriormente no ensaio com geocélula de 5 cm, a utilização do reforço resulta em elevações menos acentuadas, pois o solo se desloca de maneira mais uniforme devido ao efeito da distribuição de tensões ou efeito laje.

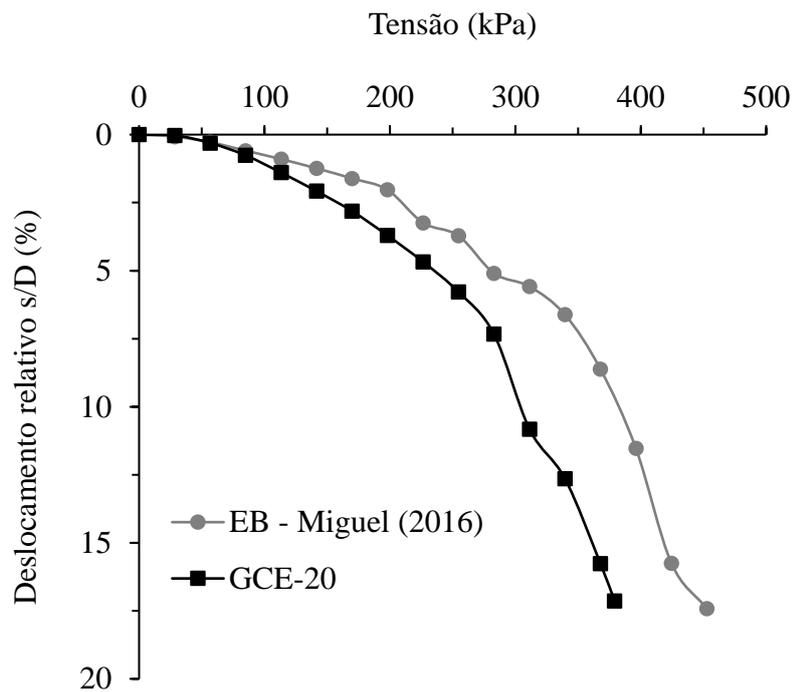
Ainda, através da análise da variação dos deslocamentos na superfície externa da placa, é possível notar que em $x/D = 1,50$ e $x/D = 2,17$, inicialmente, ocorre uma elevação da superfície devido à instabilidade do material. Após rearranjo e acomodação dos grãos, a camada de resíduo apresenta deslocamentos de recalque. Na sequência, próximo à ruptura, é observado que os recalques diminuem e a superfície passa a sofrer, novamente, deslocamentos de elevação devido ao processo de rompimento da camada, o que também é visto em $x/D = 0,83$.

Nas Figuras 36 e 37, está disposto o perfil de deslocamento da superfície para diferentes níveis de recalque da placa. É possível observar um recalque acentuado da superfície a uma distância $x/D = 0,83$, seguido de elevações da superfície medidas em $x/D = 1,50$ e $x/D = 2,17$, sendo menos expressivas conforme afastamento da placa. Em relação aos recalques diferenciais, estes foram notados desde o início do carregamento, sendo mais expressivos nos incrementos finais de carga.

Da mesma forma ocorrida nos ensaios sem reforço, foram observados maiores deslocamentos no ensaio sobre camada de resíduo reforçada de 20 cm (GCE-20) quando comparado com o ensaio sobre camada de resíduo reforçada com 5 cm (GCE-5). Esse fato pode

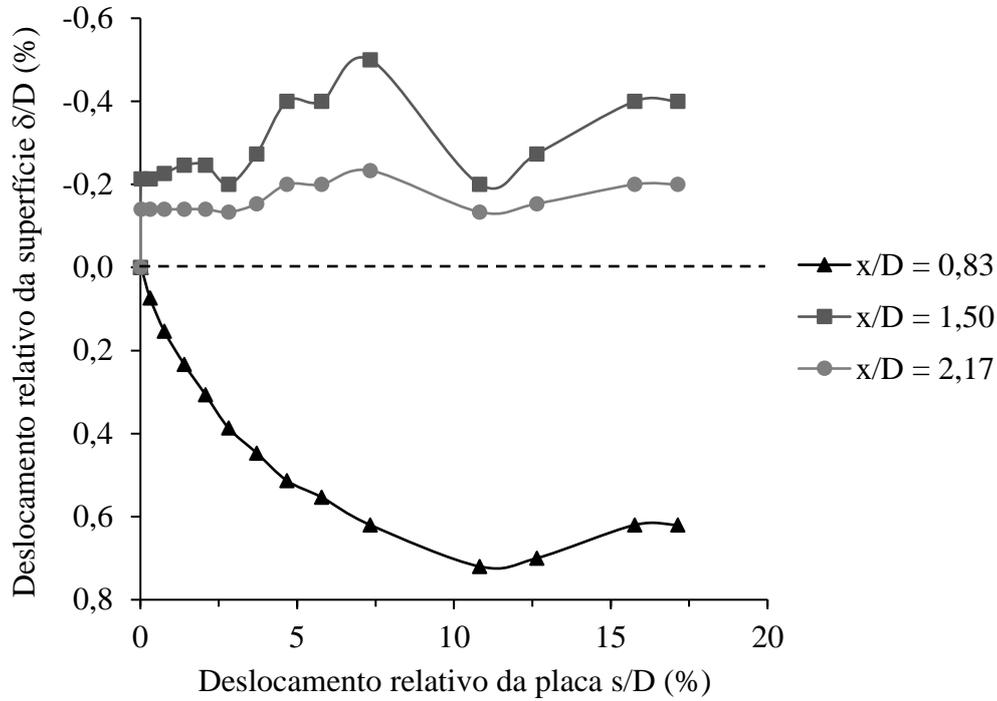
estar atribuído a problemas de compactação e/ou à maior espessura da camada, que permite que o agregado se mova com maior facilidade por se tratar de um material instável. Tal instabilidade faz com que a ruptura do solo ocorra ainda na camada de resíduo, de forma a não transmitir os esforços ao solo de base e não mobilizar a resistência da areia, a qual, conforme observado no estudo, se mostrou mais elevada que a do resíduo.

Figura 34: Curva tensão-deslocamento do ensaio com reforço GCE-20.



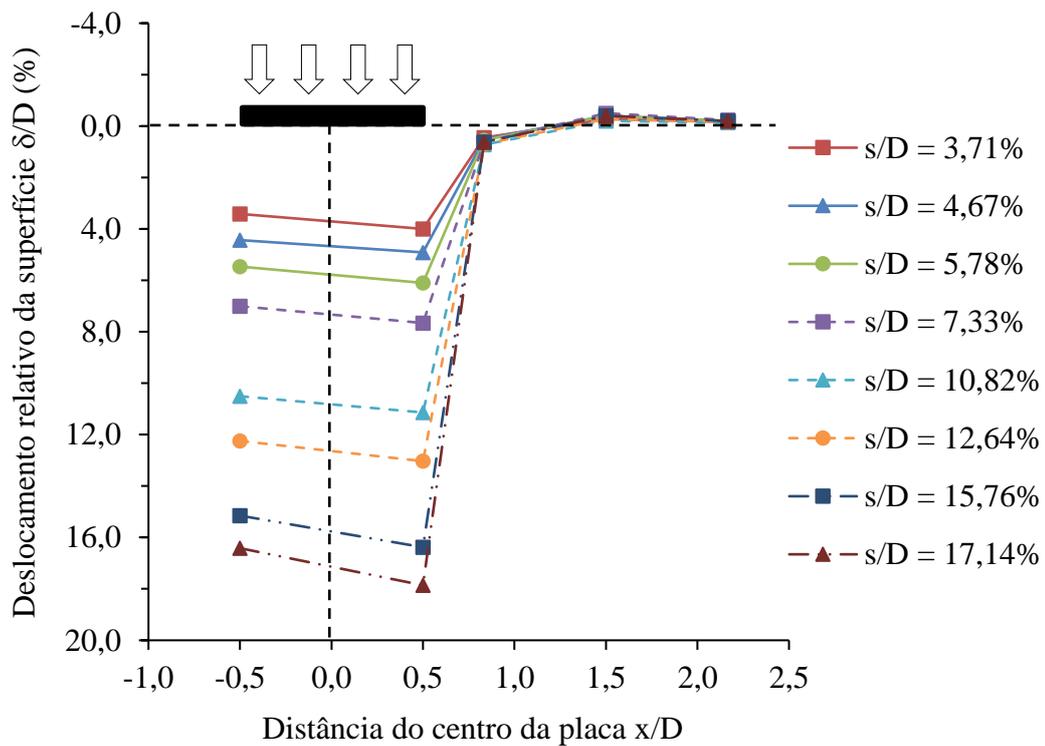
Fonte: Autor (2018).

Figura 35: Variação do deslocamento da superfície com o recalque da placa – Ensaio GCE-20.



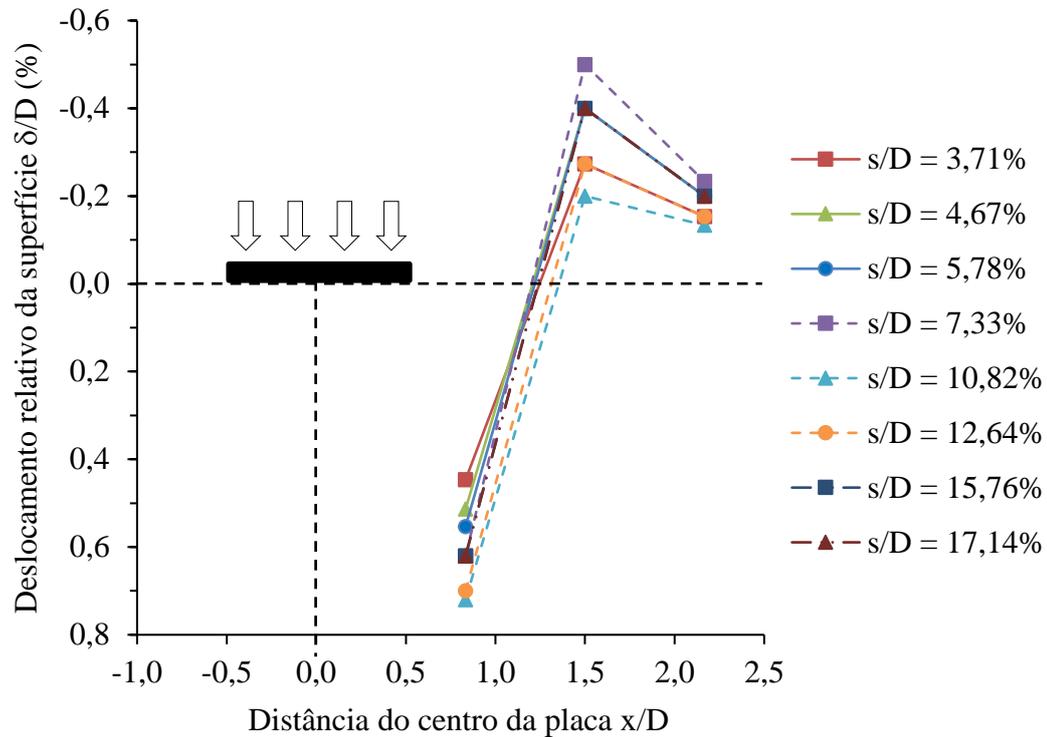
Fonte: Autor (2018).

Figura 36: Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio GCE-20.



Fonte: Autor (2018).

Figura 37: Perfil de deslocamento da superfície externa à placa – Ensaio GCE-20.



Analisando o item 4.3, verifica-se que o desempenho da fundação composta por camada de resíduo reforçada por geocélula sobrejacente a um leito arenoso, para ambas as alturas de geocélula testadas, foi inferior ao resultante do ensaio realizado apenas sobre a areia. Isso quer dizer que o solo de base a ser reforçado possui maior rigidez que o material proposto para preenchimento das células do sistema de reforço.

A baixa resistência do resíduo de pedras preciosas está associada à granulometria e densidade do material utilizadas nos experimentos, as quais se mostraram inadequadas para compor o sistema de reforço de um solo arenoso. De acordo com Pokharel *et al.* (2010), o aumento da capacidade de carga da fundação depende da qualidade do material de preenchimento. Em função de o resíduo de pedras preciosas utilizado nesta pesquisa não conter finos, ele não é sensível à umidade. Além disso, como o material é obtido nos processos de rolagem das pedras, suas partículas possuem forma mais arredondada, o que resulta em um material relativamente fraco.

Conforme estudo de Pokharel *et al.* (2010), nos ensaios de referência realizados sobre solo arenoso não reforçado, cuja distribuição granulométrica é próxima à do resíduo utilizado neste estudo, observa-se comportamento tensão-deslocamento semelhante ao observado no ensaio SR-20, apresentado anteriormente. Entretanto, os ensaios sobre a areia reforçada com

geocélula apresentaram valores de resistência mais elevados que os obtidos nos ensaios reforçados deste estudo. Esse fato pode estar atribuído à maior densidade relativa da areia ($D_r = 70\%$) ensaiada pelos pesquisadores.

De acordo com Dash *et al.* (2010) e Rai (2010), a performance da fundação com geocélula aumenta com o aumento da densidade do material de preenchimento. Isso ocorre porque solos menos densos se contraem sob deformação, de forma que é necessária maior deformação para que a tensão seja transferida para a geocélula. Por outro lado, por serem uma estrutura mais compacta, solos mais densos tendem a se expandir sob penetração da placa, mobilizando maior resistência da geocélula e conduzindo a uma melhor performance do reforço. Além disso, solos densos ao se dilatarem induzem maior resistência de atrito na interface entre o solo e a parede da geocélula, aumentando a resistência à penetração do solo e, portanto, resultando em melhora na capacidade de carga da fundação.

Um outro parâmetro a ser considerado na avaliação do desempenho do sistema de reforço é a abertura da célula ou diâmetro equivalente da célula (d) e conseqüente relação d/D . De acordo com Rai (2010), a abertura da célula deve ser menor que a área da placa, de modo que a placa seja capaz de cobrir, pelo menos, uma célula por inteiro. Dash *et al.* (2003) sugerem uma relação $d/D = 0,8$.

No atual estudo, essa condição não é verificada, pois a célula possui abertura média de 27 cm, enquanto a placa possui diâmetro igual a 15 cm e está locada no centro de uma das células ($d/D = 1,8$). Em vista disso, o desempenho insuficiente da fundação estudada também está relacionado com a influência exercida por essa relação, uma vez que a célula envolve toda a dimensão da placa.

4.4 Mecanismos de ruptura e exumação dos ensaios

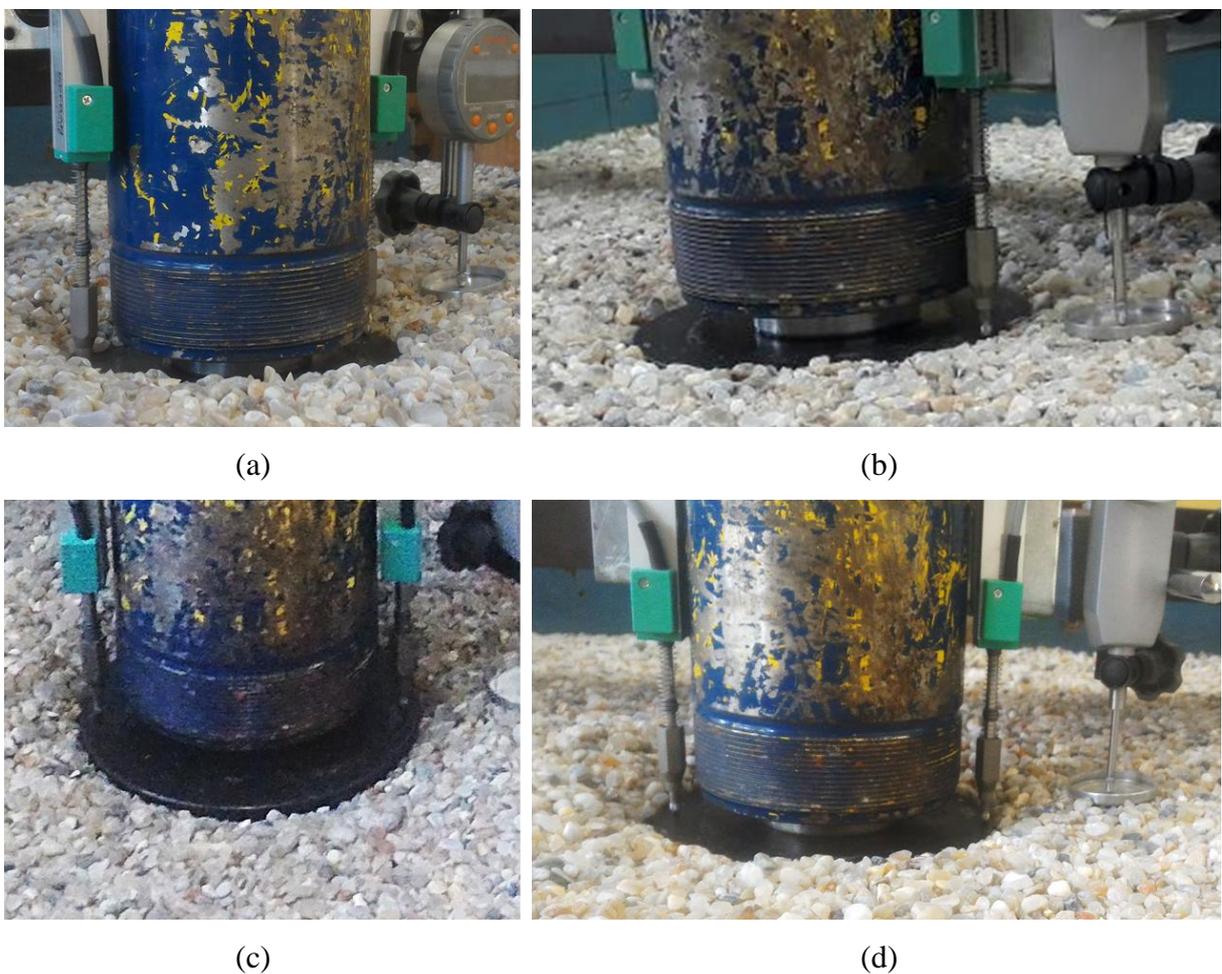
A Figura 38 apresenta os mecanismos de ruptura do solo por meio de fotografias realizadas logo após o encerramento dos ensaios. Nota-se que ocorreram rupturas semelhantes em todas as provas de carga realizadas, caracterizado pelo afundamento da placa e levantamento do material ao redor desta. Ao longo dos ensaios, foi observado que, conforme o carregamento era imposto, ocorria um rearranjo e acomodação dos grãos de resíduo principalmente na região da placa.

O deslocamento elevado das partículas de resíduo é conseqüência da granulometria e densidade utilizadas no estudo. Por se tratar de um material com granulometria medianamente uniforme e densidade relativa da camada igual a 50%, a cada incremento de carga realizado, os

grãos eram facilmente deslocados devido à instabilidade apresentada na camada. Além disso, trata-se de um material obtido nos processos de rolagem de pedras, resultando em partículas residuais com forma mais arredondada. De acordo com Pokharel *et al.* (2010), isso configura um material relativamente fraco.

Em razão da instabilidade observada na camada de resíduo, a inclusão do reforço de geocélula não teve influência na variação dos mecanismos de ruptura.

Figura 38: Mecanismo de ruptura dos ensaios (a) sem reforço SR-5, (b) sem reforço SR-20, (c) com reforço GCE-5 e (d) com reforço GCE-20.



Fonte: Autor (2018).

As Figuras 39 e 40 apresentam fotografias das exumações das camadas de solo, através de uma vista frontal, para os ensaios SR-5 e GCE-5 (Figura 39), SR-20 e GCE-20 (Figura 40). A utilização de finas camadas de areia tingida entre as camadas compactadas de solo se mostrou eficiente na visualização das deformações do solo.

A exumação dos ensaios foi possível apenas para as camadas de areia, garantida pela umidade existente ($w = 10\%$). Devido à instabilidade da camada de resíduo, esta foi retirada cuidadosamente com auxílio de concha metálica, a fim de observar o ocorrido no solo de base após rompimento da fundação.

Figura 39: Exumação das camadas de areia subjacente a uma camada de 5 cm de resíduo (a) sem reforço SR-5, (b) com reforço GCE-5.



Fonte: Autor (2018).

Na Figura 39, é possível observar, tanto para a condição de solo não reforçado quanto reforçado com camada de resíduo com 5 cm, uma leve deformação na primeira camada de solo na região abaixo da placa de aço, sendo que não são observadas deformações visíveis nas camadas mais profundas. Isso se deve ao fato da camada de resíduo ser esbelta, de modo que, mesmo apresentando elevada deformação, houve a transmissão das tensões de carregamento para o solo de base e a mobilização de sua resistência, vistas pela deformação da camada superior de areia.

Ainda em relação às camadas de resíduo com altura igual a 5 cm, nota-se elevado recalque do solo não reforçado na região abaixo da placa e, ao mesmo tempo, pequena deformação da camada (Figura 39a). Por outro lado, quando utilizada a geocélula, houve uma melhor distribuição das tensões, vista por um recalque menos expressivo na região abaixo da placa juntamente com uma deformação mais uniforme da camada superior de areia (Figura 39b). Essas características são comuns em solos reforçados com geocélula devido ao efeito da distribuição das tensões, que influencia no mecanismo de ruptura do solo, conforme apresentado anteriormente no item 2.3.4.

Figura 40: Exumação das camadas de areia subjacente a uma camada de 20 cm de resíduo (a) sem reforço SR-20, (b) com reforço GCE-20.



Fonte: Autor (2018).

Já em relação às camadas de resíduo com altura igual a 20 cm (Figura 40), não são observadas deformações no solo arenoso. Por se tratar de uma camada espessa de material que se deforma com facilidade devido à acomodação dos grãos, a solicitação imposta pelo carregamento conduz a recalques elevados, resultando na ruptura do solo ainda na camada de resíduo.

4.5 Análise global

Este item tem como objetivo apresentar os resultados e análises dos ensaios de placa agrupados em dois subitens. O primeiro aborda a influência do uso da geocélula em aspectos relacionados ao comportamento tensão-deslocamento, fator de melhora da capacidade de carga (I_f) e porcentagem de redução no deslocamento da sapara (PRS). O segundo item aborda a influência da altura da geocélula na resistência nestes mesmos fatores.

4.5.1 Influência do uso da geocélula

O aumento na capacidade de carga devido ao emprego do reforço pode ser quantificado através de um parâmetro adimensional chamado de fator de melhora da 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_0) para o mesmo

recalque, calculada pela Equação (1). 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 a ruptura do solo não reforçado, é utilizado o valor da capacidade última deste solo não reforçado e a relação passa a ser denominada razão da capacidade de carga *BPR*.

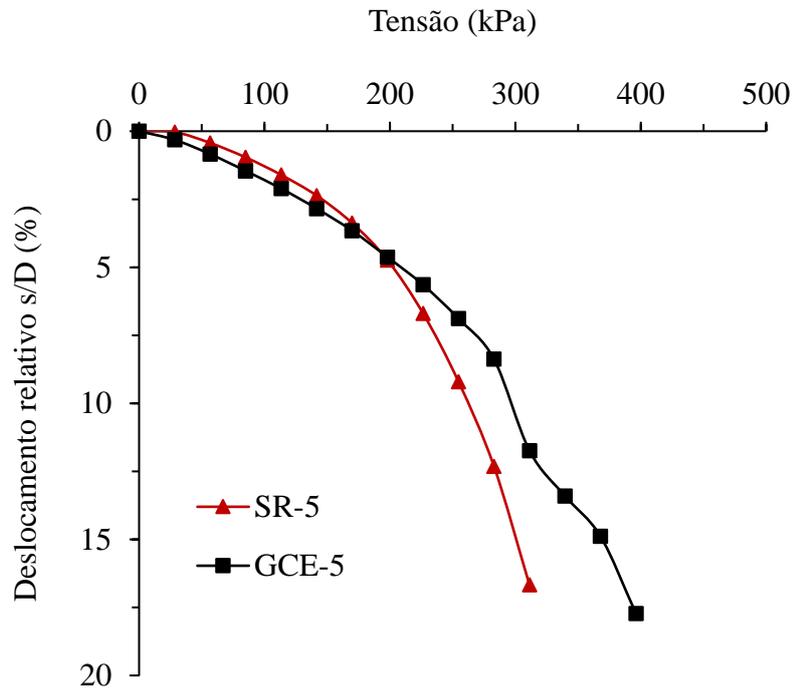
$$If = \frac{qr}{qo} \quad (1)$$

Os autores ainda comentam que a eficiência da geocélula também pode ser avaliada através da comparação entre os recalques desenvolvidos nos ensaios com e sem o reforço. Tal comparação pode ser realizada por um fator conhecido como porcentagem de redução no deslocamento da sapata (*PRS*), que é determinado pela razão da diferença entre os deslocamentos do solo não reforçado (*So*) pelo reforçado (*Sr*), sobre o valor do recalque do solo não reforçado (*So*), para uma dada carga aplicada pela sapata, conforme Equação (2). Igualmente ao fator de melhora da capacidade de carga, este parâmetro também pode ser determinado em qualquer ponto da curva.

$$PRS = \frac{So - Sr}{So} \quad (2)$$

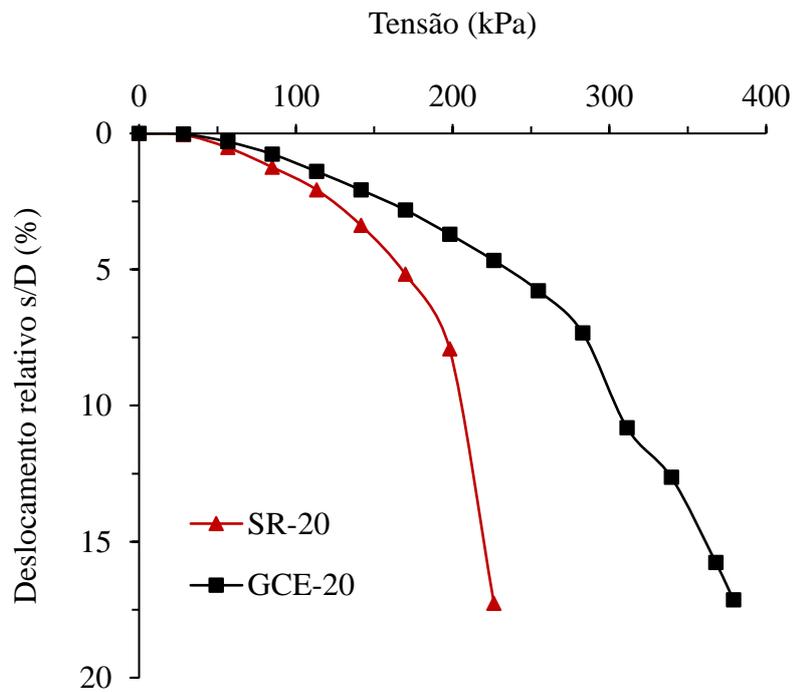
As Figuras 41 e 42 apresentam os resultados tensão-deslocamento dos ensaios com e sem reforço. É observado o claro aumento da resistência promovido pela geocélula para ambas as alturas testadas. Analisando os carregamentos finais das curvas SR-5 e GCE-5 da Figura 41, verifica-se um aumento próximo a 28% na carga de ruptura da fundação. Já os resultados dos ensaios SR-20 e GCE-20, vistos na Figura 42, apresentaram um aumento da carga de ruptura da ordem de 69%.

Figura 41: Curvas tensão-deslocamento dos ensaios para $h = 5$ cm.



Fonte: Autor (2018).

Figura 42: Curvas tensão-deslocamento dos ensaios para $h = 20$ cm.



Fonte: Autor (2018).

A quantificação da melhoria do comportamento da fundação com a aplicação da geocélula foi através dos fatores I_f e PRS .

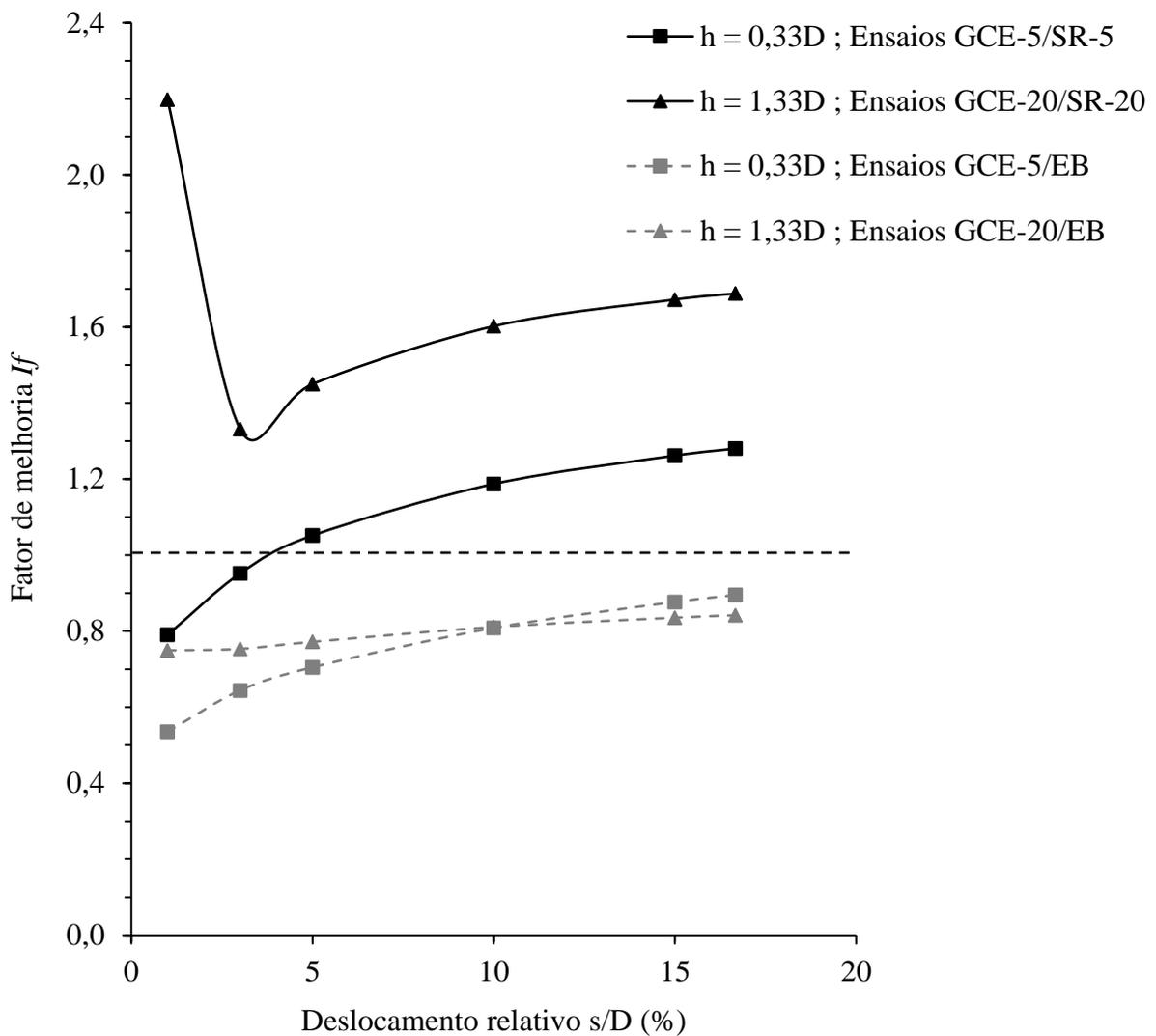
A Figura 43 representa a variação do fator de melhora de capacidade em função do recalque normalizado da placa para as duas alturas de geocélulas. Como sistema de reforço foram considerados os ensaios GCE-5 e GCE-20, nos quais foram utilizadas as geocélulas. A comparação foi realizada com os ensaios sem reforço em camada de resíduo SR-5 e SR-20 (curvas em linha contínua apresentadas na cor preta) e, também, com o ensaio de referência realizado apenas sobre a areia EB (curvas em linha tracejada apresentadas na cor cinza).

Os fatores I_f têm como parâmetro limite um valor igual a unidade. Isto quer dizer que quando o fator for menor que a unidade, a geocélula não apresenta benefício com relação ao aumento da capacidade de carga. Já para os fatores acima da unidade, significa que a utilização da geocélula auxilia no ganho de resistência. A Tabela 5 apresenta uma síntese da variação dos fatores de melhora da capacidade de carga.

Em vista disso, é possível notar, novamente, que não houve melhoria na capacidade de carga ao se utilizar a geocélula preenchida com resíduo como reforço do solo arenoso, pois os valores de I_f referentes aos ensaios com geocélula e ensaio branco ficaram abaixo da unidade. Entretanto, é observado comportamento crescente das curvas de I_f , cujos valores se aproximam da unidade no momento da ruptura.

Por outro lado, considerando os ensaios sobre camadas de resíduo com e sem reforço, os resultados de I_f ficaram acima da unidade e também apresentaram comportamento crescente ao longo da evolução dos recalques. Nos ensaios sobre camada de 20 cm, tal comportamento é observado a partir de $s/D = 3\%$. Os resultados obtidos para o fator de melhora da capacidade de carga dos ensaios indicam que a influência do uso da geocélula é mais significativa para níveis mais elevados de recalque e que índices mais altos de I_f são observados para a maior altura de geocélula.

Figura 43: Variação dos fatores de melhora da capacidade de carga com o recalque da placa.



Fonte: Autor (2018).

Tabela 5: Síntese dos resultados em termos do fator de melhora da capacidade de carga.

Parâmetros variáveis		Fator de melhora de capacidade de carga (I_f)					
Material sem reforço	h/D	(s/D) 1%	(s/D) 3%	(s/D) 5%	(s/D) 10%	(s/D) 15%	(s/D) 17%
Resíduo	0,33	0,79	0,95	1,05	1,19	1,26	1,28
	1,33	2,20	1,33	1,45	1,60	1,67	1,69
Areia	0,33	0,54	0,64	0,70	0,81	0,88	0,90
	1,33	0,75	0,75	0,77	0,81	0,84	0,84

Fonte: Autor (2018).

Outro padrão para determinação da influência da utilização da geocélula é a porcentagem de redução no deslocamento da sapata *PRS*. A Figura 44 representa as curvas de *PRS* para as duas alturas de geocélulas, cujos resultados se encontram sintetizados na Tabela 6.

De forma análoga à apresentada para os fatores de melhoria *I_f*, como sistema de reforço foram considerados os ensaios com geocélulas preenchidas com resíduo nas alturas 5 e 20 cm, e a comparação se deu com os ensaios sem reforço contendo uma camada de resíduo nas respectivas alturas (curvas em linha contínua apresentadas na cor preta) e com o ensaio de referência realizado apenas sobre a areia (curvas em linha tracejada apresentadas na cor cinza).

Através dos resultados dos ensaios sobre camada de resíduo com e sem reforço, foi verificado que a geocélula com altura de 5 cm passou a promover redução progressiva dos recalques a partir de 200 kPa, atingindo valores de até 40% nos recalques da sapata no momento da ruptura. Para a geocélula de 20 cm, observa-se efeito significativo do reforço na porcentagem de redução dos recalques da placa desde o início dos ensaios, atingindo até 74% no instante da ruptura. Esses resultados são referentes à comparação entre os ensaios realizados com a camada de resíduo. Quando comparados os ensaios reforçados com aqueles realizados sobre o solo arenoso de base, os valores negativos indicam que a utilização do reforço não foi capaz de reduzir os deslocamentos da placa.

Como foi visto nos itens anteriores 4.2 e 4.3, na apresentação dos resultados dos ensaios de placa, os deslocamentos resultantes de incrementos de carga foram mais elevados para os ensaios sobre camada de 20 cm, sendo estes amenizados com a utilização da geocélula, permitindo a aplicação de maiores carregamentos. Os altos valores de *PRS* observados para a altura de 20 cm de resíduo, assim como os referentes à altura de 5 cm, comprovam o benefício da geocélula na redução dos recalques da placa.

Figura 44: Variação das porcentagens de redução no deslocamento da sapata com a tensão.

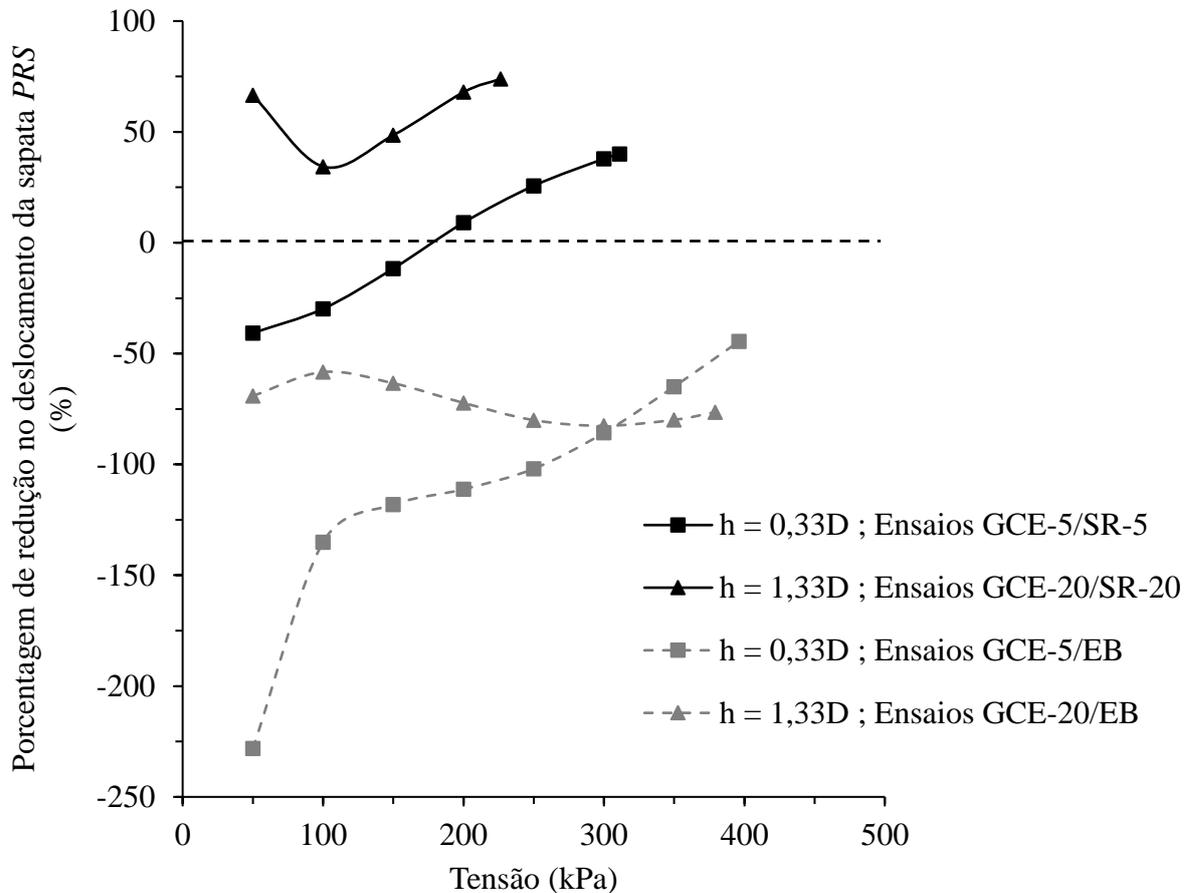


Tabela 6: Síntese dos resultados em termos da porcentagem de redução do deslocamento da sapata.

Parâmetros variáveis		Porcentagem de redução no deslocamento da sapata PRS							
Material sem reforço	h/D	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
		50	100	150	200	250	300	350	q_{rup}
Resíduo	0,33	-41%	-30%	-12%	9%	26%	38%	-	40%
	1,33	66%	34%	49%	68%	-	-	-	74%
Areia	0,33	-228%	-135%	-118%	-111%	-102%	-86%	-65%	-44%
	1,33	-69%	-58%	-63%	-72%	-80%	-83%	-80%	-76%

Fonte: Autor (2018).

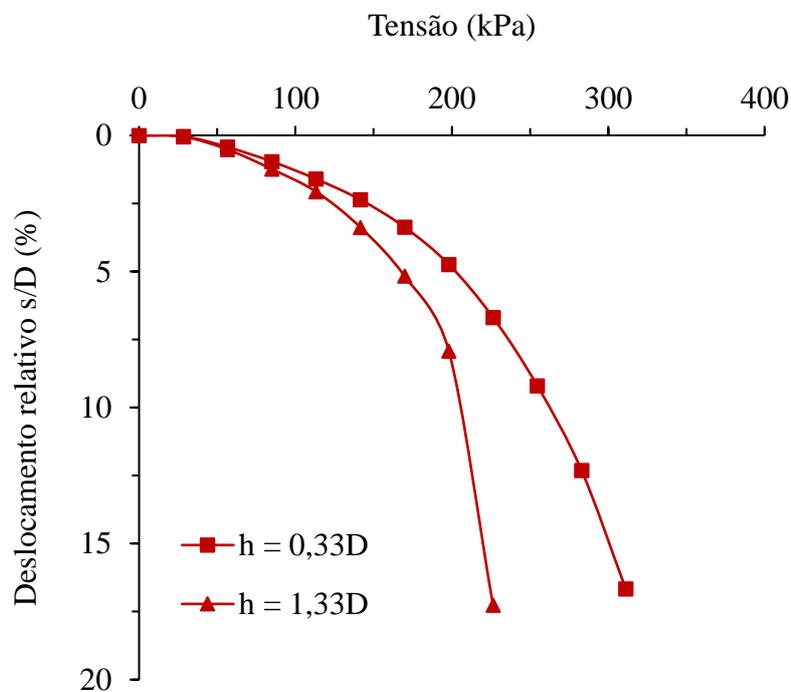
4.5.2 Influência da altura da geocélula

As tensões de carregamento e os deslocamentos resultantes dos ensaios sobre camada de resíduo com diferentes alturas, 5 cm e 20 cm, estão dispostos nas Figura 45 e 46.

Na Figura 45, é realizada a comparação entre as curvas dos ensaios não reforçados, pois estes são os ensaios de referência quando utilizada uma camada de resíduo sobrejacente ao leito arenoso. Tal comparação é necessária para avaliação dos benefícios da utilização do reforço.

Observa-se que o solo com camada de resíduo de menor espessura obteve melhores resultados de capacidade de suporte. Isso é explicado pelo fato de o solo de base ser um material mais rígido que a camada de resíduo. Conforme observado anteriormente na exumação dos ensaios, aquele com camada de resíduo de 5 cm apresentou deformação no solo de base, ao contrário do ensaio sobre camada de 20 cm, onde houve a ruptura da fundação sem deformar o solo subjacente. A deformação da areia indica que houve a mobilização da resistência desse solo. Como sua capacidade em resistir aos esforços solicitantes é maior, o solo arenoso contribuiu para o aumento da resistência do sistema com camada de resíduo de 5 cm, devido à sua pequena espessura.

Figura 45: Curvas tensão-deslocamento dos ensaios sem reforço.



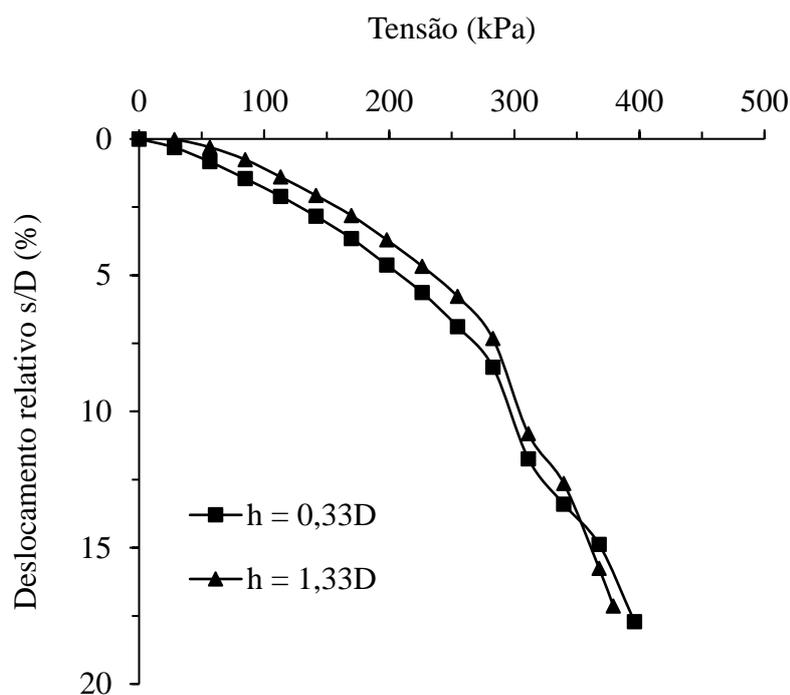
Fonte: Autor (2018).

No estudo de Pokharel *et al.* (2010), onde foi utilizado como base um solo firme e como material de preenchimento uma areia mal graduada menos resistente, foi observado que tanto as seções não reforçadas quanto reforçadas de menor espessura apresentaram capacidade de carga final superior àquela observada em camadas mais espessas. De acordo com os autores, essa diferença pode ser explicada pois o solo de base firme na camada menos espessa forçou a superfície de falha a ocorrer em uma profundidade menor e aumentou a capacidade de carga do sistema.

É visto na bibliografia, através de diversos pesquisadores, que o fator forma h/D (altura da geocélula em relação ao diâmetro da placa) exerce influência no desempenho do solo, e que valores mais altos desse fator conduzem a aumentos mais expressivos de resistência, como pode ser observado nos estudos de Mandal e Gupta (1994) e Dash *et al.* (2001).

A Figura 46 apresenta as curvas tensão-deslocamento dos ensaios reforçados com geocélulas de alturas 5 e 20 cm. Ao avaliar o efeito da altura da geocélula na resistência da fundação, é verificado que as curvas possuem comportamento similar e atingem cargas muito próximas ao longo de todo ensaio, inclusive na ruptura. Isso significa que, em função do material de preenchimento testado possuir baixa resistência, o aumento na altura da geocélula não promove um aumento na capacidade de carga.

Figura 46: Curvas tensão-deslocamento dos ensaios com reforço.



No item anterior 4.5.1, onde foram apresentados os resultados de I_f e PRS , observam-se valores distintos desses fatores para as diferentes alturas de geocélulas. Ao verificar comportamento tensão-deslocamento semelhante para ambas alturas testadas (Figura 46), atribui-se tal distinção de valores à variação na resistência dos ensaios sem reforço e não à altura do reforço utilizado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos e análises realizadas no presente trabalho, as principais conclusões acerca do comportamento de geocélulas preenchidas com resíduo de pedras preciosas sobre solo arenoso estão dispostas abaixo.

1) A eficiência da geocélula como elemento de reforço de solos foi comprovada através da comparação entre os ensaios com e sem reforço na camada de resíduo, onde foi observado um aumento significativo na resistência do solo com o emprego desse geossintético.

2) Os mecanismos de ruptura do solo foram semelhantes e independentes da utilização do reforço, apresentando elevados deslocamentos na camada de resíduo. A baixa rigidez dessa camada está relacionada com a faixa granulométrica e densidade do resíduo que foram testadas.

3) A utilização da geocélula resultou em recalques mais uniformes e elevações menos expressivas do solo ao entorno da placa, devido ao efeito da distribuição das tensões. Maiores elevações foram observadas para os casos de solo sem reforço. Esse comportamento foi verificado para ambas as alturas de geocélulas testadas.

4) Os maiores deslocamentos, bem como a menor resistência da fundação, foram observados nos ensaios sem reforço na camada mais espessa de resíduo. Na camada com menor espessura, o solo de base, por ser mais rígido, contribuiu para o aumento da capacidade de carga do sistema.

5) O comportamento carga-recalque foi similar para ambas as alturas de geocélulas testadas, indicando que esse parâmetro não teve influência no aumento da resistência do solo.

5.2 Sugestões

No decorrer do estudo, foram levantadas algumas hipóteses possíveis de serem investigadas em trabalhos futuros. Seguem abaixo, as sugestões mais relevantes para ampliação do conhecimento atual acerca de solos reforçados com geocélulas e utilização do resíduo de pedras preciosas.

- 1) Estudar o comportamento de solos reforçados com geocélulas utilizando placa maior que a abertura de célula.
- 2) Testar o resíduo de pedras preciosas como material de preenchimento em diferentes densidades e distribuição granulométrica. Além disso, realizar ensaios triaxiais para melhor conhecimento do material.
- 3) Neste trabalho, foi investigado apenas a influência do emprego do reforço e da altura da geocélula na capacidade de carga do solo. Sugere-se a realização de ensaios variando também outros parâmetros que influenciam nos mecanismos de resistência do reforço, como tamanho da célula, material de preenchimento e densidade do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. **Geologia de Engenharia**. Vários autores. 587 p. São Paulo: Oficina de Textos, 1998.

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 10004:2004. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 6458:2016. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 7181:2016. Solo – Análise granulométrica. 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.

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

AVESANI NETO, J. O.; BUENO, B. S. Estabilização de encostas com muros de gravidade de geocélula. In: 5ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. **Anais do V Cobrae**. São Paulo, 2009.

AVESANI NETO, J. O.; BUENO, B. S. Reforço de solos moles com geossintéticos. In: 15º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais do XV Cobramseg**. Gramado, 2010.

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

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

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

BARUFFI, A. **Comportamento mecânico de geocélulas preenchidas com resíduos de pedras preciosas**. 2017. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2017.

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

BATISTI, V. de S.; TASTCH, A. L. O Arranjo Produtivo Local (APL) gaúcho de gemas e joias: estruturas produtiva e comercial, arranjos institucional e educacional e relações interorganizacionais. **Ensaio FEE**. Porto Alegre. v. 33, n. 2, p. 513-538, 2012.

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

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

BISWAS, A.; KRISHNA, A. M. Geocell-reinforced foundation systems: A critical review. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**. p. 1-18, 2017.

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

BUSH, D. I.; JENNER, C. G.; BASSETT, R. H. The design and construction of geocell foundation mattresses supporting embankments over soft ground. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 9, p. 83-98, 1990.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos**. v. 1, 6 ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988.

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

CONSOLI, N.; MORAES, R.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil. **Journal of Material in Civil Engineering**. ASCE 25 (10), p. 1568-1573, 2013.

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

DALLA ROSA, F.; THOMÉ, A.; DONATO, M. Análise da viabilidade técnica da aplicação do resíduo da rolagem de pedras preciosas em estruturas de pavimentos urbanos. **Tecnologia e Inovação em Gemas, Joias e Mineração**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, p. 91-98, 2014.

DAS, B. M.; SIVAKUGAN, N. **Fundamentals of Geotechnical Engineering**. 5 ed. Boston: Cengage Learning, 2015.

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. 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. Influence of relative density of soil on performance of geocell-reinforced sand foundations. **Journal of Materials in Civil Engineering**. ASCE, v. 22, n. 5, 2010.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. PRO 381:1998. Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias. Rio de Janeiro, 1998.

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

EAB. Working Group on Excavations of the German Geotechnical Society. **Recommendations on Excavations**. 2 ed. Translation by Alan Johnson. Berlin: Ernst & Sohn, 2008.

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

HAN, J.; POKHAREL, S.K.; PARSONS, R.L. Effect of infill material on the performance of geocell-reinforced bases. In: 9^o International Conference on Geosynthetics, Brasil, 2010.

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

HEGDE, A. M.; SITHARAM, T. G. Effect of infill materials on the performance of geocell reinforced soft clay beds. **Geomechanics and Geoenvironmental Engineering: An International Journal**. v. 10, p. 163-173, 2014.

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

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

KEMPFERT, H. G.; GEBRESELASSIE, B. **Excavations and Foundations in Soft Soils**. Berlin: Springer, 2006.

KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. 5 ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005.

KORF, E. P. **Comportamento hidráulico e reativo de uma mistura solo-cimento para aplicação em barreiras de contenção de resíduos ácidos contendo chumbo e cádmio**. 2011. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LATHA, G. M.; RAJAGOPAL K.; KRISHNASWAMY, N. R. Experimental and theoretical investigations on geocell-supported embankments. **International Journal of Geomechanics**. v. 6, n. 1, p. 30-35, 2006.

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

MANDAL, J. N.; GUPTA, P. Stability of geocell-reinforced soil. **Construction and Building Materials**. v. 8, n. 1, 1994.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

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

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

MIGUEL, G. D. **Avaliação do desempenho de geocélulas expostas a cargas axiais através de provas de carga**. 2016. Tese de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

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

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

MORAES, R. F.; CANDIANI, G.; LEME, F. Z.; GOMES, H. C.; LAVOIE, F. Utilização de geocélulas de polipropileno na concretagem das bacias de contenção de percolado do CTVA-

Caieiras.. In: 3ª Conferência Internacional de Gestão de Resíduos na América Latina. **Anais da III GRAL**, São Paulo, 2013.

OBER S.A. Ober Geossintéticos. Catálogo Fortcell – Geocélula. São Paulo, 2018. Disponível em: http://www.ober.com.br/geossinteticos/catalogo/catalogo_fortcel.pdf. Acesso em 19 fev. 2018.

PALMEIRA, E. M.; ORTIGÃO, A. Aplicações em reforço de solos. In: VERTEMATTI, J.C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2 ed, p. 85-245. São Paulo: Blucher, 2015.

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

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POKHAREL, S. K.; HAN, J.; LESHCHINSKY, D.; PARSONS, R. L.; HALAHMI, I. Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 28, p. 570-578, 2010.

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

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

RODRIGUES, R.; LOPES, J. A. U. Rodovias. In: ABGE. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 419-430, 1998.

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

SHUKLA, S. K. Shallow foundations. In: _____. **Geosynthetics and their Applications**. p. 123-163. London: Thomas Telford, 2002.

SHUKLA, S. K.; YIN, J. **Fundamentals of Geosynthetic Engineering**. Leiden: Taylor & Francis, 2006.

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

TERZAGHI, K., PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. 2 ed. 512 p. New York: John Wiley and Sons, 1967.

THALLAK, S. G.; SARIDE, S.; DASH, S. K. Performance of surface footing on geocell-reinforced soft clay beds. **Geotechnical and Geological Engineering**. v. 25, p. 509-524, 2007.

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

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

TMP Geosynthetics. Products. Textured HDPE Geocell, Smooth HDPE Geocell. 2016. Disponível em: http://www.tmpgeosynthetics.com/product_list.aspx?Pid=18. Acesso em: 16 nov. 2016.

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

VERTEMATTI, J. C. Aplicações em reforço de solos. In:____. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2 ed, p. 85-245. São Paulo: Blucher, 2015b.

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.

WEBSTER S. L.; ALFORD, S. J. Investigation of construction concepts for pavements across soft ground. Report S-78-6. **Geotechnical Laboratory**, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1978.

ZANATTA, A. L. **Plano de desenvolvimento com metodologia participativa APL pedras, gemas e joias**. 120 p. 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 Geomembranes**. v. 26, n. 3, p. 231-238, 2008.