

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

COMPORTAMENTO DE GEOCÉLULAS PREENCHIDAS
COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
COMO REFORÇO DE SOLO

Bruna Thays Uhde

Passo Fundo

2020



BRUNA THAYS UHDE

COMPORTAMENTO DE GEOCÉLULAS PREENCHIDAS COM RESÍDUO
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO REFORÇO DE SOLO

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

Passo Fundo

2020

CIP – Catalogação na Publicação

U29c Uhde, Bruna Thays

Comportamento de geocélulas preenchidas com resíduo de construção e demolição como reforço de solo [recurso eletrônico] / Bruna Thays Uhde. – 2020.

3 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Felipe Floss.

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

1. Materiais de construção - Resíduos. 2. Geossintéticos.
3. Impacto ambiental. 4. Solos - Compactação. 5. Solos -
Composição. I. Floss, Márcio Felipe, orientador. II. Título.

CDU: 624

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

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 COMPORTAMENTO DE GEOCÉLULAS PREENCHIDAS COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO REFORÇO DE SOLO, elaborada por BRUNA THAYS UHDE, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Data da aprovação: 19 de agosto de 2020.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto

Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa

Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Jorge G. Zornberg

University of Texas at Austin

Prof. Dr. Márcio Felipe Floss - Orientador

Universidade de Passo Fundo

Passo Fundo

2020

Dedico este trabalho aos meus pais Neide e Gilson, ao meu irmão Bruno e ao meu namorado Eduardo, que não mediram esforços para me ajudar nessa etapa tão importante.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me levou para o lugar certo e me abriu uma porta, por ter me guiado durante todo o desenvolvimento da pesquisa e ter me dado forças para seguir e concretizar meus objetivos.

Aos meus pais Neide e Gilson, pela vida que me ofereceram, por todo o amor e apoio incondicionais que sempre me disponibilizaram, não há palavras para que eu possa reconhecer tudo que sempre fizeram por mim. Pai, mãe, amo vocês!

Ao meu irmão Bruno, pela amizade e o amor mais verdadeiro que posso sentir, pelas conversas e risadas que mesmo longe minimizaram a saudade, você é meu maior orgulho e por você quero ser um bom exemplo e lutar também pelos seus sonhos.

Ao meu amor Eduardo, pelo ombro amigo, por me dar forças e me colocar para cima quando eu não consigo, por estar ao meu lado me incentivando, pela compreensão e amor em todos os momentos.

Ao meu orientador Dr. Márcio Floss, pela orientação, paciência, confiança e correções. Teu apoio e ensinamentos foram fundamentais no desenvolvimento e conclusão deste estudo.

À todos os professores do PPGEng pelas experiências e conhecimentos compartilhados. Em especial aos professores das bancas examinadoras de projeto e qualificação Dr. Pedro Prietto e Dr. Luizmar Lopes, pelas contribuições durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos laboratoristas e acadêmicos, envolvidos no Laboratório do Centro Tecnológico de Engenharia Civil, Ambiental e Arquitetura, especialmente aos do Laboratório de Geotecnia, Leunir, Matheus e Pedro.

À Universidade de Passo Fundo e ao PPGEng por possibilitar o desenvolvimento deste trabalho e pelo incentivo às pesquisas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento da bolsa de estudo.

Aos demais amigos e colegas do PPGEng, pelas alegrias, angústias e conhecimentos compartilhados, e auxílio prestado durante estes dois anos de caminhada. Em especial Claudio, Joice e Bianca meu muito obrigada!

“Feliz aquele que transfere o que sabe e
aprende o que ensina.”
(Cora Coralina)

RESUMO

A construção civil é um dos setores que mais impacta o meio ambiente, tanto na utilização de recursos naturais como na produção de resíduos. As obras de infraestrutura necessitam de alternativas para a redução do seu impacto ambiental e para a aplicação do resíduo de construção e demolição (RCD), considerado um material com grande potencial para reúso. O reforço com uso de geocélulas já vem sendo estudado por outros pesquisadores e tem demonstrando eficiência. Feita de materiais geossintéticos, suas células fornecem confinamento ao solo, o que melhora a distribuição dos carregamentos. Sendo assim, o estudo propõe uma alternativa aos agregados naturais substituindo-os pelo RCD, e analisando seu comportamento como material de preenchimento de geocélulas empregadas no reforço de solo arenoso, a fim de analisar o desempenho do resíduo no aumento da capacidade de carga do solo. A verificação dos resultados de resistência das amostras foi obtida através de ensaios de placa em laboratório em placa circular de 15 cm de diâmetro, com medidas diretas de tensão e deslocamento. Os ensaios foram realizados em duplicata para duas alturas distintas de geocélula preenchidas com RCD, a fim de analisar mais essa influência na resistência do solo. Assim como foram ensaiadas amostras de resíduo sem geocélula nas mesmas alturas, para verificação do real aumento na capacidade de carga do solo proporcionado pelo uso da geocélula. Os resultados mostraram que o RCD como material de preenchimento e a geocélula promoveram um aumento de 2,57 vezes para os ensaios com 20 cm e 2,38 para os ensaios com 7,5 cm comparado com o referência. Assim como os resultados para a redução de deslocamento da sapata apresentou mais de 70% de melhoria quando comparado com o referência e mais de 40% quando comparado com o resíduo, não sendo observada influência da altura do reforço para os ensaios com geocélula.

Palavras-chave: Ensaio de placa. Melhoramento de solo. Geossintéticos. RCD.

ABSTRACT

Civil construction is one of the sectors that most impacts the environment, both in the use of natural resources and in the production of waste. Infrastructure works need alternatives to reduce their environmental impact and to apply construction and demolition waste (RCD), considered a material with great potential for reuse. Reinforcement using geocells has already been studied by other researchers and is showing efficiency. Made of geosynthetic materials, its cells provide confinement to the ground, which improves the distribution of shipments. Thus, the study proposes an alternative to natural aggregates replacing them with RCD, and analyzing their behavior as filling material for geocells used in the reinforcement of sandy soil, in order to analyze the performance of the residue in increasing the load capacity of the soil. The verification of the resistance results of the samples was obtained through laboratory plate tests on a circular plate of 15 cm in diameter, with direct measurements of tension and displacement. The tests were carried out in duplicate for two different geocell heights filled with RCD, in order to further analyze this influence on soil resistance. As well as samples of residue without geocell were tested at the same heights, to verify the real increase in the load capacity of the soil provided by the use of the geocell. The results showed that the RCD as filling material and the geocell promoted an increase of 2.57 times for the 20 cm tests and 2.38 times for the 7.5 cm tests compared to the reference. As well as the results for the reduction of displacement of the shoe presented more than 70% improvement when compared with the reference and more than 40% when compared with the residue, with no influence of the height of the reinforcement for the geocell tests.

Keywords: Plate tests. Reinforcement of soil. Geosynthetics. CDW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagramas de uma geocélula (a) Geocélula fechada (b) Geocélula aberta	25
Figura 2 - Parâmetros geométricos de um sistema de reforço por geocélula: B - largura do carregamento, u - recobrimento do reforço, h - altura da geocélula, d - largura da célula, b - largura do reforço	25
Figura 3 - Geocélula (a) com parede lisa e (b) com parede perfurada	26
Figura 4 - Padrões utilizados para a formação de geocélulas (a) padrão diamante (b) padrão chevron	26
Figura 5 - Ilustração esquemática do efeito do confinamento: a) aplicação do carregamento; b) indução de tensões horizontais dentro da célula; c) mobilização de tensões cisalhantes na interface solo/parede da célula	28
Figura 6 - Esquema ilustrativo do efeito membrana: (a) aplicação do carregamento; (b) deformação do solo de fundação e ativação das tensões cisalhantes na interface entre o solo e a geocélula e de tração no geossintético.....	28
Figura 7 - Ilustração esquemática do efeito laje	29
Figura 8 – Índices de RCD coletados – Brasil e regiões (2016 e 2017).....	32
Figura 9 - Composição das cargas coletadas por todas as empresas nos meses julho, setembro e outubro de 2005	33
Figura 10 - Classificação dos resíduos recebidos em uma usina de Passo Fundo/ RS	34
Figura 11 - Fluxograma da pesquisa	41
Figura 12 - Amostra da areia	44
Figura 13 - Curva granulométrica da areia de Osório	45
Figura 14 – Amostra RCD sem peneirar	46
Figura 15 - Configuração do ensaio de placa	50
Figura 16 - Equipamentos do ensaio de placa	51
Figura 17 - Sistema de reação e caixa de acomodação.....	51
Figura 18 - Equipamentos: a) Placa rígida de aço b) Macaco hidráulico c) Célula de carga...	52
Figura 19 - Régua e deflectômetro	52
Figura 20 - Vista superior do sistema.....	54
Figura 21 - Curva granulométrica do RCD	55
Figura 22 - Composição Gravimétrica	57
Figura 23 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios de referência no solo de fundação S1 e S2	60

Figura 24 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio S1	60
Figura 25 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio S2	61
Figura 26 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - S1	61
Figura 27 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - S2	62
Figura 28 - Deslocamento da superfície com o recalque da placa S1 e S2	62
Figura 29 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios SR1 - 7,5 cm e SR2 - 7,5 cm.....	63
Figura 30 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR1 - 7,5 cm	64
Figura 31 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR2 - 7,5 cm	64
Figura 32 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SR1 - 7,5 cm	65
Figura 33 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SR2 - 7,5 cm	65
Figura 34 - Deslocamento da superfície com o recalque da placa SR1 - 7,5 cm e SR2 - 7,5 cm	66
Figura 35 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios SR1 - 20 cm e SR2 - 20 cm.....	66
Figura 36 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR1 - 20 cm	67
Figura 37 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR2 - 20 cm	67
Figura 38 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SR1 - 20 cm	68
Figura 39 -Perfil de deslocamento embaixo da placa - SR2 - 20 cm	68
Figura 40 - Deslocamento da superfície com o recalque da placa SR1 - 20 cm e SR2 - 20 cm	69
Figura 41 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios SRG1 - 7,5 cm e SRG2 - 7,5 cm	69
Figura 42 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SRG1 -7,5 cm	70
Figura 43 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SRG2 -7,5 cm	70
Figura 44 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SRG1 -7,5 cm	71
Figura 45 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SRG2 -7,5 cm	71
Figura 46 - Deslocamento da superfície com o recalque da placa SRG1 - 7,5 cm e SRG2 - 7,5 cm	72
Figura 47 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios SRG1 - 20 cm e SRG2 - 20 cm.....	72
Figura 48 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SRG1 -20 cm	73
Figura 49 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SRG2 -20 cm	73
Figura 50 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SRG1 - 20 cm	74
Figura 51 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SRG2 -20 cm	74
Figura 52 -Deslocamento da superfície com o recalque da placa SRG1 - 20 cm e SRG2 - 20 cm	75

Figura 53 - Curvas tensão-deslocamento dos ensaios com e sem geocélula com $h= 7,5$ cm e ensaios de referência.....	77
Figura 54 - Curvas tensão-deslocamento dos ensaios com e sem geocélula $h= 20$ cm e ensaios de referência	79
Figura 56 - Curvas tensão-deslocamento dos ensaios com geocélula e ensaios de referência	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Funções dos geossintéticos em projetos de engenharia	23
Quadro 2 - Pesquisas sobre o comportamento de geocélulas como reforço de solo.....	37
Quadro 3 - Continuação - Pesquisas sobre o comportamento de geocélulas como reforço de solo	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados referentes ao total de cargas coletadas pelas empresas nos meses de julho, agosto e setembro de 2005.....	32
Tabela 2 - Classificação e caracterização dos resíduos das demolições e reformas em Passo Fundo, RS.....	35
Tabela 3 - Classificação e caracterização dos resíduos provenientes das obras residenciais em Passo Fundo, RS.....	36
Tabela 4 - Comparação das classificações do RCD em Passo Fundo/RS.....	36
Tabela 5 - Variáveis fixas, controláveis e de resposta.....	43
Tabela 6 - Plano experimental dos ensaios de placa.....	43
Tabela 7 - Caracterização geotécnica da areia de Osório.....	45
Tabela 8 - Especificações técnicas das geocélulas.....	46
Tabela 9 - Composição do resíduo.....	56
Tabela 10 - Teor de Matéria Orgânica do RCD.....	56
Tabela 11 - Percentual de composição e classificação dos resíduos de construção e demolição.....	57
Tabela 12 - Resultado da análise de solubilidade nas amostras de RCD.....	58
Tabela 13 - Resultado da análise de toxicidade nas amostras de RCD.....	58
Tabela 14 - Resultados do fator de melhora da capacidade de carga SRG1 - 7,5 cm.....	77
Tabela 15 - Resultados do fator de melhora da capacidade de carga SRG2 - 7,5 cm.....	77
Tabela 16 - Porcentagem de redução do deslocamento da sapata SRG1 – 7,5 cm.....	78
Tabela 17 - Porcentagem de redução do deslocamento da sapata SRG2 – 7,5 cm.....	78
Tabela 18 - Resultados do fator de melhora da capacidade de carga SRG1 - 20 cm.....	79
Tabela 19 - Resultados do fator de melhora da capacidade de carga SRG2 - 20 cm.....	79
Tabela 20 - Porcentagem de redução do deslocamento da sapata SRG1 – 20 cm.....	80
Tabela 21 - Porcentagem de redução do deslocamento da sapata SRG2 – 20 cm.....	80
Tabela 22 - Resultados do fator de melhora da capacidade de carga SRG1 - 20 cm e SRG2- 20 cm.....	81
Tabela 23 - Porcentagem de redução do deslocamento da sapata SRG1 – 20 cm e SRG2 – 20 cm.....	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	16
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos.....	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	REFORÇO DE SOLO.....	19
2.1.1	Solo reforçado com geossintéticos.....	20
2.2	GEOSSINTÉTICOS.....	21
2.2.1	Definição.....	22
2.2.2	Geocélulas.....	24
2.2.2.1	<i>Efeito confinamento.....</i>	27
2.2.2.2	<i>Efeito membrana</i>	28
2.2.2.3	<i>Efeito Laje</i>	29
2.3	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	29
2.3.1	Definição.....	30
2.3.2	Geração dos RCD	31
2.3.3	Composição e Caracterização dos RCD.....	33
2.4	ESTUDOS EXPERIMENTAIS REALIZADOS	37
3	MATERIAIS E MÉTODO DE PESQUISA	41
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	41
3.2	MATERIAIS	44
3.2.1	Solo.....	44
3.2.2	Resíduo de Construção e Demolição.....	45
3.2.3	Geocélula	46
3.3	MÉTODOS.....	47
3.3.1	Caracterização do resíduo	47
3.3.1.1	<i>Composição Granulométrica</i>	47
3.3.1.2	<i>Determinação da Composição Gravimétrica.....</i>	47
3.3.1.3	<i>Determinação Massa Específica de agregados reciclados de RCD segundo Leite (2001)</i>	47

3.3.1.4	<i>Índices de vazios</i>	48
3.3.1.5	<i>Teor de matéria orgânica</i>	48
3.3.1.6	<i>Lixiviação</i>	49
3.3.1.7	<i>Solubilização</i>	49
3.3.2	Ensaio de Placa	49
3.3.2.1	<i>Equipamentos</i>	50
3.3.2.2	<i>Processo de construção das camadas</i>	53
3.3.2.3	<i>Método de ensaio</i>	53
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	55
4.1.1	Composição Granulométrica	55
4.1.2	Determinação Massa Específica	56
4.1.3	Índices de Vazios	56
4.1.4	Teor de Matéria Orgânica	56
4.1.5	Composição Gravimétrica	57
4.1.6	Ensaio de Lixiviação e Solubilização	58
4.2	ENSAIO DE PLACA.....	59
4.2.1	Ensaio de referência	59
4.2.2	Ensaio reforço de resíduo com 7,5 cm	63
4.2.3	Ensaio reforço de resíduo com 20 cm	66
4.2.4	Ensaio reforço de resíduo e geocélula com 7,5 cm	69
4.2.5	Ensaio reforço de resíduo e geocélula com 20 cm	72
4.3	ANÁLISE GLOBAL.....	75
4.3.1	Influência do uso da geocélula	76
4.3.2	Influência da altura da geocélula	80
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A construção civil é considerada um dos setores que mais afeta o meio ambiente. Isso se deve a vários motivos, como o consumo excessivo dos recursos naturais, utilização de grande montante de agregados, onde sua extração acarreta em grandes modificações do meio ambiente e a geração de resíduo em grande escala, que ocasiona uma quantidade considerável de entulhos pelas cidades, trazendo inúmeras consequências imediatas e principalmente futuras.

Em vista disso, as obras de engenharia civil são responsáveis por uma quantidade considerável de produção de resíduos. O Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil mostra que no ano de 2018 foram cerca de 44,5 milhões de toneladas de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) produzidos, representando um índice de 0,585 kg/hab/dia, sendo quase 6 milhões na região sul, com um índice de 0,546 kg/hab/dia (ABRELPE, 2019). Já no município de Passo Fundo, os dados são de 2008, e o valor aproximado de geração em um ano era de 37 toneladas, compondo um índice de 0,55 kg/hab/dia (BERNARDES et al., 2008).

O desenvolvimento sustentável está relacionado com a possível redução da geração, a reutilização ou reciclagem dos resíduos. As áreas que envolvem a engenharia vêm aumentando suas pesquisas em busca de materiais alternativos ou novos materiais para serem utilizados em suas obras de infraestrutura. Sendo que esses novos materiais apresentam, muitas vezes, o mesmo desempenho que os materiais naturais ou até mesmo um melhor desempenho.

A Resolução nº. 307, 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a Gestão dos Resíduos da Construção Civil obrigando os geradores a reduzir, reutilizar e reciclar, tratar e dispor os resíduos de construção e demolição (RCD). Através disso muito tem-se estudado sobre o RCD e os resultados vem chamando a atenção, principalmente como alternativa a utilização dos agregados naturais (CONAMA, 2002).

Dentro dos setores da engenharia civil, a engenharia geotécnica tem se destacado nas buscas por elementos alternativos, pois a condição dos solos é de grande importância para a implantação das obras. Sendo assim, muitas vezes é necessário realizar intervenções nos locais em que o solo, em sua condição original, não teria capacidade de suportar determinadas estruturas, pois apresenta baixa resistência ou recalques excessivos.

Muitas construções estão avançando para áreas onde os solos não tem uma capacidade de carga ideal, apresentando um grande desafio para a geotecnia. Um grande aliado para estes casos são os materiais geossintéticos, como a geocélula, para reforço de solo, que na maioria das vezes são preenchidos com material granular natural (DASH; BORA, 2013).

A utilização de um geossintético, como a geocélula, para reforço de solo já é largamente difundido na engenharia geotécnica. A geocélula, com sua estrutura tridimensional de confinamento, interage com o solo e melhora a distribuição dos carregamentos e a deformação. Aumentando assim a resistência ao cisalhamento daquele solo, além de também ser empregadas em projeto e execução de proteção de taludes contra erosão, em muros de gravidade e em revestimento e proteção de canais e corpos de águas. (SIREESH et al., 2009; DASH; BORA, 2013). Por esse motivo foi escolhida para compor o estudo, sendo normalmente preenchida com o próprio solo ou com agregados naturais, no caso estudado foi preenchida com o resíduo de construção e demolição (RCD).

O preenchimento de geocélulas com materiais alternativos vem sendo estudado dentro da linha de pesquisa de Infraestrutura Sustentável do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng) da Universidade de Passo Fundo (UPF), Baruffi (2017) e Favretto (2018) utilizaram o resíduo do beneficiamento de pedras preciosas e apresentaram resultados que indicam uma viabilidade técnica de sua aplicação. Seguindo essa linha, de utilizar resíduo como material de preenchimento em geocélulas, foi modificado o tipo de resíduo e estudado o comportamento do RCD na geocélula. Além de ser uma alternativa sustentável para reduzir o uso de agregados naturais, é também uma solução que reduz o impacto do armazenamento deste resíduo.

Com o intuito de encontrar alternativas para a utilização de agregados naturais no reforço de solos com geocélulas e em busca de minimizar os problemas ambientais futuros, o presente estudo utilizou o resíduo de construção e demolição da região de Passo Fundo/RS como material de preenchimento de geocélulas, analisando o desempenho para considerar seu uso em reforço de solos.

Para isso foi analisado o aumento da resistência do solo, ou seja, o aumento da capacidade de carga, através dos ensaios de placa em laboratório, já utilizado em outros estudos experimentais (MANDAL e GUPTA, 1994; MHAISKAR e MANDAL, 1996; DASH et al., 2001a; DASH et al., 2001b; DASH et al., 2003; MENESES, 2004; THALLAK et al., 2007; SIREESH et al., 2009; BARUFFI et al., 2016; FAVRETTO, 2018). Com os dados obtidos

foram definidos critérios sobre o comportamento da carga-recalque e estimadas as características de capacidade de carga de um elemento de fundação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente estudo foi analisar, através de ensaio de placa, o comportamento e avaliar o desempenho de um sistema de reforço em solo arenoso e fofo, utilizando geocélulas preenchidas com resíduos de construção e demolição gerados na cidade de Passo Fundo- RS e região.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterizar o resíduo;
- b) Avaliar a capacidade de carga do solo com uso de geocélulas preenchida com resíduo;
- c) Analisar os deslocamentos no solo com a utilização do sistema de reforço em duas alturas distintas.
- d) Comparar o desempenho dos sistemas de reforço de solo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo estão apresentados os fundamentos teóricos sobre os principais conceitos utilizados para a elaboração deste estudo. Primeiramente são abordados os temas de aplicações de reforço de solo e o uso dos geossintéticos para aumento de capacidade de carga em solos, seguido de um estudo de conceitos e técnicas de reforço de solo com uso de geocélula. Após é realizada uma análise, da geração e composição do resíduo de construção e demolição (RCD). Para finalizar foram abordados alguns estudos experimentais referência para a pesquisa.

2.1 REFORÇO DE SOLO

A demanda por algum tipo de reforço, ou melhoramento, em solos vem da necessidade de executar estruturas, como fundações, pisos industriais ou pátios de estacionamento, em camadas de solos com reduzida resistência (AVESANI NETO, 2013). Esse reforço pode consistir em técnicas que introduzem determinados elementos ao solo, com o intuito de que resistam e deem suporte a uma determinada solicitação, ao qual aquele solo por si só não resistiria. Assim como, atuar no melhoramento das características geotécnicas, através de técnicas físicas e químicas que alterem uma ou mais propriedades do solo que se deseja melhorar.

Os solos a serem reforçados são em sua maioria argilas moles ou muito moles, que apresentam resistência muito baixa, são muito compressíveis e que sofrem com diversas deformações. Assim como, também necessitam de reforços, as areias soltas ou muito soltas, que apresentam uma resistência baixa, são compressíveis e de alta permeabilidade (MENESES, 2004).

Almeida e Marques (2013) apresentam alternativas de técnicas convencionais para a construção de aterros em solos moles que melhorariam a liquidação e a estabilidade do solo. Para os autores as restrições de tempo podem tornar inadequadas técnicas como aterros convencionais ou aterros sobre drenos verticais, com isso favorecem as aplicações de outras alternativas, que, no entanto, pode ter custos mais elevados. Os autores afirmam também que é comum o uso de reforço geossintético associado ou substituindo à maioria das alternativas aplicáveis.

Projetistas e executores passam por verdadeiros desafios em projetos geotécnicos para construir em camadas de solos de baixa capacidade de suporte ou com recalques excessivos,

onde as construções podem apresentar problemas durante a execução que comprometem toda a sua vida útil (KEMPFERT e GEBRESELASSIE, 2006; AVESANI NETO, 2013). Dentre suas análises Avesani Neto (2013) divide as possíveis intervenções em cinco grupos de atuação, onde cada grupo busca uma solução diferente para construir nestes solos.

Sendo que o primeiro grupo foi denominado desvio, a solução mais simples, embora seja difícil de ser colocada em prática. Sua proposta é evitar o problema, mudando o traçado ou escolhendo outra área para realizar a construção. O segundo grupo é o de convivência com o problema, no qual se sugere a construção de um aterro de conquista possibilitando a construção do aterro necessário (AVESANI NETO, 2013).

Remoção é o terceiro grupo citado por Avesani Neto (2013), neste é apresentado como solução a mais antiga forma, onde se é removido totalmente ou parcialmente a camada de solo mole, sendo usual até 5 metros e em algumas bibliografias admitido até 7 metros. Entretanto, o custo dessa solução deve ser analisado, pois existem tratamentos que podem ser aplicados de maneira mais rápida e muitas vezes mais econômicos.

Esses tratamentos são apresentados pelo quarto e quinto grupos, tratamentos e construções, onde são utilizados artifícios construtivos para auxiliar na melhoria geotécnica do solo de fundação. Nestes casos existem diversas metodologias aplicáveis, algumas mais incisivas na construção e outras com maior aproveitamento de materiais e sistemas construtivos (AVESANI NETO, 2013).

Assim como Almeida e Marques (2013) declaram que as técnicas de melhoramento do solo que serão aplicadas em determinadas situações estão diretamente ligadas com as características geotécnicas do local, a finalidade de uso da área, prazos e principalmente os custos envolvidos. Nesse contexto são empregados com frequência os geossintéticos, atuando sozinho ou com associações, utilizando mantas, geogrelhas, de elevada rigidez e resistência, ou geocélulas como sistema de confinamento.

2.1.1 Solo reforçado com geossintéticos

Com o uso de geossintéticos o tempo de execução da obra é considerado menor, pois eles têm uma fácil instalação, quando comparado com outras técnicas ou outros produtos destinados a reforço, assim como maior controle de qualidade durante a fabricação. Além de exigir menos equipamentos, outra vantagem está na diminuição da poluição e quanto a

preservação ambiental uma vez que é considerado um produto alternativo aos materiais naturais, como solos e materiais granulares (SHUKLA; YIN, 2006).

Os geossintéticos vem desempenhando um papel fundamental, nas últimas décadas, apresentando soluções mais rápidas, mais leves, mais esbeltas, mais confiáveis e muitas vezes mais econômicas. Ajudando no aprimoramento de técnicas existentes e permitindo associações e combinações de solos e agregados mais efetivos (VERTEMATTI, 2015).

A eficiência na utilização de geossintéticos dentro da construção civil vem tomando lugar de destaque, principalmente na área geotécnica. Esses materiais permitem que diversos problemas, dessa área da engenharia, sejam solucionados de maneira eficiente e rápida. Pois contamos com uma grande variedade de geossintéticos que podem ser aplicados em inúmeros casos, como de instabilidades de taludes, impermeabilização de áreas e reforço e melhoria de solos (AVESANI NETO; BUENO, 2009; MENESES, 2004).

Avesani Neto (2013) realizou uma pesquisa em que compara o reforço planar, com uso de geogrelhas e mantas, e o reforço com sistema celular, com uso de geocélulas. Concluindo que há um aumento significativo na rigidez quando utilizado a geocélula, ou seja, um aumento da eficiência do reforço devido ao sistema de confinamento celular. Também Meneses (2004) afirma que o acréscimo da resistência ao cisalhamento é resultado do confinamento da geocélula que evita o espalhamento lateral, sendo de grande relevância quando o intuito é melhorar a capacidade de carga.

2.2 GEOSSINTÉTICOS

A utilização de materiais formados por fibras resistentes para melhorar a qualidade dos solos já é realizada a muitos anos, mas a produção em larga escala de geossintéticos aconteceu apenas no ano de 1960 na França, na Inglaterra e nos Estados Unidos. A partir disso na década de 70 as aplicações de geossintéticos ficaram ainda mais difundidas no mundo, principalmente pelas muitas funções dos produtos, onde eram utilizados em aterros rodoviários sobre solos de baixa capacidade de suporte, muros em solo reforçado, filtros de drenos e barragens, além da associação de diferentes tipos de geossintéticos como geotêxteis e geomembranas (ABINT, 2001; VERTEMATTI, 2015). E em 1971, segundo ABINT (2001) teve início no Brasil a “Era dos Geossintéticos” quando foi fabricado o primeiro geotêxtil não tecido.

Os geossintéticos surgiram como materiais de engenharia interessantes em uma ampla gama de aplicações, como em obras de transporte, geotécnicas, ambientais e hidráulicas por

exemplo. Com isso, rapidamente produtos relacionados e derivados dos geossintéticos vêm sendo desenvolvidos e usados das mais diversas maneiras (KOERNER, 2005).

Há muitas razões para o fenômeno de novos produtos acontecer, os geossintéticos tem um alto controle de qualidade quando fabricados, a rapidez com que são instalados, geralmente substituem os recursos das matérias-primas, muitas vezes substituem os projetos de difíceis execuções, sua vida útil é apropriada, e é competitivo quando comparado com outras soluções para problemas, além de que eles tornaram possíveis projetos e aplicações até então impossíveis (KOERNER, 2005).

2.2.1 Definição

Segundo a norma ISO 10318-1:2013 a nomenclatura geossintético, também conhecido pela sigla GSY, é utilizado de maneira genérica para designar produtos que são produzidos com a utilização de um polímero, seja sintético ou natural. Os geossintéticos podem se apresentar como manta, tira ou estrutura tridimensional, sendo muito utilizado em aplicações de engenharia geotécnica, civil e ambiental. Vertematti (2015) afirma que os geossintéticos são formados essencialmente por polímeros e aditivos. Sendo os polímeros compostos químicos formados por grandes moléculas, interligadas através de forças atrativas intermoleculares simples, e os aditivos usados dependem da função que se deseja melhorar, seja nos processos de fabricação ou para modificar aspectos do comportamento do polímero básico.

O termo geossintético, segundo Koerner (2005) e Shukla e Yin (2006), foi formado basicamente pela derivação de dois termos, o prefixo “geo” que se refere ao seu uso final associado a melhoria de desempenho em obras geotécnicas, e o sufixo “sintético” que se refere aos materiais poliméricos que são empregados em sua fabricação. Cada produto derivado do geossintético possui características únicas, do mesmo jeito que outros materiais de construção, como aço, concreto, madeira, se adaptando a diferentes situações, seja por diferentes formatos ou combinações de diferentes geossintéticos.

Utilizado em melhoramento de solos, controle de erosão, estabilidade de taludes, impermeabilizações, entre outras obras que os geossintéticos podem ser aplicados. Sendo que, para ser aplicado corretamente, as condições técnicas devem ser bem analisadas para a escolha do geossintéticos ideal que atenda a todas as exigências necessárias na obra. De acordo com Shukla e Yin (2006), os geossintéticos podem ser classificados conforme o modo que é fabricado, como alguns descritos a seguir:

- **GEOTÊXTEIS (GTX):** formam texturas tecidas e/ou não tecidas, flexível e permeável pode ser utilizado para separar, proteger, filtrar, drenar ou reforçar;
- **GEOGRELHAS (GGR):** sua estrutura tem forma de grelha, com isso permite o contato com o meio onde está inserido, utilizado normalmente como reforço de solo;
- **GEORREDES (GNT):** tem a estrutura semelhante a grelha, possui alta porosidade, muito utilizada na drenagem;
- **GEOMEMBRANAS (GMB):** tem estrutura semelhante a manta possuem baixa permeabilidade, utilizada principalmente em impermeabilizações;
- **GEOCÉLULAS (GCE):** possui estrutura tridimensional, constituídos por um conjunto de células interligadas que confinam mecanicamente os materiais neles inseridos, utilizadas em controle de erosão, proteção de taludes, reforço de solos moles e na construção de muros de contenção; e
- **GEOCOMPOSTOS (GC):** é formado pela associação de um ou mais geossintéticos, desenvolvido conforme a necessidade específica, por exemplo drenagem.

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 em projetos de engenharia

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	-	-	-	-	-	-	X
Geocélula	-	X	-	-	X	X	-
Geotubo	-	-	-	X	-	-	-
Geofibras	-	-	-	-	-	X	-

* Quando impregnado com material asfáltico.

Fonte: Adaptado de Vertematti (2015)

2.2.2 Geocélulas

A utilização da geocélula teve seu início na década de 70 pelo United States Army Corps of Engineers, onde os militares norte-americanos se depararam com a necessidade de estabilizar materiais granulares para o trânsito de veículos. A solução, para ser aplicada em praias e desertos, deveria ser de rápida construção e oferecer uma base com o suporte necessário para ser estradas e pistas de pouso e decolagem (MENESES, 2004; WESSELOO et al., 2009).

Com o resultado positivo dessa tecnologia já no final da década de 70 início dos anos 80 houve a sua incorporação em construções civis. Dessa forma iniciou-se a sua produção e comercialização em larga escala, assim sua técnica e aplicação começaram a ser mais conhecida mundialmente (MENESES, 2004).

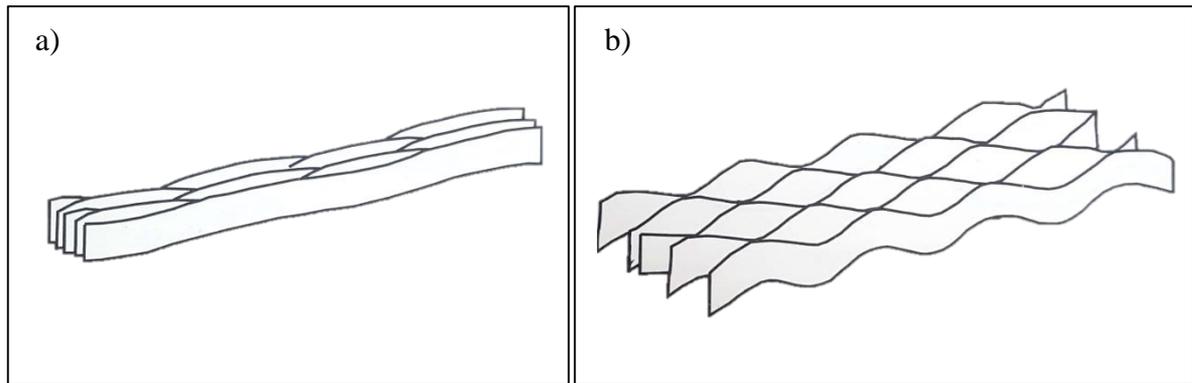
O reforço de geocélula é uma estrutura tridimensional interconectada em favo de mel feita de geotêxteis ou geogrelhas. Suas células fornecem confinamento ao solo. Também desenvolve interligação com o solo circundante através da sua abertura e desenvolve forte ancoragem que melhora a capacidade de carga. A geocélula preenchida comporta-se como uma laje semirrígida que redistribui a carga, levando a redução do estresse e assentamento (BISWAS et al., 2012)

Koerner (2005) em seu livro aborda as geocélulas tridimensionais e confirma que o confinamento físico do solo, desempenhado por ela, melhora amplamente a resistência ao cisalhamento principalmente de solos granulares. Além disso, essa maior resistência ao cisalhamento devido ao confinamento, resulta em excelente melhora da capacidade de carga.

A definição do geossintético denominado geocélula, segundo a ISO 10318-1:2013, o Curso Básico de Geotêxteis (ABINT, 2001) e o Manual Brasileiro de Geossintéticos (VERTEMATTI, 2015), é de um produto que possui estrutura tridimensional aberta, formada por células interligadas, com a finalidade de confirmar mecanicamente os materiais nela inseridos, com a principal função de reforçar e de controlar erosão.

Outra grande vantagem da utilização de geocélulas é a facilidade que se tem em obra para fazer seu transporte e armazenamento. Isso se deve, pois são formadas por tiras sobrepostas unidas entre si e assim são entregues pelos fabricantes em painéis esbeltos, como demonstrado na Figura 1a, sendo montadas direto na obra onde são abertas formando painéis, como mostra a Figura 1b, ficando prontas para receber o preenchimento.

Figura 1 - Diagramas de uma geocélula (a) Geocélula fechada (b) Geocélula aberta

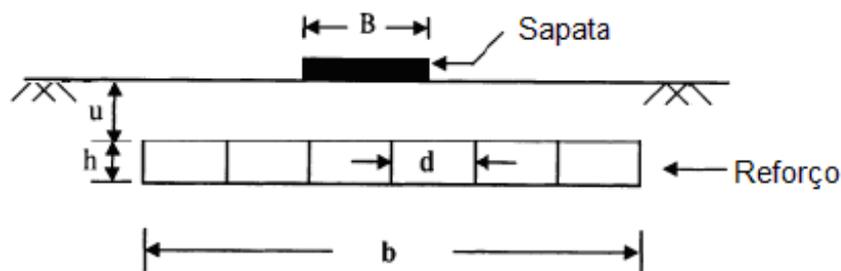


Fonte: Adaptado de Koerner (2005)

Avesani Neto e Bueno (2009) certificaram que as indústrias vêm produzindo diversos tipos e modelos de geocélulas, onde variam os materiais de sua composição, os tipos de solda das tiras, os formatos e as dimensões das células. Com uma pesquisa rápida no mercado é possível encontrar diferentes dimensões de abertura (d), altura (h), relação de forma (h/d), sendo geralmente, nas alturas (h) de 50, 75, 100, 150 e 200 mm.

Na Figura 2 são ilustrados os parâmetros geométricos de um sistema de reforço com camada de geocélula. As propriedades da geocélula, como rigidez, orientação das nervuras e o tamanho da abertura tem grande influência na melhora do efeito de reforço. (DASH et al., 2001; BISWAS et al., 2012).

Figura 2 - Parâmetros geométricos de um sistema de reforço por geocélula: B - largura do carregamento, u - recobrimento do reforço, h - altura da geocélula, d - largura da célula, b - largura do reforço



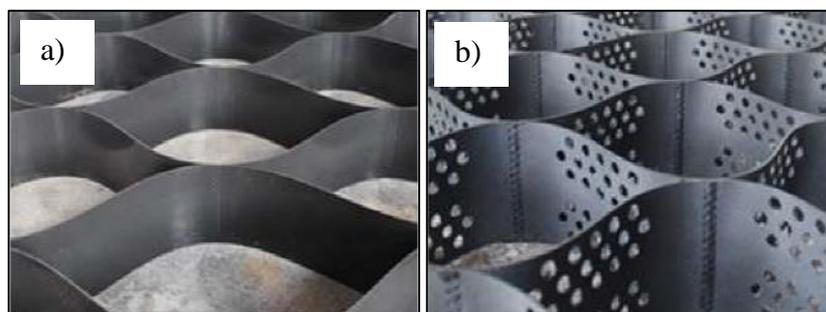
Fonte: Avesani Neto (2013)

Para a fabricação das geocélulas são feitas tiras com dimensões pré-definidas, e soldadas umas as outras para obter o formato celular. Geralmente são utilizados os mesmos materiais de outros geossintéticos, como o Polietileno (PE) e o Polietileno de Alta Densidade (PEAD) das geomembranas, e o Poliéster (PET) e o Polipropileno (PP) dos geotêxteis e geogrelhas. A maneira que as tiras são unidas muda conforme o material, para geocélulas em PE e PEAD,

utilizam-se soldas ultrassônicas ou por termofusão, já no caso de tiras de PET e PP, usualmente a união é feita por costuras (MENESES, 2004; AVESANI NETO; BUENO, 2009).

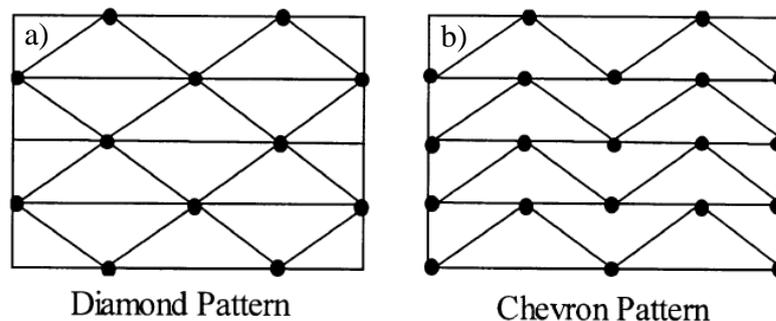
Para casos em que além do confinamento, se deseja a drenagem do solo, é possível encontrar células que possuem perfurações nas paredes com o intuito de permitir o fluxo de água, conforme comparação da Figura 3. Dois modelos de células podem ser encontrados no mercado, são denominadas Diamante e Chevron, conforme representado na Figura 4, sendo o primeiro similar a um favo de mel e o segundo em ziguezague.

Figura 3 - Geocélula (a) com parede lisa e (b) com parede perfurada



Fonte: TMP Geosynthetics (2016)

Figura 4 - Padrões utilizados para a formação de geocélulas (a) padrão diamante (b) padrão chevron



Fonte: Dash et al. (2001)

Webster e Alford (1978) realizaram os primeiros estudos sobre confinamento celular, com o intuito de encontrar alternativas para construção de estradas sobre camadas de solos moles. Através dos resultados obtidos nas suas pesquisas, foi confirmada que a utilização do sistema de confinamento celular, em base de estradas e pátios de armazenamento, é uma boa alternativa onde observaram uma diminuição de, aproximadamente, 30% na espessura de projeto da base.

Segundo Biswas et al. (2012) para ter um melhor desempenho do solo reforçado com geocélulas, deve-se considerar a influência de diferentes parâmetros envolvidos em seu funcionamento e mecanismo. Para Avesani Neto (2013) a diferença entre a geocélula e os demais geossintéticos é de que além dos efeitos de confinamento e membrana, a geocélula desenvolve um terceiro mecanismo conhecido como o efeito laje.

Como desenvolve a melhora na capacidade de carga, a geocélula trabalha com vários tipos de mecanismos que atuam em conjunto, assim como nos outros geossintéticos utilizados como reforço basal. Com a função de absorver os carregamentos oriundos da superfície e distribuí-los à camada de base abaixo da geocélula, os três mecanismos podem ser entendidos e analisados de forma específica. Sendo assim cada um dos três mecanismos estão retratados detalhadamente a seguir a fim de melhor explicar e entender seus funcionamentos (AVESANI NETO, 2013).

2.2.2.1 *Efeito confinamento*

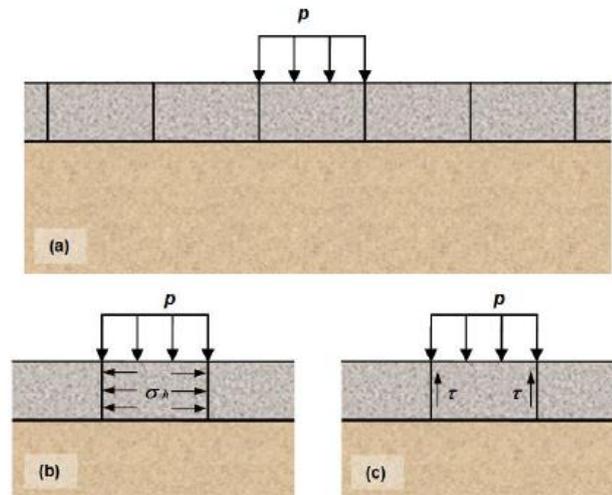
O sistema de confinamento da geocélula é iniciado no momento em que o carregamento é aplicado. Com seu formato celular, há um aumento das tensões confinantes em seu material de enchimento, de maneira a induzir uma compressão deste material nas células densificando o agregado (MANDAL; GRUPTA, 1994).

Assim, podemos explicar o efeito de confinamento em duas etapas (

Figura 5), a primeira, acontece com o aumento da resistência e a redução da deformabilidade do material de preenchimento da geocélula, isso se deve as tensões confinantes no material de preenchimento que com a compressão compacta e resulta em melhores condições de resistência. A segunda etapa acontece através da dissipação dos carregamentos aplicados, onde as tensões horizontais de dentro das células são distribuídas e compartilhadas entre células adjacentes mobilizando tanto as resistências passivas do solo confinado como as resistências cisalhantes na interface solo/parede nas células (MANDAL; GRUPTA, 1994; AVESANI NETO, 2013).

Avesani e Bueno (2010) afirmam que a vantagem do efeito de confinamento, é a de que sua ativação não implica nos deslocamentos do solo da fundação, mas sim da adequada transmissão dos esforços para o material de enchimento, e entre este e as paredes das células. Assim como a resistência e a rigidez da geocélula e de suas costuras.

Figura 5 - Ilustração esquemática do efeito do confinamento: a) aplicação do carregamento; b) indução de tensões horizontais dentro da célula; c) mobilização de tensões cisalhantes na interface solo/parede da célula

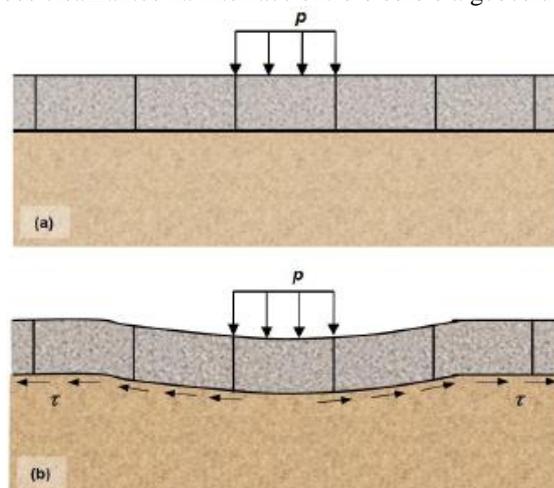


Fonte: Avesani Neto (2013)

2.2.2.2 Efeito membrana

O efeito membrana foi explicado por Avesani Neto (2013), segundo seu estudo quando um geossintético está disposto sobre um material compressível e é submetido a um carregamento normal apresenta uma deflexão com formato semelhante ao de uma membrana. Esse formato côncavo formado no material geossintético tensionado, se deve a rigidez e as suas extremidades ancoradas, que exerce uma força para cima na tentativa de suportar as cargas normais ao seu plano, redistribuindo e transferindo essas cargas para suas extremidades ancoradas, mobilizando assim, resistência ao cisalhamento de interface entre o reforço e o solo, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema ilustrativo do efeito membrana: (a) aplicação do carregamento; (b) deformação do solo de fundação e ativação das tensões cisalhantes na interface entre o solo e a geocélula e de tração no geossintético



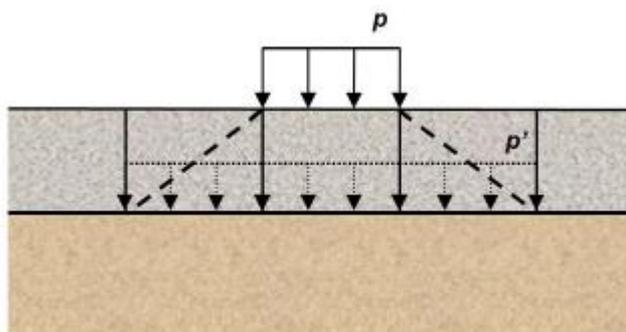
Fonte: Avesani Neto (2013)

Com a ocorrência desse efeito, há uma melhora na capacidade de suporte do solo e redução dos deslocamentos. Porém, para que esse efeito aconteça de maneira satisfatória é necessário que o reforço possua algumas características, como a separação entre os materiais acima e abaixo do reforço, alta rigidez longitudinal do elemento de reforço, deslocamentos verticais elevados da fundação para que aconteça a ativação, uma adequada interação entre reforço e solo para mobilização do atrito de interface e consequentemente transferência das tensões (AVESANI NETO, 2013).

2.2.2.3 Efeito Laje

Conhecido também como efeito radier ou espraçamento das tensões verticais, o efeito laje (Figura 7) não precisa de deslocamentos significativos para sua mobilização, atuando de forma semelhante a uma laje de concreto fornecendo resistências à flexão, compressão, tração e cisalhamento. Isso acontece em função do confinamento, onde o solo de preenchimento redistribui os esforços para a fundação, devido as tensões que são dispersadas transferindo a carga para a camada subjacente do solo e atua em uma superfície mais ampla, conduzindo menores valores de tensão para a fundação (AVESANI NETO, 2013; BISWAS et al., 2012).

Figura 7 - Ilustração esquemática do efeito laje



Fonte: Avesani Neto (2013)

2.3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

As atividades humanas, em sua maioria, necessitam de um ambiente construído adequado, e independente do grau de exigência todas tem alguma ligação com a construção civil. Isso reflete em todas as regiões do planeta onde há ocupação pelo homem, seja na cidade ou no campo. Sendo considerado como um dos maiores setores da economia, capaz de produzir os bens de maiores dimensões do planeta, a construção civil é consequentemente o maior consumidor de recursos naturais. Com isso, o impacto ambiental da construção civil pode ser considerado proporcional a sua tarefa social (JOHN, 2000).

Além de serem grandes consumidoras de recursos naturais as áreas da construção civil também são responsáveis pela geração de uma grande quantidade de resíduos. Seja na produção dos materiais e componentes, ou na atividade do canteiro de obras, durante a manutenção, modernização e também demolição. Esses resíduos possuem grande potencial para reutilização, e são desperdiçados em sua maior parte, sua geração vem crescendo continuamente à medida que vivemos (JOHN, 2000; KARTAM et al., 2004).

O descarte inadequado e o despejo ilegal do RCD estão causando um grande impacto ambiental, que vem se tornando a principal questão nas cidades e na gestão de seus resíduos sólidos. Esse descarte inadequado pode causar o aumento dos níveis de inundação dos rios, esgotamento de recursos, lixiviação de material perigoso na água causando impacto na vida marinha. Ou ainda, estes resíduos são por vezes enterrados no próprio local da obra causando a formação de camadas impermeáveis que não permitem o crescimento da vegetação e a infiltração de água da chuva no interior do solo (BANSAL et al., 2016).

2.3.1 Definição

Segundo o The Solid Waste Association of North America (SWANA, 1993 apud PINTO, 1999) a classificação da origem dos RCD se divide da seguinte maneira: material de obras viárias; material de escavação; demolição de edificações; construção e renovação de edifícios; e limpeza de terrenos. Porém Pinto (1999) salienta que a composição dos RCD depende de que local foi originado, cada país ou região utiliza diferentes tecnologias construtivas.

A definição de resíduos da construção civil (RCC) pode ser encontrada no artigo 2º da Resolução 307 do Conama (2002), que trata da seguinte maneira:

“os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulho de obras metralha ou calça”

A preocupação com a geração de resíduos e principalmente sua disposição ficou ainda mais clara a partir da Resolução 307 do CONAMA (CONAMA, 2002), onde obriga o gerador a adotar políticas para a prevenção da geração de resíduos, assim como o tornou responsável pela segregação dos RCC em quatro classes diferentes, sendo de classe A os reutilizáveis ou recicláveis como agregados de construção, pavimentação e pré-moldados; classe B aqueles

recicláveis para outras destinações, tais como os plásticos; classe C os sem tecnologia de reciclagem economicamente viável; e finalmente os de classe D que são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção ou demolição, tais como: tintas, solventes, óleos, provenientes de clínicas radiológicas etc. Além dessa divisão coloca como dever do gerador o encaminhamento desses resíduos para a reciclagem ou uma disposição final.

A NBR 10004 (ABNT, 2004a) é responsável pela classificação segundo riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública de diversos tipos de resíduos sólidos. Com o intuito de permitir o manuseio e a destinação final dos resíduos de maneira correta. Os RCD, desde que enquadrados na classe A da resolução 307 do CONAMA, são classificados nesta norma, na Classe II B, ou seja, inertes, e são definidos como:

“quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT 10007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor”.

2.3.2 Geração dos RCD

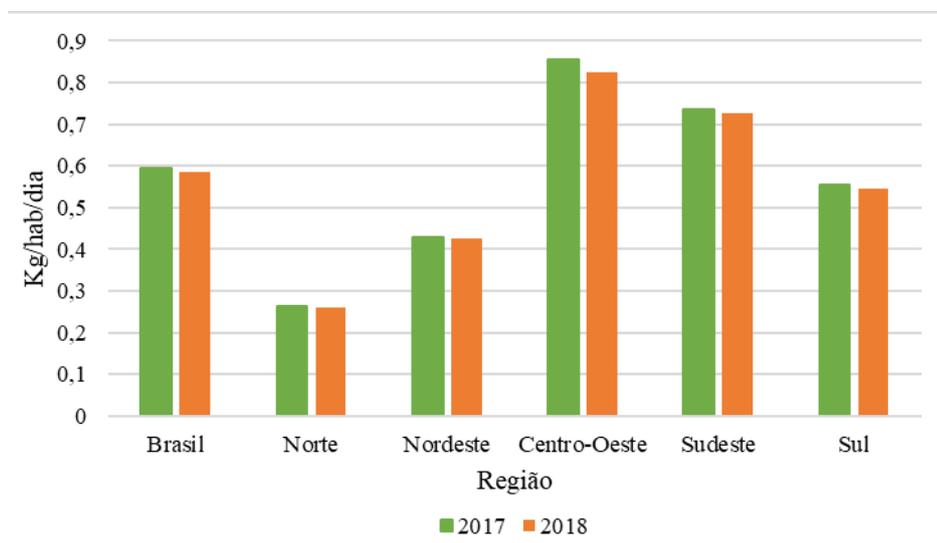
Pinto (1999) apresentou em seu estudo três formas que o resíduo de construção e demolição (RCD) pode ser mensurado, a primeira pela área construída, a segunda pela quantificação de cargas em coletores ou pelo monitoramento de descargas. Porém salienta a falta da fiscalização eficiente, onde as descargas muitas vezes são camufladas no ambiente urbano, sendo dispostas em locais inapropriados.

A indústria da construção é uma das mais antigas indústrias conhecidas, e vem a anos criando uma grande quantidade de refugos como subproduto. O RCD está sendo produzido em enormes quantidades e estes materiais podem incluir agregados, como tijolos, concreto, gesso, cerâmica, vidro, asfalto, telhas, placa de gesso, madeira, metais, diferentes tipos de plásticos, etc. (MYMRIN et al., 2015).

Por esse motivo a real quantidade de resíduos de construção e demolição gerada é difícil de ser levantada, mas é elevada na maioria dos países, e estima-se que representem de 13 a 80%, em massa, dos resíduos sólidos urbanos gerados (ÂNGULO, 2000). O diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil (IPEA, 2012) realizou o levantamento da geração dos destes resíduos através de dados quantitativos existentes tanto em escala, regional, estadual e

municipal. A Abrelpe (2019), disponibilizou índices da coleta de RCD nas regiões do Brasil nos anos de 2017 e 2018 apresentados na Figura 8.

Figura 8 – Índices de RCD coletados – Brasil e regiões (2016 e 2017)



Fonte: Abrelpe (2019)

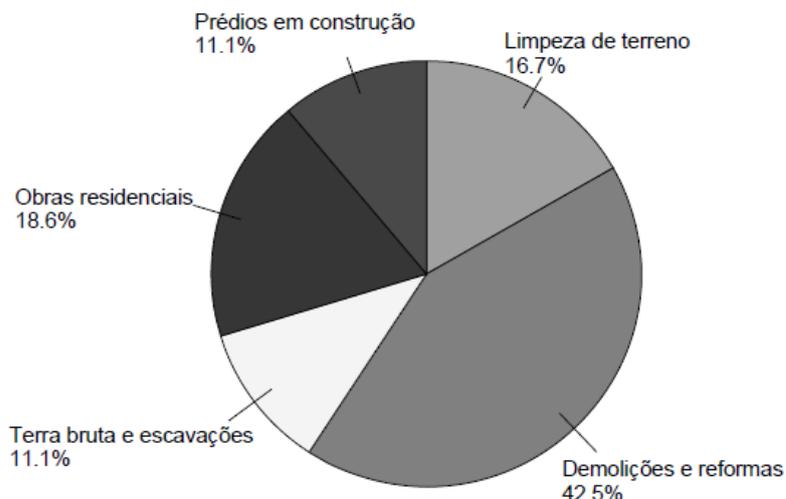
No município de Passo Fundo foi realizado um levantamento por Bernardes et al. (2008) da quantidade de RCD coletados em três meses do ano de 2005, os dados obtidos estão apresentados na Tabela 1 e na Figura 9, a pesquisa levou em consideração inclusive os resíduos de limpeza de terrenos e terra. Os autores identificaram que as cargas de demolições e reformas foi a mais expressiva, chegando a 42,5% do total de cargas, já dos percentuais de resíduos gerados por obras residenciais e prédios em construção totalizaram juntos 29,7% do montante coletado.

Tabela 1 - Dados referentes ao total de cargas coletadas pelas empresas nos meses de julho, agosto e setembro de 2005

Tipos de resíduos	Número de cargas			Total de cargas	Porcentagem (%)
	Julho	Setembro	Outubro		
Limpeza de terreno	75	99	96	270	16,7
Demolições e reformas	155	245	287	687	42,5
Terra bruta de escavações	73	61	45	179	11,1
Obras residenciais	69	110	121	300	18,6
Prédios em construção	43	54	82	179	11,1
Totais	415	569	631	1615	100

Fonte: Adaptado de Bernardes et al. (2008)

Figura 9 - Composição das cargas coletadas por todas as empresas nos meses julho, setembro e outubro de 2005



Fonte: Bernardes et al. (2008)

Com a obtenção destes dados, foi realizada uma estimativa de coleta de RCD no município de Passo Fundo, chegando ao número de 4.644 cargas anuais, desconsiderando as cargas oriundas de limpeza de terreno, sendo 1.916 cargas oriundas de construções e 2.842 de demolições e reformas. Sendo assim, chegou-se a uma estimativa da geração per capita de RCD de aproximadamente de 200 kg/hab/ano, ou 0,55 kg/hab/dia para o ano de 2005 (BERNARDES et al., 2008).

Brum (2017) realizou um estudo no ano de 2016 em uma usina de reciclagem de resíduos de construção civil, da cidade de Passo Fundo/RS, onde, dentre outros aspectos, analisou os resíduos recebidos quanto a quantidade e classificação, no período de março a dezembro. Através da análise das cargas recebidas, Brum (2017) chegou a uma quantidade média mensal de 4545 m³ de resíduo de construção e demolição recebidos na usina.

2.3.3 Composição e Caracterização dos RCD

A composição dos RCD é variável, dependendo da natureza da sua geração que pode ser de novas construções, reformas e demolições. Além disso, há uma grande variedade de técnicas e métodos que compõem as características e a quantidade produzida de RCD. Assim a caracterização dos RCD está condicionada a fatores específicos da região geradora do resíduo analisado (ÂNGULO, 2000; KARTAM et al., 2004).

Para que os RCD possam ser reutilizados existem requisitos básicos que precisam estar funcionando para que tudo possa ocorrer com sucesso. Kartam et al. (2004) listam alguns requisitos, como o recolhimento adequado dos materiais, locais de depósito apropriados,

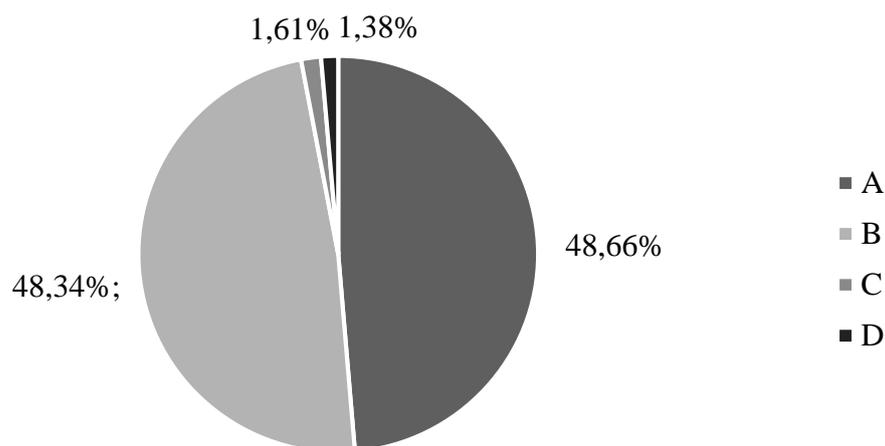
separação dos diferentes resíduos provenientes da obra, e que o produto reciclado seja competitivo com recursos naturais em termos de custo e qualidade.

Portanto, permanece a necessidade de desenvolver mais métodos atrativos, mais eficientes de criar composições que utilizam de maneira mais eficiente os resíduos, o que poderia resolver o problema de como reciclar RCD (MYMRIN et al., 2015). Há uma necessidade urgente de entender a reutilização e o potencial de reciclagem do RCD, que além de gerar oportunidades de negócios em potencial, ajuda na sustentabilidade ambiental. Os materiais podem ser reutilizados sem muito processamento em diversos tipos de utilidades, como habitações de custo mais acessível (BANSAL et al., 2016).

A qualidade do agregado de RCD depende da quantidade de argamassa nesse agregado. Também quanto mais os resíduos são tratados melhor a qualidade do agregado produzido, porém um processamento maior aumenta custo de agregado e, assim, acaba por torná-lo economicamente inviável em locais onde o agregado natural é obtido por preços mais baratos (BANSAL et al, 2016).

Brum (2017) em seu estudo classificou os resíduos recebidos pela a usina de reciclagem de RCC de Passo Fundo, como mostra a Figura 10, esta análise demonstra que a usina recebeu em maior quantidade resíduos classes A e B, somando 97% do total recebido de resíduos.

Figura 10 - Classificação dos resíduos recebidos em uma usina de Passo Fundo/ RS



Fonte: Brum (2017)

No município de Passo Fundo os dados disponíveis sobre a composição do RCD gerado estão divididos em duas categorias, a de demolições e reformas e a de obras residências. Para o RCD gerado em demolições e reformas foram analisadas oito cargas com os resultados e

classificação de acordo com a Resolução nº 307 do CONAMA apresentados na Tabela 2. Dos resíduos a maior parte foi classificada como resíduos Classe A, e os encontrados os em maior quantidade foram tijolos, argamassas e concretos representando quase 30% do total (BERNARDES et al., 2008).

O RCD de origem de obras residenciais, no município de Passo Fundo, foi analisado a partir de quatro cargas, onde foi identificado grande heterogeneidade como pode ser visto na Tabela 3. Quanto a classificação não houve presença de resíduos Classe D, que poderiam ser considerados perigosos. O resíduo de argamassas foi o de percentual mais significativo chegando a mais de 35% (BERNARDES et al., 2008).

Tabela 2 - Classificação e caracterização dos resíduos das demolições e reformas em Passo Fundo, RS

Resíduos	Massa (kg)	%	Classificação (Resolução nº 307 do CONAMA)
1 – Argamassa	7.043,5	25,4	A
2 – Cerâmica	110,6	0,4	A
3 – Concreto	5.665,4	20,40	A
4 – Fina argamassa	1.090,5	3,9	A
5 – Finos de Tijolos	891,0	3,2	A
6 – Madeira	560,4	2,0	B
7 – Matéria Orgânica, galhos	34,8	0,1	B
8 – Material retido (argamassa + tijolos)	5.456,6	19,7	A
9 – Metal, arames	52,9	0,2	B
10 – Papel, plástico e isopor, vidro	51,0	0,2	B
11 - Tijolo	6.784,6	24,5	A
Total	27.741,3	100,0	

Fonte: Bernardes et al. (2008)

Tabela 3 - Classificação e caracterização dos resíduos provenientes das obras residenciais em Passo Fundo, RS

Resíduos	Massa (kg)	%	Classificação (Resolução n° 307 do CONAMA)
1 – Argamassa	2.400,6	21,3	A
2 – Cerâmica	1.069,4	9,5	A
3 – Concreto	751,8	6,7	A
4 – Fina argamassa	1.924,7	17,1	A
5 – Gesso	141,3	1,3	C
6 – Madeira	383,9	3,4	B
7 – Material retido (argamassa + tijolos)	468,5	4,2	A
8 – Metal	31,7	0,3	B
9 – Papel, plástico, tecido, isopor, PVC	121,3	1,1	B
10 – Pedra	499,7	4,4	A
11 – Terra bruta	350,5	3,1	A
12 – Tijolo	3.137,3	27,8	A
Total	11.280,5	100,0	---

Fonte: Bernardes et al. (2008)

Quando comparados as classificações realizadas por Bernardes et al. (2008), dos resíduos gerados nas obras em Passo Fundo/RS e Brum (2017), dos resíduos recebidos por uma usina de reciclagem no mesmo município, há uma certa discrepância de percentuais como podemos ver na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação das classificações do RCD em Passo Fundo/RS

Classe	Bernardes (2006)	Brum (2017)
A	94,80%	48,66%
B	3,10%	48,34%
C	2,10%	1,62%
D	0 %	1,38%
Total	100%	100%

Fonte: Adaptado de Brum (2017)

2.4 ESTUDOS EXPERIMENTAIS REALIZADOS

No Quadro 2 apresentado nessa seção estão contidas informações, de forma breve e em ordem cronológica, de estudos realizados por alguns pesquisadores que analisaram o comportamento de geocélulas como reforço de solo. Destacando os testes realizados em laboratório para avaliar a eficácia do reforço, as variáveis estudadas, como o tipo de geocélula, o tipo de solo e os materiais de preenchimento.

Quadro 2 - Pesquisas sobre o comportamento de geocélulas como reforço de solo

AUTOR	ENSAIO	SOLO	GEOCÉLULA	VARIAÇÃO
Mandal e Gupta (1994)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque (61x32cm h=40cm); Placa corrida (B=7,3cm)	Fundação: argila marinha; Preenchimento: Areia	Geotêxtil / Polipropileno	Varição da razão de forma da geocélula (h/B).
Mhaiskar e Mandal (1996)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque (85 x 75cm h=60cm e 1,15 x 1,05m h=0,75cm); Placa retangular (B=0,25 x 0,35m)	Fundação: argila marinha; Preenchimento: Areia	Geotêxtil / Polipropileno	Altura (b) da geocélula; Profundidade geocélula; Densidade solo da fundação.
Dash et al. (2001a)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque de aço (120 x 33,2cm h=70cm); Placa corrida (B=10cm)	Fundação: Areia Preenchimento: Areia	Geogrelha biaxial	Densidade da areia (ID); Tamanho da célula (d); Formato, composição, altura (h), largura (b) e profundidade (u) da geocélula;
Dash et al. (2001b)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque de aço (120 x 33,2cm h=70cm); Placa corrida (B=10cm)	Fundação: Areia Preenchimento: Areia	Geogrelha biaxial	Altura da geocélula (h); Posição reforço planar.
Dash et al (2003)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque (90x90cm h=60cm); Placa circular (B=15cm)	Fundação: Argila siltosa Preenchimento: Areia	Geogrelha de poliéster	Espessura camada sobrejacente de areia (H); Largura (b) e Altura (h) da geocélula; Reforço planar com geogrelha; Camada de reforço planar.
Meneses (2004)	Ensaio de placa; laboratorial, caixa (1,82x1,42m h=1,80); Placa circular (B=35cm)	Fundação: Argila Siltosa Preenchimento: Areia	polietileno e polipropileno; Geogrelha biaxial	Altura (h); Material da geocélula; Reforço de geogrelha; Comparação com métodos de previsão de carga.
Thallak et al. (2007)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque (90x90cm h=60cm); Placa circular (B=15cm)	Fundação: Argila siltosa Preenchimento: Argila siltosa	Geogrelha biaxial de poliéster	Altura (h) largura (b) e profundidade (u) da geocélula; Adição reforço planar.
Zhou e Wen (2008)	Ensaio de carga; laboratorial, tanque (306x118cm h=200cm); air bags na superfície e water bags nas laterais	Fundação: solo mole coesivo da Qinshen Railway.	geocélula e geogrelha	Influência da geocélula.

Quadro 3 - Continuação - Pesquisas sobre o comportamento de geocélulas como reforço de solo

AUTOR	ENSAIO	SOLO	GEOCÉLULA	VARIAÇÃO
Sireesh et al. (2009)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque (90x90cm h=90cm); Placa circular (B=15cm)	Fundação: Argila siltosa Preenchimento: Areia.	Geogrelha biaxial; formato Chevron	Altura (h) e largura (b) da geocélula; Densidade areia (ID); Adição reforço planar.
Dash (2012)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque de aço (120 x 33,2cm h=70cm); Placa corrida (B=10cm)	Fundação: Areia Preenchimento: Areia	Geogrelha	Material da geocélula.
Avesani Neto (2013)	Comparou resultados de diferentes autores	--	diferentes geocélulas	metodologia de cálculo
Hegde e Sitharam (2015)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque de ferro (90x90 cm h= 60 cm); Placa quadrada (15x15cm h=2cm)	Fundação: Argila macia Preenchimentos: Areia, argila e agregado	Neoloy	Material da geocélula.
Suku et. al (2016)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque de ferro (90x90 cm h= 60 cm); Placa circular (B= 15 cm)	Fundação: Areia Preenchimento: Agregado granular	Polietileno	Cargas ciclicas
Baruffi (2016)	Ensaio de placa em campo; 2 Placas redondas de 30 cm uma com perfuração central de 4 cm	Fundação: Residual de basalto; Preenchimentos: Resíduo de pedras preciosas	Polipropileno	Comportamento do resíduo
Biwas e Krishna (2017)	Revisão crítica	-	-	Revisão crítica do comportamento de sistemas reforçados com geocélula
Favretto (2018)	Ensaio de placa; laboratorial, caixa de madeira (90x90 cm h=70 cm); Placa circular (D=15 cm)	Fundação: Areia; Preenchimentos: Resíduo de pedras preciosas	Polipropileno	Altura da camada
Mehrijardi et al.(2019)	Ensaio de Placa em laboratório (120x70cm h=70cm) Placas circulares (D= 8 cm, 12 cm e 15 cm)	-	-	Quatro diferentes tamanhos de grãos de solo, dois tamanhos diferentes de geocélulas e três diferentes tamanhos de placa de carregamento.

Fonte: Autor (2019)

Dentre esses estudos, Dash e colaboradores (2001a; 2001b; 2003; 2012) são os pioneiros quando levado em consideração o comportamento dos solos reforçados com geocélulas e sujeitos a cargas através de ensaios de placas. Dash e os demais pesquisadores (2001a; 2001b) relataram em seus estudos que por limitar a areia de forma mais eficaz, devido a estrutura tridimensional, a geocélula é uma técnica de reforço de solo muito favorável.

Os autores (DASH, 2001a; 2001b) variaram a razão de forma da geocélula, largura do reforço, seu recobrimento e a densidade relativa do solo. Os resultados reforçam o que havia sido observado por Mandal e Gupta (1994), de que quanto maior a razão de forma, maior a capacidade de carga do sistema de fundação. Ainda, nesses estudos foi verificado que quanto maior a largura das geocélulas maiores as capacidades de carga obtidas. Além disso, a análise quanto ao recobrimento do reforço, resultou nos melhores resultados aqueles em profundidades próximas a superfície, obtendo a seguinte referência $u = 0,1D$, ou seja, o recobrimento igual relação de 0,1 do diâmetro da placa utilizada no ensaio.

Em outro estudo, Dash et al. (2003), realizaram ensaios de placa em laboratório utilizando uma caixa com dimensões iguais a 90 x 90 x 60 cm (comprimento, largura e altura), com sapata circular de 15 cm de diâmetro, para um solo de fundação em argila mole, tendo as geocélulas preenchidas com areia. Nessa pesquisa, foram realizadas comparações com o desempenho de reforços planares (geogrelhas) e reforços tridimensionais (geocélulas), verificando que o reforço de geocélula promoveu um aumento na capacidade de carga de até seis vezes e uma redução na elevação de superfície da camada de fundação, também constatam que, quando comparados os sistemas planares e tridimensionais, atuando separadamente, a geocélula foi mais eficiente.

Os autores (DASH et. al, 2003) também concluíram que em relação à largura da geocélula, houve uma melhora no desempenho do reforço com o aumento de sua largura. Além disso, foram observados os melhores resultados para uma relação de altura da camada de reforço cerca de até duas vezes o diâmetro da placa ($h/D = 2,1$).

Thallak et al. (2007) também realizaram ensaios com geocélulas e ensaios de placa em laboratório, os ensaios foram com solo mole argiloso de fundação reforçado com geocélula preenchida com o mesmo solo da fundação. Os autores utilizaram sapata circular de 15 cm e caixa de ensaio de 90 x 90 x 60 cm (comprimento, largura e altura). Com os resultados obtidos através dos ensaios, Thallak e demais os pesquisadores (2007), concluíram que o reforço de geocélula aumenta a capacidade de carga do solo e reduz o assentamento da fundação de argila mole, além disso quanto a análise do efeito das alturas das geocélulas, os autores verificaram uma grande melhoria no desempenho para alturas de $0,6D$ até $1,2D$.

Em estudos mais recentes (SUKU et al., 2016) o reforço com geocélula foi testado sob solo granular em solos de baixa capacidade de suporte utilizados em pavimentação. Através de ensaios de carga de placas com carregamentos repetidos os resultados obtidos demonstraram

que a geocélula reforça o solo e a espessura da camada granular de estradas apresentando uma deformação menor para a camada reforçada com maior espessura.

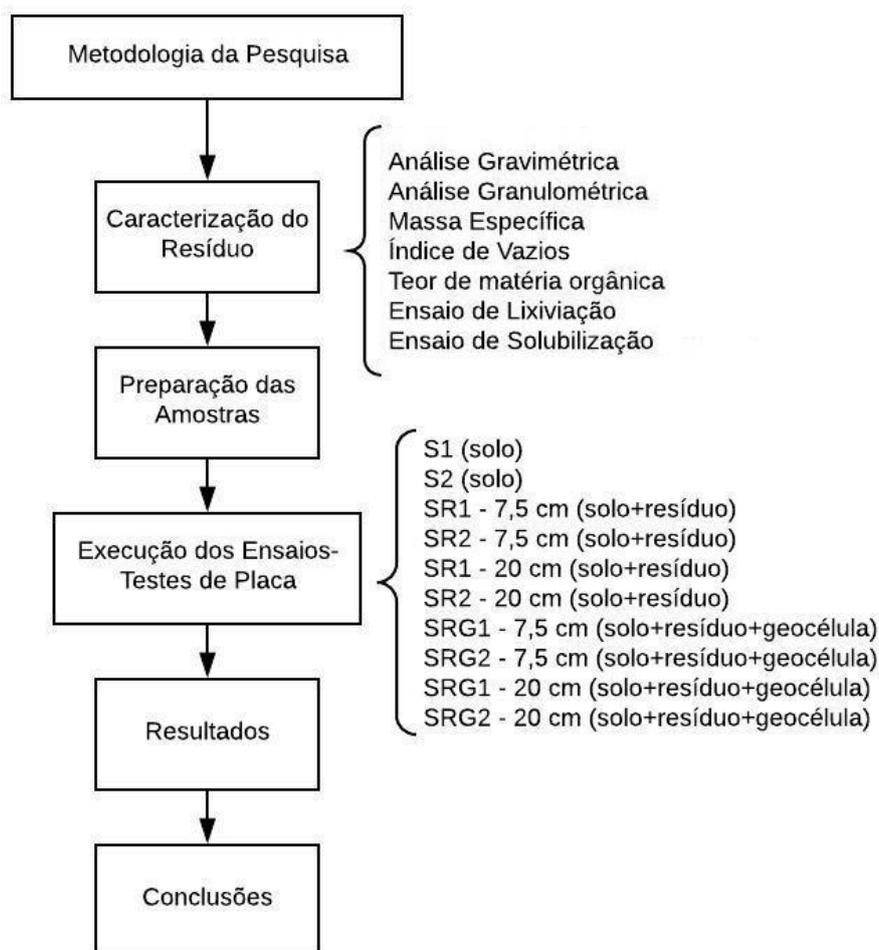
No estudo mais recente de Mehrjardi et al. (2019) foram realizados uma série de ensaios de placa com o intuito de investigar a influência dos fatores de tamanho de placa, tamanho dos grãos do solo e das aberturas da geocélula para o ensaio em escala reduzida. Como conclusões deste estudo Mehrjardi e seus pesquisadores (2019) apresentam que a proporção de tamanho de célula de geocélulas para tamanho de grão médio (D_{50}) seja de 15 para 1. Assim como, para obter os maiores benefícios do reforço de geocélulas, a dimensão da placa (B) deve estar na faixa de 13 a 27 vezes tamanho de grão médio. Ainda completam que para fornecer um aterro reforçado com geocélula mais estável e confiável, é recomendado que o tamanho das células de geocélulas deve ser selecionado menor que 0,67 vezes a largura da base.

3 MATERIAIS E MÉTODO DE PESQUISA

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa é fundamentada em experimentos laboratoriais, para a avaliação da resistência gerada pela interação entre o uso de material RCD como camada de reforço e o comportamento da geocélula. Todos os ensaios necessários foram realizados no Centro Tecnológico de Engenharia Civil, Ambiental e Arquitetura - FEAR (CETEC Serviços), vinculado a Universidade de Passo Fundo (UPF), especificadamente no Laboratório de Geossintéticos (LABGEO). O Fluxograma na Figura 11 descreve a organização das etapas sequenciais do estudo.

Figura 11 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autor (2019)

A aplicação de um planejamento de experimento tem como finalidade suprir informações sobre a relação de diferentes fatores, ou seja, demonstrar quais são os impactos de cada fator na resposta analisada e da interação entre fatores. Sendo de suma importância no desenvolvimento de novos produtos ou técnicas, garantindo uma maior qualidade dos resultados dos testes levando a um projeto com melhor desempenho. Com isso, para que os ensaios do estudo em questão tenham uma resposta de maior confiabilidade, foi desenvolvido um planejamento de experimento.

Primeiramente foram identificados todos os fatores de ruído que podem ter efeito no experimento, e para que estes não tenham influência sobre a variável de resposta optou-se por mantê-los fixados. Para que os ruídos sejam menores tomou-se os seguintes cuidados, os ensaios foram aleatorizados, o local para a realização dos ensaios foi em laboratório fechado, livre de efeitos climáticos como temperatura, vento e qualquer outra intempérie; os ensaios de placa foram todos conduzidos, desde a preparação da caixa até sua finalização, por um único operador; além de garantir todos os dispositivos de medição devidamente calibrados.

Seguindo com o planejamento experimental, foram definidas as variáveis fixas, controláveis e de resposta que estão descritas na Tabela 5. As variáveis foram definidas levando em consideração as bibliografias estudadas. Após a definição destas variáveis, é possível quantificar os testes a serem realizados, uma vez que todos os testes foram realizados em duplicata, foram executadas 10 provas de carga estática de maneira aleatória. Sendo que dois destes testes foram realizados somente com a camada de solo de base para referência, e os demais testes foram do solo com a camada de RCD, alternando em testes com reforço e sem reforço de geocélula e as diferentes alturas da geocélula, conforme apresenta a Tabela 6.

Tabela 5 -Variáveis fixas, controláveis e de resposta

Variáveis Fixas	
Fatores	Especificações
Solo de base	Areia seca, Dr: 30%
Material de Preenchimento da Geocélula	RCD, Dr:50%
Recobrimento do reforço	2 cm
Abertura da célula	34x29cm
Caixa de acomodação	Dimensões: 90 x 90 x 70 cm
Diâmetro da placa	15 cm

Variáveis controláveis	
Fatores	Especificações
Altura (h) da camada de reforço	7,5 cm; 20 cm
Camada de RCD	COM geocélula SEM geocélula

Variáveis de resposta	
Fatores	Especificações
Carga de parada	kN
Recalque final	mm

Fonte: Autor (2018)

Tabela 6 - Plano experimental dos ensaios de placa

Ensaio	Denominação	Configuração	Altura camada RCD	Nº de Repetições
A	S1 E S2	solo	-	2
B	SR1- 7,5cm e SR2- 7,5cm	solo + resíduo	7,5 cm	2
C	SR1- 20cm e SR2- 20cm	solo + resíduo	20 cm	2
D	SRG1- 7,5 cm e SRG2- 7,5 cm	solo + resíduo+ geocélula	7,5 cm	2
E	SRG1- 20 cm e SRG2- 20 cm	solo + resíduo+ geocélula	20 cm	2
Total de ensaios				10

Fonte: Autor (2018)

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Solo

O solo a ser utilizado como base, é um solo granular, proveniente da cidade de Osório localizada no litoral norte no Estado do Rio Grande do Sul. Essa areia já foi objeto de estudo de diversos pesquisadores como por exemplo Consoli et al. (2010), Consoli et al. (2013), Donato (2007), Cruz (2008), Spinelli (1999), e possui uma caracterização geotécnica bem consolidada.

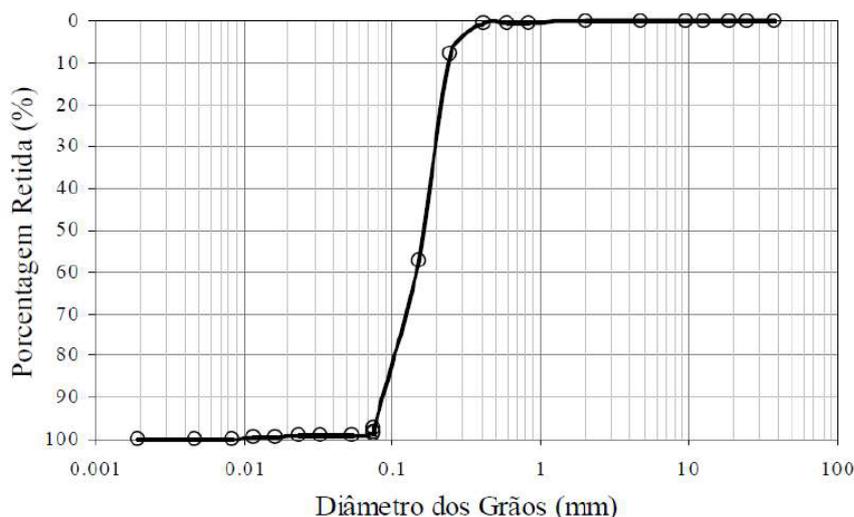
Como o presente estudo não tem por objetivo determinar os índices físicos deste solo, adotou-se os resultados encontrados em laboratório por Donato (2007), que são condizentes com os demais estudos já citados. Embasado nesses estudos, pode-se afirmar que este solo é caracterizado como uma areia fina (Figura 12), sem presença de matéria orgânica, com granulometria uniforme, como pode ser visto na curva granulométrica (Figura 13), e que sua composição mineralógica é constituída por 99% quartzo. Seus índices físicos estão representados na Tabela 7.

Figura 12 - Amostra da areia



Fonte: Autor (2018)

Figura 13 - Curva granulométrica da areia de Osório



Fonte: Donato (2007)

Tabela 7 - Caracterização geotécnica da areia de Osório

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 ($e_{\text{mín.}}$)	0,59
Índice de vazios máximo ($e_{\text{máx.}}$)	0,88

Fonte: Adaptado de Donato (2007)

3.2.2 Resíduo de Construção e Demolição

O resíduo para preenchimento das geocélulas foi disponibilizado pela empresa Ecosmart Tratamento de Resíduos da Construção Civil, que realiza o tratamento dos resíduos de construção e demolição coletados do município de Passo Fundo, Rio grande do Sul. O processo para reciclagem e reutilização da empresa passa por alguns passos, primeiramente o material que chega passa por um controle de transporte de resíduos, chamado de CTR, onde algumas características do tipo de resíduo já são identificadas. Para a realização do estudo foram analisados os resíduos de característica granular, passantes na peneira #3/4" (abertura de 19 mm). Essa delimitação granulométrica se faz necessária para um maior controle e conhecimento do resíduo a ser analisado, pois na forma com que chega da recicladora possui alguns resíduos

que passam sem britar. Uma amostra de como o RCD chega da recicladora pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 – Amostra RCD sem peneirar



Fonte: Autor (2018)

3.2.3 Geocélula

Para o estudo foram utilizadas geocélulas do tipo diamante, modelo MacWeb, que possui paredes perfuradas, produzidas em polietileno (PEAD) de alta densidade, na cor preta sendo as células ligadas entre si por meio de solda ultrassônica, formando a estrutura tridimensional de confinamento. As propriedades definidas pelo fabricante seguindo o que pede as normas ASTM D1505, ASTM D1693 e ASTM D5199 estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Especificações técnicas das geocélulas

Propriedades	MacWeb 2507.3	MacWeb 2520.3
Altura da célula (cm)	7,5	20
Matéria Prima	Polietileno de alta densidade	Polietileno de alta densidade
Dimensão média da célula (cm)	34x29	34x29
Área nominal da célula (cm ²)	986	986
Tamanho máximo do painel expandido (m)	2,81x10,7	2,81x10,7
Área máxima do painel expandido (m ²)	30	30
Distância entre as juntas de solda (cm)	44,5	44,5
Resistência mínima da solda em curto prazo (N)	1060 (+-5%)	2900 (+-5%)

Fonte: Adaptado de Maccaferri (2018)

O painel recebido do fabricante, quando aberto, mede aproximadamente 30 m². As alturas das células ensaiadas são de 7,5 cm e 20 cm, sendo que as dimensões de abertura de cada célula 34x 29 cm, se mantendo constante independente da altura. Para a execução dos

ensaios foi necessário um painel de 90x 90 cm conforme medidas da caixa de acomodação do ensaio de placa.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Caracterização do resíduo

Conforme as normas recomendadas o resíduo de construção e demolição foi caracterizado quanto a composição granulométrica, composição gravimétrica, massa específica, índices de vazios e teor de matéria orgânica, foram realizados também os ensaios de metais pesados lixiviados e solubilizados.

3.3.1.1 *Composição Granulométrica*

A composição granulométrica é a distribuição, em porcentagem, das dimensões das partículas do resíduo. Sendo assim, essa característica foi verificada por meio da norma NBR 7181 (ABNT, 2016), que estabelece os passos necessários para a obtenção da curva granulométrica, podendo ser realizados de duas maneiras: apenas por peneiramento (para partículas maiores que 0,075 mm de diâmetro) ou por combinação de peneiramento e sedimentação (para partículas menores que 0,075 mm de diâmetro).

3.3.1.2 *Determinação da Composição Gravimétrica*

Para a determinação da composição gravimétrica do RCD, foi realizada utilizando-se a técnica do quarteamento, estabelecido na norma ABNT NBR 10.007: 2004 – Amostragem dos Resíduos Sólidos – Procedimentos (ABNT, 2004d). Para isso foram estipuladas quatro amostras de 1 kg. Com o intuito de obter uma amostra significativa do volume total, utilizado a metodologia do quarteamento, que consiste em dividir uma amostra pré-homogeneizada em quatro parte iguais e retirar metade das partes obtidas, uma sim e uma não, repetindo o processo até se obter o peso de amostra desejada. No levantamento da gravimetria os componentes foram divididos entre: argamassa/concreto, tijolo, madeira, metal, plástico e vidro.

3.3.1.3 *Determinação Massa Específica de agregados reciclados de RCD segundo Leite (2001)*

A massa específica é a relação entre a sua massa total e o seu volume total, incluindo-se aí o peso da água existente em seus vazios e o volume de vazios do solo. O método a ser utilizado para a determinação da massa específica das partículas do resíduo de construção e

demolição o proposto por Leite (2001). O ensaio consiste em utilizar um balão volumétrico de 1000 ml, uma bomba de vácuo e uma balança de precisão mínima de 0,1 g. A amostra de agregado deve ser seca em estufa por 24 horas e após resfriada em temperatura ambiente separar aproximadamente 800 g de material (C). Em seguida o material é posto no balão volumétrico e coberto de água até submergir, devendo ficar em repouso por 24 horas. Passando o tempo de repouso, aplica-se a bomba de vácuo, por pelo menos 15 minutos, agitando o recipiente para eliminar todo o ar entre os grãos do agregado. Após esse processo completa o recipiente de água e cobre com uma placa de vidro pesando esse conjunto (A). Descarta-se o material, lavando o recipiente e preenchendo-o totalmente de água e cobrindo com a placa de vidro, pesa-se esse conjunto (B). Com os valores das massas obtidas é possível calcular a massa específica do agregado reciclado através da equação abaixo:

$$\gamma = \frac{C}{B - A + C}$$

Onde:

$\gamma(\text{g/cm}^3)$ = massa específica do agregado

A(g) = massa da amostra + recipiente + água + placa de vidro

B(g) = massa do recipiente + água + placa de vidro

C(g) = massa da amostra seca em estufa

3.3.1.4 Índices de vazios

Os procedimentos para os índices de vazios mínimos e máximos estão estabelecidos em duas normas a NBR 12004/1990 e NBR 12051/1991 respectivamente que foram utilizadas para determinar esses índices do RCD. A determinação da densidade mínima (NBR 12004/1990) é feita através de simples derramamento de material, por meio de um funil padronizado, em movimento espiral, em recipiente apropriado e de volume conhecido (ABNT, 1990). Já a densidade máxima (NBR 12051/1991) necessita de uma mesa vibratória eletromagnética de aço, que utiliza da compactação vibratória para se obter a densidade máxima através dos métodos seco e molhado e sem reuso de material (ABNT, 1991).

3.3.1.5 Teor de matéria orgânica

Para determinar o teor de matéria orgânica do RCD foi utilizado a NBR 13600 (ABNT, 1996) que normatiza o ensaio para encontrar o teor de matéria orgânica através da queima a 440 °C. Para isso foram estipuladas três amostras de 50g, que foram colocadas para secar em

estufa a 105°C registrando seu peso após 24h, então as amostras são levadas para a queima a 440°C após pelo menos 12h de queima é conferido o peso da amostra.

3.3.1.6 Lixiviação

Nesse ensaio analisada a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo, por meio de dissolução no meio extrator. O ensaio é normatizado pela ABNT na norma 10005:2004 que descreve o procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. A partir dos dados encontrados é possível classificar pela norma o resíduo em duas classes: classe I – perigosos – e classe I – não perigosos. Aqueles tidos como perigosos agredem ao meio ambiente e pode fazer mal aos seres humanos, enquanto os não perigosos não apresentam riscos (ABNT, 2004b).

3.3.1.7 Solubilização

O procedimento de solubilização se caracteriza quando a substância ou produto pode dissolver em um líquido. O ensaio aplicado para o RCD o apresentado na NBR 10006:2004 (ABNT,2004c) que propõe os requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados na NBR 10004 como classe II A – não-inertes – e classe II B – inertes. Sendo que os não inertes eles dissolvem na água e são biodegradáveis, mas não são inertes, enquanto os não inertes podem dissolver na água e não alterar a sua composição.

3.3.2 Ensaio de Placa

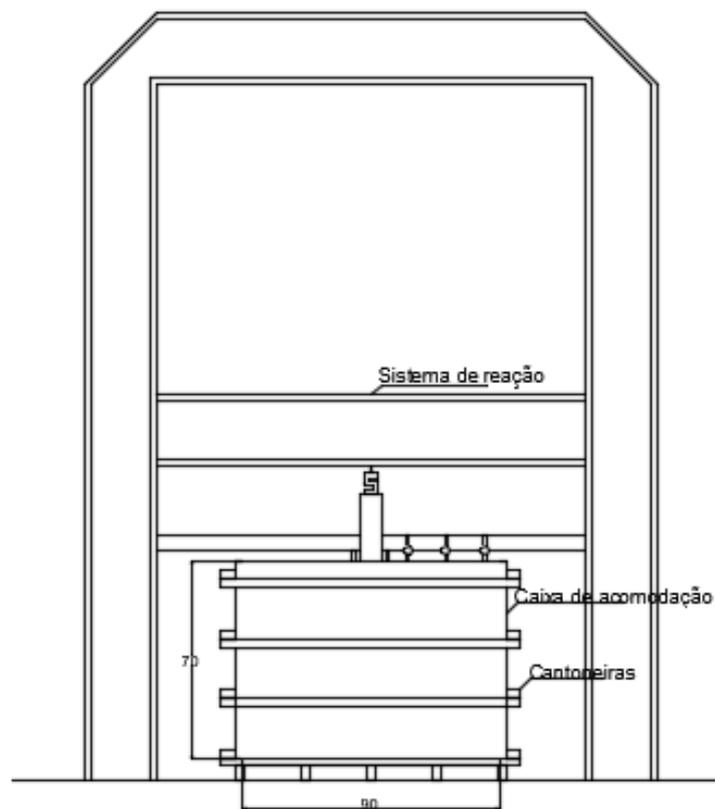
O ensaio de placa é baseado na simulação de um sistema de fundação superficial em escala reduzida, com o intuito de verificar a capacidade de suporte e estabilidade do solo e substrato de fundação. Apresentando como resposta o recalque da base por meio da aplicação de uma força. É considerado adequado para o estudo do comportamento de fundações superficiais e sua principal vantagem é ser mais econômico em relação às provas de carga em verdadeira grandeza, sendo que em ambos os casos, o solo é submetido ao mesmo tipo de carregamento.

Com base nos critérios técnicos da NBR 6489:2016 e nos estudos de referência, o método de ensaio e os equipamentos que foram utilizados na realização dos testes de placa estão apresentados nos itens a seguir.

3.3.2.1 Equipamentos

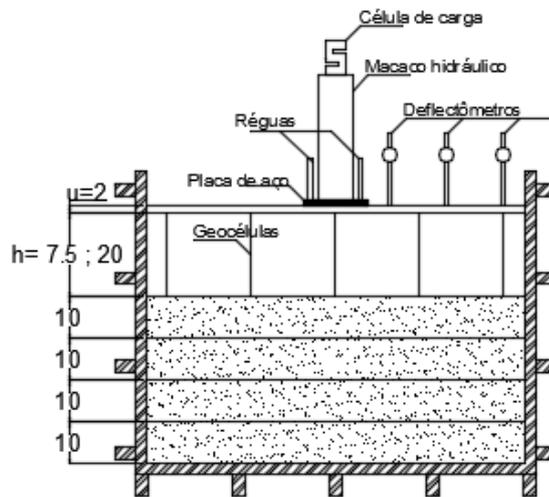
Para a execução dos ensaios de placa é necessário a utilização de diversos equipamentos, como sistema de reação, caixa de acomodação, placa rígida de aço, macaco hidráulico, célula de carga, régua e deflectômetros, garantindo assim o andamento da pesquisa. Para melhor entender estes equipamentos e suas funções durante o desempenho, eles estão explicados e apresentados a seguir. O diagrama esquemático da configuração e dos equipamentos do ensaio de placa estão ilustrados na Figura 15 e Figura 16.

Figura 15 - Configuração do ensaio de placa



Fonte: Autor (2018)

Figura 16 - Equipamentos do ensaio de placa



Fonte: Autor (2018)

O sistema de reação utilizado foi desenvolvido pelo Laboratório de Ensino de Sistemas Estruturais (LESE) da Universidade de Passo Fundo (Figura 17). Sendo composto de um pórtico perfil “I”, com espessura aproximada de 12 mm e carga de trabalho de até 250kN. Incorporado a esse pórtico há uma caixa de madeira, com dimensões de 90 x 90 x 70 cm (largura, comprimento e altura), que utilizada para acomodar as camadas do solo de base e reforço, definidas pela dimensão da placa utilizada, estas dimensões permitem que a condução dos ensaios ocorra sem interferência das faces da caixa nos resultados. Para garantir que não haverá distorção dos resultados provindos de deformações na caixa de madeira, a lateral e fundo da estrutura da caixa está reforçada por cantoneiras de madeira.

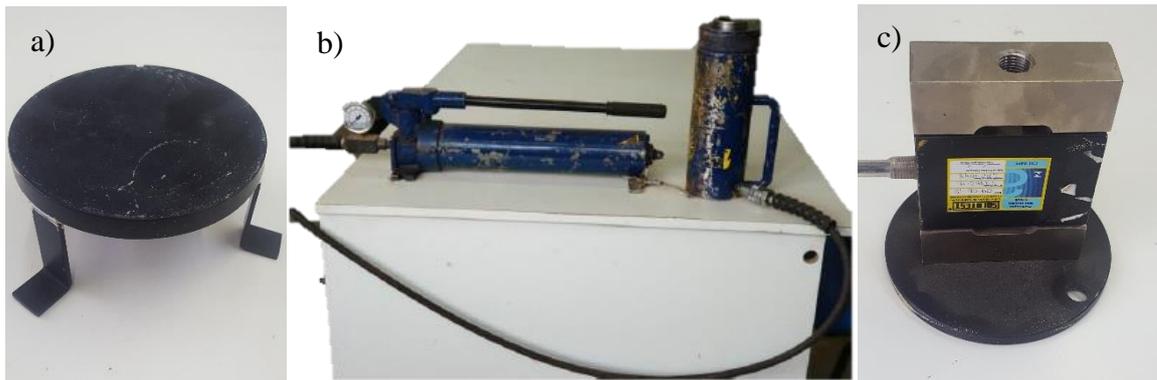
Figura 17 - Sistema de reação e caixa de acomodação



Fonte: Autor (2018)

Uma placa rígida de aço (Figura 18a), com 15 cm de diâmetro (D) e 1,2 cm de espessura, utilizada para a transmissão dos esforços ao solo. Esta placa simula a ação de uma sapata circular sobre o solo. Já a aplicação de cargas se dará através de um macaco hidráulico (Figura 18b) com capacidade de carga de 300 kN, acoplado a uma bomba manual para auxiliar no funcionamento do procedimento. A carga transferida para o sistema monitorada pela célula de carga (Figura 18c), disposta entre o sistema de reação e o macaco hidráulico.

Figura 18 - Equipamentos: a) Placa rígida de aço b) Macaco hidráulico c) Célula de carga



Fonte: Autor (2018)

O deslocamento da placa monitorado por meio de três régua resistivas com curso de 55 mm e 0,01 mm de precisão. Para os deslocamentos externos, foram instalados seis deflectômetros digitais na superfície do solo ao longo da largura da caixa de ensaio. As régua e os deflectômetros podem ser vistos na Figura 19.

Figura 19 - Régua e deflectômetro



Fonte: Autor (2018)

Para a obtenção dos dados de carregamento, recalque e tensão utilizado um sistema digital, chamado Measurement Computing 16HS, o sistema consiste em uma placa conversora A/D (analogico/digital) com 16 canais de entrada analógica, sendo que cada entrada pode operar com 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.

3.3.2.2 *Processo de construção das camadas*

Para a preparação do solo, primeiramente foram fixadas duas variáveis a umidade, sendo que no estudo foi utilizada a areia seca, e a densidade relativa definida em 30%, uma areia “fofa”. O material submetido ao processo de secagem em estufa, para que fique sem umidade, o que se deseja para a execução das camadas de base. A moldagem da caixa de acomodação se dará com o espalhamento e compactação do solo em camadas de 10cm, o controle da densidade realizado geometricamente, através da verificação das dimensões da camada.

Após os procedimentos de acomodação do solo, é construída a camada de reforço. Para a moldagem da camada com o RCD foi fixada uma densidade relativa de 50% para o resíduo seco, em camada única, moldada e compactada manualmente, assim como no solo de base a densidade do material foi controlada geometricamente, através da verificação das dimensões da camada. Para todas as amostras efetuado um recobrimento (u) com espessura de 2 cm de resíduo.

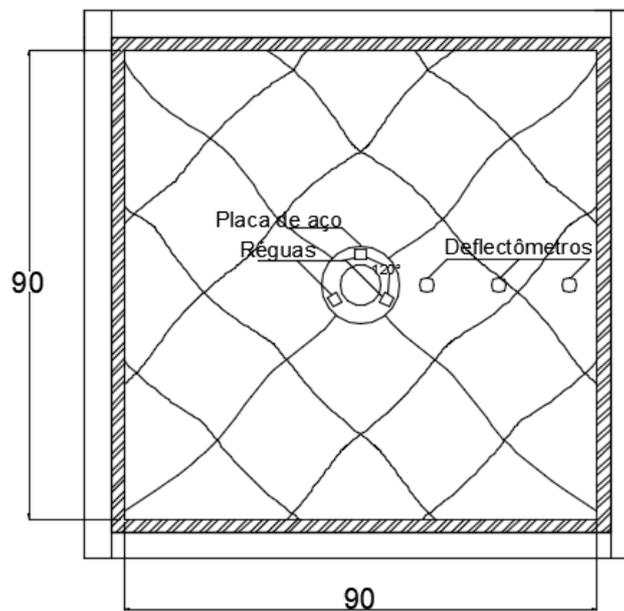
Sendo, para separar a camada de base da camada de reforço, utilizado um geotêxtil com a função de não permitir que os materiais se misturem. As amostras foram confeccionadas com as alturas e os reforços como descrito no programa experimental da Tabela 6, assim como as amostras de referência contendo apenas o solo que foram ensaiadas para verificação do aumento proporcionado pela adição das diferentes camadas de reforço.

3.3.2.3 *Método de ensaio*

A execução do ensaio de placa seguirá as instruções da ABNT NBR 6489:2016, que normatiza as provas de carga diretas. O ensaio realizado com carregamento lento, com aplicação de cargas sucessivas por meio de incrementos, limitando os mesmos a 20% da carga de ruptura prevista. Somente após a verificação de estabilização dos recalques anteriores, com tolerância máxima de 5% do recalque total neste estágio, haverá um novo carregamento. O critério de parada normatizado é de verificação de um recalque de 25 mm ou, então, quando atingido o dobro da carga máxima admitida para o solo.

A aplicação de carga se dará através da placa circular com diâmetro de 15cm posicionada ao centro da caixa de acomodação e sobre o nó da geocélula. O sistema de medição dos deslocamentos foi composto por três régua resistivas, posicionadas em pontos opostos ao diâmetro da placa, para verificação do assentamento da mesma. Assim como, para verificar possíveis levantamentos ou recalques do solo no entorno da placa, foram utilizados três deflectômetros digitais, dispostos paralelamente a borda da placa e distanciados entre si simetricamente. Esse sistema pode ser observado na vista superior na Figura 20.

Figura 20 - Vista superior do sistema



Fonte: Autor (2018)

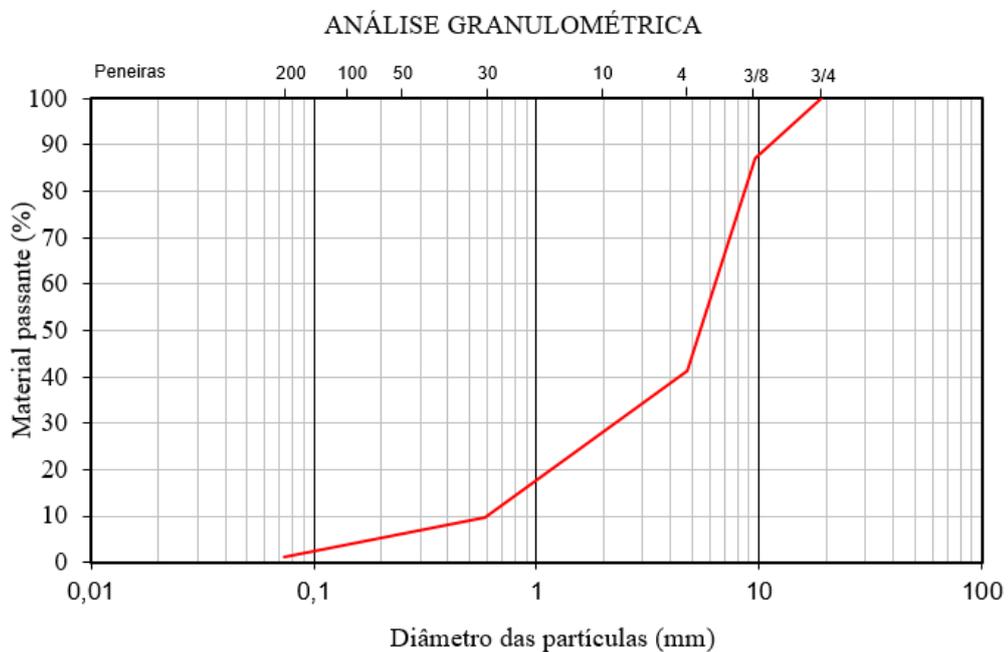
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

4.1.1 Composição Granulométrica

A composição granulométrica foi determinada pela NBR 7181 (ABNT, 2016), através do peneiramento do material, obtendo-se a seguinte curva granulométrica (Figura 21).

Figura 21 - Curva granulométrica do RCD



Fonte: Autor (2019)

O RCD apresentou um diâmetro efetivo (D_{10}) como sendo 0,59 mm e o diâmetro médio (D_{50}) de 5,69 mm. Através da análise da curva granulométrica (Figura 21), é possível obter o coeficiente de uniformidade (C_u) de 11,37, assim como o coeficiente de curvatura (C_c) calculado como 2,72. De acordo com o sistema unificado – SUCS (ASTM, 1993), o resíduo analisado é classificado como um pedregulho bem graduados com pouco fino (GW).

A definição da faixa que os grãos do material se encontram também é definida pela granulometria. A Tabela 9 demonstra o resumo das porcentagens obtidas pelos limites definidos pela ABNT e através da curva disponível na Figura 21, indicando que o resíduo possui menos de 1% de materiais finos e que sua maior porcentagem é representada por pedregulhos 59%.

Tabela 9 - Composição do resíduo

Resultado (%)	
Pedregulho	59 %
Areia Grossa	20,50 %
Areia Média	16,55 %
Areia Fina	2,95 %
Silte /Argila	<1%

Fonte: Autor (2019)

4.1.2 Determinação Massa Específica

O método utilizado para a determinação da massa específica das partículas do resíduo de construção e demolição foi o proposto por Leite (2001). A massa específica do RCD obtida foi o de 2,519 g/cm³.

4.1.3 Índices de Vazios

O índice de vazios mínimo foi estabelecido através da norma NBR 12004 (ABNT, 1990), obtendo-se 0,83. Já o índice de vazios máximo calculado foi de 1,34 pela NBR 12051 (ABNT, 1991).

4.1.4 Teor de Matéria Orgânica

A determinação do teor de matéria orgânica do RCD foi realizada através de três amostras seguindo a NBR 13600 (ABNT, 1996). Dos resultados obtidos (Tabela 10) a amostra três foi a que mais continha matéria orgânica com 1,37% , com a média das três amostras foi determinado 1,15% como teor orgânico do RCD utilizado na pesquisa.

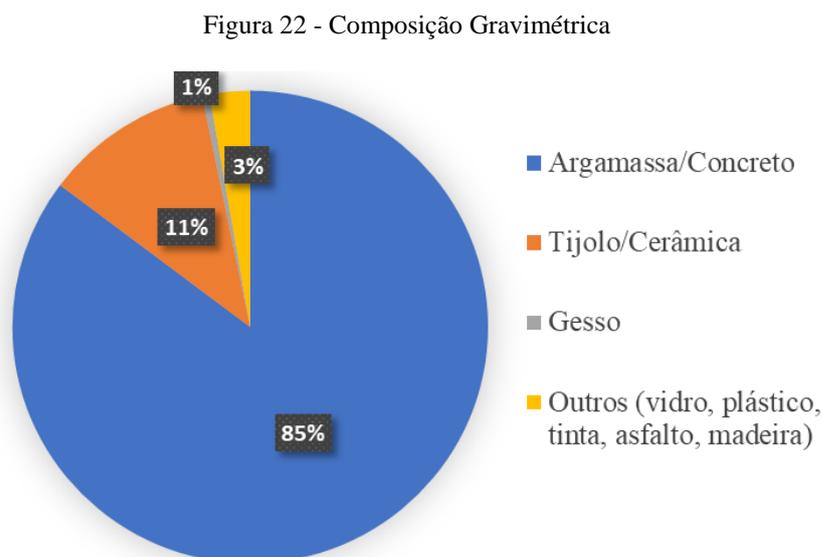
Tabela 10 - Teor de Matéria Orgânica do RCD

	Amostra seca	Amostra queimada	Teor de matéria orgânica
Amostra 1	96,12 g	95,2 g	0,96%
Amostra 2	90,27 g	89,25 g	1,13%
Amostra 3	84,6 g	83,44 g	1,37%
	Média		1,15%

Fonte: Autor (2019)

4.1.5 Composição Gravimétrica

A composição gravimétrica do RCD foi determinada por meio da norma NBR 10.007 (ABNT, 2004d). Através do peso de cada um dos materiais segregados nas diferentes categorias, e através de uma regra de três simples, foi calculado o percentual de cada material como demonstra o gráfico abaixo (Figura 22).



Fonte: Autor (2019)

Quanto a composição quantitativa do RCD destaca-se a predominância de argamassa e concreto (85%) e de tijolo e material cerâmico (11%). Os demais materiais aparecem em pequena quantidade gesso, vidro, plástico, tinta, asfalto e madeira, juntos não somam 4% do total. Com esses dados foi realizada a classificação do RCD segundo a resolução do CONAMA nº 307 (CONAMA, 2002) apresentados na Tabela 11. A partir desses dados pode-se afirmar que o resíduo é heterogêneo, uma vez que o desvio padrão foi bem baixo, e que os resíduos classificados como classe A tem a maior participação na composição gravimétrica, com percentual médio de 96,47%.

Tabela 11 - Percentual de composição e classificação dos resíduos de construção e demolição

	Classificação	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média	Desvio Padrão
Argamassa/Concreto	A	85%	85%	86%	85%	85,03%	0,0041
Tijolo/Cerâmica	A	11%	11%	12%	12%	11,44%	0,0049
Gesso	B	2%	0%	0%	0%	0,38%	0,0075
Outros (vidro, plástico, tinta, asfalto, madeira)	B	2%	4%	2%	4%	3,14%	0,0094

Fonte: Autor (2019)

4.1.6 Ensaio de Lixiviação e Solubilização

De acordo com as normas NBR 10005:2004 e NBR 10006:2004 foram realizados os ensaios para extração de lixiviado e solubilizado. Após os fluídos foram enviados para análise no Laboratório de Solos da UPF quanto a presença de metais pesados: Cadmio, chumbo, cromo e zinco.

A análise de solubilidade em água, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), estão dispostos na Tabela 12, os resultados das análises dos parâmetros de acordo com o limite máximo permitido apresentado no Anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004), demonstraram que as concentrações de cadmio, cobre, chumbo e zinco estão dentro dos limites permitidos.

Os resultados das concentrações dos metais pesados nas amostras do extrato lixiviado para a análise de toxicidade estão apresentados na Tabela 13, onde estão comparados com o limite máximo permitido para cada constituinte de acordo com o anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004), onde todas as concentrações se mostraram dentro do limite permitido.

Tabela 12 - Resultado da análise de solubilidade nas amostras de RCD

Metais	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Limite máximo do extrato (mg/L ⁻¹)
Cadmio	ND	ND	ND	0,005
Chumbo	0,009	0,003	0,009	0,01
Cobre	0,0304	0,0076	0,0228	2,0
Cromo	0,0458	ND	0,0458	0,05
Zinco	0,0105	0,0035	0,021	5,0

ND: Não detectado na amostra.

Fonte: Autor (2019)

Tabela 13 - Resultado da análise de toxicidade nas amostras de RCD

Metais	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Limite máximo do extrato (mg/L ⁻¹)
Cadmio	0,0104	0,0078	0,0078	0,5
Chumbo	0,1162	0,0518	0,0518	1,0
Cromo	0,1374	0,1374	0,1374	5,0

Fonte: Autor (2019)

4.2 ENSAIO DE PLACA

Neste item, estão apresentados os resultados dos ensaios de placa realizados como descrito no capítulo 3 item 3.3.2 deste trabalho e como definido pelo planejamento experimental, disponível na Tabela 6. Os ensaios foram realizados em modo aleatório para aumentar a confiabilidade dos dados obtidos. Quanto ao mecanismo de paralização, foi definido como um recalque de aproximadamente 25 mm.

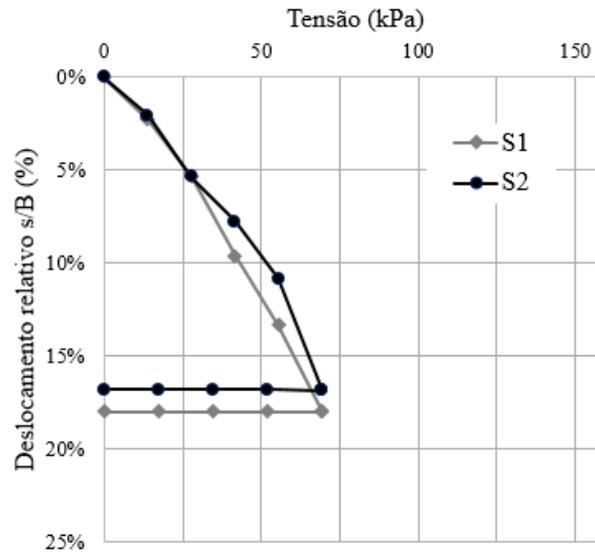
Para uma melhor comparação dos resultados obtidos e evitar a influência das variáveis geométricas nos ensaios foram definidos parâmetros normalizados. Assim sendo, nos gráficos as alturas estão representadas em função do diâmetro da placa ($B = 15$ cm) como $h = 0,5B$, para a altura de 7,5 cm e $h = 1,33B$, para a altura de 20 cm. Assim como, o deslocamento da placa (s) está representado como s/B (%) e o deslocamento da superfície (δ) como δ/B (%), ambos no formato adimensional. Os deslocamentos da superfície foram controlados por deflectômetros posicionados nas distâncias de $x = 0,83B$, $x = 1,17B$, $x = 1,50B$.

Nos itens a seguir estão dispostos os resultados dos testes em placa, primeiramente o ensaio referência (S1 e S2), após os ensaios sem a utilização da geocélula (SR1 – 7,5 cm, SR2- 7,5 cm, SR1- 20 cm, SR2- 20 cm) e por fim os ensaios com reforço e geocélula (SRG1 – 7,5 cm, SRG2 – 7,5 cm, SRG1 - 20 cm, SRG2 – 20 cm). Sendo apresentadas em cada item as curvas de tensão-deslocamento e os deslocamentos de superfície. Ao final do capítulo é apresentada uma análise global, onde são os ensaios realizados são avaliados e comparados.

4.2.1 Ensaio de referência

Neste item são apresentados os ensaios de referência (S1 e S2), a curva tensão – deslocamento desses ensaios, realizados no solo de base, podem ser observadas na Figura 23. No gráfico de comportamento tensão-deslocamento (Figura 23), estão representados os pontos das leituras de estabilização dos recalques para cada incremento de carga até a paralização, definido como 25 mm de recalque. Os ensaios realizados no solo de base demonstraram quão reduzida é a resistência desse solo sem reforço, onde chegamos a uma tensão de aproximadamente 70 kPa para ocorrer a paralização tanto do ensaio S1 quanto S2.

Figura 23 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios de referência no solo de fundação S1 e S2

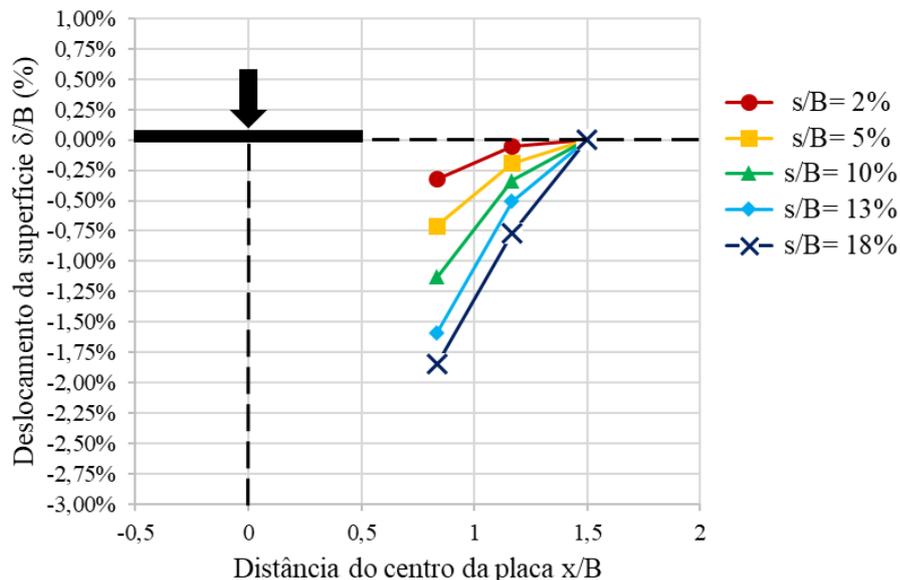


Fonte: Autor (2019)

Os deslocamentos de superfície foram medidos por três deflectômetros posicionados nas distâncias de $x = 0,83B$, $x = 1,17B$, $x = 1,50B$. Os dados estão apresentados pela progressão dos recalques estabilizados para cada incremento de carga.

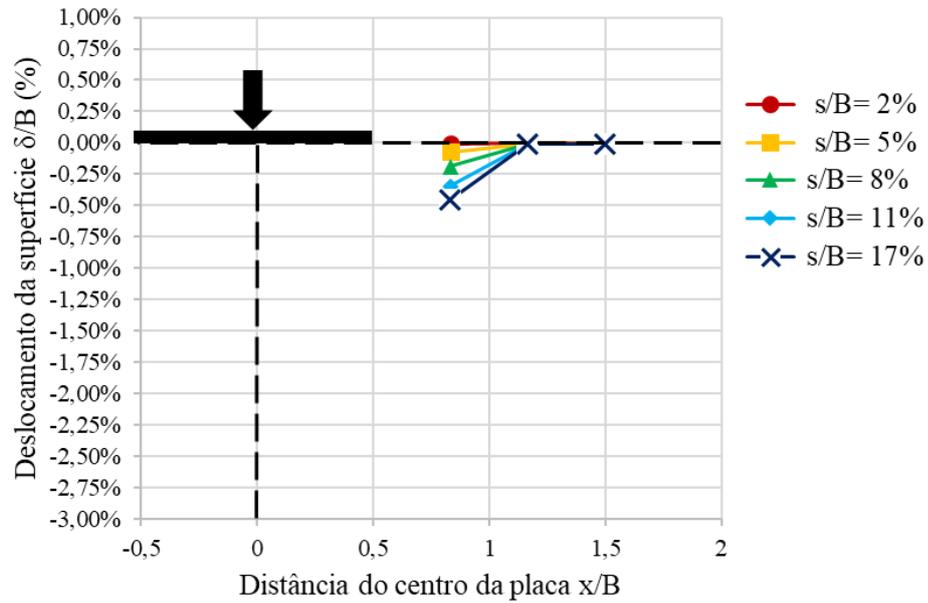
A Figura 24 e a Figura 25 demonstram os deslocamentos da superfície, podemos constatar que estes deslocamentos aconteceram no mesmo sentido em que se aplicou a carga na placa sendo crescente conforme o aumento de carga, porém o deslocamento apresentado pelo ensaio S1 se mostrou maior do que no ensaio S2, isso se deve ao rearranjo apresentado pelos grãos da areia durante a execução dos ensaios.

Figura 24 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio S1



Fonte: Autor (2019)

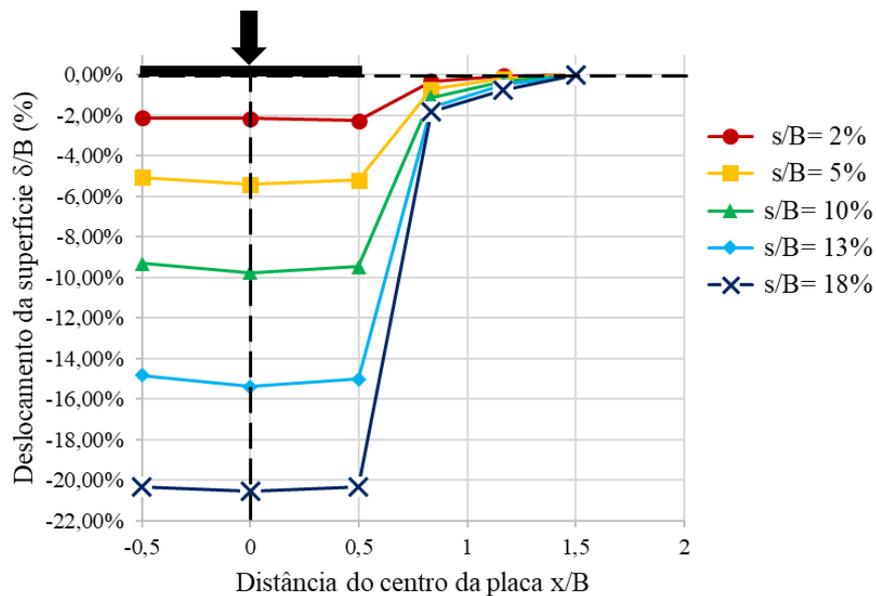
Figura 25 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio S2



Fonte: Autor (2019)

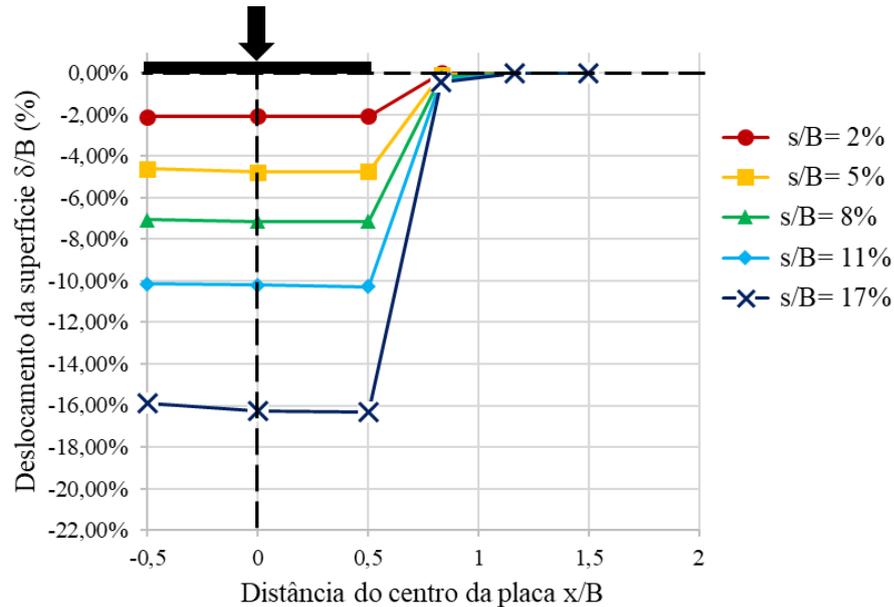
Na Figura 26 e na Figura 27 é possível verificar a sequência do recalque de cada incremento de carga dos ensaios realizados no solo de base (S1 e S2), observa-se nos gráficos o sentido das deformações e uma pequena rotação da placa, considerado um fato comum em testes de laboratório de pequena escala segundo Hegde e Sitharam (2015).

Figura 26 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - S1



Fonte: Autor (2019)

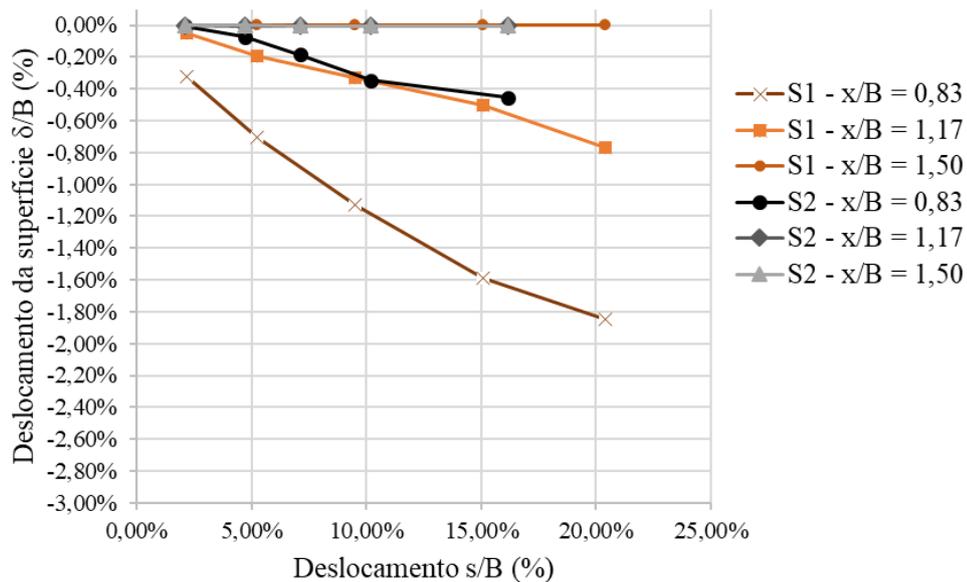
Figura 27 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - S2



Fonte: Autor (2019)

A Figura 28 apresenta o deslocamento da superfície pelo recalque da placa, esses deslocamentos foram medidos nas distâncias $x=0,83B$, $x=1,17B$ e $x=1,50B$ do eixo da placa. Pode-se observar o afundamento da superfície do solo conforme o aumento dos recalques da placa, principalmente no deflectômetro mais próximo da placa, demonstrando que o solo se reforço se move livremente conforme o aumento de incrementos.

Figura 28 - Deslocamento da superfície com o recalque da placa S1 e S2

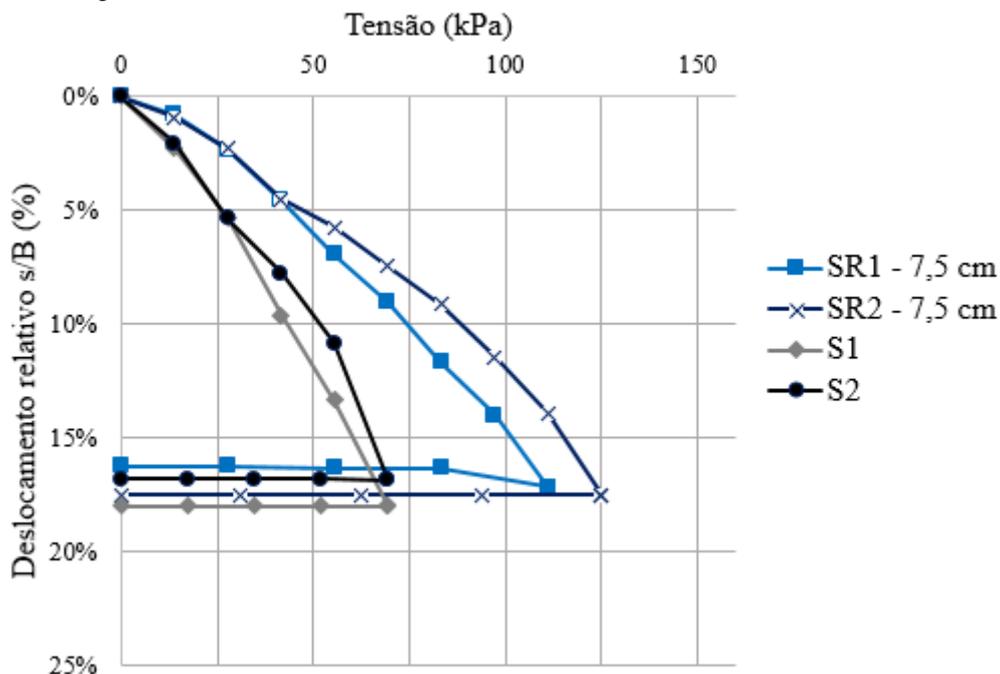


Fonte: Autor (2019)

4.2.2 Ensaio reforço de resíduo com 7,5 cm

Na Figura 29 estão dispostas as curvas tensão-deslocamento para os ensaios de referência realizados no solo de fundação (S1 e S2) e para os ensaios sobre camada de resíduo não reforçada com espessura igual a 7,5 cm (SR1-7,5 cm e SR2- 7,5cm). Foi constatado que, com a camada de resíduo como reforço sobre o solo de base, houve uma melhora da resistência de uma tensão de 70 kPa para uma tensão de 111 kPa no ensaio SR1 – 7,5cm e de 125 kPa no ensaio SR2 – 7,5cm para se chegar na paralização definida.

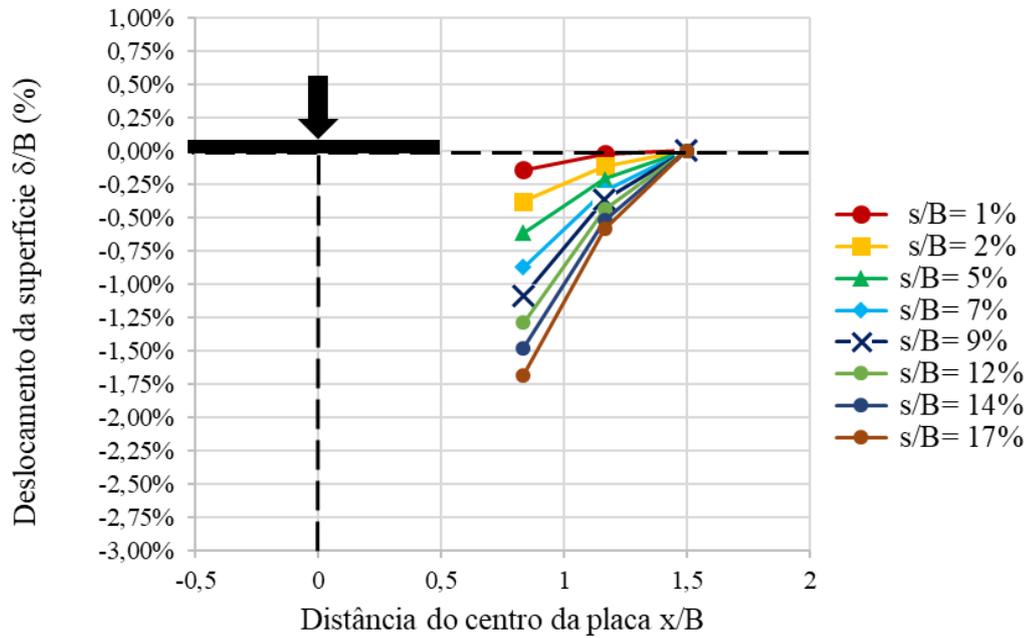
Figura 29 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios SR1 - 7,5 cm e SR2 - 7,5 cm



Fonte: Autor (2019)

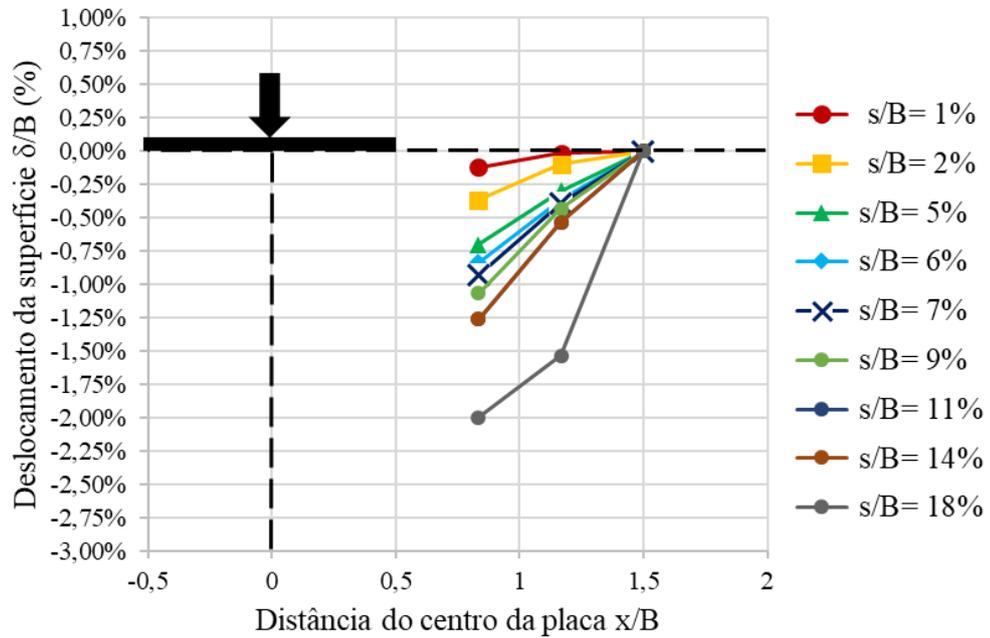
A Figura 30 e a Figura 31 apresentam a variação do deslocamento da superfície em relação ao recalque da placa onde podemos observar que o comportamento foi semelhante ao do deslocamento da superfície dos ensaios de referência (S1 e S2) quanto ao deslocamento s/B (Figura 24 e Figura 25), porém observa-se uma maior resistência para a deformação em cada incremento. Assim como no deslocamento embaixo da placa nas Figuras 32 e 33, verificando um maior recalque para cada incremento de carga estabilizado.

Figura 30 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR1 - 7,5 cm



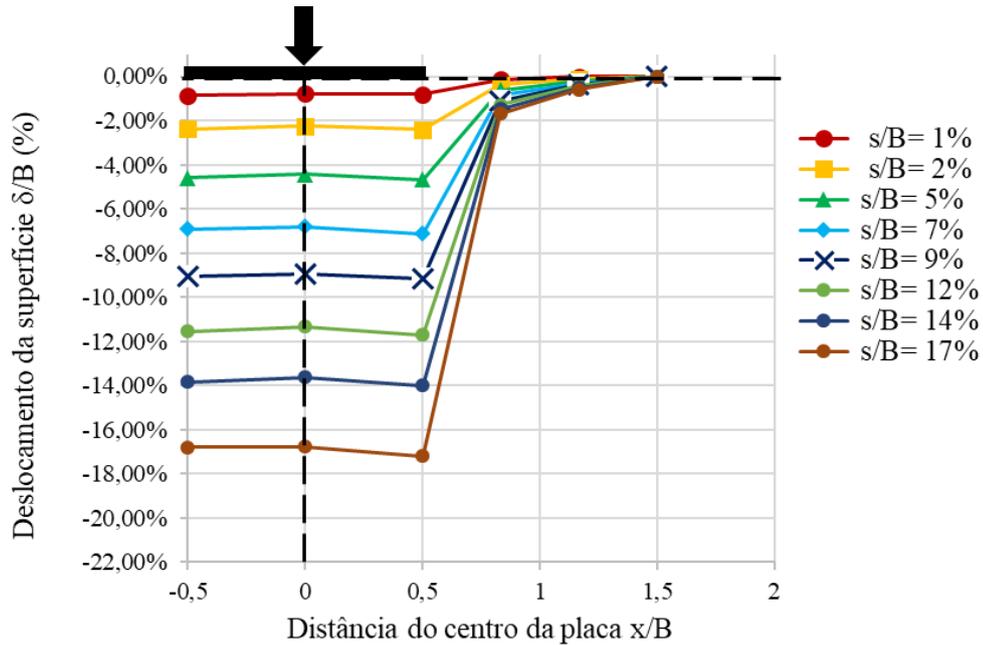
Fonte: Autor (2019)

Figura 31 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR2 - 7,5 cm



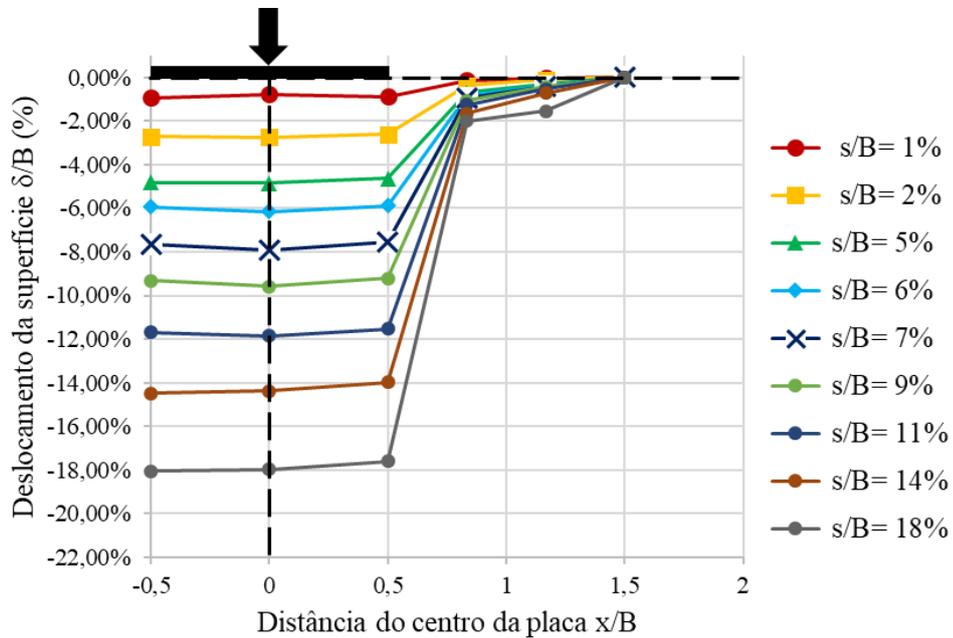
Fonte: Autor (2019)

Figura 32 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SR1 - 7,5 cm



Fonte: Autor (2019)

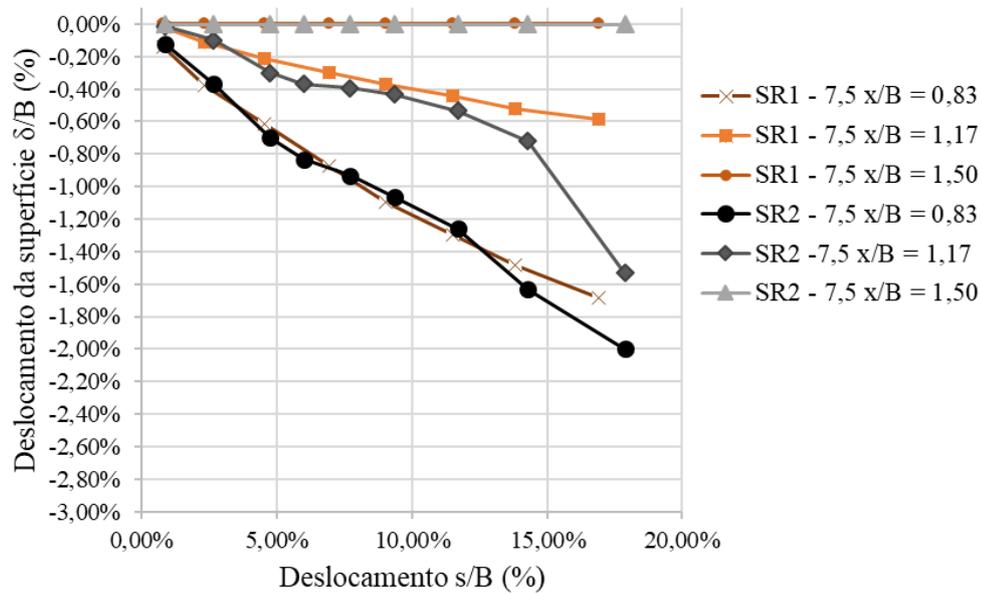
Figura 33 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SR2 - 7,5 cm



Fonte: Autor (2019)

A Figura 34 apresenta a variação da deformação da superfície em relação ao recalque da placa, onde verifica-se um maior recalque em $x=0,83B$ para os dois ensaios diminuindo na distância $x=1,16B$ e zerando na distância $x=1,5B$.

Figura 34 - Deslocamento da superfície com o recalque da placa SR1 - 7,5 cm e SR2 - 7,5 cm

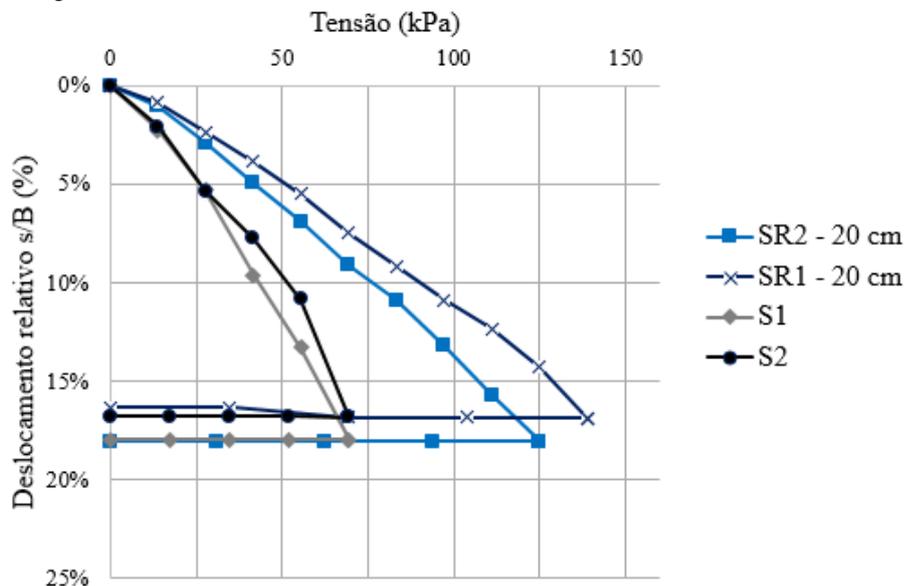


Fonte: Autor (2019)

4.2.3 Ensaio reforço de resíduo com 20 cm

Os ensaios sobre camada de resíduo não reforçada com geocélula de espessura igual a 20 cm gerou o gráfico tensão-deslocamento da Figura 35 que estão sendo comparado com os ensaios de referência realizados no solo de fundação (S1 e S2). Assim como ocorreu na camada de 7,5 cm, a camada de RCD de 20 cm sem geocélula aumentou a resistência do solo arenoso de base, nesse caso de 70 kPa para 125 kPa no ensaio SR1 – 20cm e para 139 kPa para o ensaio SR2 – 20 cm.

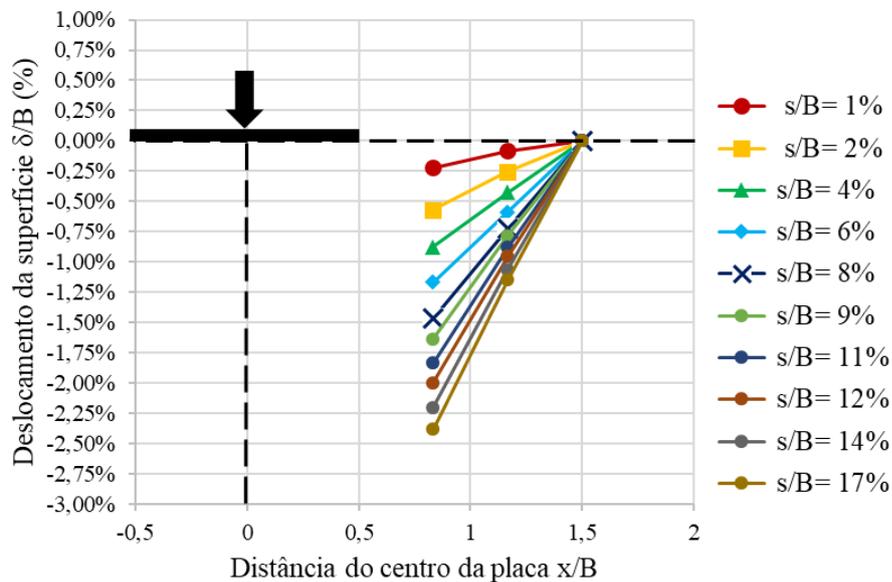
Figura 35 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios SR1 - 20 cm e SR2 - 20 cm



Fonte: Autor (2019)

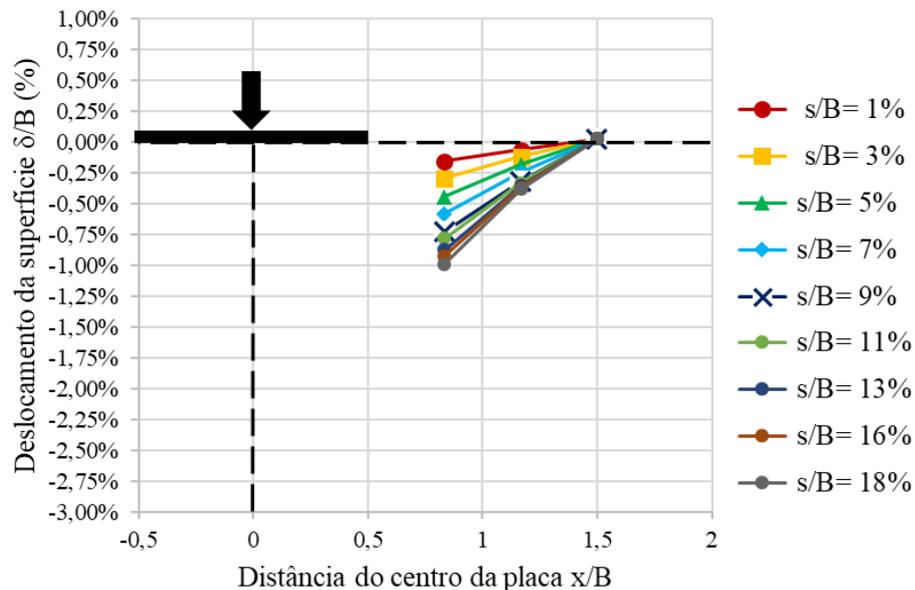
Quanto aos deslocamentos da superfície e embaixo da placa (Figura 36, Figura 37, Figura 38 e Figura 39), observa-se o aumento do recalque do solo durante todo o carregamento, e quando comparado com os deslocamentos de superfície e embaixo da placa dos ensaios referência (Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27) e dos ensaios com camada de resíduo de 7,5 cm (Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33) observa-se que seguiram o mesmo padrão e intensidade chegando a deslocamento de superfície médio de 1,55% para a distância $x=0,83B$.

Figura 36 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR1 - 20 cm



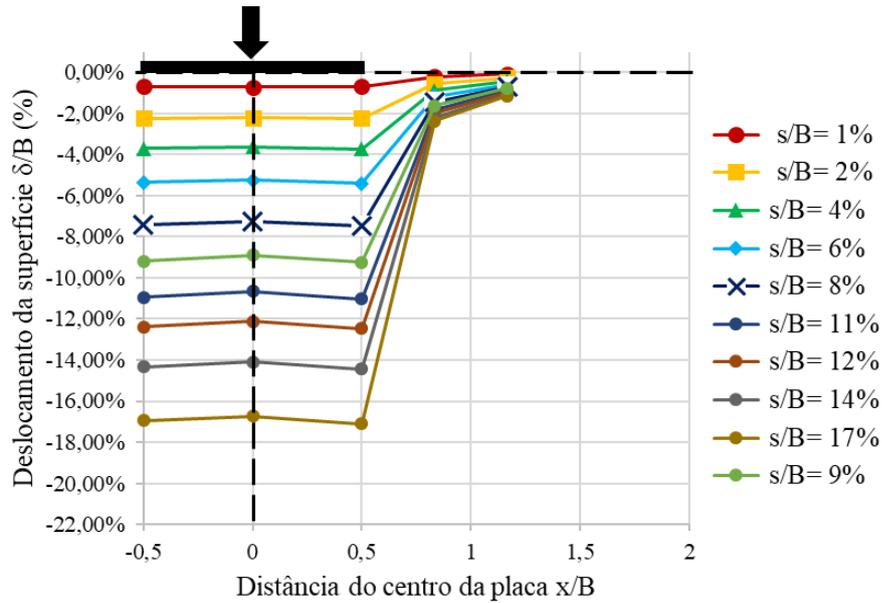
Fonte: Autor (2019)

Figura 37 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SR2 - 20 cm



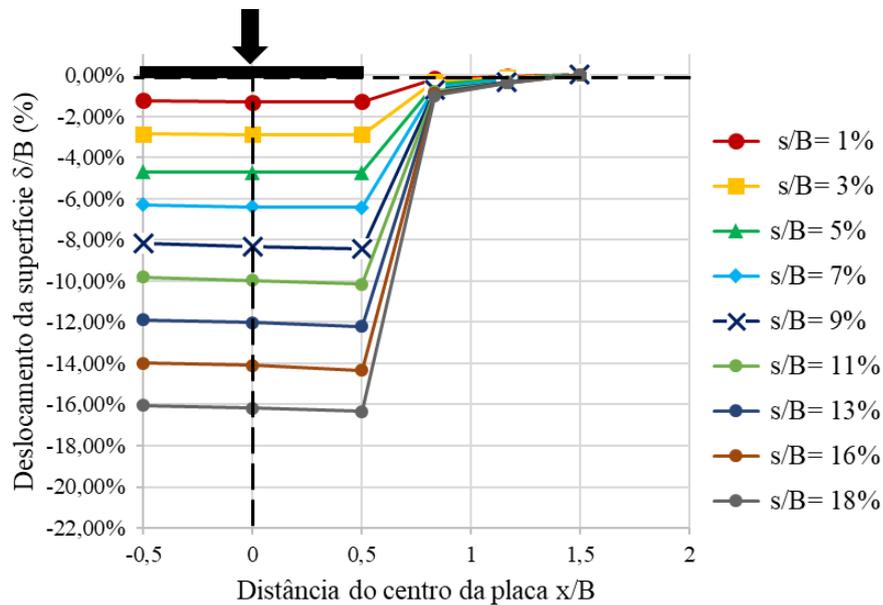
Fonte: Autor (2019)

Figura 38 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SR1 - 20 cm



Fonte: Autor (2019)

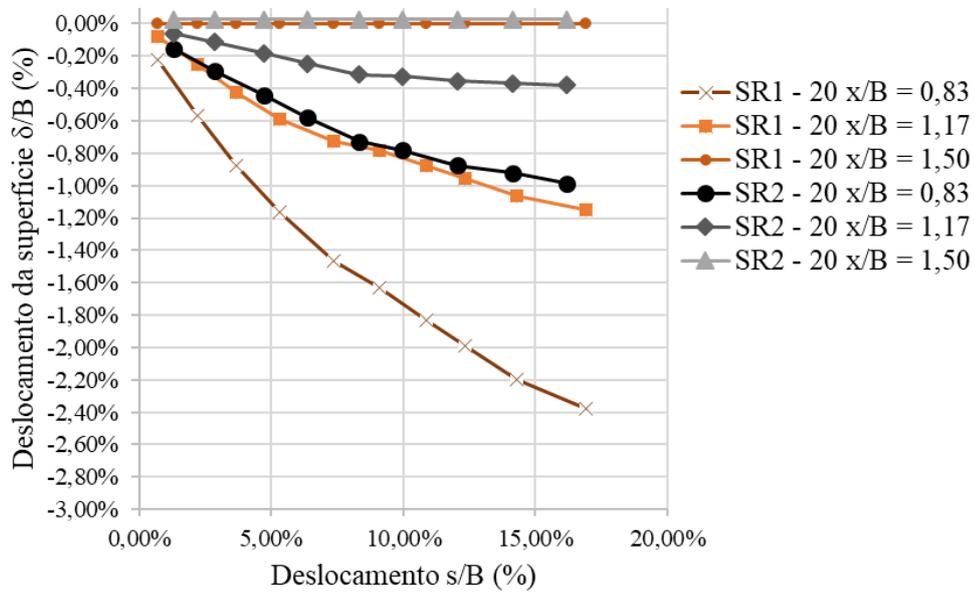
Figura 39 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SR2 - 20 cm



Fonte: Autor (2019)

A variação do deslocamento da superfície em relação ao deslocamento da placa pode ser analisado a partir da Figura 40, onde o ensaio SR1-20 cm obteve um maior recalque em todas as distâncias, $x = 0,83B$, $x = 1,17B$ e $x = 1,5B$, quando comparado com o ensaio SR2- 20 cm, isso se explica pelo fato do resíduo não ser totalmente uniforme ocorrendo acomodações dos grãos durante a execução dos ensaios.

Figura 40 - Deslocamento da superfície com o recalque da placa SR1 - 20 cm e SR2 - 20 cm

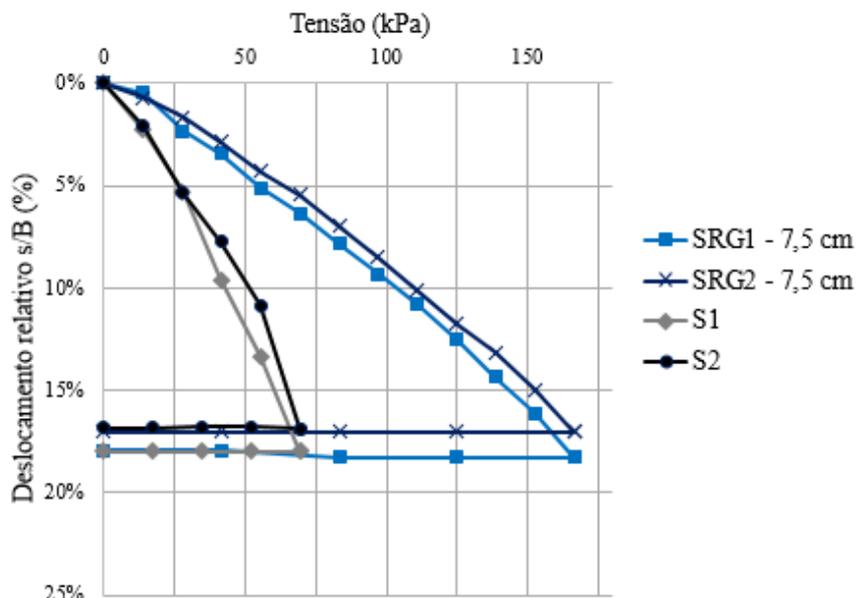


Fonte: Autor (2019)

4.2.4 Ensaio reforço de resíduo e geocélula com 7,5 cm

O comportamento tensão-deslocamento dos ensaios com geocélula de 7,5 cm estão apresentados na Figura 41, assim como os resultados dos ensaios no solo de fundação para fins de comparação. É constatado que a utilização do reforço celular gerou um ganho de resistência grande comparado ao solo de base, onde a resistência ficou em 70 kPa e com o reforço celular chegou a 167 kPa, representando um ganho de 2,38 vezes.

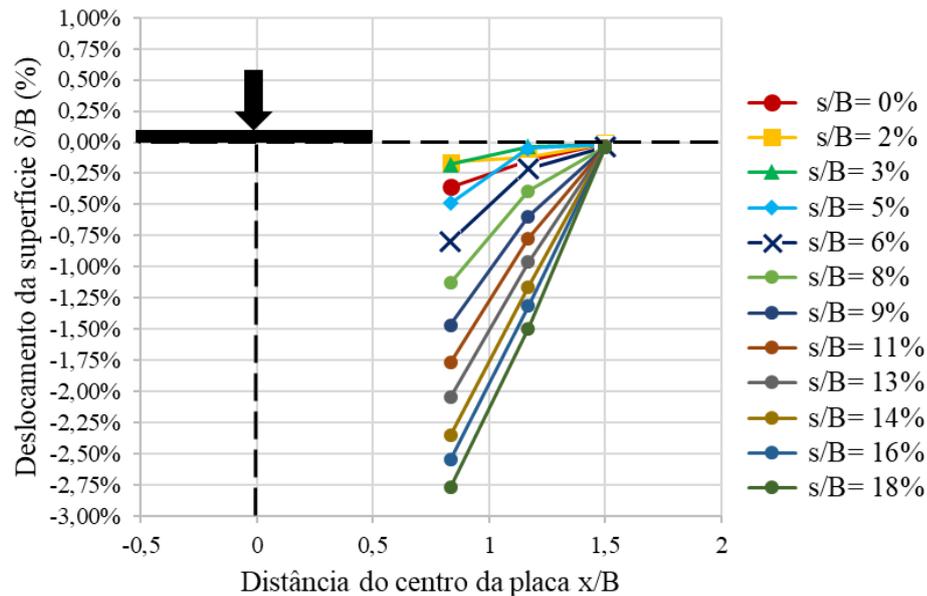
Figura 41 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios SRG1 - 7,5 cm e SRG2 - 7,5 cm



Fonte: Autor (2019)

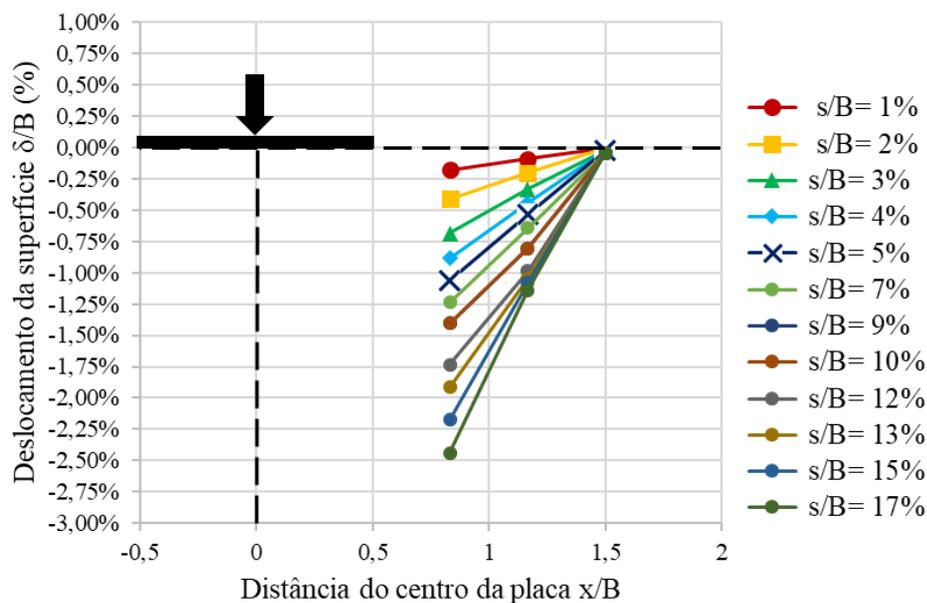
Os deslocamentos de superfície apresentados nas Figuras 42 e 43 demonstram que a superfície lateral a placa sofreu um recalque nas três distâncias medidas, diminuindo quanto mais afastadas da placa. É possível observar também uma maior resistência a esse deslocamento quanto maior a carga aplicada. Nos deslocamentos embaixo da placa apresentados nas 44 e 45 um recalque diferencial leve em ambos dos ensaios.

Figura 42 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SRG1 -7,5 cm



Fonte: Autor (2019)

Figura 43 - Perfil de deslocamento da superfície – Ensaio SRG2 -7,5 cm



Fonte: Autor (2019)

Figura 44 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SRG1 -7,5 cm

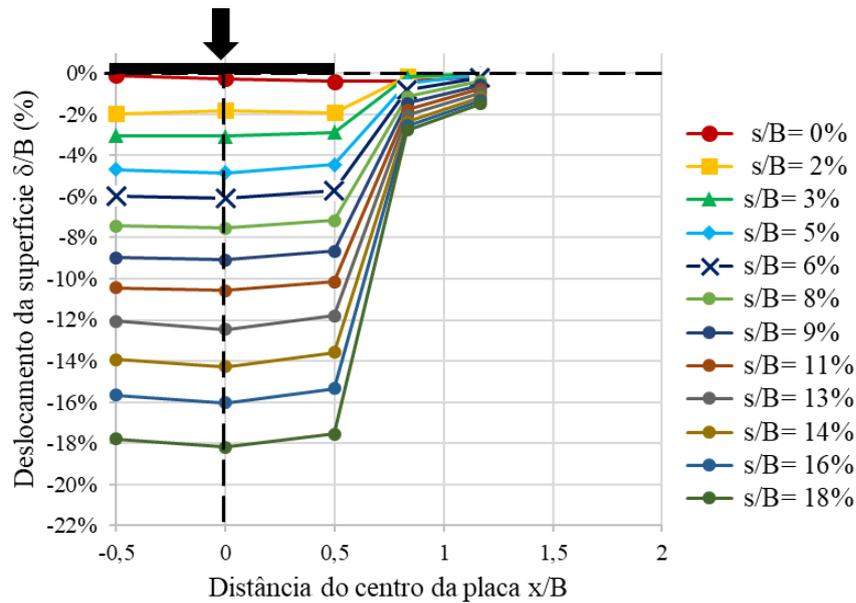
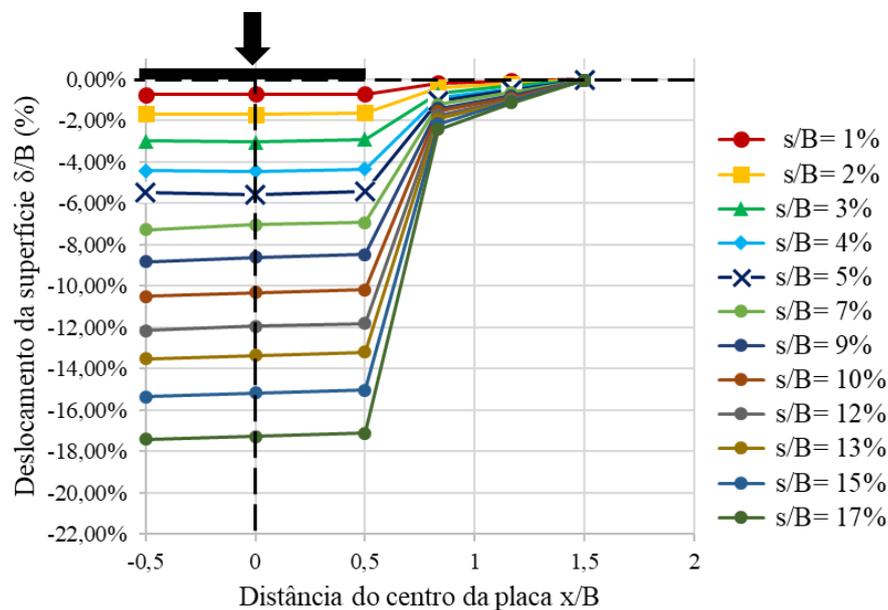


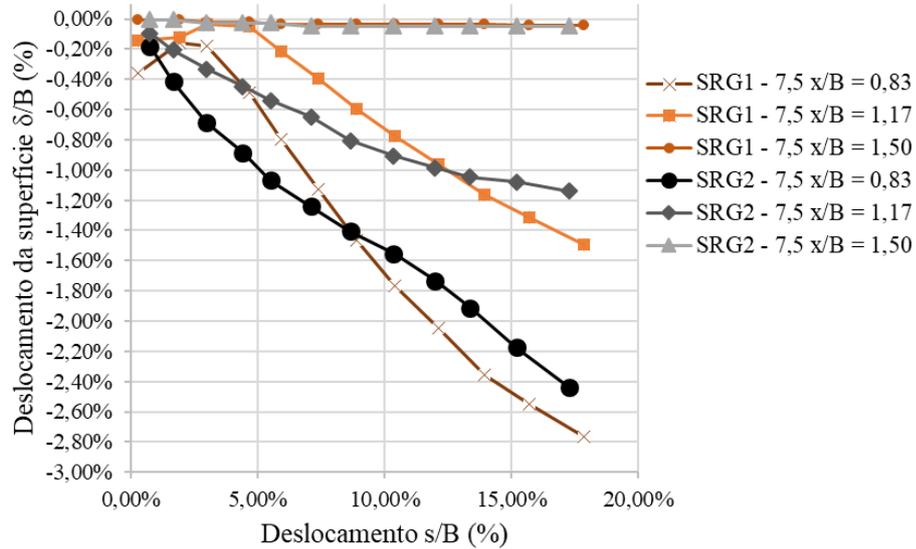
Figura 45 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SRG2 -7,5 cm



A Figura 46 retrata o deslocamento da superfície em relação ao deslocamento da placa para as distâncias $x=0,83B$, $x=1,17B$ e $x=1,50B$ do eixo da placa. É possível verificar que os deslocamentos se mantiveram acompanhando a placa, porém com o uso da geocélula o comportamento dos dois ensaios se mostrou mais aproximados, Hegde e Sitharam (2015) justificam esse comportamento pelo uso da geocélula que mantém as superfícies de falha presas

às células fazendo com que a acomodação dos grãos do resíduo aconteça de maneira mais uniforme.

Figura 46 - Deslocamento da superfície com o recalque da placa SRG1 - 7,5 cm e SRG2 - 7,5 cm

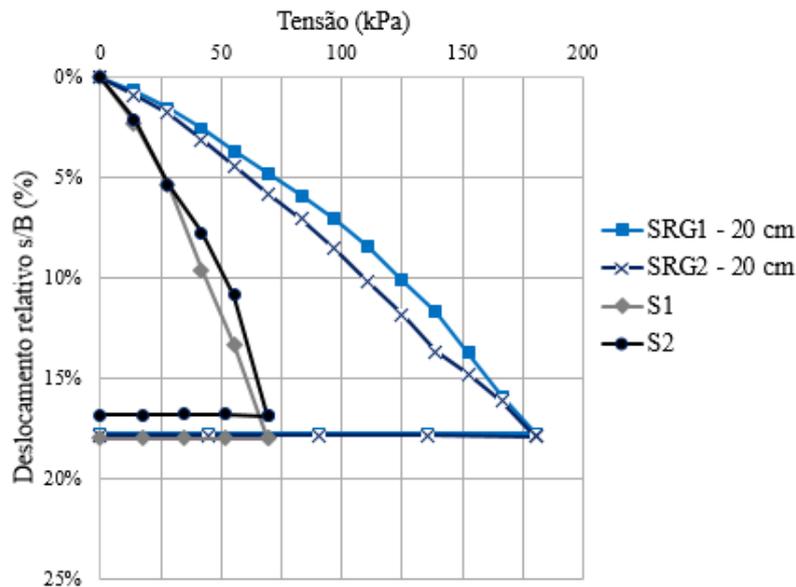


Fonte: Autor (2019)

4.2.5 Ensaio reforço de resíduo e geocélula com 20 cm

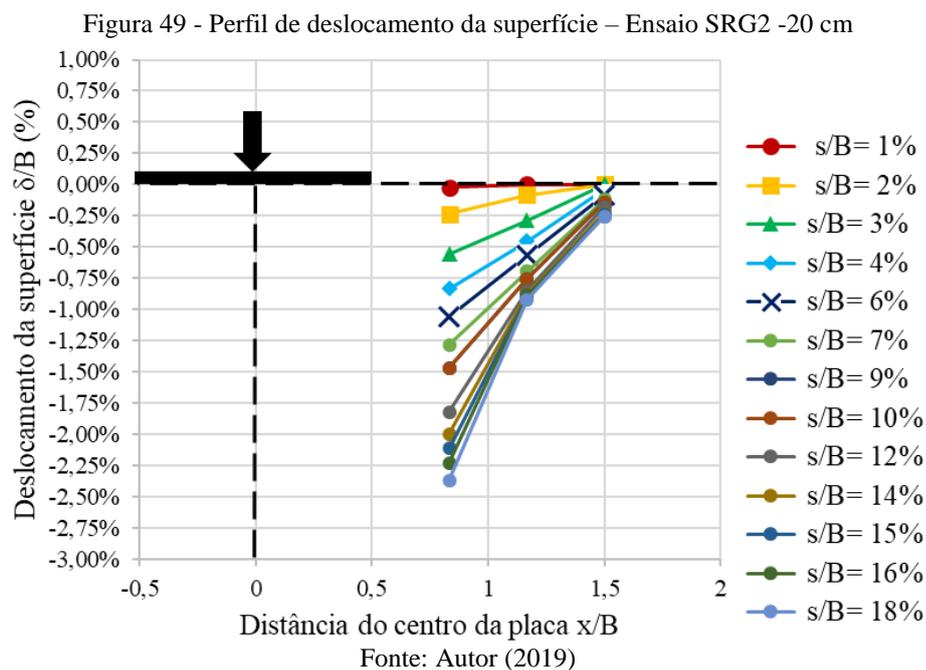
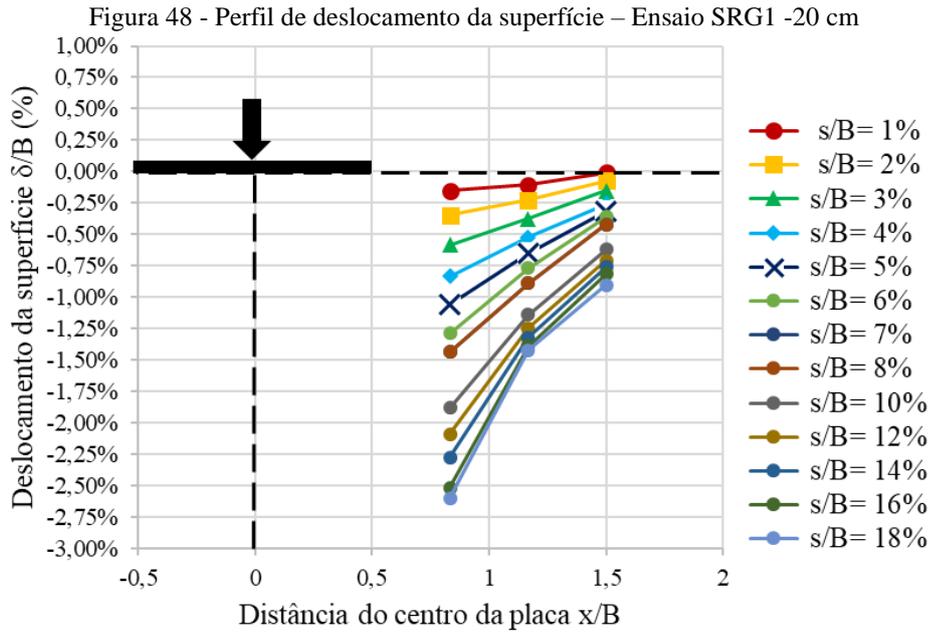
Os ensaios sobre camada de resíduo reforçada com geocélula de altura igual a 20 cm gerou o gráfico tensão-deslocamento da Figura 47 que estão sendo comparados com os ensaios de referência realizados no solo de fundação (S1 e S2). Observa-se um ganho de resistência de 2,57 vezes quando comparado com os ensaios de base.

Figura 47 - Curva tensão-deslocamento dos ensaios SRG1 - 20 cm e SRG2 - 20 cm



Fonte: Autor (2019)

A Figura 48 e a Figura 49 apresentam a variação do deslocamento da superfície em relação ao recalque da placa onde podemos observar que o comportamento foi semelhante ao do deslocamento da superfície dos demais ensaios apresentados, entretanto observa-se uma maior resistência para a deformação a cada incremento, isso se deve a utilização da geocélula que atua conduzindo a um recalque mais uniforme, como afirmaram Dash et al. (2001) e Avesani Neto (2013) em seus estudos.



Na Figura 50 e na Figura 51 é possível verificar a sequência do recalque de cada incremento de carga dos ensaios realizados nos ensaios SRG1 – 20cm e SRG2 – 20 cm respectivamente, observa-se nos gráficos o sentido em que ocorrem os deslocamentos e não são identificados recalques diferenciais para nenhum dos ensaios.

Figura 50 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SRG1 - 20 cm

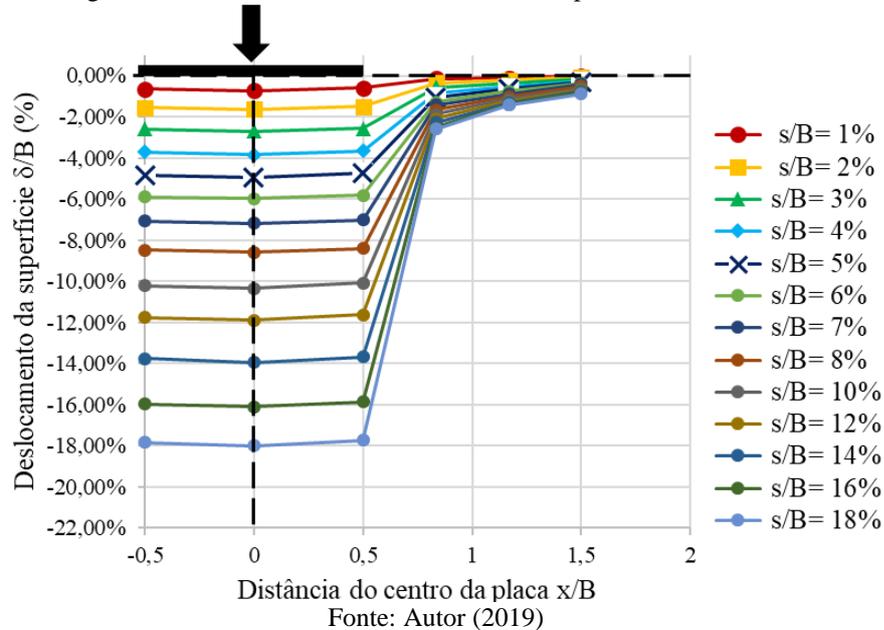
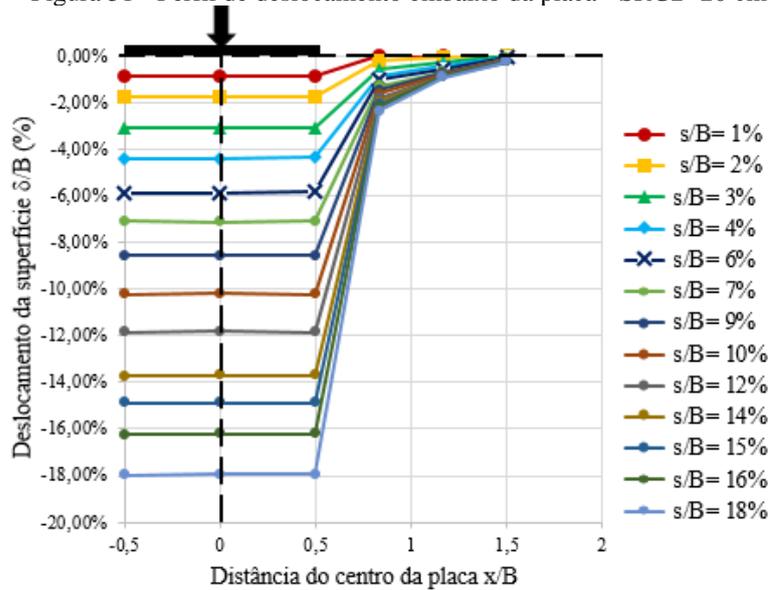
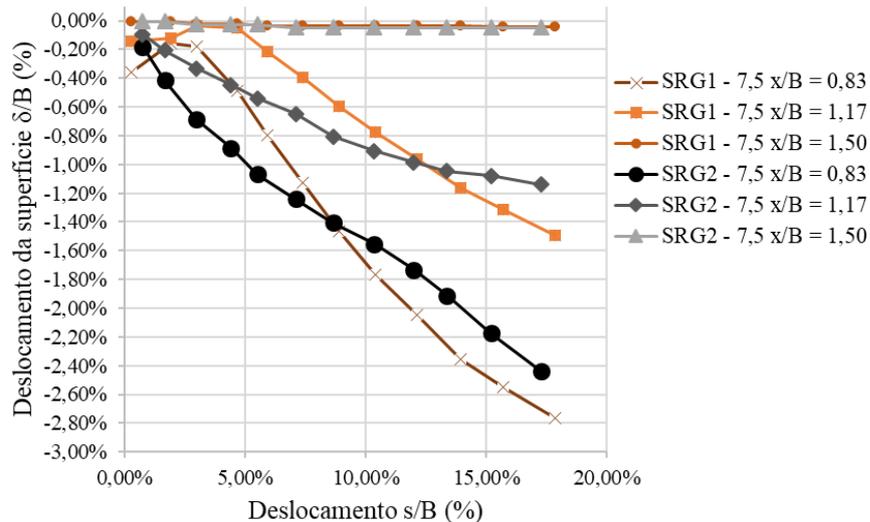


Figura 51 - Perfil de deslocamento embaixo da placa - SRG2 -20 cm



Os deslocamentos da superfície em relação aos deslocamentos da placa são apresentados na Figura 52 medidos nas distâncias $x=0,83B$, $x=1,17B$ e $x=1,50B$ do eixo da placa. É possível verificar que os deslocamentos se mantiveram acompanhando o deslocamento da placa nas três distâncias sendo menores os deslocamentos quanto maior o afastamento da placa.

Figura 52 -Deslocamento da superfície com o recalque da placa SRG1 - 20 cm e SRG2 - 20 cm



Fonte: Autor (2019)

4.3 ANÁLISE GLOBAL

Neste item estão apresentadas análises dos resultados apresentados no item 4.2 deste capítulo. Sendo divididas em dois subitens, o primeiro abordará a influência do uso da geocélula no reforço e o outro a influência das diferentes alturas de geocélulas utilizadas.

Para quantificar essas influências foram calculados dois fatores, o fator de melhoria de capacidade de carga (I_f) e pela porcentagem de redução no deslocamento da sapata (PRS). O fator de melhoria de capacidade de carga (I_f) é um fator adimensional que é definido pela razão da tensão aplicada no solo com o reforço de geocélula (q) pela tensão aplicada no solo não reforçado (q_0) para o mesmo deslocamento, como descrito na Equação 1, podendo ser calculado para qualquer ponto da curva tensão-deslocamento. Este fator tem como referência o valor 1 (um), caso o resultado for acima de um tem-se melhoria na capacidade de carga, caso contrário, menor que um, não houve melhoria na capacidade de carga (DASH et al., 2003; AVESANI NETO, 2013).

Equação 1

$$I_f = \frac{q_r}{q_o}$$

I_f = Fator de melhoria da capacidade de carga (adimensional)

q_r = Tensão aplicada no solo reforçado (kPa)

q_o = Tensão aplicada no solo sem reforço (kPa)

O outro parâmetro utilizado, porcentagem de redução no deslocamento de sapata (PRS) também é calculado para qualquer ponto da curva tensão-deslocamento, e estimado pela razão da diferença entre os deslocamentos do solo não reforçado (S_o) pelo solo com reforço (S_r), pelo valor do deslocamento do solo não reforçado (S_o) Equação 2 (DASH et al., 2003; AVESANI NETO, 2013).

Equação 2

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

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

S_o = Recalque do solo não reforçado (mm)

S_r = Recalque do solo reforçado (mm)

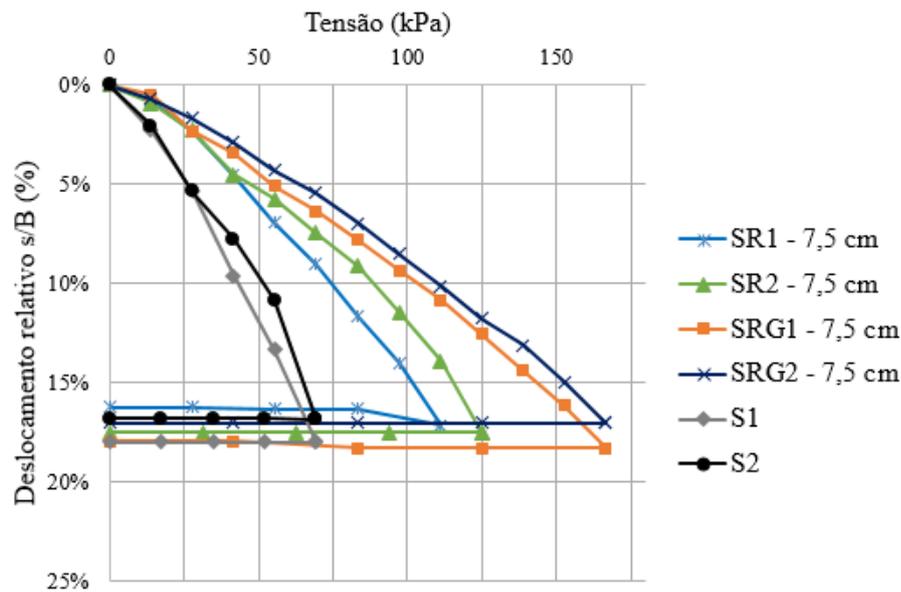
4.3.1 Influência do uso da geocélula

Na Figura 53 estão apresentadas as curvas tensão deslocamento dos ensaios de $h= 7,5$ cm e dos ensaios referência, sendo possível notar que a utilização do resíduo sob solo de fundação demonstrou melhora da capacidade de carga, sugerindo assim que o RCD tem grande potencial para uso em reforço, assim como o uso da geocélula apresentou uma melhora ainda mais significativa.

A dimensão dessa melhora de comportamento com aplicação da geocélula de 7,5 cm de altura foi calculada através dos fatores I_f e PRS apresentados nas tabelas abaixo (Tabelas 14, 15, 16 e 17). Nas tabelas 14 e 15 os fatores de melhora de capacidade de carga (I_f) são apresentados pelo deslocamento normalizado (s/B) para as duas repetições do ensaio com geocélula de 7,5 cm (SRG1 – 7,5 cm e SRG2 – 7,5 cm) comparadas com os ensaios de referência (S1 e S2) e com os ensaios com reforço de resíduo com $h= 7,5$ cm (SR1 – 7,5 cm e SR2 - 7,5 cm). É observado que todos os fatores de melhora ficaram igual ou superior a um (Tabela 14 e 15) o que indica o ganho na resistência, pois para esse fator o parâmetro definido

é o valor de um. Assim como as Tabelas 16 e 17 demonstram os resultados para a redução de deslocamento da sapata para os mesmos ensaios, e mostram que para a maior parte dos pontos comparados há grande melhora no deslocamento, chegando a mais de 70% quando comparado com o referêcia e mais de 40% quando comparado com o resíduo.

Figura 53 - Curvas tensão-deslocamento dos ensaios com e sem geocélula com $h=7,5$ cm e ensaios de referência



Fonte: Autor (2019)

Tabela 14 - Resultados do fator de melhora da capacidade de carga no ensaio SRG1 - 7,5 cm

Parâmetro Comparativo	Fator de melhora de capacidade de carga I_f			
	(s/B)	(s/B)	(s/B)	(s/B)
	2%	5%	10%	17%
SR1 - 7,5 cm	1,00	1,33	1,40	1,50
S1	2,00	2,00	2,33	2,40
SR2 - 7,5cm	1,00	1,33	1,33	1,33
S2	2,00	2,00	2,00	2,40

Fonte: Autor (2019)

Tabela 15 - Resultados do fator de melhora da capacidade de carga no ensaio SRG2 - 7,5 cm

Parâmetro Comparativo	Fator de melhora de capacidade de carga I_f			
	(s/B)	(s/B)	(s/B)	(s/B)
	2%	5%	10%	17%
SR1 - 7,5 cm	1,00	1,67	1,60	1,50
S1	2,00	2,50	2,67	2,40
SR2 - 7,5cm	1,00	1,67	1,33	1,33
S2	2,00	2,50	2,00	2,40

Fonte: Autor (2019)

Tabela 16 - Porcentagem de redução do deslocamento da sapata no ensaio SRG1 – 7,5 cm

SRG1 – 7,5 cm									
Parâmetro Comparativo	PRS								
	kgf 25	kgf 50	kgf 75	kgf 100	kgf 125	kgf 150	kgf 175	kgf 200	kgf 225
SR1 - 7,5 cm	42%	1%	25%	27%	30%	33%	37%	-	-
S1	79%	56%	64%	62%	65%	-	-	-	-
SR2 - 7,5cm	48%	-1%	24%	11%	15%	14%	18%	22%	28%
S2	77%	56%	64%	62%	65%	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

Tabela 17 - Porcentagem de redução do deslocamento da sapata no ensaio SRG2 – 7,5 cm

SRG2 – 7,5 cm									
Parâmetro Comparativo	PRS								
	kgf 25	kgf 50	kgf 75	kgf 100	kgf 125	kgf 150	kgf 175	kgf 200	kgf 225
SR1 - 7,5 cm	-8%	24%	32%	37%	36%	39%	39%	41%	-
S1	62%	66%	68%	67%	68%	-	-	-	-
SR2 - 7,5cm	5%	22%	32%	24%	22%	23%	25%	27%	33%
S2	58%	67%	60%	60%	60%	66%	-	-	-

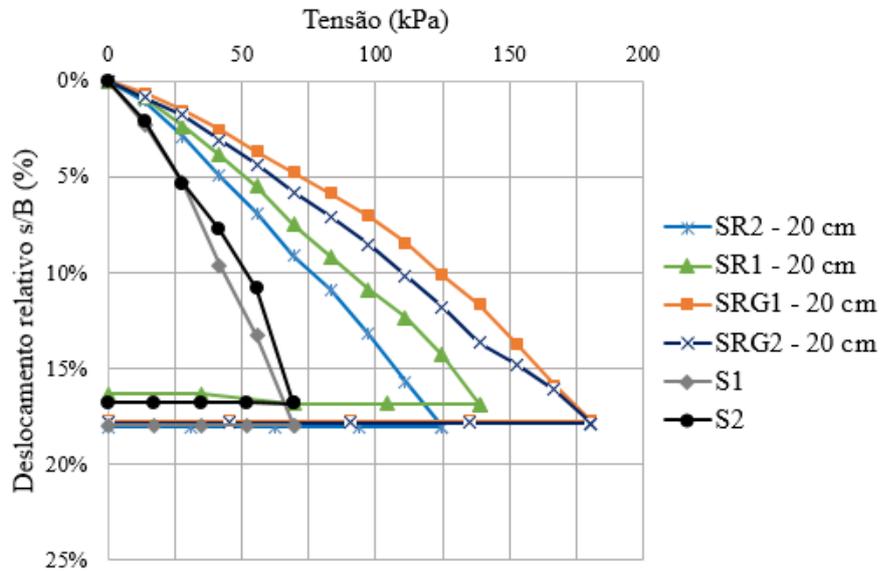
Fonte: Autor (2019)

Na Figura 54 verifica-se, nas curvas tensão-deslocamento dos ensaios de $h=20$ cm e dos ensaios referência, que o emprego do RCD sob solo de fundação demonstrou melhora da capacidade de carga, assim como o uso da geocélula com uma melhora ainda mais expressiva.

A dimensão dessa melhora no deslocamento com aplicação da geocélula de 20 cm de altura é demonstrada pelos fatores I_f e PRS nas tabelas abaixo (Tabelas 18, 19, 20 e 21). Os fatores de melhora de capacidade de carga (I_f) são apresentados pelo deslocamento normalizado (s/B) para as duas repetições do ensaio com geocélula de 20 cm (SRG1 – 20 cm e SRG2 – 20 cm) comparadas com os ensaios de referência (S1 e S2) e com os ensaios com reforço de resíduo com $h=20$ cm (SR1 – 20 cm e SR2 - 20 cm).

Nas tabelas 18 e 19 estão evidenciados os fatores de melhora, onde todos estão iguais ou superiores a um indicando a melhora da resistência, pois para esse fator o parâmetro definido para melhora é o valor de um. Assim como as Tabelas 20 e 21 que apresentam os resultados para a redução de deslocamento da sapata (PRS) para os ensaios já citados, demonstrando que na grande maioria dos pontos comparados há redução de deslocamento, chegando a mais de 70% quando comparado com o referência e mais de 40% quando comparado com o resíduo.

Figura 54 - Curvas tensão-deslocamento dos ensaios com e sem geocélula h= 20 cm e ensaios de referência



Fonte: Autor (2019)

Tabela 18 - Resultados do fator de melhora da capacidade de carga SRG1 - 20 cm

Parâmetro Comparativo	Fator de melhora de capacidade de carga I_f			
	SRG1 - 20 cm			
	(s/B) 2%	(s/B) 5%	(s/B) 10%	(s/B) 17%
SR1 - 20 cm	1,00	1,25	1,29	1,30
S1	2,00	2,50	3,00	2,60
SR2 - 20 cm	1,00	1,67	1,50	1,44
S2	2,00	2,50	3,00	2,60

Fonte: Autor (2019)

Tabela 19 - Resultados do fator de melhora da capacidade de carga no ensaio SRG2 - 20 cm

Parâmetro Comparativo	Fator de melhora de capacidade de carga I_f			
	SRG2 - 20 cm			
	(s/B) 2%	(s/B) 5%	(s/B) 10%	(s/B) 17%
SR1 - 20 cm	1,00	1,00	1,33	1,30
S1	2,00	2,00	2,67	2,60
SR2 - 20 cm	1,00	1,33	1,33	1,44
S2	2,00	2,00	2,00	2,60

Fonte: Autor (2019)

Tabela 20 - Porcentagem de redução do deslocamento da sapata no ensaio no ensaio SRG1 – 20 cm

SRG1 – 20 cm										
Parâmetro Comparativo	PRS									
	kgf 25	kgf 50	kgf 75	kgf 100	kgf 125	kgf 150	kgf 175	kgf 200	kgf 225	kgf 250
SR1 - 20 cm	25%	35%	34%	33%	37%	36%	35%	32%	29%	31%
S1	71%	71%	73%	72%	74%	-	-	-	-	-
SR2 - 20 cm	37%	47%	49%	47%	48%	47%	46%	44%	-	-
S2	68%	71%	67%	66%	72%	-	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

Tabela 21 - Porcentagem de redução do deslocamento da sapata no ensaio SRG2 – 20 cm

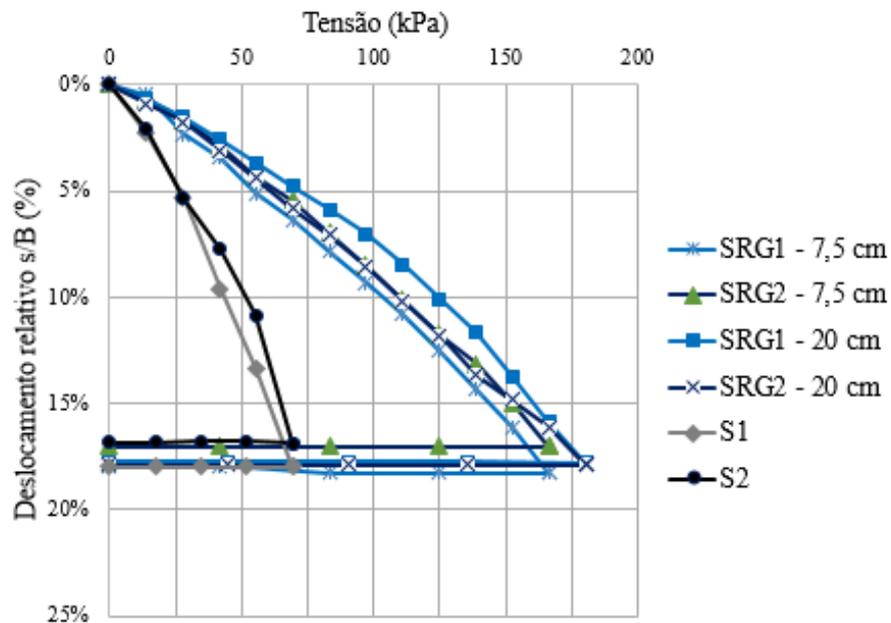
SRG2 – 20 cm										
Parâmetro Comparativo	PRS									
	kgf 25	kgf 50	kgf 75	kgf 100	kgf 125	kgf 150	kgf 175	kgf 200	kgf 225	kgf 250
SR1 - 20 cm	1%	25%	20%	20%	22%	23%	22%	18%	17%	19%
S1	71%	71%	73%	72%	-	-	-	-	-	-
SR2 - 20 cm	17%	39%	38%	36%	36%	35%	35%	35%	35%	-
S2	58%	67%	60%	60%	66%	-	-	-	-	-

Fonte: Autor (2019)

4.3.2 Influência da altura da geocélula

As curvas tensão-deslocamento da Figura 55 apresentam os resultados dos ensaios com geocélula de $h = 7,5$ cm (SRG1- 7,5 cm e SRG2- 7,5 cm), de $h = 20$ cm (SRG1 – 20 cm e SRG2 – 20 cm) e os referências do solo de fundação (S1 e S2). Com essas curvas é possível observar que a diferença de altura das geocélulas preenchidas com RCD não obtiveram melhoras muito expressivas, uma vez que as curvas dos ensaios SRG – 7,5 cm e SRG – 20 cm possuem comportamento semelhantes atingindo tensões muito próximas ao longo do ensaio e também na paralização. O que pode ser confirmado pelos resultados dos fatores I_f e PRS das tabelas 22 e 23, onde o maior fator I_f foi de 1,29 e a média de redução de deslocamento da sapata no melhor resultado foi de 18%.

Figura 55 - Curvas tensão-deslocamento dos ensaios com geocélula e ensaios de referência



Fonte: Autor (2019)

Tabela 22 - Resultados do fator de melhora da capacidade de carga nos ensaios SRG1 - 20 cm e SRG2- 20 cm

SRG1 - 20 cm				
Parâmetro Comparativo	Fator de melhora de capacidade de carga I_f			
	(s/B)	(s/B)	(s/B)	(s/B)
	2%	5%	10%	17%
SRG1 - 7,5 cm	1,00	1,25	1,29	1,08
SRG2 - 7,5cm	1,00	1,00	1,13	1,08
SRG2 - 20 cm				
Parâmetro Comparativo	Fator de melhora de capacidade de carga I_f			
	(s/B)	(s/B)	(s/B)	(s/B)
	2%	5%	10%	17%
SRG1 - 7,5 cm	1,00	1,25	1,14	1,08
SRG2 - 7,5cm	1,00	1,20	1,00	1,08

Fonte: Autor (2019)

Tabela 23 - Porcentagem de redução do deslocamento da sapata nos ensaios SRG1 – 20 cm e SRG2 – 20 cm

SRG1 - 20 cm													
Parâmetro Comparativo	PRS												
	Kg 25	Kg 50	Kg 75	Kg 100	Kg 125	Kg 150	Kg 175	Kg 200	Kg 225	Kg 250	Kg 275	Kg 300	Kg 325
SRG1 - 7,5 cm	-39%	34%	25%	28%	25%	25%	25%	22%	19%	19%	15%	13%	-
SRG2 - 7,5 cm	25%	14%	17%	16%	18%	17%	17%	17%	14%	15%	7%	2%	1%

SRG2 - 20 cm													
Parâmetro Comparativo	PRS												
	Kg 25	Kg 50	Kg 75	Kg 100	Kg 125	Kg 150	Kg 175	Kg 200	Kg 225	Kg 250	Kg 275	Kg 300	Kg 325
SRG1 - 7,5 cm	-54%	28%	16%	15%	14%	11%	9%	6%	6%	9%	7%	7%	-
SRG2 - 7,5 cm	16%	7%	7%	2%	6%	1%	0%	0%	1%	4%	-1%	-6%	0%

Fonte: Autor (2019)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi estudado o comportamento de geocélulas preenchidas com resíduo de construção e demolição de um sistema de reforço em solo arenoso e fofo, utilizando geocélulas preenchidas com resíduos de construção e demolição em duas alturas 7,5 cm e 20 cm. Analisadas através de ensaios de placa em laboratório em placa circular de 15 cm de diâmetro com medidas diretas de tensão e deslocamento.

O resíduo de construção e demolição utilizado foi caracterizado e classificado como um pedregulho bem graduados com pouco fino (GW), com massa específica de 2,519 g/cm e índice de vazios mínimo de 0,83 e máximo de 1,34. O RCD possui um teor de matéria orgânica de 1,15%, tendo como materiais predominantes em sua composição a argamassa e o concreto com 85% e o tijolo e material cerâmico com 11%. Quanto a presença de metais pesados: Cadmio, chumbo, cromo, cobre e zinco o RCD possui concentrações dentro do limite permitido tanto para solubilidade quanto para lixiviação.

A utilização do resíduo de construção e demolição como material de preenchimento das geocélulas e como reforço, na faixa granulométrica e densidades empregadas, conduziu a resultados eficazes tanto no aumento da capacidade de carga do solo quanto na redução do deslocamento da sapata com o solo arenoso de fundação.

O uso da geocélula promoveu um aumento significativo na capacidade de carga tanto dos ensaios referência quanto dos ensaios reforçados com resíduo, verificadas nas comparações dos resultados encontrados, onde dos ensaios referência a melhoria da capacidade de carga foi de 2,57 vezes para os ensaios com 20 cm e 2,38 para os ensaios com 7,5 cm. Assim como quando comparado com o reforço de RCD a melhoria foi de 1,44 vezes para os ensaios de 20 cm e 1,62 vezes para o de 7,5 cm. Da mesma maneira os resultados para a redução de deslocamento da sapata demonstraram melhoras significativas de mais de 70% quando comparado com o referência e mais de 40% quando comparado com o resíduo.

Verificou-se que quando comparado os resultados das duas alturas distintas quanto as curvas de tensão-deslocamento um comportamento semelhante, indicando que nas condições ensaiadas não há grandes influências da altura da geocélula, tanto para a capacidade de carga quanto na redução de recalque. Sendo assim, com solo arenoso fofo de fundação com geocélula preenchida de RCD é mais econômico, geocélula mais barata e menos material de preenchimento, e efetivo utilizar a altura de 7,5 cm.

REFERÊNCIAS

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

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

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

_____. **NBR 10007:2004**. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004d.

_____. **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 13600:1996**. Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

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

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. Abrelpe, São Paulo, 2019.

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.

ÂNGULO, S.C. **Variabilidade de agregados graúdos reciclados de resíduos de construção e demolição reciclados**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

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. 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.

BANSAL, A.; MISHRA, G.; BISHNOI, S. Recycling and Reuse of Construction and Demolition waste: sustainable approach. In: **7º International Conference on Sustainable Built Environment**, Earl's Regency Hotel, Kandy, Sri Lanka, 2016.

BARUFFI, A. **Comportamento mecânico de geocélulas preenchidas com resíduo de pedras semipreciosas**. 2016. 95f. Projeto de pesquisa (Dissertação - Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2017.

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.

BERNARDES, A.; THOMÉ, A.; PRIETTO, M. P. D.; ABREU, A. G. Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 65-76, jul. /out. 2008.

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**, v. 3, n. 17, 2017.

BRUM, E. M. **Aspectos econômico, social e ambiental da sustentabilidade de uma usina de reciclagem de resíduos de construção civil**. 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2017.

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

CONAMA. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 307, DE 05 DE JULHO DE 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Publicada no DOU de 17 de julho de 2002.

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

CONSOLI, N. C.; MORAES, R. R. de; FESTUGATO, L.. Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Fiber-Reinforced Cemented Soil. **Journal Of Materials In Civil**

Engineering, [s.l.], v. 25, n. 10, p.1568-1573, out. 2013. American Society of Civil Engineers (ASCE)

DASH, S. K. Effect of Geocell Type on Load-Carrying Mechanisms of Geocell-Reinforced Sand Foundations. **International Journal of Geomechanics**. ASCE 12 (5), p. 537-548, 2012.

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.; BORA, M.C. Improved performance of soft clay foundations using stone columns and geocell-sand mattress. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 41, p. 26-35, 2013.

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

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

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

HEGDE, A.M.; SITHARAM, T.G. Experimental and numerical studies on protection of buried pipelines and underground utilities using geocells. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 43, p. 372-381, 2015.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil - Relatório de Pesquisa**. Brasília, 2012

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

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 102p. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KARTAM, N.; AL-MUTAIRI, N.; ALGHUSAIN, I.; AL-HUMOUD, J. Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait, **Waste Manage**, v. 24, p. 1049-1059, 2004.

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.

LEITE, M. B. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MEHRJARDI, G. T.; BEHRAD, R.; TAFRESHI, S. N. M. Scale effect on the behavior of geocell-reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 47, p. 154-163, 2019.

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

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.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. New York: John Wiley & Sons, 2001. xii, 684 p.

MYMRIN et al. Construction material from construction and demolition debris and lime production wastes. **Construction and Building Materials**. v.79, p. 207-213, 2015.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Universidade de São Paulo, 1999, 189p.

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.

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

SUKU, L.; PRABHU, S; RAMESH, P., BABU, G.L.S. Behavior of geocell-reinforced granular base under repeated loading. **Transportation Geotechnics**. v. 9, p. 17-30, 2016.

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.

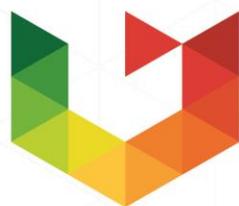
TMP Geosynthetics. Products. Textured HDPE Geocell, Smooth HDPE Geocell. 2016. Disponível em: <http://www.tmpgeosynthetics.com/product_list.aspx?Pid=18>. Acesso em: 23 out. 2018.

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

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.

WESSELOO, J.; VISSER, A.T.; RUST E. The stress–strain behaviour of multiple cell geocell packs. **Geotextiles and Geomembranes**. 27, p. 31-38, 2009.

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



UPF
UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

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