

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

Aline Baruffi

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE GEOCÉLULAS
PREENCHIDAS COM RESÍDUOS DE PEDRAS
PRECIOSAS**

Passo Fundo

2017

Aline Baruffi

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE GEOCÉLULAS
PREENCHIDAS COM RESÍDUOS DE PEDRAS
PRECIOSAS

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

Passo Fundo

2017

Aline Baruffi

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE GEOCÉLULAS
PREENCHIDAS COM RESÍDUOS DE PEDRAS
PRECIOSAS

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.

Data da aprovação: 19 de abril de 2017.

Membros componentes da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Felipe Floss
Orientador

Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa
Coorientador

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

Prof. Dr. Antonio Thomé
Universidade de Passo Fundo – UPF

Prof. Dr. Vitor Pereira Faro
Universidade Federal do Paraná - UFPR

Passo Fundo

2017

*“Dedico este trabalho a
Deus.”*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda lucidez e superação nos momentos de adversidade, sempre me inspirando e dando força para seguir adiante.

Ao meu pai Elvio Luiz Baruffi (in memoriam), agradeço o esforço de uma vida inteira para minha formação pessoal e profissional.

A minha mãe, Ozana Baruffi, obrigada pelo suporte emocional e incentivo incondicional.

Ao meu irmão Renan Luiz Baruffi que mesmo distante me ouvia e corrigia minhas traduções.

Ao meu namorado, Cristofer Becker Portela, obrigada pelo estímulo, apoio, confiança ao longo desta jornada, por me ajudar no preenchimento das geocélulas, acompanhar meus ensaios noites adentro e auxiliar na correção do presente trabalho.

As minhas amigas Camila Kechner, Daiane Walker, Ediangili Pivotto, Emanuele Rodrigues, Mariana Zanardo e Taiana Ribeiro, obrigada pelo apoio, pelas conversas e por sempre estarem ao meu lado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Felipe Floss obrigada por suas ideias, disponibilidade, incentivo e confiança durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa, agradeço por suas críticas e sugestões sempre pertinentes.

Aos meus colegas do mestrado, agradeço o carinho e o convívio. Em especial ao grupo “mestrandas” Ritielli Berticelli, Cristiane Tieppo, Natália Ecker e Andressa Decesaro e aos “três mosqueteiros” Janaína Gularte Borges e Felipe Leite Silva, muito obrigada.

A minha colega Vanessa Tibola da Rocha obrigada pela parceria e experiências compartilhadas.

Aos funcionários do CETEC, agradeço pelo auxílio no preenchimento das geocélulas e nos ensaios, em especial ao Leunir Freitas, por sempre surgir com novas ideias diante do imprevisto.

Ao meu colega Matheus de Conto Ferreira e aos bolsistas Igor Decol, Fernando Fante e Luiz Carlos Ábido por me auxiliarem em diferentes etapas da minha pesquisa.

Ao meu amigo Gustavo Dias Miguel, pelo auxílio desde o início da minha pesquisa, trabalhando arduamente, pelas publicações compartilhadas e pelas dicas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo.

À banca examinadora, pelo aceite da participação e contribuições de melhorias para este trabalho.

.

RESUMO

O resíduo do beneficiamento de pedras preciosas é composto por refugos, peças semiacabadas e peças defeituosas, que acabam sendo estocados no pátio das empresas podendo ocasionar riscos ao meio ambiente. Estudos já realizados nos indicam que é possível a utilização desse resíduo no ramo da engenharia civil como, por exemplo, em materiais cimentícios, em estruturas de pavimentos urbanos e em estacas, contribuindo assim, com a redução de resíduos armazenados nas empresas. Outra possibilidade de reutilizar esse material é através do preenchimento de geocélulas. As geocélulas possuem a função de aumentar a capacidade do solo, as quais são compostas por séries de células interligadas formando uma estrutura tridimensional que confina os materiais nela inseridos. Neste contexto, o trabalho tem como objetivo analisar o desempenho mecânico da geocélula, por meio de ensaios de placa, empregando como material de preenchimento o resíduo de beneficiamento de pedras preciosas, proveniente do município de Soledade/RS. O programa experimental proposto buscou caracterizar o resíduo, analisar o comportamento do solo sem reforço e reforçado com geocélulas de 5cm, 10cm e 20cm de altura quando submetido a cargas aplicadas e, por fim, comparar os dados obtidos nos ensaios com os métodos mais usuais de previsão de capacidade de carga para geocélulas. O resíduo é classificado como areia e silte, com 35% de materiais finos, massa específica igual a $2,62\text{g/cm}^3$, massa específica aparente seca $1,91\text{g/cm}^3$ e umidade ótima igual a 11,29%. Os resultados mostram que o solo reforçado com geocélula apresenta uma melhoria de capacidade de carga de no mínimo 36%, além de reduzir significativamente o recalque do solo. O emprego de geocélulas de maiores alturas é ideal para aumento de capacidade de carga, já para diminuição de recalques geocélulas com menores alturas são as mais indicadas. A posição da placa na geocélula influencia seu comportamento, quando localizada no nó de ligação das células proporciona um ganho de capacidade de carga superior a 77% do que quando alocada no centro da célula. O método proposto por Presto (2008) mostrou-se o mais adequado para a estimativa de capacidade de carga deste trabalho.

Palavras-chave: capacidade de carga, geossintéticos, reforço do solo.

ABSTRACT

The waste from the processing of precious stones consists of refuse, semi-finished parts and defects pieces, which end up being stored the companie's courtyard, which can cause risks to the environment. Studies have shown that it is possible to use this waste in civil engineering, such as cement materials, urban pavement structures and cuttings, thus contributing to the reduction of waste stored in companies. Another possibility of reusing this material is through the filling of geocells. The geocells have the function of increasing the capacity of the soil, which are composed of series of interconnected cells forming a three-dimensional structure that confines the materials inserted therein. In this context, the objective of this work is to analyze the mechanical performance of the geocell, by means of plaque tests, using as fill material the residue of precious stones processing, from the municipality of Soledade / RS. The proposed experimental program aimed to characterize the residue, to analyze the behavior of the soil without reinforcement and reinforced with geocells of 5cm, 10cm and 20cm of height when submitted to applied loads and, finally, to compare the data obtained in the tests with the most usual methods of prediction of carrying capacity for geocells. The residue is classified as sand and silt, with 35% of fine materials, specific mass equal to $2.62\text{g} / \text{cm}^3$, specific apparent dry mass $1.91\text{g} / \text{cm}^3$ and optimal humidity equal to 11.29%. The results show that the geocellular reinforced soil presents an improvement in the load capacity of at least 36%, in addition to significantly reducing soil repression. The use of geocells of higher heights is ideal for increasing load capacity, and for reducing geocells with lower heights are the most indicated. The position of the plate in the geocelle influences its behavior, when located at the cell attachment node provides a load capacity gain greater than 77% than when allocated at the center of the cell. The method proposed by Presto (2008) was the most suitable for the estimation of the load capacity of this work.

Key-words: Load capacity, geosynthetics, soil reinforcement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de geocélula instalada.....	18
Figura 2 - Materiais de composição das geocélulas: (a) Polietileno de Alta Densidade; (b) Poliprolileno.....	19
Figura 3 - Ilustração dos formatos das geocélulas.....	19
Figura 4 - Ilustração das dimensões da geocélula: (a) fechada; (b) aberta.....	20
Figura 5 - (a) preenchimento geocélula (b) compactação do material de preenchimento dentro das células (c) camada de reforço pronta (d) acréscimo de uma camada compactada de solo sobrejacente para proteção.	22
Figura 6 - Esquema ilustrativo do efeito confinamento: (a) aplicação do carregamento, (b) indução de tensões horizontais dentro da célula; (c) mobilização de tensões cisalhantes na interface entre o material de preenchimento e a parede da célula.	24
Figura 7 - Esquema ilustrativo do efeito laje.....	25
Figura 8 - 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.....	25
Figura 9 - Esquema ilustrativo da geometria do ensaio estudado.	30
Figura 10 - Pontos de aplicação de carga na geocélula: (a) centro da célula; (b) nó de ligação das células; (c) parede da geocélula.....	36
Figura 11 - Mapa gemológico da região sul do Brasil.	38
Figura 12 - Pilha de rejeito de pedras preciosas.	39
Figura 13 - Esquema ilustrativo da localização da placa: (a) superfície; (b) em cavas; (c) em furos.	43
Figura 14 - Esquema ilustrativo dos tipos de placas utilizadas: (a) convencional; (b) helicoidal “parafuso”.	43
Figura 15 - Esquema ilustrativo dos tipos de sistemas de reação: (a) caixões de areia; (b) plataformas carregadas; (c) estruturas ou vigas ancoradas no terreno.....	44
Figura 16 - Esquema ilustrativo da ruptura geral.	45
Figura 17 - Esquema ilustrativo da ruptura por puncionamento.	46
Figura 18 - Esquema ilustrativo da ruptura local.	46
Figura 19 - Mecanismos de ruptura da capacidade de suporte do solo: (a) sem reforço celular; (b) com sistema de confinamento da geocélula.	48
Figura 20 - Fluxograma da pesquisa.	52
Figura 21 - Delimitação do campo experimental.	53
Figura 22 - Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas.....	54
Figura 23 - Instalação geocélula entre o sistema de apoio - vista superior.	57
Figura 24 - Instalação geocélula entre o sistema de apoio - vista frontal.....	58
Figura 25 - Fixação da geocélula no terreno.	59
Figura 26 - Homogeneização do resíduo.....	59
Figura 27 - Preenchimento da geocélula com resíduo.....	60
Figura 28 - Compactação da geocélula.	60
Figura 29 - Geocélula finalizada.	60
Figura 30 - Determinação do peso específico aparente seco do resíduo.....	61
Figura 31 - Instalação sistema de reação.	62
Figura 32 - Sistema de transmissão de carga e sistema de transmissão de deslocamento.	63
Figura 33 - Sistema de reação do ensaio de placa.	63
Figura 34 - Placas: (a) diâmetro 30cm; (b) diâmetro 30cm com furo central de 4cm.....	64

Figura 35 - Esquema representativo da localização da placa sobre a geocélula.	67
Figura 36 - Curva granulométrica do resíduo - NBR 7181 (1984).	69
Figura 37 - Massa específica aparente seca x Umidade ótima do resíduo.	70
Figura 38 - Curva Carga x Recalque.	71
Figura 39 - Curva carga x recalque – S-1.	72
Figura 40 - Curva carga x recalque – GL5-1.	73
Figura 41 - Curva carga x recalque – GL10-1.	73
Figura 42 - Curva carga x recalque – GL10-2.	74
Figura 43 - Curva carga x recalque – GL20-1.	74
Figura 44 - Curva carga x recalque – GL20-2.	75
Figura 45 - Comparativo das cargas de ruptura obtida para os diferentes critérios.	75
Figura 46 - Curva tensão x recalque S/B – S-1 e GL5-1.	77
Figura 47 - Curva tensão x recalque S/B – S-1 e GL10-1.	77
Figura 48 - Curva tensão x recalque S/B – S-1 e GL10-2.	78
Figura 49 - Curva tensão x recalque S/B – S-1 e GL20-1.	78
Figura 50 - Curva tensão x recalque S/B – S-1 e GL20-2.	79
Figura 51 - Comparativo do PRS (%) de cada geocélula em relação ao recalque normalizado.	80
Figura 52 - Coeficiente de Recalque x Deslocamento	81
Figura 53 - Comparativo da melhoria de capacidade de carga devido ao fator forma.	82
Figura 54 - Curva tensão x recalque normativo – GL20-1 e GL20-2.	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estudos empregando ensaio de placa em geocélula.....	27
Quadro 2 - Energias de compactação	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Funções dos geossintéticos.....	22
Tabela 2 - Variáveis abordadas no ensaio - Dash et al. (2001).	30
Tabela 3 - Variáveis de teste - Meneses (2004).....	32
Tabela 4 - Variáveis de teste - Sireesh et al. (2009).....	34
Tabela 5 - Caracterização física do solo do campo experimental.	53
Tabela 6 - Especificações técnicas das geocélulas.	54
Tabela 7 - Denominação e dimensão das geocélulas.	59
Tabela 8 - Resumo dos ensaios de placa realizados.	61
Tabela 9 - Previsão de capacidade de carga.	62
Tabela 10 - Determinação da composição granulométrica - NBR 7181 (1984).	68
Tabela 11 - Composição do resíduo.	69
Tabela 12 - Massa específica aparente seca do resíduo.....	71
Tabela 13 - Valores de carga de ruptura e recalque para os diferentes critérios.	75
Tabela 14 - Fator de melhoria de capacidade de carga.....	79
Tabela 15 - Porcentagem de redução no deslocamento da sapata.	80
Tabela 16 - Coeficiente de recalque.	81
Tabela 17 - Fator forma (h/d).	82
Tabela 18 - Largura de reforço (b/B).....	83
Tabela 19 - Comparativo geocélulas de 20cm.	85
Tabela 20 - Propriedades do solo.	85
Tabela 21 - Propriedades da geocélula.	85
Tabela 22 - Comparação entre o método de Koerner (1994) e dados ensaiados.....	86
Tabela 23 - Parâmetros medidos no método de Presto (2008).	87
Tabela 24 - Comparação entre o método de Presto (2008) e dados ensaiados.....	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Problema da Pesquisa	15
1.2	Justificativa.....	16
1.3	Objetivos.....	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
1.4	Estrutura da dissertação	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Definição de geocélula	18
2.1.1	Material de preenchimento da geocélula	20
2.1.2	Aplicações da geocélula	22
2.1.3	Interação solo/ geocélula	23
2.1.3.1	Efeito confinamento	23
2.1.3.2	Efeito laje	24
2.1.3.3	Efeito membrana	25
2.1.3.4	Fatores que afetam a resistência da geocélula.....	26
2.1.4	Estudos de casos	27
2.2	Resíduos de beneficiamento de pedras preciosas	36
2.2.1	Geração de resíduos.....	39
2.3	Provas de carga em placas	41
2.3.1	Equipamentos	43
2.3.2	Metodologias de aplicação de carregamento.....	44
2.3.3	Mecanismos de ruptura.....	45
2.4	Métodos de previsão de capacidade de carga.....	47
2.4.1	Método de previsão de capacidade de carga do solo.....	47
2.4.1.1	Método de Terzaghi	47
2.4.2	Métodos de previsão de capacidade de carga de solo reforçado com geocélula	48
2.4.2.1	Método de Koerner.....	48
2.4.2.2	Método de Presto.....	49
3	MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1	Programa de Pesquisa.....	52
3.2	Local do estudo.....	52
3.3	Materiais	54
3.3.1	Resíduo	54
3.3.2	Geocélula	54
3.4	Equipamentos empregados nos ensaios.....	55
3.4.1	Preenchimento geocélula.....	55
3.4.2	Ensaio de placa	55
3.5	Métodos	56
3.5.1	Caracterização do resíduo.....	56
3.5.1.1	Composição Granulométrica.....	56
3.5.1.2	Determinação Massa Específica.....	56
3.5.1.3	Ensaio de Compactação	56
3.5.2	Preparação da geocélula para ensaio	57
3.5.3	Ensaio de Placa.....	61
3.5.3.1	Critérios de ruptura.....	64

3.5.4	Desempenho da geocélula	64
3.5.4.1	Fator de melhoria da capacidade de carga	64
3.5.4.2	Porcentagem de redução no deslocamento da sapata.....	65
3.5.4.3	Coeficiente de recalque	65
3.5.4.4	Fator forma.....	66
3.5.4.5	Largura do reforço.....	66
3.5.4.6	Posição da placa	66
3.5.5	Métodos comparativos para cálculo de reforço de solo empregando geocélulas...	67
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
4.1	Caracterização do Resíduo	68
4.1.1	Composição Granulométrica	68
4.1.2	Determinação Massa Específica.....	69
4.1.3	Ensaio de Compactação.....	70
4.1.4	Ensaio de Cone de Areia	70
4.2	Ensaio de Placa.....	71
4.2.1	Verificação da carga de ruptura.....	72
4.2.2	Desempenho da geocélula	76
4.2.2.1	Fator de melhoria da capacidade de carga	76
4.2.2.2	Porcentagem de redução no deslocamento da sapata.....	79
4.2.2.3	Coeficiente de recalque	81
4.2.2.4	Fator forma.....	82
4.2.2.5	Largura do reforço.....	83
4.2.2.6	Posição da placa	84
4.2.3	Métodos comparativos.....	85
4.2.3.1	Método de Koerner (1994).....	86
4.2.3.2	Método de Presto (2008)	86
5	CONCLUSÃO.....	88
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1 INTRODUÇÃO

Os geossintéticos surgiram após a Segunda Guerra Mundial com o desenvolvimento da indústria petroquímica e a disseminação dos produtos plásticos. As obras costeiras nos Países Baixos e nos EUA foram às pioneiras na utilização de geotêxteis como um material filtrante. No Brasil, o uso dos geossintéticos iniciou-se somente em 1971 com a fabricação do primeiro geotêxtil não-tecido (VERTEMATTI, 2001).

Os geossintéticos são produtos industrializados que apresentam em pelo menos um de seus componentes, algum polímero sintético ou natural, sendo oferecido na forma de manta, tira, ou estrutura tridimensional, e são utilizados em contato com o solo ou com outros materiais em aplicações da engenharia civil, geotécnica e ambiental. Eles podem ser classificados, de acordo com seu processo de fabricação em: geotexteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompostos, geocompostos argilosos, geotubos, geoexpandido e geocélulas (IGS BRASIL, 2014).

O desenvolvimento das geocélulas originou-se na década de 70 através de motivações militares, onde necessitava-se de rápida tecnologia para a construção de estradas para pousos e decolagens em praias ou operações em áreas desérticas. No início dos anos 80 as geocélulas já estavam sendo produzidas comercialmente para fins civis.

Em obras sobre solos moles a utilização de geocélulas pode ser vantajosa, pois proporciona um confinamento tridimensional ao material de preenchimento formando um “tapete” rígido que distribui a carga submetida para áreas mais amplas do solo subjacente melhorando a sua resistência (SIREESH et al., 2009). As geocélulas também podem 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.

Para o preenchimento da geocélula podem ser utilizados vários tipos de materiais, sendo alguns deles: solo, vegetação, concreto e resíduo industriais, como, por exemplo, o resíduo do beneficiamento de pedras preciosas.

As indústrias de beneficiamento de pedras preciosas do município de Soledade/RS e região geram grande quantidade de rejeitos gemológicos, que acabam depositados nos pátios das empresas, podendo ocasionar danos ao meio ambiente. Devido a isso, algumas alternativas buscam solucionar os problemas enfrentados hoje por essas indústrias, promovendo o aproveitamento do rejeito gerado de forma ambientalmente correta (IPAR, 2011).

Neste contexto, este trabalho busca contribuir para a compreensão da distribuição de tensões do solo reforçado com geocélulas preenchidas com resíduo de beneficiamento de pedras preciosas do município de Soledade, através de medida direta de tensão-deformação, da compreensão do comportamento mecânico deste solo reforçado e também da comparação dos resultados com metodologias de dimensionamento já existentes.

1.1 Problema da Pesquisa

Os recursos naturais estão esgotando-se e, caso a velocidade do esgotamento não diminuir, as gerações futuras não terão acesso ao desenvolvimento tecnológico e a um ambiente equilibrado, colocando não só a própria vivência em risco, mas também a das próximas gerações (PORTO et al., 2011).

No processo de extração e beneficiamento de pedras preciosas, grande quantidade de resíduo sólido acaba sendo gerado na forma de refugos, peças semiacabadas, peças pouco beneficiadas, peças que contêm impurezas e defeitos de formação. Atualmente, esse resíduo vem sendo armazenado no pátio das empresas formando grandes pilhas de rejeitos de dezenas de toneladas (IPAR et al., 2012) que causam significativos impactos ambientais e econômicos. Estes impactos têm chamado a atenção de indústrias em relação à utilização deste material como matéria prima no desenvolvimento de novos materiais.

Por outro lado, com o crescimento da construção civil, a demanda por terrenos tem aumentado em grande escala, porém, na natureza é comum a existência de perfis de solos que possuam deficiências do ponto de vista de resistência e estabilidade volumétrica. Quando o engenheiro se depara com materiais de baixa qualidade uma das alternativas disponíveis é fazer uso de técnicas de estabilização de solos. Essas técnicas alteram as propriedades físicas e mecânicas dos solos, transformando-os em novos materiais geotécnicos.

Pensando em solucionar problemas futuros, as universidades e empresas estão investindo na utilização de materiais recicláveis na estabilização de solos. Devido a esse incentivo, o presente trabalho deseja utilizar o resíduo de beneficiamento de pedras preciosas da região de Soledade/RS como preenchimento de geocélula empregadas sobre um solo poroso, a fim de analisar o desempenho do conjunto.

1.2 Justificativa

Com o aumento do interesse na preservação do meio ambiente nos últimos anos, pesquisas vêm sendo realizadas para obter um melhor aproveitamento dos resíduos descartados (BETAT et al., 2009; IPAR, 2011; EDLER et al., 2012; IPAR et al., 2012; WILM et al., 2014; DALLA ROSA et al., 2014; VENQUIARUTO et al., 2014), contribuindo, assim, com a redução de resíduos gerados pelas empresas, mesmo que em longo prazo. A reutilização desses materiais proporciona benefícios, além de aumentar os espaços em aterros e diminuir a quantidade de recursos a serem utilizados, auxilia também na minimização de gastos que as indústrias possuem com o armazenamento e a responsabilidade por qualquer dano ambiental proveniente desse resíduo.

Uma alternativa provável para reduzir o impacto que o meio ambiente pode sofrer com a geração de resíduo de beneficiamento de pedras preciosas, é utilizando o mesmo no preenchimento de geocélulas. O emprego de geocélulas encontra-se em ascensão no Brasil, pois oferece agilidade e rapidez na sua construção; apresenta variedades de formas e composições, podendo ser utilizado em estruturas de contenção, estabilização de taludes, canais e obras hidráulicas, proteção contra erosão, proteção mecânica de geomembranas e também na estabilização de solos.

A análise do comportamento da geocélula preenchida com o resíduo de beneficiamento de pedras preciosas sobre o solo, pode ser verificada por meio da realização de ensaios de carga, ou seja, ensaios de placa, promovendo melhores condições ao profissional de Engenharia de verificar se o conjunto possui capacidade de melhorar o suporte de carga do solo.

Vários estudos avaliam o desempenho mecânico de geocélulas quando submetida a ensaios de placa em laboratório (MANDAL e GUPTA, 1994; MHAISKAR e MANDAL, 1996; DASH et al., 2001a; DASH et al., 2001b; DASH et al., 2003; MENESES, 2004; THALLAK et al., 2007; SIREESH et al., 2009; MIGUEL, 2016), porém, não há nenhum estudo que analise o comportamento de geocélulas preenchidas com resíduos quando ensaiadas em campo experimentais, sendo esse um diferencial do presente trabalho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar o comportamento mecânico da geocélula, com o preenchimento de resíduo do beneficiamento de pedras preciosas da cidade de Soledade-RS.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são definidos como:

- a) Caracterizar o resíduo do beneficiamento de pedras preciosas;
- b) Avaliar a capacidade de carga da composição geocélula, resíduo e solo;
- c) Comparar o resultado obtido com diversas metodologias de dimensionamentos existentes.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação está metodologicamente dividida em cinco partes, conforme a descrição apresentada nos parágrafos seguintes.

No capítulo 1, introdução, são apresentados o tema, a problemática e a justificativa da pesquisa. Neste mesmo item, são apresentados os objetivos geral e específicos do presente estudo.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre os pontos principais de interesse da pesquisa

No capítulo 3 são descritos, de forma clara, os procedimentos metodológicos utilizados na realização da pesquisa.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e as discussões obtidos na presente pesquisa.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, em resposta aos objetivos estabelecidos na Introdução.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição de geocélula

A geocélula (GL ou GCE) é definida, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR ISO 10318 (2013), como um produto que apresenta estrutura tridimensional aberta, constituída de células interligadas que confina mecanicamente os materiais nela inseridos, com função predominantemente de reforço e controle de erosão. Fernandes (2012) acrescenta que a geocélula possui um aspecto semelhante a uma colmeia.

O geossintético geocélula possui arranjos tridimensionais constituídos por tiras poliméricas, as quais são soldadas ou costuradas formando células interconectadas. Essas células, posteriormente são preenchidas com solo (Figura 1) e, às vezes, concreto (IGS BRASIL, 2014).

Figura 1 - Modelo de geocélula instalada.



Fonte: Acervo do autor (2016).

A geocélula foi arquitetada com o intuito de melhorar a capacidade de suporte de solos de baixa resistência (AVESANI NETO; BUENO, 2010). Para permitir a drenagem, as geocélulas, podem ser confeccionadas com tiras de polietileno perfuradas ou com espaços entre as ligações das células (FERNANDES, 2012).

O seu funcionamento baseia-se na resistência criada pelo confinamento lateral que um carregamento gera e pelo atrito das paredes das células com o material de enchimento, impedindo a ruptura por cisalhamento e o movimento lateral dos materiais (KOERNER, 1994).

Hoje em dia, no mercado, as geocélulas podem ser encontradas em diferentes configurações, variando de acordo com o fabricante ou com a finalidade a que se destina; elas

podem diferir quanto à composição do material, tipo da união das tiras, formato e dimensão das células.

As geocélulas são geralmente produzidas com os mesmos materiais de outros geossintéticos como o Polietileno (PE), Polietileno de Alta Densidade (PEAD) (Figura 2), Polipropileno (PP) e o Poliéster (PET). A união das tiras é realizada através de soldas ultrassônicas e termofusão em geocélulas constituídas de PE e PEAD; Para as tiras compostas de PP e PET, a união é realizada através de costuras (AVESANI NETO, 2013).

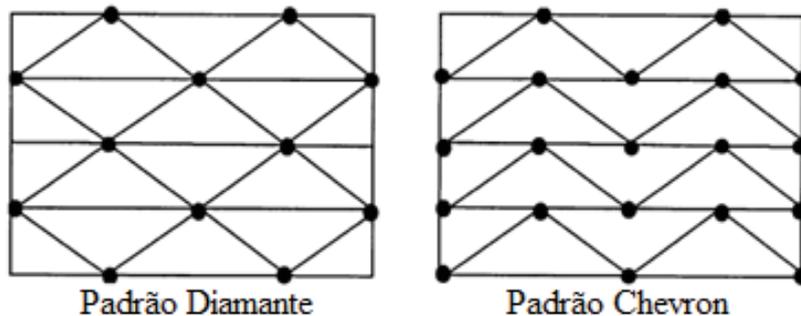
Figura 2 - Materiais de composição das geocélulas: (a) Polietileno de Alta Densidade; (b) Polipropileno.



Fonte: (a) Geosynthech (2008), (b) Kometa (2001).

Normalmente no mercado existem dois formatos de geocélulas (Figura 3): o Diamante e o Chevron; o primeiro é semelhante ao favo de mel e o segundo em forma ziguezague.

Figura 3 - Ilustração dos formatos das geocélulas.

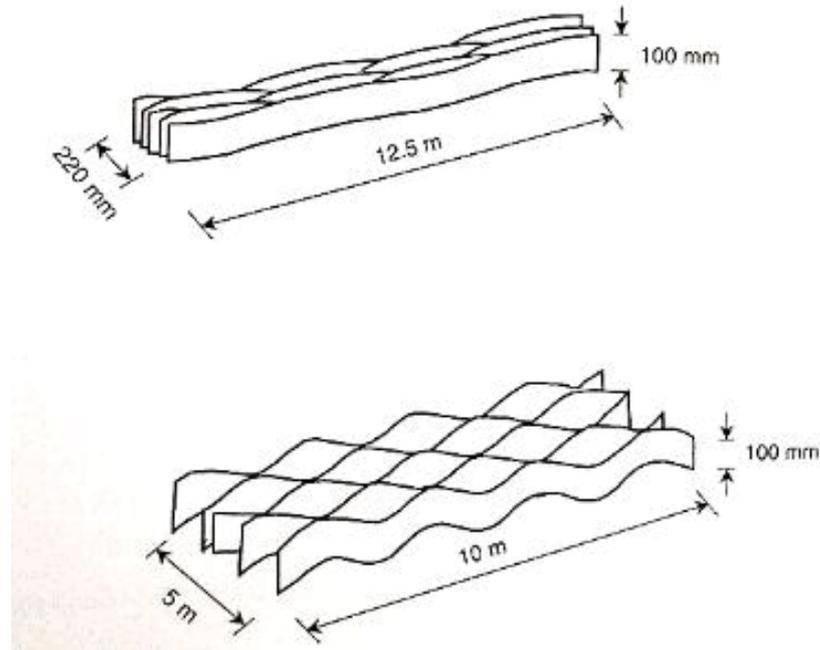


Fonte: Adaptado de Dash et al. (2001a).

Em geocélulas pré-fabricadas, há uma padronização entre a largura das células (l) e altura (h). As alturas comumente encontradas são de 50, 75, 100, 150 e 200 mm. Geralmente, quando expandidas, apresentam placas com área em torno de 2,60 x 3,00 m para tamanho mínimo e 2,60 x 6,00 m para as maiores (OBER, 2014); quando comprimidas a largura da

geocélula reduz (Figura 4), facilitando o transporte e armazenamento da mesma. A área das células é de aproximadamente 300 cm². (MENESES, 2004).

Figura 4 - Ilustração das dimensões da geocélula: (a) fechada; (b) aberta.



Fonte: Koerner (1994).

As geocélulas podem ser produzidas artesanalmente “in loco”, normalmente o material utilizado para sua montagem são geogrelhas, dispostas em seções transversais e diagonais. A vantagem da produção de geocélulas no canteiro de obra, é que permite dimensionar à altura e comprimento desejado.

2.1.1 Material de preenchimento da geocélula

Segundo a Engepol Geossintéticos Ltda (2012), existem três tipos de enchimento de geocélula: material granular, vegetação e concreto. A sua escolha dependerá das particularidades da obra.

- **Material granular:** através do confinamento granular nas células, há um aumento da resistência à erosão; isso se deve à redução da energia hidráulica que impede a migração das partículas do talude abaixo, pela ação da gravidade e do fluxo da água. Este sistema de proteção é flexível e durável (ENGEPOL, 2012). O preenchimento com agregados é aconselhável em canais que possuam de baixa a moderada vazão (MENESES, 2004). A areia é recomendada somente para taludes suaves (FERNANDES, 2012);

- Vegetação: é a medida mais simples e natural de proteção dos mesmos. As raízes da vegetação penetram o subsolo, formando um bloco compacto e reforçado de solo, onde os caules das plantas formam barreira física para o deslocamento das partículas de solo (MENESES, 2004). As células possuem função de confinar e reforçar o solo vegetal protegendo a zona de enraizamento, isso contribui para o aumento da resistência natural contra a erosão além de direcionar o fluxo de água sobre a vegetação e reduzir a perda de umidade. Recomenda-se o uso, desse tipo de enchimento, em taludes íngremes e áreas de fluxo concentrado (ENGEPOL, 2012);
- Concreto: por ser um revestimento flexível, a geocélula, proporciona trincamento controlado do concreto e controle de piping; uma vez que as células acompanham a movimentação do solo de apoio se conformando a ele. É recomendado enchimento de concreto para taludes íngremes e revestimento de canais (ENGEPOL, 2012).

A instalação das geocélulas, de acordo com a Engepol (2012), são realizadas de forma rápida e simples. Primeiramente realiza-se a terraplenagem da área, em seguida determina-se a localização da fixação do primeiro painel de geocélula e então colocam-se grampos nos quatro cantos dos painéis, para painéis próximos à crista do talude deve-se leva-los até a canaleta de ancoragem. Depois de fixado os grampos, o painel é aberto e encaixado aos mesmos, a fim de garantir que o painel fique totalmente aberto, coloca-se grampos adicionais.

Após a instalação da geocélula, inicia-se o enchimento das primeiras fileiras de células (Figura 5), utilizando uma caçamba basculante de caminhão ou de trator, para as demais fileiras pode-se espalhar o material com pás manuais ou carregadeiras. Nenhum tipo de equipamento deve andar sobre o painel de geocélula sem enchimento. A altura do lançamento do material de enchimento deve ser de, no máximo, um metro, evitando assim danos as células.

Em enchimentos com solo vegetal, areia ou brita deve-se colocar o material na célula a uma altura de 25 a 50 mm adicional a altura da célula, uma vez que o material recalca devido à compactação.

A compactação do enchimento é realizada com o mesmo equipamento usado para colocar o material sobre o painel, através consecutivas passadas. Para alcançar certos níveis de compactação especificados utiliza-se rolo e/ou placa vibratória.

Figura 5 - (a) preenchimento geocélula (b) compactação do material de preenchimento dentro das células (c) camada de reforço pronta (d) acréscimo de uma camada compactada de solo sobrejacente para proteção.



Fonte: Avesani Neto e Bueno (2010).

2.1.2 Aplicações da geocélula

As aplicações das geocélulas são diversas (Tabela 1), sendo estas utilizadas para a proteção de taludes contra a erosão, construção de muros de contenção, controle de erosão de canais e melhoria da capacidade de carga de solos.

Tabela 1 - Funções dos geossintéticos.

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

Fonte: Adaptado de Bueno e Vilar (2004).

Na aplicação como fundações, as geocélulas, devido ao efeito do confinamento, impedem a ruptura por cisalhamento e o movimento lateral dos materiais agregados. Este sistema além de estabilizar o material de preenchimento, produzindo um sistema de distribuição de carga de solos de baixa resistência, estabiliza também as bases de pavimento e produz estabilização superficial em vias não pavimentadas (ENGEPOL, 2006).

Em solos argilosos que apresentam vazios ou vácuos subterrâneos, o emprego de geocélulas faz com que aumente a capacidade de carga e reduza à liquidação do subleito, isso se deve ao fato da rigidez da geocélula que transfere a pressão da base para regiões adjacentes, reduzindo a influência da carga sobre o vácuo (SIREESH et al., 2009).

A geocélula, quando disposta em camadas, torna-se um sistema de contenção, esse sistema possui uma flexibilidade construtiva devido a sua superfície frontal ser totalmente revestida de vegetação (ENGEPOL, 2006).

Para reservatórios de resíduos ou líquidos construídos em geomembranas, as geocélulas proporcionam superfícies impermeáveis e protegidas. O preenchimento mais usual é o concreto, pois ele atende as funções de retenção e controle dos líquidos, as geocélulas preenchidas com solo e vegetação apresentam maior uso em reservatórios e reabilitações paisagísticas. Quando preenchidas com brita geram uma camada drenante, que permite coletar e conduzir percolados para tubulação de drenagem (ENGEPOL, 2006).

2.1.3 Interação solo/ geocélula

É extremamente importante o conhecimento da interação do geossintético com o solo, uma vez que as características mecânicas de um solo reforçado refletem a ação dos mecanismos de interação dos materiais constituintes, distribuindo as tensões no interior do conjunto (GOMES, 1993, apud FERNANDES, 2012).

Em solos reforçados com geocélula, a base para o desenvolvimento da resistência da camada de geocélula, é o princípio do confinamento celular, onde as camadas do reforço são dispostas sobre a fundação de solo com a finalidade de absorver os carregamentos provenientes da superfície e redistribuí-los às camadas subjacentes com menor intensidade. O desenvolvimento da resistência na geocélula é creditado a três diferentes mecanismos; o efeito laje, efeito confinamento e o efeito membrana. Eles são gerados pela mesma “fonte”, ou seja, pelo mesmo carregamento aplicado ao solo. Embora cada mecanismo possa ser analisado de forma específica, os mesmos são inter-relacionados e atuam de forma conjunta desenvolvendo melhoria na capacidade de suporte do solo (AVESANI NETO; BUENO, 2010).

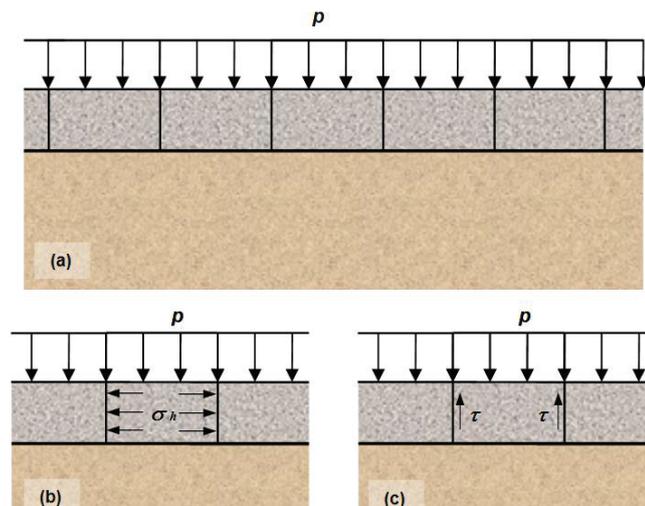
2.1.3.1 Efeito confinamento

O efeito de confinamento funciona de duas maneiras (Figura 6); a primeira, é aumentando a resistência e reduzindo a deformabilidade do material de preenchimento da

geocélula, isso se deve ao formato celular das geocélulas, onde as tensões confinantes em seu material de preenchimento aumentam, levando a uma compressão deste material nas células, compactando-os, resultando em melhores condições de resistência. A segunda, é através da dissipação dos carregamentos aplicados, onde a indução das tensões horizontais dentro das células são distribuídas e compartilhadas entre as células adjacentes mobilizando a resistência passiva do material confinado (MANDAL; GRUPTA, 1994).

A vantagem do efeito confinamento, é 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, como também da resistência e rigidez da geocélula e de suas costuras (CANCELLI; MONTANELLI, 1999, apud AVESANI NETO; BUENO, 2010).

Figura 6 - Esquema ilustrativo do efeito confinamento: (a) aplicação do carregamento, (b) indução de tensões horizontais dentro da célula; (c) mobilização de tensões cisalhantes na interface entre o material de preenchimento e a parede da célula.



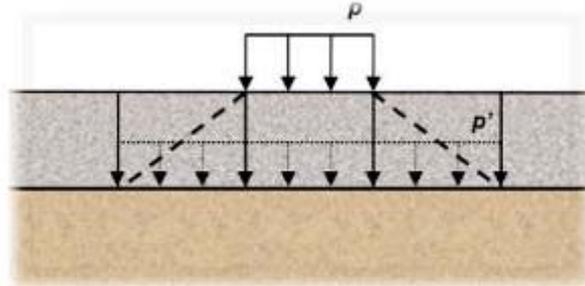
Fonte: Avesani Neto e Bueno (2010).

2.1.3.2 Efeito laje

O efeito laje, segundo Avesani Neto e Bueno (2010), também é conhecido por efeito radier ou espraiamento das tensões verticais; esse efeito não precisa de deslocamentos significativos para sua mobilização e atua de forma semelhante a uma laje de concreto fornecendo resistências à flexão, compressão, tração e cisalhamento. As tensões regadas através da carga aplicada, se dispersam para a camada subjacente do solo graças à estrutura tridimensional de células interconectadas e preenchidas, devido a esta dispersão ou

espraiamento, a carga que é transferida ao solo atua em uma superfície mais ampla, conduzindo menores valores de tensão a fundação. A Figura 7 ilustra de forma esquemática esse efeito.

Figura 7 - Esquema ilustrativo do efeito laje.



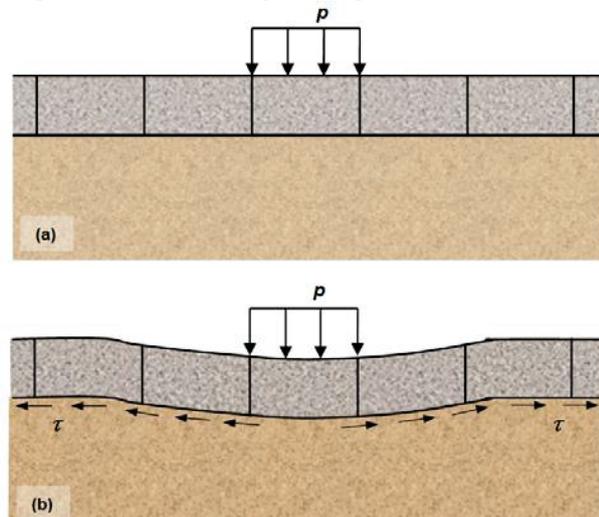
Fonte: Avesani Neto e Bueno (2010).

2.1.3.3 Efeito membrana

De acordo com Avesani Neto (2013), um geossintético quando disposto sobre um material compressível e submetido a um carregamento normal, atua como uma membrana tensionada exercendo 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 (Figura 8). Esse efeito atua, melhorando a capacidade de suporte do solo e reduzindo os deslocamentos.

A geocélula depois de uma relação de assentamento de 20% exibe uma ação de membrana (AVESANI NETO, 2013).

Figura 8 - 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 e Bueno (2010).

2.1.3.4 Fatores que afetam a resistência da geocélula

Avesani Neto (2013), enumera cinco características que alteram a resistência do sistema: o formato, as dimensões e a quantidade de células, a geometria do reforço e o material de composição da célula. Para Meneses (2004), além da geometria da geocélula e da resistência das paredes da célula, a densidade relativa do material de preenchimento também modifica a eficiência da geocélula. Dash et al (2001a), acrescenta que o tamanho e a orientação das nervuras da abertura da grelha utilizadas na geocélula apresentam elevada influencia no mecanismo de transporte de carga para a fundação.

Dash et al. (2001a), estudou detalhadamente alguns fatores que influenciam na geocélula, dentre esses fatores estava o formato da geocélula, onde a forma Chevron obteve melhores resultados que o formato Diamante; isso se deve ao fato da Chevron apresentar maior número de articulação, mas esse resultado é apenas marginal pois ambas as geocélulas possuem o mesmo tamanho efetivo das células e mesma área de plano.

A largura e a altura da geocélula interferem no aumento da capacidade de carga da obra (AVESANI NETO; BUENO, 2010). Camadas reforçadas com geocélula de maior altura suportam um carregamento mais elevado (MENESES, 2004), uma vez que a absorção dos esforços e o espraiamento das tensões até a camada subsequente serão maiores e os recalques menores. O aumento do desempenho é significativo até uma altura da geocélula igual ao dobro da largura da base, em alturas maiores que essa a melhoria é apenas marginal, e a largura ideal é em torno do quádruplo da largura da base (DASH et al., 2001a). A proporção ideal entre a altura e o diâmetro da célula foi encontrada segundo Dash et al. (2001a) como sendo aproximadamente 1,67.

O solo, tanto na sub-base como no preenchimento das células, influencia diretamente a capacidade do sistema (AVESANI NETO; BUENO, 2010). A compactação do material de preenchimento também interfere no desempenho do reforço, devido ao fato de materiais mais compactados fornecem melhores condições de capacidade de carga. (AVESANI NETO, 2013). Solos que apresentam maior densidade relativa, tendem a dilatar mais, mobilizando assim tensões mais elevadas na camada da geocélula (DASH et al., 2001a).

A geocélula quando associada a outros materiais geossintéticos, como geotêxtil ou geogrelhas, apresentam mudança em seu comportamento e resposta frente às solicitações (AVESANI NETO; BUENO, 2010), esta associação aumenta ainda mais a melhora do reforço em geocélulas de reduzida razão de forma (AVESANI NETO, 2013). A camada de geotêxtil colocada abaixo da geocélula, devido à resistência de flexão do geotêxtil, aumenta a rigidez

global do sistema distribuindo as tensões mais uniformemente, porém esse efeito torna-se insignificante quando a geocélula apresentar grandes alturas (Dash et al., 2001b).

2.1.4 Estudos de casos

Existem vários estudos que analisam o comportamento de geocélulas, dentre esses, os mais citados estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1 - Estudos empregando ensaio de placa em geocélula.

AUTOR	ENSAIO	SOLO	GEOCÉLULA	VARIAÇÃO
Mandal; Gupta (1994)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque (61x32cm h=40cm); Placa corrida (B=7,3cm); 3 ensaios.	Fundação: argila marinha; Preenchimento: Areia	Polipropileno (formada por tiras de geotêxtil)	Variação da razão de forma da geocélula.
Mhaiskar; 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); 8 ensaios; Computacional;	Fundação: argila marinha; Preenchimento: Areia	Polipropileno (formada por tiras de geotêxtil)	Material da geocélula; 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); 30 ensaios.	Fundação e preenchimento com Areia de rio	Geogrelha biaxial (35x35mm abertura malha)	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); 9 ensaios.	Fundação e preenchimento com Areia de rio (ID=70%).	Geogrelha biaxial (35x35mm abertura malha)	Altura da geocélula (h); Posição reforço planar.
Dash et al (2003)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque (90x90cm h=60cm); Placa circular (B=15cm); 24 ensaios.	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); 13 ensaios.	Fundação: Argila Siltosa; Preenchimento: Areia.	Geocélula de polietileno e geotêxtil (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 e preenchimento: Argila siltosa.	Geogrelha biaxial de poliéster	Altura (h) largura (b) e profundidade (u) da geocélula; Adição reforço planar.
Zhou e Wen (2007)	Ensaio de carga; laboratorial, tanque (306x118cm h=200cm); air bags na superfície e water bags nas laterais; 4 grupos de testes.	Fundação: solo mole coesivo da Qinshen Railway.	Geossintético; geocélula e geogrelha;	Influência da geocélula.
Sireesh et al. (2009)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque (90x90cm h=90cm); Placa circular (B=15cm); 24 ensaios.	Fundação: Argila siltosa apresentava um vazio (vácuo) no solo; Preenchimento: Areia.	Geogrelha biaxial; formato Chevron	Altura (h) e largura (b) da geocélula; Densidade areia (ID); Adição reforço planar.
Yang et al. (2011)	Testes de Pavimentos Acelerados; seções de estradas não pavimentadas; 4 seções experimentais.	Estradas não pavimentadas	Geocélulas do tipo NPA (<i>Novel Polymeric Alloy</i>)	Variação de altura (h)
Asha e Latha (2014)	Ensaio de cargas cíclicas; laboratorial, CBR, tanque (75x75cm h=62cm), campo experimental (2x1m).	Fundação ensaio laboratorial: Argila de baixa plasticidade; Fundação campo: argila vermelha e areia; Preenchimento: CBR grãos de 5,5mm, tanque grãos de 1 até 26,5mm, campo agregado passante na peneira 12,5mm e retido na peneira 10mm	Geogrelha biaxial; formato Diamante	Comparação reforço planar e geocélula; Razão geocélula; União das células.
Miguel (2016)	Ensaio de placa; laboratorial, tanque (90x90cm h=70cm); Placa circular (B=15cm); 8 ensaios.	Fundação e preenchimento: areia.	Geocélula malha); formato Diamante	Localização da placa; níveis de tensão no interior do solo; deformação no entorno da placa; interação geocélula/solo.

Mandal e Gupta (1994), realizaram 9 ensaios de placa, dentre esses, apenas 3 continham resultados no artigo. Os ensaios foram realizados em laboratório utilizando tanque com dimensões igual 61x 32cm e altura de 40cm, solo de fundação composto por argila marinha, geocélula de polipropileno produzida por tiras de geotêxtil, material de preenchimento empregado era areia, onde estudou-se a variação da razão de forma da geocélula. A placa utilizada no ensaio era corrida e possuía uma largura de 7,3cm.

Obtiveram como resposta que: a rigidez do solo aumenta com o aumento da espessura da camada; a geocélula depois de uma relação de assentamento de 20% exibe uma ação de membrana; a capacidade de carga aumenta com o aumento do tamanho da abertura e a espessura da geocélula, porém menores aberturas devem ser usadas em estrutura de baixa assentamento (ex: estrada pavimentada) e maiores aberturas em estrada de terra.

Mhaskar e Mandal (1996), estudaram o comportamento de um solo composto por argila marinha com e sem reforço de geocélula. Os ensaios foram produzidos em laboratório em dois tanques de aço com dimensões 85 x 75cm, altura de 60cm e 1,15 x 1,05m altura de 0,75cm. O solo era colocado nos tanques em 8 camadas de 0,06m cada, onde eram compactadas com 3 golpes do martelo de Proctor Modificado. Dois tipos de geocélula foram empregados no ensaio, uma composta de geotêxtil não tecido soldadas e a outro geotêxtil tecido costurado por fio de nylon; as alturas das células adotadas foram 10, 15, 20 e 25cm. O material de preenchimento utilizado era areia e apresentavam densidades relativas iguais a 15 e 80%.

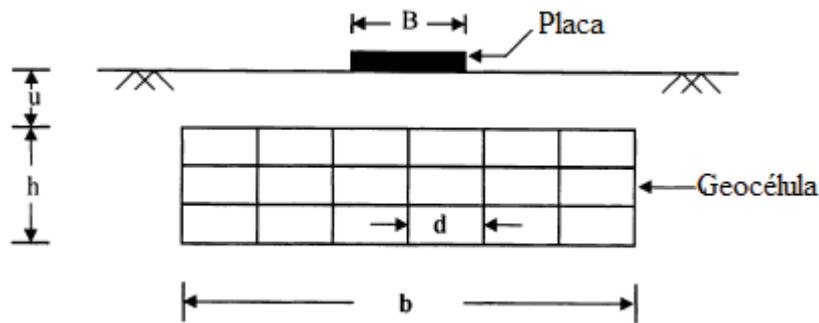
O ensaio de placa, foi realizado com placa retangular de dimensões iguais a 0,25 e 0,35m, a carga era aplicada por meio de um macaco hidráulico. Os resultados encontrados foram comparados com resultados de simulações numéricas computacionais tridimensionais obtidos por meio do software ANSYS.

Os autores concluíram que, a geocélula produzida com geotêxtil de tecido apresentava valores de capacidade de carga superiores a geocélula produzida com geotêxtil não tecido. Por meio da análise de elementos finitos, mostrou-se que, a fundação com camada de reforço de geocélula apresenta uma capacidade de carga 3 vezes superior do que a fundação sem reforço e para altura crítica da geocélula o bulbo de pressão encontra-se dentro da mesma, transferindo tensões mais baixas à camada de fundação.

Dash et al. (2001a), realizaram um dos estudos mais completos sobre o comportamento dos solos quando reforçados com geocélulas e sujeitos a cargas através de ensaios de placas. Os ensaios foram conduzidos em um tanque com dimensões 120cm x 32,2cm e altura de 70cm, o solo tanto de fundação como de preenchimento da geocélula era composto por areia de rio.

A geometria do ensaio abordado nesse estudo é apresentada na Figura 9, onde: (B) é a largura da placa; (d) tamanho da célula; (h) altura da geocélula; (b) largura da geocélula; e (u) é a profundidade em que a geocélula foi instalada. A Tabela 2 exhibe as variáveis adotada pelos autores.

Figura 9 - Esquema ilustrativo da geometria do ensaio estudado.



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

Tabela 2 - Variáveis abordadas no ensaio - Dash et al. (2001).

TESTE SÉRIE	VARIÁVEL
A	Densidade areia (ID): 30, 40, 50, 60 e 70% (sem reforço)
B	Formato geocélula: Chevron, Diamante.
C	Tamanho célula (d/B): 1.2, 1.5 e 2.7
D	Altura geocélula (h/B): 0.8, 1.6, 2, 2.75, 3.14
E	Largura geocélula (b/B): 1, 2, 4, 6, 8, 10 e 12
F	Profundida geocélula (u/B): 0, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1 e 1.5
G	Composição geocélula: geogrelha BX, NP-1 e NP-2
H	Densidade areia (ID): 30, 40, 50, 60 e 70% (com reforço)

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

Para o ensaio de placa, utilizou-se placa corrida que apresentava espessura de 2,5cm, comprimento 33cm e largura igual a 10cm. As cargas foram aplicadas em pequenos incrementos por meio de um macaco hidráulico, cada incremento era mantido constante até que o recalque se estabilizasse. Mais de 60 testes foram realizados, porem foram analisados 30 ensaios.

Dash et al. (2001a) concluíram que:

- Série A: com o aumento da densidade aumenta a capacidade de suporte do solo;
- Série B: as geocélula que apresentavam formato Chevron possuíam fatores de melhora um pouco mais elevados que as geocélula Diamante, segundo os autores, isso se deve a maior rigidez da geocélula Chevron resultante de um maior número de articulações;

- Série C: as geocélulas que possuem tamanhos de células menores oferecem melhores desempenhos de capacidade de suporte;
- Série D: as alturas das geocélulas iguais a 2 vezes a largura das células proporcionam melhoria no desempenho, a partir dessa proporção a melhoria é somente marginal;
- Série E: mesmos com geocélula com tamanho igual a largura da base já há melhoria na capacidade de suporte, a largura ideal é 4B, além disso a melhoria do desempenho é insignificante;
- Série F: os resultados sugerem que, para se obter resultados mais benéficos, a geocélula deve ser colocada no solo a uma profundidade 0,1B;
- Série G: as geocélulas feitas de geogrelha biaxiais com polímeros ordenados (BX), apresentaram melhores desempenhos para assentamentos maiores;
- Série H: a resistência de atrito entre a geocélula e o material de preenchimento aumenta com o aumento da densidade do solo de preenchimento, além do que, esse solo tende a dilatar mais, mobilizando tensões mais elevadas da camada da geocélula, melhorando assim a capacidade de carga.

Esta pesquisa é um complemento do estudo Dash et al (2001a), onde os ensaios foram realizados no mesmo tanque, com o mesmo solo tanto de fundação como de preenchimento e a mesma placa.

Dash et al. (2001b), realizaram 9 ensaios de placa, sendo que um ensaio era de referência, ou seja, situação não reforçada, 3 ensaios apresentavam variação das alturas (h) das geocélulas e 5 ensaios utilizavam geogrelhas como reforço planar. Desses 5 ensaios, 3 apresentavam geogrelha instalada abaixo das geocélulas de diferentes alturas; um a geogrelha era empregada acima da geocélula ($h/B = 2,75$); e num adicionou-se uma camada de geotêxtil entre a geocélula ($h/B = 1,2$) e a geogrelha.

Os autores chegaram à conclusão que, a adição do reforço planar de geotêxtil melhora a capacidade de carga da fundação quando empregado abaixo da geocélula, quando aplicado acima não apresenta um efeito muito benéfico. Porém, o efeito somente é favorável para geocélulas que apresentem h/B no máximo igual a dois, valores acima dessa relação o uso de geogrelha torna-se insignificante. A camada de geotêxtil aplicada entre a geocélula e a geogrelha não apresentou bons resultados, reduzindo a melhoria do desempenho.

Dash et al. (2003), desenvolveram ensaios de placa para analisar a melhoria de reforços planares e celulares, utilizando um tanque de dimensões iguais a 90x90m e altura de 60cm;

fundação de solo composta por argila siltosa, geocélula produzidas com geogrelha de poliéster preenchidas com areia e reforço planar de geogrelha (sozinho ou na base das geocélula).

Nos ensaios, a placa utilizada era circular, com diâmetro de 15cm. As variáveis estudadas eram: espessura camada subjacente de areia (H); largura (b) e altura (h) da geocélula; reforço planar com geogrelha; e camada de reforço planar.

Através dos resultados gerados a partir dos ensaios de placa, os autores concluíram que, o reforço com geocélula melhora a capacidade de carga e reduz o esforço da superfície da fundação substancialmente; há uma melhora do desempenho global a uma altura da geocélula cerca de duas vezes o diâmetro da placa e uma largura até $b = B$ de 5, valores acima desses, a melhoria é apenas marginal; e a camada adicional de geogrelha na base da geocélula aumenta a melhoria de capacidade de carga e rigidez do leito de fundação.

Meneses (2004), em sua dissertação executou 13 ensaios de placa em fundações de solo mole, sendo 3 ensaios sem reforço, 3 reforçados com geocélulas de geotêxtil, 3 com geocélulas de polipropileno e 4 ensaios reforçados com associação de geocélulas com geogrelhas. A Tabela 3 apresenta as variáveis adotadas pelo autor.

Tabela 3 - Variáveis de teste - Meneses (2004).

VARIÁVEL
Composição da geocélula: polietileno e geotêxtil (polipropileno)
Altura da geocélula: 5cm, 10cm e 15cm
Associação geocélula com geogrelha

Os ensaios foram desenvolvidos em um tanque com dimensões de 1,42x1,82cm e 1,80m de altura, o mesmo continha na parte interna revestimento em membrana de PVC pintado com graxa, garantindo assim sua estanqueidade. O solo mole das fundações era composto por argila siltosa e o preenchimento das geocélulas era areia mal graduada. A placa para aplicação da carga tinha formato circular com 35cm de diâmetro e 30cm de espessura.

Através dos ensaios o autor pode concluir:

- Houve uma melhoria com o emprego de geocélulas tanto em termos de recalque quanto de capacidade de carga, onde, para recalques de até 10mm obteve-se cargas superiores a 3,5 vezes com emprego de geocélulas;
- Não existiu diferença de comportamento significativa com relação ao material de composição da geocélula;
- O aumento da altura da geocélula resultou em ganho de capacidade de carga, sendo esse maior quando a geocélula passa de 5cm para 10cm;

- O emprego de geocélulas associadas a geogrelhas apresentou um fator de desempenho de até 40%.

Thallak et al. (2007), realizaram ensaios de placa em uma fundação de solo mole argiloso reforçada com geocélula, produzida por geogrelha biaxial de poliéster, e preenchida com o solo da fundação, também utilizou-se a adição de uma camada de geogrelha na base da geocélula.

O ensaio foi executado em um tanque com dimensões 90x90cm e altura 60cm, onde primeiramente, colocava-se a camada de fundação, em seguida, era montado a estrutura da geocélula e estas eram preenchidas por meio da técnica de “chuva de areia” a fim de se obter a densidade do material desejada pelos autores. A placa utilizada, nos 22 ensaios de geocélula, era circular com diâmetro de 15cm. Desses ensaios, um estudava o solo sem reforço, 7 estudavam a profundidade, 7 a largura, 4 a altura, e 3 analisavam o comportamento de diferentes alturas com a adição de um reforço planar.

Os resultados dos ensaios indicam que o reforço de geocélula aumenta a capacidade de carga do solo e reduz o assentamento da fundação de argila mole substancialmente. A melhoria acentuada no desempenho, é obtida mesmo com uma largura de geocélula quase igual ao diâmetro da placa, e a melhoria também é obtida com a disposição de uma camada adicional de geogrelha na base.

Zhou e Wen (2007), aplicaram geossintéticos, geocélulas e geogrelhas em locais desfavoráveis geotecnicamente, visando aumentar a capacidade de carga desses solos. Em sua pesquisa, utilizaram um tanque, com dimensões iguais a 306cm x 118cm e 200cm de profundidade, sendo este preenchido com 6 camadas de solo mole, coesivo, obtidos da Qin-shen Railway, igualmente espaçados e de mesmas características.

Afim de examinar a influência dos geossintéticos sobre o solo mole, dividiram o ensaio em 04 grupos de testes, onde aplicaram cargas por meio de macaco hidráulico sobre os modelos. Na transferência da carga para o colchão utilizaram air bags e nas laterais da caixa foram usados water bags, sacos em formato de bolhas preenchidos com água, produzindo assim, maior deformabilidade ao conjunto. Os resultados encontrados, demonstraram que a geocélula é capaz de minimizar a fluência do solo mole, gerando a este, maior capacidade de carga, e reduz em 44% a deformação, quando comparada ao subleito não reforçado.

Sireesh et al. (2009), estudaram o comportamento de um solo argiloso que apresentava um vazio (vácuo) em seu interior, através de ensaios de placas realizadas em laboratório. As camadas da fundação, foram preparadas, em uma caixa com dimensões de 90x90cm e altura

igual a 90cm, nessa caixa deixou-se na parede lateral, a uma altura de 11cm, uma janela com diâmetro de 9,5cm que possui a finalidade de criar o vácuo na fundação.

Durante a pesquisa foram realizados 24 ensaios de placas, no qual a placa era de 15cm de diâmetro, onde: 4 eram ensaios de referência, sem reforço; 14 apresentavam somente reforço com geocélula; e 6 ensaios possuíam reforço planar na base da geocélulas. As variáveis do estudo são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Variáveis de teste - Sireesh et al. (2009).

TESTE SÉRIE	TIPO DE REFORÇO	VARIÁVEL
A	Sem reforço (camada de areia)	Espessura areia (H)
B	Sem reforço (camada de areia)	Densidade areia (ID)
C	Geocélula	Largura geocélula (b)
D	Geocélula	Altura geocélula (h)
E	Geocélula	Densidade areia (ID)
F	Geocélula + reforço planar	Altura geocélula (h)

Fonte: Adaptado de Sireesh et al. (2009)

As geocélulas utilizadas eram construídas com geogrelhas biaxiais, com abertura de malha 35mmx35mm, no formato Chevron. As mesmas foram colocadas a uma profundidade (u) de 0,05 preenchidas com areia pela técnica de “chuva de areia”, onde alcançavam as compacidade desejadas pelos autores.

Através do ensaio de placa, os autores encontraram os seguintes resultados:

- Série A: com o aumento da espessura da camada de areia, houve também, um aumento na capacidade de carga da fundação;
- Série B e E: capacidade de carga aumenta com o aumento da densidade do solo de preenchimento;
- Série C: a largura da geocélula próxima ao dobro do diâmetro da placa aumenta mais de 60% a capacidade de carga do solo;
- Série D: a capacidade de carga da fundação aumenta com o aumento da altura da camada da geocélula;
- Série F: o reforço planar de geotêxtil na base da geocélula melhora o desempenho da capacidade de suporte da fundação, porém, a influência da camada de geotêxtil reduz com o aumento da altura da geocélula.

Yang et al. (2011) por meio de Testes de Pavimentos Acelerados (Accelerated Pavement Testing - APT) testaram seções de estradas não pavimentadas reforçadas com geocélulas.

Construíram quatro seções experimentais, sendo que, em duas não utilizaram reforços e nas outras duas aplicaram geocélulas do tipo NPA (Novel Polymeric Alloy) com variadas alturas.

Construíram um eixo contendo quatro rodas, duas em cada lado, similares as de um veículo que transmite 80 KN ao substrato, para a aplicação da carga. Com este, passaram cerca de 5.000 vezes sobre as seções montadas, 10passagens/min. a uma velocidade de 11,3Km/h. Por onde o eixo passava, surgiram deformações em forma de sulcos, sendo estes, mensurados conforme a passagem do eixo. Utilizaram Strain Gages a fim de monitorar a tensão transmitida a geocélula.

Os testes indicaram que o emprego da geocélula aumentou significativamente a estabilidade das seções não pavimentadas, contendo grande parte das deformações sujeitas, tração no solo abaixo das rodas e compressão no solo fora das rodas. O estudo salientou a importância de se manter intactas as estruturas da geocélula para o seu devido funcionamento.

Asha e Latha (2014) realizaram experimentos laboratoriais e em campo. Dividiram a pesquisa em três formas de avaliação: aplicabilidade em conjunto com o ensaio California Bearing Ratio (CBR); construção de um tanque nas dimensões 750mm x 750mm e altura de 620mm; e a construção de um campo experimental de 2m x 1m. Como base para os ensaios laboratoriais, empregaram o solo encontrado nas localidades do Instituto Indiano de Ciência, sendo este, classificado como uma argila de baixa plasticidade. Para o ensaio de campo, empregaram como solo de fundação uma mistura argila vermelha e areia.

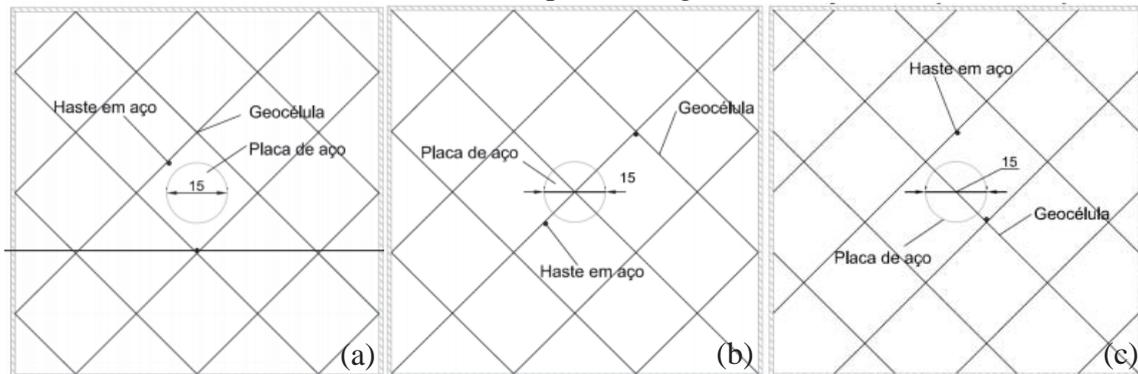
Utilizaram geocélulas montadas a partir geogrelhas biaxiais, em formato diamante, para camada de reforço. O material de preenchimento para o ensaio do CBR possuía uma faixa granulométrica de 5,5mm, para o ensaio do tanque realizaram misturas entre agregados, variando a granulometria de 1mm até 26,5mm, e no campo utilizaram agregado passante na peneira 12,5mm e retido na peneira 10mm. Após compactação do material utilizado como subleito e colocação do reforço com os respectivos preenchimentos, aplicaram uma carga cíclica sobre estes, com a utilização de um pistão no caso do CBR, um macaco hidráulico para o tanque e uma motocicleta Scooter para o campo experimental.

Através dos ensaios, observaram que solos reforçados com geocélulas apresentam maior eficácia do que reforços planares. Também observaram que a razão em que é montada a geocélula tende a influenciar sua capacidade de resposta à aplicação da carga, além disto, a articulação ou método como é ligada uma célula a outra decide o quão eficaz será esta.

Miguel (2016) avaliou o comportamento do solo sem reforço e do solo reforçado com geocélula de prolipropileno de 5cm de altura quando sujeita a cargas pontuais em três pontos

distintos (Figura 10): no centro da célula, no nó de ligação das células que compõem a geocélula e na parede da célula.

Figura 10 - Pontos de aplicação de carga na geocélula: (a) centro da célula; (b) nó de ligação das células; (c) parede da geocélula.



Fonte: Adaptado de Miguel (2016).

Seus ensaios foram conduzidos em um tanque com dimensões de 90x90cm e altura de 70cm, a transmissão de carga era feita através de um macaco hidráulico para uma placa circular com diâmetro de 15cm. A fundação e o preenchimento eram compostos por areia do município de Osório.

Ao todo foram realizados 08 ensaios, onde Miguel (2016) concluiu que o emprego da geocélula resulta em um aumento da rigidez do solo, diminuição das trincas na superfície, aumentando a capacidade de carga em até 43% a mais quando comparado ao solo sem reforço e redução de cerca de 42,5% dos recalques ocorridos.

Com relação a localização da placa na geocélula, quando a carga era aplicada no centro da célula obteve-se um comportamento semelhante ao do solo sem reforço, já os ensaios realizados no nó de ligação das células e na parede da célula exibiram respostas parecidas onde aumento apresentaram ganho de rigidez e de capacidade de carga.

2.2 Resíduos de beneficiamento de pedras preciosas

O Brasil, no período de 1725 até 1866, foi o principal produtor de diamantes do mundo. Devido ao crescimento na indústria eletrônica outros minerais começaram a ser valorizados na década de 1940. As pedras brasileiras foram ganhando mercado nacional e internacional fazendo com que imigrassem para o norte do estado de Minas Gerais alemães e libaneses, esses por sua vez, iniciaram a exportação de pedras chamadas coradas, onde praticamente 100%

destas eram exportadas em sua forma bruta, resultando na perda de mão de obra especializada nesse ramo (PICOLOTTO, 2013).

A extração de pedras preciosas no país, é realizada na sua maioria por garimpeiros e em pequeno número por empresas de mineração. Estão localizadas nos estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Bahia, Goiás, Pará, Tocantins, Paraíba e Piauí (ZANATTA, 2014).

A lapidação e a fabricação de obras e artefatos de pedras são praticadas, geralmente, por pequenas indústrias, onde muitas são consideradas de “fundo de quintal”. Os seus polos estão concentrados nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Rio Grande do Sul, Bahia e Goiás (ZANATTA, 2014).

Segundo Picolotto (2013), presume-se que existam no Brasil aproximadamente 3.500 empresas de beneficiamento de pedras preciosas, estas estando localizadas no São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e Bahia. Novos polos industriais estão desapontando no mercado, como Paraná, Pará, Amazonas, Ceará e Goiás.

“Atualmente, estima-se que o país seja responsável pela produção de cerca de 1/3 do volume das gemas do mundo” (IBGM, 2012). No Rio Grande do Sul destacam-se três polos gemológicos em maior quantidade e qualidade de material. O primeiro, está situado na fronteira do estado do Rio Grande do Sul com Santa Catarina, localizadas na região do Alto Uruguai, compreendendo os municípios de Ametista do Sul, Planalto, Iraí e Frederico Westphalen. O segundo, no centro do estado, engloba os municípios de Salto do Jacuí, Arroio do Tigre, Espumoso, Sobradinho, Soledade e Barros Cassal. O terceiro, na divisa do estado do Rio Grande do Sul com o Uruguai, em torno do município de Quaraí, apresenta uma produção relativamente pequena quando comparado aos demais polos (ZANATTA, 2014). Os principais garimpos no Rio Grande do Sul, localizam-se em áreas bem distintas, a ametista é encontrada, em maior abundância, no primeiro polo, a ágata por sua vez predomina no segundo polo. Também há ametista e ágata na região da Fronteira Sudoeste como mostra a Figura 11 (PICOLOTTO, 2013).

O Estado do Rio Grande do Sul é um grande produtor de pedras preciosas, especialmente ágata e ametista, a produção destina-se basicamente ao exterior, de acordo com Zanatta (2014), o município de Ametista do Sul destina seus produtos para países da Ásia, como Taiwan e Hong Kong, para a Índia, China, Estados Unidos, Alemanha e para outros países da Europa e América Latina em menor escala; e o município de Soledade tem como principal destino a China, seguido pelos Estados Unidos, Espanha, Alemanha, Taiwan, Itália, entre outros países.

Figura 11 - Mapa gemológico da região sul do Brasil.



Fonte: Modificado de Junchem et al. (2007, apud PICOLOTTO, 2013).

O município de Soledade, localizado na região norte do estado do Rio Grande do Sul, no Planalto Riograndense, no alto da serra do Botucaraí, segundo a Lei Estadual nº 12.874 de 2007, é a Capital das Pedras Preciosas. O município é polo da APL do Conselho regional de Desenvolvimento Alto da Serra do Botucaraí, onde, segundo Zanatta (2014), estão localizadas 180 empresas que desenvolvem atividades de extração mineral, produção e comercialização. Muitas dessas empresas, de acordo com Picolotto (2013), atuam em ramos diversificados, sendo que a maioria são empresas beneficiadoras de ágatas. Das 180 empresas, 63 são associadas ao Sindicato das Indústrias de Joalheria, Mineração, Lapidação, Beneficiamento e Transformação de Pedras Preciosas do Rio Grande do Sul (Sindipedras) e 150 são associadas à Associação dos Pequenos Pedristas de Soledade (Appesol), as empresas podem ser filiadas em ambos.

“O município de Soledade destaca-se pela comercialização e pelo beneficiamento das pedras preciosas, embora numa escala menor” (ZANATTA, 2014). O SINDIPEDRAS e a APPESOL buscam produzir grande parte dos produtos que são exportados pelo município (PICOLOTTO, 2013).

As indústrias de pedras preciosas representam 30% da economia do município de Soledade, as principais pedras são ametistas, ágatas, citrinos e calcitas (EDLER, 2011).

2.2.1 Geração de resíduos

Nos processos de extração e beneficiamento de pedras preciosas há uma significativa geração de resíduos sólidos, segundo Hartmann et al. (2010) de 30 a 40% da pedra beneficiada tornam-se resíduo. De acordo com o APL (2013), a cada 30 quilos de capelas de ametista 02 toneladas de rejeitos são extraídas, se mensalmente são produzidos aproximadamente 500 toneladas de capelas e drusas, estima-se que a produção de rejeito seja maior 300 mil toneladas/mês. Estes resíduos são originários de refugos, peças semiacabadas e peças que apresentam impurezas ou defeitos de formação natural e de fabricação.

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

Os restos de pedras são geralmente estocados e retornam para a logística reversa a serem utilizados no processamento de outros materiais. O resíduo de pó de pedra é reutilizado no polimento de futuras peças (PICOLOTTO, 2013).

Segundo Picolotto (2013), os resíduos são armazenados no pátio das empresas (Figura 12) em grandes pilhas de rejeitos de dezenas de toneladas.

Figura 12 - Pilha de rejeito de pedras preciosas.



Fonte: IPAR et al. (2012).

O Brasil possui uma vasta legislação relacionada à preservação ambiental, a principal legislação brasileira é a Constituição Federal, promulgada em 1988, onde apresenta no artigo 225 que todos os brasileiros têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, sendo dever do Poder Público assegurar este direito (MEDAUAR, 2009). A lei N° 12.305, trata da política nacional de resíduos sólidos, em seu artigo 9 aponta que: “Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010).

Em esfera estadual, o decreto estadual N° 38.356/98, prevê em seu Art. 1° que: “A gestão dos resíduos sólidos é de responsabilidade de toda a sociedade e deverá ter como meta prioritária a sua não geração, devendo o sistema de gerenciamento destes resíduos buscar sua minimização, reutilização, reciclagem, tratamento ou destinação adequada”. O decreto também dispõe que: “o transporte, o tratamento, o processamento e a destinação final dos resíduos sólidos de estabelecimentos industriais, comerciais e de prestação de serviços, inclusive de saúde, são de responsabilidade da fonte geradora”. A Resolução CONSEMA N° 073 (2004), proíbe a disposição de resíduos sólidos industriais em aterros de resíduos sólidos urbanos no estado do Rio Grande do Sul.

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

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

Betat et al. (2009), também utilizaram o resíduo em concreto, mas em substituição do agregado graúdo nas proporções de 25%, 50% e 75%, através de ensaios de compressão encontraram resistências mais elevadas para o traço em que o agregado graúdo era substituído 50% pelo resíduo; esses valores foram superiores ao traço de referência que não utilizava o resíduo. O mesmo traço também obteve uma redução de consumo de cimento de 10%.

Edler et al. (2012), realizaram estacas escavadas compostas por solo cimento e resíduo, submetem essas estacas a ensaios de cargas e realizaram a análise de custo, onde concluíram que as estacas produzidas com solo cimento e resíduo possuem resistência semelhante as estacas de concreto convencional e um custo 38% inferior.

Pivotto (2013), empregou a areia de rejeito em argamassa substituindo o agregado miúdo em 25% e 50%, através de ensaios a tração em flexão e de compressão encontrou resultados maiores para argamassas com teor de 50% do resíduo, concluindo que há possibilidade de substituir a areia natural pelo resíduo.

Baruffi et al. (2016), utilizaram resíduo proveniente do beneficiamento de ágatas na verificação da camada de proteção do Geosynthetic clay liners (GCL) a fim de determinar qual a melhor razão de cobertura (altura/diâmetro do pistão), através de uma versão modificada do ensaio de penetração California Bearing Ratio (CBR) avaliando a deformação ocorrida no GCL. Concluíram que a deformação no GCL reduz conforme aumenta-se a razão de cobertura, para os ensaios realizados com pistão de 50 mm a razão igual ou superior a 1.5 resultaram pequenas deformações ao GCL, já para os ensaios com pistão de 25mm a razão de cobertura deve ser igual ou superior a 2.0.

2.3 Provas de carga em placas

Provas de carga em placa, foram uma das primeiras aplicações dos ensaios "in situ" para a obtenção de informações sobre a determinação das propriedades de deformação e de ruptura do solo (VENDRUSCOLO, 1996). Esse ensaio surgiu antes das conceituações da Mecânica dos Solos e consiste em um modelo reduzido de uma fundação superficial (DONATO, 2007).

Segundo Donato (2007), esse ensaio vem sendo utilizado na geotecnia para projetos de fundações e para o estudo do comportamento de pavimentos. Ainda, de acordo com o autor, existem outros fatores que podem levar a utilização desse ensaio, como por exemplo: o fato de que o ensaio tem se mostrado adequado para a avaliação do comportamento de fundações superficiais, uma vez que o solo é submetido ao mesmo tipo de carregamento; o ensaio também permite a observação da forma de ruptura que ocorre no solo devido o carregamento da fundação; há uma grande quantidade de soluções matemáticas e procedimentos empíricos e semi-empíricos que podem auxiliar na interpretação dos resultados experimentais; e as condições geométricas são conhecidas o que facilita a sua aplicação em soluções analíticas como o Método dos Elementos Finitos.

O ensaio de placa é um método experimental para a determinação da pressão admissível, é conduzido pela NBR 6489 de 1984. Constitui na instalação de uma placa rígida, com uma área igual ou maior que 0,5m², sobre o solo natural na mesma cota prevista no projeto das fundações superficiais, onde aplicam-se cargas verticalmente no centro da placa, e medem-se as deformações simultaneamente com os aumentos de carga. Um estágio de carga somente é

aplicado após terem praticamente cessado os recalques do estágio anterior. As cargas são aplicadas até a ruptura do solo e, caso isto não aconteça, são aplicadas até que se atinja o dobro da tensão admissível presumida para o solo, ou um recalque julgado excessivo. Os resultados são apresentados em gráficos de pressão x recalque juntamente com outros dados relativos ao dia e horário do início e fim da prova, a situação do local da prova no terreno e cota da superfície, o corte do poço de prova com indicação de dimensões e natureza do terreno, referência aos dispositivos de carga e de medida, ocorrências excepcionais durante a carga, como, por exemplo: perturbação nos dispositivos de carga e de medida, modificações na superfície do terreno adjacente à prova, etc. Segundo Russi (2007), os resultados são interpretados levando em consideração as relações entre o comportamento da placa e da fundação real, em conjunto com as propriedades das camadas de solo influenciadas pela placa e pela fundação.

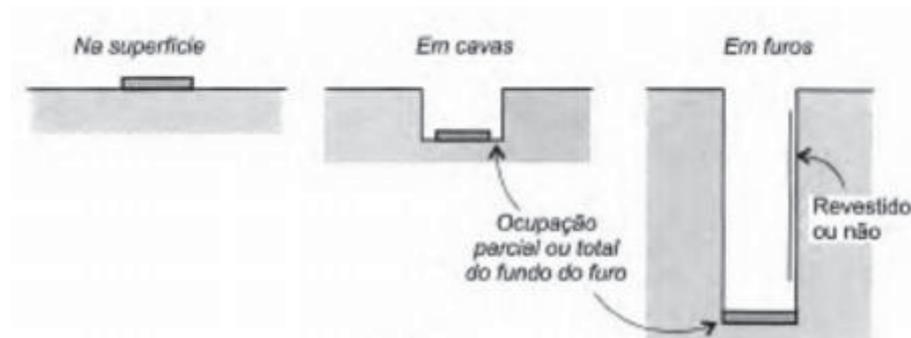
Teixeira e Godoy (1998), salientam que devido sua pequena dimensão, apenas o solo imediatamente abaixo da placa é solicitado durante um ensaio. Uma prova de carga superficial gera informações sobre a camada de solo de apoio das sapatas, não abordam o comportamento das tensões que alcançarão a camada compressível profunda. Donato (2007), de acordo com Terzaghi e Peck (1967), informam que os resultados dos ensaios de placa concebem somente as características do solo a uma profundidade de aproximadamente dois diâmetros abaixo da placa.

Na prova de carga padrão, uma placa de 80 cm de diâmetro é utilizada. Porém, quando se tem o objetivo de extrapolar os resultados da prova de carga para placas maiores (sapatas), é conveniente utilizar diferentes tamanhos de placas como, por exemplo, placas de 30, 60 e 80 cm de diâmetro, ou até mesmo sapata de concreto armado. Outra modificação, no procedimento padrão, seria medir o deslocamento do solo em um ou mais pontos dentro do bulbo de tensões da placa, a fim de estimar um módulo de deformabilidade do solo (TEIXEIRA; GODOY, 1998).

Os ensaios de placa, de acordo com Velloso e Lopes (2004), podem ser classificados segundo:

- Localização: a sua localização pode ser tanto na superfície, com em cavas ou em furos (Figura 13);

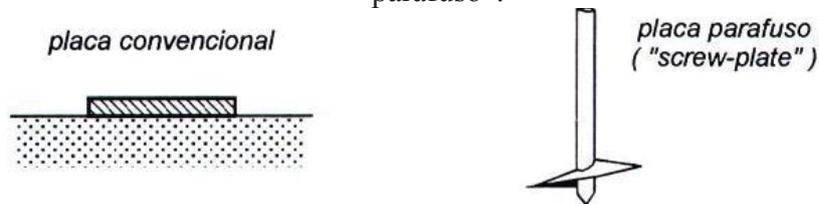
Figura 13 - Esquema ilustrativo da localização da placa: (a) superfície; (b) em cavas; (c) em furos.



Fonte: Veloso e Lopes (2004).

- Tipo de placa: podem ser utilizados dois tipos de placas; a “convencional” que é formada por uma chapa de aço, a qual pode ser circular ou retangular, e a placa helicoidal, também denominada de placa “parafuso” (screwplane), que consiste basicamente em uma lâmina helicoidal de aço de um único ciclo, a qual é inserida no solo através de rotação (Figura 14);

Figura 14 - Esquema ilustrativo dos tipos de placas utilizadas: (a) convencional; (b) helicoidal “parafuso”.



Fonte: Veloso e Lopes (2004).

- Modo de carregamento: o carregamento pode ser realizado de carga controlada ou deformação controlada.

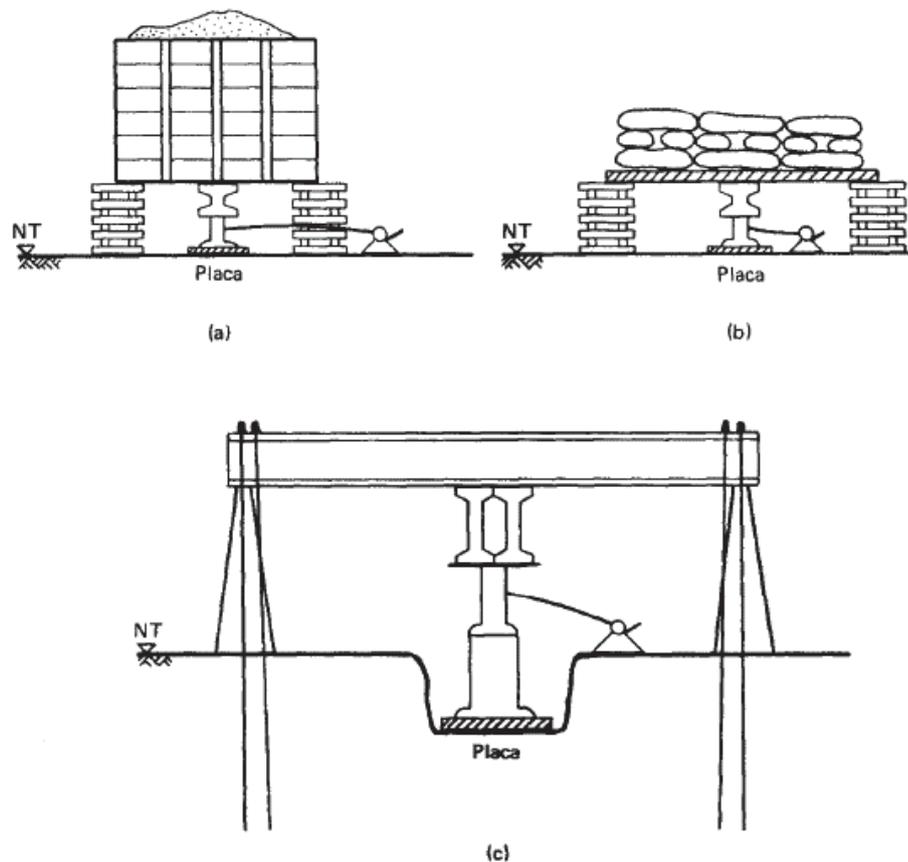
2.3.1 Equipamentos

Russi (2007), utiliza para a realização do ensaio de prova de carga três sistemas:

- Sistema de reação: esse sistema tem a finalidade de garantir ao sistema de transmissão de carga uma reação capaz de contrapor as cargas solicitadas pelo macaco hidráulico. Os sistemas de reação segundo Menegotto (2004), podem ser: caixões de areia, plataformas carregadas, estruturas ou vigas ancoradas no terreno, entre outros (Figura 15);

- Sistema de transmissão de carga: esse sistema costuma ser composto por: uma rótula, um macaco hidráulico, uma célula de carga, uma torre de transferência de carga e a placa propriamente dita;
- Sistema de leitura: o sistema de leitura é composto por medidores de deslocamento.

Figura 15 - Esquema ilustrativo dos tipos de sistemas de reação: (a) caixões de areia; (b) plataformas carregadas; (c) estruturas ou vigas ancoradas no terreno.



Fonte: Barata (1984, apud MENEGOTTO, 2004).

2.3.2 Metodologias de aplicação de carregamento

Para Fellenius (1975) existem quatro tipos de metodologias para carregamento de placas. São elas:

- Ensaio lento (Slow Maintained Load Test - SML): é o ensaio aonde os incrementos de carga são iguais até um nível de carga determinado, superior ao nível de trabalho. Os incrementos são mantidos até que se estabilizem os deslocamentos de acordo com determinado critério (RUSSI, 2007). No Brasil, este ensaio é normatizado pela NBR 6489 (1984).

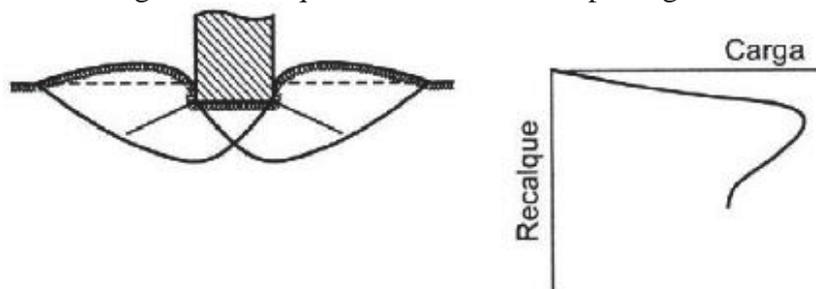
- Ensaio rápido (Quick Maintained Load Test - QML): neste ensaio o intervalo de tempo para a duração de cada estágio de carregamento é fixo, independente da estabilização dos recalques (MENEGOTTO, 2004). O carregamento de incremento é o mesmo até determinado nível de carga, maior que o nível de trabalho, essa carga é mantida por um intervalo de pré-determinado (RUSSI, 2007).
- Ensaio com taxa de penetração constante (Constant Ratio of Penetration - CRP): a placa é forçada a recalcar a uma velocidade constante pré-determinada e o ensaio é conduzido até um determinado nível de deslocamento (RUSSI, 2007), ou até quando o recalque aumenta sob carga constante (MENEGOTTO, 2004).
- Ensaio cíclico (Cyclic Load Test - CLT): a placa é carregada até 1/3 da tensão admissível prevista, ou seja, da carga de projeto, posteriormente descarrega-se metade desta tensão, repetindo esta operação por 20 vezes. Em seguida, aumenta-se a tensão máxima do ciclo anterior em 50%, repetindo-se o procedimento até que se atinja a ruptura (MENEGOTTO, 2004; RUSSI, 2007).

2.3.3 Mecanismos de ruptura

Vesic (1975, apud RUSSI, 2007), considera três diferentes mecanismos de ruptura do maciço de solo de um elemento de fundação. São elas:

- Ruptura geral: ocorre quando se forma uma superfície de deslizamento contínua, que parte da borda da base do elemento estrutural de fundação e estende-se até a superfície do terreno (Figura 16). Na ruptura geral, a carga é bem definida e a ruptura ocorre de maneira repentina. A ruptura do solo é acompanhada pelo tombamento do elemento estrutural.

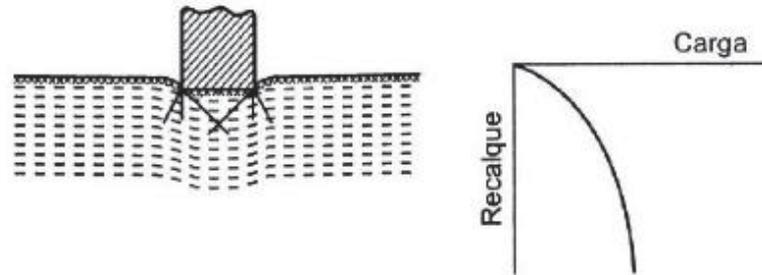
Figura 16 - Esquema ilustrativo da ruptura geral.



Fonte: Russi, 2007.

- Ruptura por punção: exibe um significativo afundamento do elemento estrutural quando se aplica uma determinada carga (Figura 17). O solo ao redor da área carregada praticamente não é afetado, não há movimentos do mesmo na superfície, sendo assim, é mantido o equilíbrio do elemento estrutural nos sentidos vertical e horizontal.

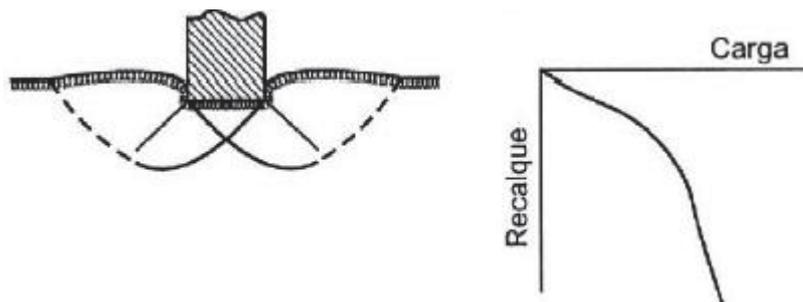
Figura 17 - Esquema ilustrativo da ruptura por punção.



Fonte: Russi, 2007.

- Ruptura local: é definida claramente apenas sob a base do elemento estrutural. Também é considerada um caso intermediário, entre a ruptura geral e a ruptura por punção (Figura 18), pois apresenta características dos ambos modos de ruptura.

Figura 18 - Esquema ilustrativo da ruptura local.



Fonte: Russi, 2007.

2.4 Métodos de previsão de capacidade de carga

2.4.1 Método de previsão de capacidade de carga do solo

2.4.1.1 Método de Terzaghi

Segundo Velloso e Lopes (2004), Terzaghi foi o primeiro a desenvolver um cálculo de capacidade de carga para fundações.

Para Terzaghi, fundação superficial é aquela onde a largura é igual ou superior a profundidade da base de fundação. Ele substituiu a resistência ao cisalhamento do solo acima da fundação por uma sobrecarga, tornando assim a fundação uma sapata corrida carregada uniformemente. Após uma série de deduções, cálculos numéricos e análises encontrou a fórmula da expressão de capacidade de carga da fundação (Equação 1) (VELLOSO; LOPES, 2004).

$$q_{ult} = cN_c + qN_q + 0,5\gamma BN_\gamma \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

q_{ult} = Capacidade de carga unitária da fundação;

c = Coesão do solo;

q = Sobrecarga adicional ($q = \gamma_q D_q$), sendo γ_q o peso específico do solo e D_q a profundidade da base de fundação;

γ = Peso específico do solo na zona de ruptura;

B = Largura da fundação;

N_c, N_q, N_γ = Fatores de capacidade de carga que são função do ângulo de atrito do solo;

A partir dessa equação, Terzaghi propôs outras duas, uma para sapatas circulares (Equação 2) e outra para quadradas (Equação 3).

$$q_{ult} = 1,3cN_c + qN_q + 0,6*0,5\gamma BN_\gamma \quad \text{Equação 2}$$

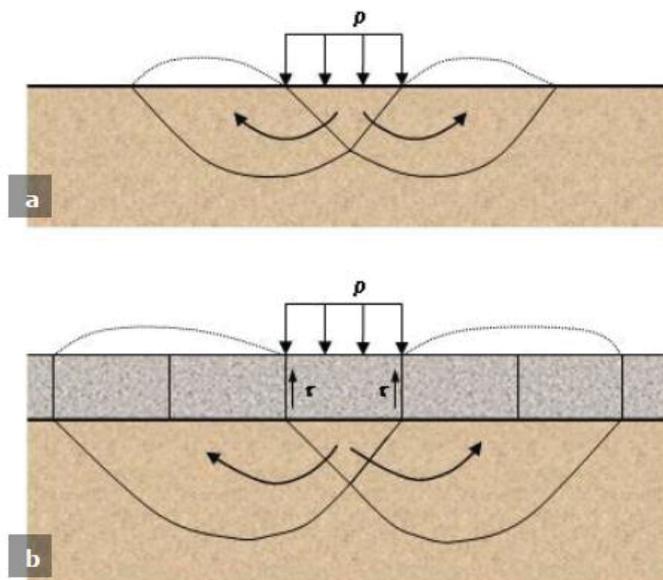
$$q_{ult} = 1,3cN_c + qN_q + 0,8*0,5\gamma BN_\gamma \quad \text{Equação 3}$$

2.4.2 Métodos de previsão de capacidade de carga de solo reforçado com geocélula

2.4.2.1 Método de Koerner

De acordo com Koerner (1994), em solos reforçados com geocélula (Figura 19), a superfície de ruptura acaba sendo interrompida pelas tiras da célula. Para que tal ruptura ocorra, é necessário que o material de preenchimento de uma célula em particular supere o atrito lateral, ou seja, tenha sua resistência de cisalhamento de interface com as paredes da célula excedida pela tensão e assim puncione o material não confinado da camada inferior, transferindo o carregamento para as camadas subjacentes a do reforço celular.

Figura 19 - Mecanismos de ruptura da capacidade de suporte do solo: (a) sem reforço celular; (b) com sistema de confinamento da geocélula.



Fonte: Avesani Neto (2013).

A análise convencional de equilíbrio limite plástico deve ser corrigida para sistemas reforçados com geocélula. Koerner (1994), recomenda a adição de um termo que represente o efeito de confinamento do solo nas células, resultando na Equação 4.

$$\rho r = 2\tau + cN_c S_c + qN_q S_q + 0,5\gamma B N_\gamma S_\gamma \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

ρr = Capacidade de carga do solo reforçado (correspondente a pressão exercida pelo pneu do veículo sobre o sistema);

c = Coesão (zero para solos granulares como areia);

q = Sobrecarga adicional ($= \gamma_q D_q$), sendo γ_q o peso específico do solo contido pela geocélula e D_q a espessura da geocélula;

B = Largura do sistema de pressão aplicado (largura do pneu do veículo);

γ = Peso específico do solo na zona de ruptura;

Nc, Nq, Ng = fatores de capacidade de carga que são função do ângulo de atrito do solo;

Sc, Sq, Sg = Fatores de forma que levam em conta o desvio das deformações planas assumidas pela teoria original;

τ = Resistência ao cisalhamento entre a parede da geocélula e o solo nela contido;

$$\tau = \sigma_h \tan \delta \quad \text{Equação 5}$$

σ_h = Tensão horizontal média dentro da geocélula;

$$\sigma_h \cong pK_a \quad \text{Equação 6}$$

P = Pressão vertical aplicada;

K_a = Coeficiente de pressão do solo;

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{Equação 7}$$

δ = Ângulo de atrito entre o solo e a parede da célula ($\cong 15$ a 20° entre areia e HDPE e $\cong 25$ e 35° entre areia e geotêxtil não-tecido).

2.4.2.2 Método de Presto

Presto (2008), apresenta um método de cálculo de carga de solos reforçados com geocélula específico para estradas não pavimentadas construídas sobre solos com baixa capacidade de suporte.

Como o método trabalha em função da resistência ao cisalhamento do solo do subleito, podem ser empregados tanto solos granulares como coesivos. A resistência do solo de fundação é expressa através das seguintes equações:

$$s = c + \rho \tan \phi \quad \text{para solos granulares} \quad \text{Equação 8}$$

$$s = su \quad \text{para solos coesivos} \quad \text{Equação 9}$$

Sendo:

s = Resistência do subleito;

c = Intercepto de coesão;

ϕ = Ângulo de atrito interno do solo;

su = Resistência não drenada.

ρ = Tensão aplicada;

Com a resistência do subleito definida determina-se a máxima capacidade do solo não reforçado através da Equação 10.

$$\rho = N_c S \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

ρ = Capacidade de carga máxima;

N_c = fatores de capacidade de carga, desenvolvido para estradas não pavimentadas considerando a ruptura por puncionamento.

Em seguida, adota-se uma profundidade para o reforço celular, essa por sua vez, deve ser medida a partir da superfície de rolagem até o topo da geocélula. Essa profundidade não deve ser muito alta, pois as tensões verticais são maiores mais próximas à superfície. Depois de definida a profundidade, calcula-se a tensão vertical no topo da camada de geocélula, por meio da Teoria da Elasticidade, e a tensão vertical em sua base.

$$\sigma_{vt} = p \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{r}{u}\right)^2} \right]^{\frac{3}{2}} \right\} \quad \text{Equação 11}$$

$$\sigma_{vb} = p \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{r}{u+h}\right)^2} \right]^{\frac{3}{2}} \right\} \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

σ_{vt} = Tensão vertical atuante no topo da geocélula;

σ_{vb} = Tensão vertical atuante na base da geocélula;

p = Tensão atuante na superfície (pneu, sapata, placa);

r = Raio da área carregada;

u = Profundidade da disposição da geocélula;

h = Espessura da camada a geocélula.

Uma vez encontrada as tensões verticais, calculam-se as tensões horizontais atuantes no topo e na base da geocélula.

$$\sigma_{ht} = K_a \sigma_{vt} \quad \text{Equação13}$$

$$\sigma_{hb} = K_a \sigma_{vb} \quad \text{Equação14}$$

Onde:

σ_{ht} = Tensão horizontal do topo da geocélula;

σ_{hb} = Tensão horizontal da base da geocélula;

K_a = Coeficiente de empuxo ativo (determinado pela teoria de rankine).

Determina-se a tensão horizontal média nas paredes da geocélula:

$$\sigma_{hm} = \frac{(\sigma_{ht} + \sigma_{hb})}{2} \quad \text{Equação15}$$

Com o valor médio da tensão horizontal, calcula-se a redução da tensão devido ao reforço de geocélula.

$$I = 2 \frac{h}{d} \sigma_{hm} \tan \delta \quad \text{Equação16}$$

Sendo:

I =Melhoria devido ao reforço da geocélula;

h/d = Razão de forma de geocélula;

δ = Ângulo de atrito na interface parede da célula e material de enchimento.

Calcula-se a capacidade de suporte do sistema (ρ_r):

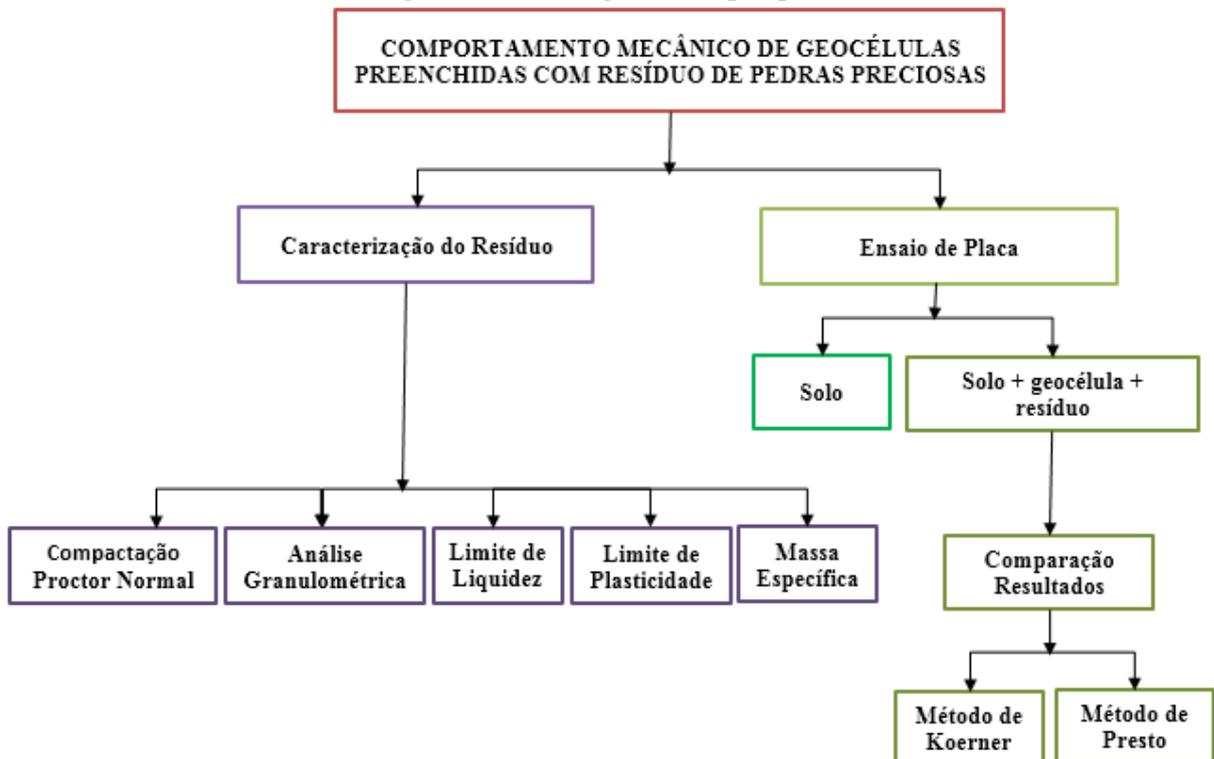
$$\rho_r = N_c S + 2 \frac{h}{d} \sigma_{hm} \tan \delta \quad \text{Equação17}$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Programa de Pesquisa

O presente trabalho possui um programa de pesquisa, é composto por 2 etapas, essas podem ser observadas no organograma da Figura 20.

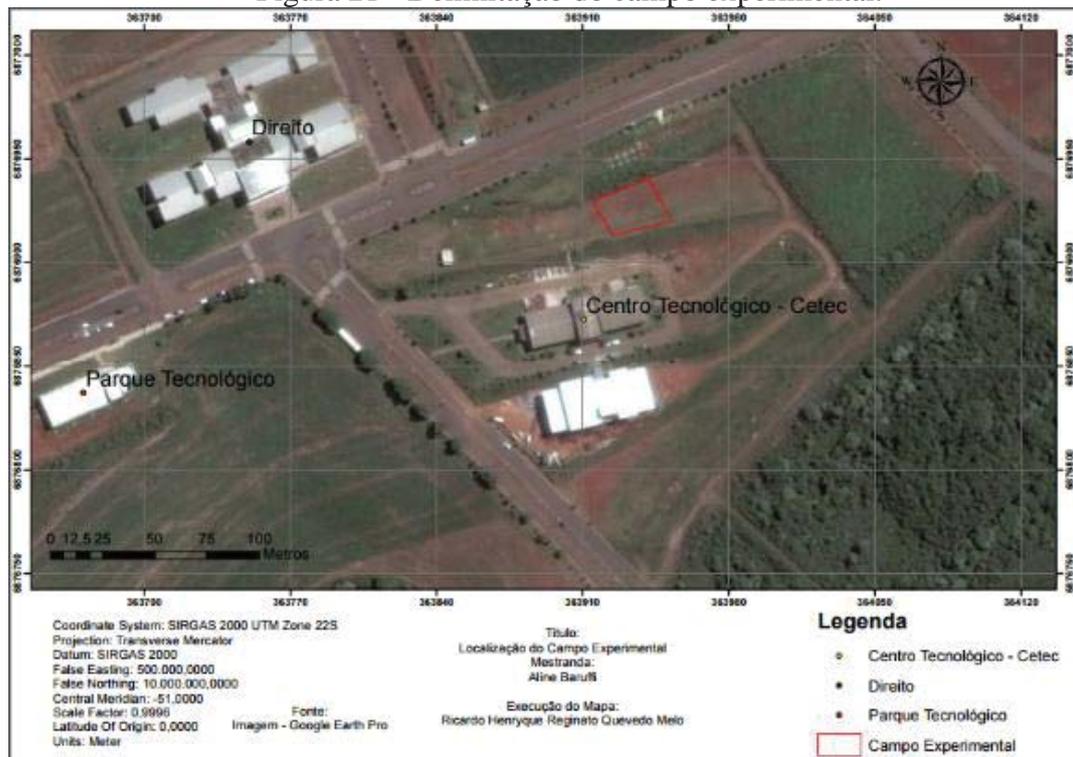
Figura 20 - Fluxograma da pesquisa.



3.2 Local do estudo

O estudo foi desenvolvido no Campo Experimental de Geotecnia, da Universidade de Passo Fundo (Figura 21), e no laboratório do Centro de Tecnologias da UPF (CETEC), localizado na cidade de Passo Fundo, região norte do estado do Rio Grande do Sul.

Figura 21 - Delimitação do campo experimental.



Fonte: Google Earth (2016).

O solo do campo experimental, utilizado como base para a aplicação da geocélula, é de origem residual de basalto e segundo Korf (2011) classificado como CH, argila de alta compressibilidade. Meneghetti (2007) e Ruver (2011), empregaram também o sistema da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHO), que classifica o solo como A-5-7, solo silto-argiloso. A caracterização física do solo está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização física do solo do campo experimental.

Parâmetros do solo	Valor
Argila (%)	68
Silte (%)	5
Areia (%)	27
Limite de Liquidez (%)	53
Limite de Plasticidade (%)	42
Índice de Plasticidade (%)	11
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	26,7
Umidade Natural (%)	34,6
Peso específico natural (kN/m ³)	16,3
Índice de vazios	1,2
Porosidade (%)	54

Fonte: Korf (2011).

De acordo com Ferreira (2010), a coesão (c) e o ângulo de atrito (ϕ) do solo residual de basalto são respectivamente 10kN/m^2 e 24° .

3.3 Materiais

3.3.1 Resíduo

O material de preenchimento das geocélulas foi o resíduo originário da trituração de pedras preciosas, proveniente do município Soledade/RS (Figura 22).

Figura 22 - Resíduo do beneficiamento de pedras preciosas.



Fonte: Acervo do autor (2015).

3.3.2 Geocélula

As geocélulas empregadas na pesquisa foram da marca Ober, conhecidas como FortCell, confeccionadas em polipropileno (tiras de geotêxtil), modelo Diamante, com espessuras classificadas como FC02/30 (5cm), FC4/30 (10cm) e FC8/30 (20cm). As células eram ligadas entre si por meio de costuras. As características das geocélulas estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Especificações técnicas das geocélulas.

Altura da Geocélula (cm)	Dimensão da célula (cm)	Área da célula (cm)	Dimensão da peça (expandida) (m)	Área da peça (expandida) (m ²)	Resistência transversal das juntas (NBR 13134) (N)
5					900
10	27x27	729	mín. 3,00x2,60 máx. 6,00x2,60	mín. 7,80 máx. 15,60	1800
20					3700

Fonte: Adaptado Ober (2014).

3.4 Equipamentos empregados nos ensaios

3.4.1 Preenchimento geocélula

Para execução do preenchimento das geocélula foram necessários:

- Hastes metálicas: utilizados na fixação da geocélula;
- Betoneira: empregada na homogeneização da água com o resíduo, para que o resíduo apresente umidade ótima;
- Carrinho de mão e pás: são utilizados na transferência do resíduo para geocélula;
- Placa vibratória: possui a finalidade de compactar o resíduo à geocélula, até o mesmo alcançar sua densidade máxima seca.

3.4.2 Ensaio de placa

Os ensaios de placa foram realizados segundo a NBR 6489 (1984): Prova de carga direta sobre terreno de fundação.

Para a realização dos ensaios de placa, empregou-se três sistemas: um sistema de reação, um sistema de transmissão de carga e um sistema de medição de deslocamentos. Os componentes desses sistemas são os seguintes:

- Sistema de Reação: utilizou-se o sistema de reação de propriedade da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, cedidos à Universidade de Passo Fundo mediante convênio de cooperação técnico-científica. A sobrecarga é constituída por blocos de concreto de aproximadamente 7kN cada e uma viga metálica de 10kN, apoiada sobre duas sapatas móveis.
- Sistema de transmissão de carga: utilizou-se um macaco hidráulico com capacidade de carga de 20 toneladas e uma célula de carga com capacidade de 10 toneladas. A placa utilizada apresentava um diâmetro de 30 cm e espessura de 25mm.
- Sistema de medição dos deslocamentos: os deslocamentos verticais foram averiguados através de 02 extensômetros digitais instalados sobre a placa.

3.5 Métodos

3.5.1 Caracterização do resíduo

O resíduo de pedras preciosas foi caracterizado quanto a composição granulométrica, a massa específica, os limites de liquidez e plasticidade, e também compactação.

3.5.1.1 Composição Granulométrica

Tem-se por composição granulométrica a proporção relativa expressa em forma de porcentagem (%) em que se encontram os grãos de certo agregado. A composição granulométrica foi verificada por meio da norma NBR 7181 (1984), onde divide-se em Sedimentação, Peneiramento Fino e Peneiramento Grosso.

3.5.1.2 Determinação Massa Específica

A obtenção do peso específico real dos grãos do resíduo foi realizada com referência na norma NBR 6508 (1984). A amostra foi preparada de acordo com a NBR 6457 (1986), onde separou-se 250g do material. Desse, aproximadamente 60g foram empregadas no ensaio de massa específica e o restante foi utilizado para a determinação da umidade higroscópica.

Devido ao fato de o resíduo ser um material muito fino, certificou-se o resultado por meio de ensaios realizados, segundo a norma rodoviária DNER-ME 085 (1994).

3.5.1.3 Ensaio de Compactação

O teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca do resíduo foram obtidos através de ensaios de Compactação Proctor na Energia Normal executado seguindo os métodos prescritos na norma NBR 7182 (1986).

O resíduo foi misturado manualmente com a água, sendo que a umidade inicial utilizada era de 175ml, em seguida a umidade foi aumentada 2% gradativamente.

O ensaio foi realizado com cilindros pequenos como indica o Quadro 2, possuindo 03 camadas e aplicando 26 golpes em cada.

Quadro 2 - Energias de compactação

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia
		Normal
Pequeno	Soquete	Pequeno
	Número de camadas	3
	Número de golpes por camada	26

Fonte: Adaptado da NBR 7182 (ABNT, 1986).

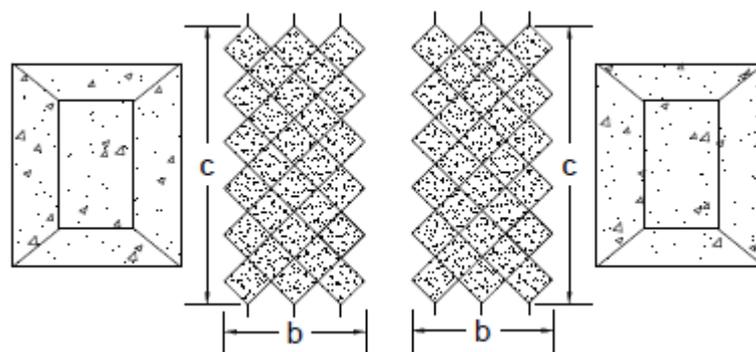
3.5.2 Preparação da geocélula para ensaio

Após selecionado o local para a realização dos ensaios no campo experimental de Geotecnia (Figura 21) e determinada a forma mais fácil de mobilidade do pórtico para a realização dos ensaios de placa, limpou-se o terreno com o auxílio de uma retroescavadeira e pás manuais.

Devido ao fato de existir um espaçamento inferior a 6 metros entre as sapatas móveis do sistema de apoio, optou-se em cortar a geocélula e empregar duas peças com 28 células em cada.

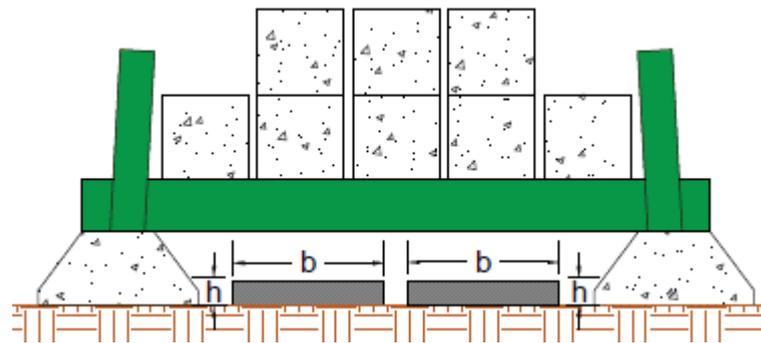
As geocélulas foram instaladas no campo experimental de forma que a largura das mesmas ficasse situada entre as sapatas do sistema de apoio, como mostra a Figura 23 e Figura 24.

Figura 23 - Instalação geocélula entre o sistema de apoio - vista superior.



Fonte: acervo do autor (2015).

Figura 24 - Instalação geocélula entre o sistema de apoio - vista frontal.



Fonte: acervo do autor (2015).

Para a fixação das geocélulas, primeiramente, determinava-se a sua área e em seguida fixava-se as quatro extremidades por meio de grampos, ou seja, hastes metálicas fixadas no solo, em das seguida fixava-se o restante extremidades (Figura 25) (MPZ, 2015).

No preenchimento das geocélulas o resíduo apresentava umidade ótima. Averiguava-se a umidade do mesmo por meio do ensaio Speed, com base na norma do DNER-ME 052 (1994), depois adicionava-se água ao resíduo, até que a umidade desejada fosse alcançada, sendo homogeneizado em uma betoneira (Figura 26).

Com o auxílio de um carrinho de mão, transportava-se o resíduo de beneficiamento de pedras preciosas até as geocélulas, despejava-se sobre as mesmas, e com o auxílio de pás manuais o mesmo era espalhado (Figura 27).

Para a compactação do preenchimento utilizava-se uma placa vibratória (Figura 28). O resíduo, após compactado, apresentava uma cobertura de 3cm sob a geocélula (Figura 29), para melhor assentamento da placa.

A quantidade de resíduo seco empregado em cada geocélula de 5cm, 10cm e 20cm de altura eram de 343kg, 558kg e 986kg respectivamente, esse valor levava em consideração um adicional de 10% de material para eventuais perdas no transporte e na compactação e, os 3cm de cobertura. Foram ao todo preenchidas seis (06) geocélulas, utilizando um total de 3.774kg de resíduo seco.

O peso específico aparente seco era averiguado uma semana após o preenchimento da geocélula, através do ensaio de cone de areia (Figura 30), seguindo instruções da norma DNER-ME 092 (1994).

A Tabela 7, apresenta a denominação atribuída as geocélulas e suas dimensões, vale ressaltar que todas as geocélulas foram instaladas com 28 células, cuidando para que cada célula permanecesse com 27cm de cada lado, mas, como o ensaio realizado era em campo e com várias células, ao contrário dos ensaios em laboratório que apresentavam poucas células, tornava-se

difícil controlar essa variável. Outro fator que influenciou na diferença da largura das mesmas foi o preenchimento e a compactação, uma vez que algumas células aumentaram em comprimento e outras em largura. O próprio fabricante expõe que para uma mesma geocélula possui área mínima e máxima de expansão (Tabela 6).

Tabela 7 - Denominação e dimensão das geocélulas.

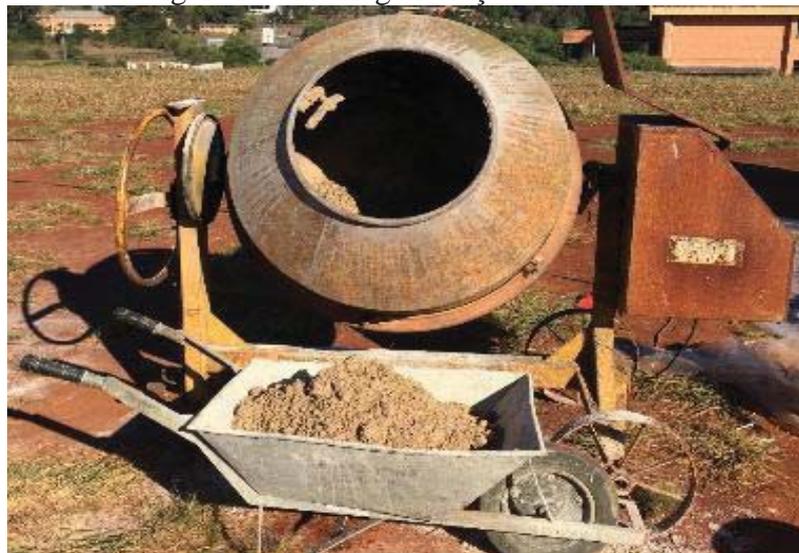
Denominação	Altura (h) (m)	Altura da camada final (m)	Largura célula (d) (m)	Largura geocélula (b) (m)	Comprimento (c) (m)
GL5-1	0,05	0,08	0,273	0,82	2,84
GL5-2			0,330	0,99	2,77
GL10-1	0,1	0,13	0,297	0,89	2,87
GL10-2			0,367	1,10	2,51
GL20-1	0,2	0,23	0,367	1,1	2,44
GL20-2			0,363	1,09	2,38

Figura 25 - Fixação da geocélula no terreno.



Fonte: acervo do autor (2016).

Figura 26 - Homogeneização do resíduo.



Fonte: acervo do autor (2016).

Figura 27 - Preenchimento da geocélula com resíduo.



Fonte: acervo do autor (2016).

Figura 28 - Compactação da geocélula.



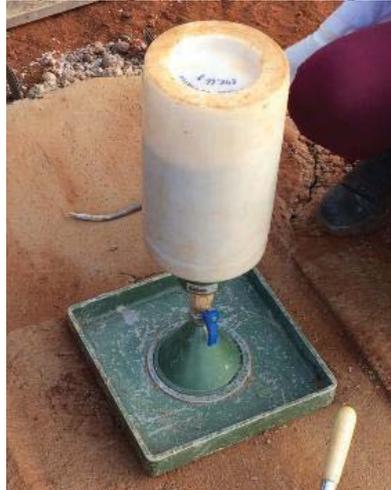
Fonte: acervo do autor (2015).

Figura 29 - Geocélula finalizada.



Fonte: acervo do autor (2016).

Figura 30 - Determinação do peso específico aparente seco do resíduo.



Fonte: acervo do autor (2016).

3.5.3 Ensaio de Placa

A análise da composição geocélula + resíduo, poderia ocorrer somente por meio de comparação com os valores de resistência do solo.

Embora existam vários ensaios de placas realizados no campo experimental de geotecnia da UPF, os mesmos foram efetivados em uma vala e não na superfície, como é necessário para o caso. Sendo assim, houve a necessidade de realizar ensaio de placa sobre o solo, além dos ensaios nas geocélulas.

A Tabela 8 resume os ensaios de placa efetivados e a denominação atribuída ao solo. Ao todo foram realizados 07 (sete) ensaios, sendo 01 (um) no solo sem reforço, e 06 (seis) no solo reforçado com geocélula, destes, 02 (dois) foram nas geocélulas com altura de 5cm, 02 (dois) nas geocélulas de 10cm de altura e 02 nas geocélulas de 20cm de altura. Os ensaios foram realizados com a placa situada no nó de ligação das células, com exceção a geocélula de 20cm de altura número dois (GL20-2), nessa a placa localizava-se no centro da célula.

Tabela 8 - Resumo dos ensaios de placa realizados.

Ensaio n°	Denominação	Reforço	Altura das geocélulas (cm)	Local da placa na célula
01	S-1	Não	-	-
02	GL5-1	Sim	5	Nó
03	GL5-2	Sim	5	Nó
04	GL10-1	Sim	10	Nó
05	GL10-2	Sim	10	Nó
06	GL20-1	Sim	20	Nó
07	GL20-2	Sim	20	Centro

A previsão de capacidade de carga da fundação foi definida para o solo sem reforço e para o solo reforçado com geocélula preenchida de resíduo, empregando a teoria de Terzaghi (Equação 2) e o método de Koerner (Equação 4), respectivamente. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 9 - Previsão de capacidade de carga.

Solo		Solo + geocélula + resíduo					
Capacidade de carga (kN/m ²)	Taxa admissível (kN)	Capacidade de carga (kN/m ²)	Taxa admissível (kN)	Capacidade de carga (kN/m ²)	Taxa admissível (kN)		
265,01	18,73	88,34	6,24	387,89	27,42	129,30	9,14

Com o intuito de facilitar a análise dos dados e reduzir as variáveis de ensaio, optou-se por fixar o incremento, ou seja, a carga pontual em 400kg para todos os ensaios.

Para a realização dos ensaios de placa, instalou-se primeiramente o sistema de reação sobre o solo e as geocélulas, seguido da placa, do sistema de transmissão de carga e do sistema de medição de deslocamentos, como mostra a Figura 31, Figura 32 e Figura 33.

Figura 31 - Instalação sistema de reação.



Fonte: acervo do autor (2015).

Figura 32 - Sistema de transmissão de carga e sistema de transmissão de deslocamento.



Fonte: acervo do autor (2015).

Figura 33 - Sistema de reação do ensaio de placa.



Fonte: acervo do autor (2016).

Os ensaios de placa foram realizados seguindo a norma brasileira NBR 6489 (1984), onde, após a aplicação do incremento, as leituras eram realizadas em tempos dobrados de 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos e assim consecutivamente caso necessário. Se o recalque total se estabilizasse ou se mantivesse inferior a 5% após meia hora de ensaio, partir ia-se para um novo acréscimo de carga, caso contrário dava-se sequência na leitura dos deslocamentos.

Após a realização do ensaio, fazia-se a descarga. A mesma era realizada em estágios sucessivos inferiores a 25% da carga total, onde eram lidos os deslocamentos de maneira idêntica ao carregamento.

A norma exige que o ensaio ocorra até que o recalque seja maior ou igual a 25mm, ou que a carga do incremento atingisse o dobro da carga admissível. Caso o solo não rompa, a carga máxima deveria ser mantida por 12 horas.

Todos os ensaios foram realizados com placa de diâmetro de 30cm, porém, nos ensaios GL5-, GL5-2, GL10-1 e GL10-2 a placa possuía um orifício central de diâmetro de 4cm, como mostra a Figura 34.

Figura 34 - Placas: (a) diâmetro 30cm; (b) diâmetro 30cm com furo central de 4cm.



Fonte: acervo do autor (2016).

3.5.3.1 Critérios de ruptura

Os ensaios de placa são apresentados na forma de gráfico Carga (kN) x Recalque (mm). Os critérios de ruptura adotados foram os mais usuais, citados a seguir:

- Critério n° 1: recalque relativo limitado a 2% do diâmetro da placa (THOMÉ, 1999).
- Critério n° 2: recalque máximo igual a $D/30$, D é o diâmetro da placa (CUDMANI, 1994 APUD DALLA ROSA, 2003).
- Critério n° 3: recalque total de 25mm (NBR 6489, 1984).
- Critério n° 4: recalque máximo igual a 10% do diâmetro da placa (CUDMANI, 1994 APUD DALLA ROSA, 2003).

3.5.4 Desempenho da geocélula

3.5.4.1 Fator de melhoria da capacidade de carga

Uma das formas de avaliar o desempenho da geocélula preenchida com resíduo é através de um fator adimensional, denominado fator de melhoria da capacidade de carga (I_f), que

segundo Dash et al. (2003), é a razão entre a carga aplicada sobre o sistema reforçado e a carga aplicada sem o reforço, para um determinado valor de recalque, como descrito na Equação 18.

$$I_f = \frac{\sigma_r}{\sigma_o} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

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

σ_r = Tensão aplicada no solo reforçado (kPa.);

σ_o = Tensão aplicada no solo (kPa).

O fator tem como limite valor igual a 01 (um). Quando o mesmo é superior a um, tem-se que o solo reforçado produz melhoria na capacidade de carga, o contrário acontece quando esse valor for inferior a um.

3.5.4.2 Porcentagem de redução no deslocamento da sapata

A Porcentagem de redução no deslocamento da sapata (PRS) é a divisão da diferença entre os recalques do solo não reforçado com o solo reforçado e o recalque do solo não reforçado, para um determinado valor de carga (Equação 19).

$$PRS = \left(\frac{S_o - S_r}{S_o} \right) \times 100 \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

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

S_r = Recalque do solo reforçado (mm);

S_o = Recalque do solo não reforçado (mm).

3.5.4.3 Coeficiente de recalque

O coeficiente de recalque (k_v), conhecido também por coeficiente de reação vertical ou coeficiente de mola, tem como princípio fundamental a hipótese de Winkler, que considera o solo como um colchão de molas independentes umas das outras, onde a placa estará assentada recebendo cargas e sofrendo recalques.

O coeficiente de recalque relaciona as tensões aplicadas no solo com os recalques verticais proporcionados pela mesma (Equação 20).

$$k_v = \frac{\sigma}{S}$$

Equação 20

Onde:

k_v = Coeficiente de recalque (kgf/cm³);

σ = Tensão aplicada no solo (kgf/cm²);

S = Recalque do solo (cm).

3.5.4.4 Fator forma

Fator forma (h/d), também conhecido como razão forma, é um valor adimensional que leva em consideração as dimensões das células, correlaciona a altura da geocélula (h) com a largura da célula (d). Para Avesani Neto (2013), no emprego da geocélula como reforço, esse é um dos parâmetros de maior importância que influencia diretamente na capacidade de carga.

3.5.4.5 Largura do reforço

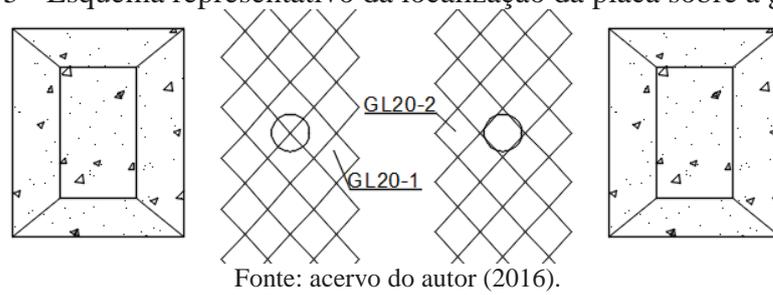
A largura da geocélula influencia na variação da capacidade de carga disponibilizada para este reforço (DASH et al., 2003). A razão (b/B) relaciona a largura da camada de geocélula (b) com o tamanho da placa (B).

3.5.4.6 Posição da placa

Uma forma de analisar a performance da geocélula é através da posição onde a carga pode ser aplicada. Esta, por sua vez, pode ser aplicada em um dos nós de ligação da célula ou no centro da mesma.

Como descrito na Tabela 7, nos ensaios de placa desenvolvidos nas geocélulas de 20cm houve alteração na posição de instalação da placa. O ensaio GL20-1 foi realizado com a placa acomodada sobre o nó de ligação, já o ensaio GL20-2 a placa encontrava-se no centro da célula. A Figura 35 mostra um modelo representativo dos ensaios.

Figura 35 - Esquema representativo da localização da placa sobre a geocélula.



3.5.5 Métodos comparativos para cálculo de reforço de solo empregando geocélulas

Comparou-se os resultados obtidos com diferentes modelos de cálculo existentes de reforço de solo com geocélula, sendo eles:

- Método de Koerner (1994);
- Método de Presto (2008);

Esses métodos foram escolhidos por consistirem em uma abordagem clara e por serem os mais empregados por outros autores (MENESES, 2004; AVESANI NETO, 2013).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização do Resíduo

4.1.1 Composição Granulométrica

A composição granulométrica foi determinada pela NBR 7181 (1984), realizando a sedimentação, seguido do peneiramento fino e grosso do resíduo (Tabela 10 e Figura 36).

Tabela 10 - Determinação da composição granulométrica - NBR 7181 (1984).

DIÂMETRO (mm)	Material Passante (%)	DIÂMETRO (mm)	Material Passante (%)
25	100%	0,0817	33,70%
19	100%	0,075	33,59%
12,70	98,09%	0,058	31,86%
9,50	97,10%	0,041	29,08%
6,35	94,41%	0,029	24,46%
4,76	90,35%	0,021	21,69%
2,38	72,05%	0,015	19,84%
2,00	68,48%	0,011	17,06%
1,19	62,32%	0,008	14,29%
0,60	54,00%	0,005	11,52%
0,42	50,30%	0,004	6,09%
0,25	45,48%	0,003	3,32%
0,15	41,52%	0,002	0,00%

Analisando os dados da curva granulométrica, obtém-se o diâmetro efetivo (D_{10}) como sendo 0,0049mm e o Coeficiente de Uniformidade (Cu) igual a 207,57, classificando o resíduo em não uniforme. De acordo com o Coeficiente de Curvatura (Cc), o resíduo seria apontado como mal graduado, Cc igual a 0,405, porém, ao analisar a Figura 36, nota-se que a curva apresenta uma distribuição contínua com uma ampla faixa de tamanho dos grãos, determinando que o resíduo é um material bem graduado onde as partículas menores ocupam os vazios deixados pelas partículas maiores, resultando em melhores condições de compactação e resistência, sendo ideal seu emprego em geocélulas.

De acordo com o sistema unificado – SUCS (ASTM,1993), o resíduo é classificado como SM (areia e silte).

Figura 36 - Curva granulométrica do resíduo - NBR 7181 (1984).

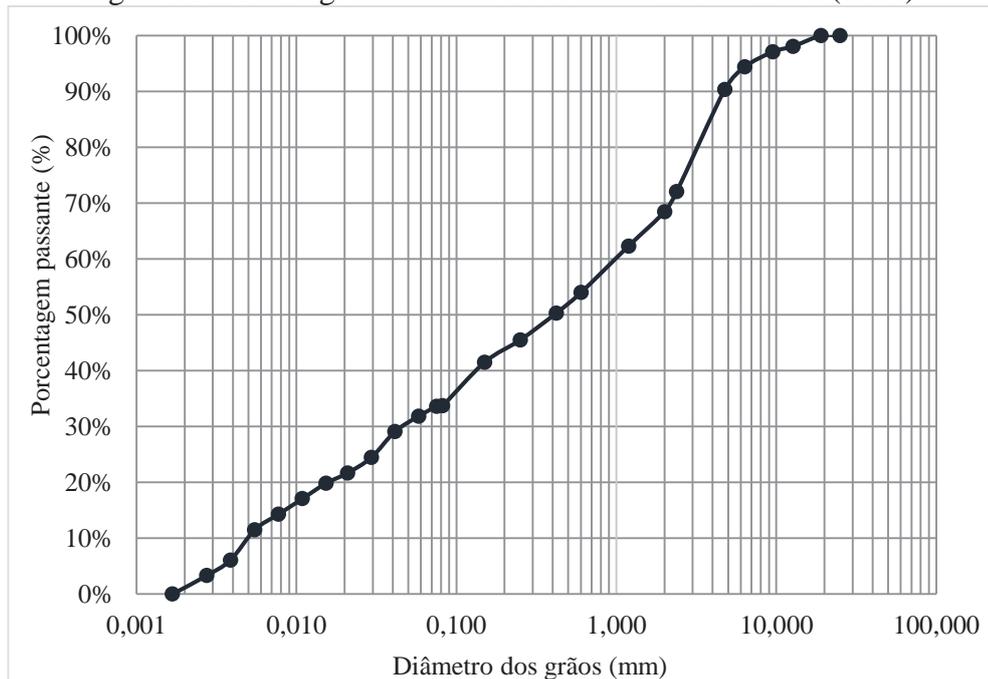


Tabela 11 - Composição do resíduo.

Resultado (%)	
Argila	6%
Silte	29%
Areia Fina	15%
Areia Média	18%
Areia Grossa	22%
Pedregulho	10%

A granulometria nos permite definir a faixa em que os grãos do material se encontram. A Tabela 11 expõe um resumo dos dados obtidos na Tabela 10, onde indica que resíduo apresenta na sua composição 35% de materiais finos.

Dalla Rosa et al. (2014), realizaram ensaio de difração de raio X no resíduo, onde, identificaram que o mesmo possui em sua composição 98% de sílica.

4.1.2 Determinação Massa Específica

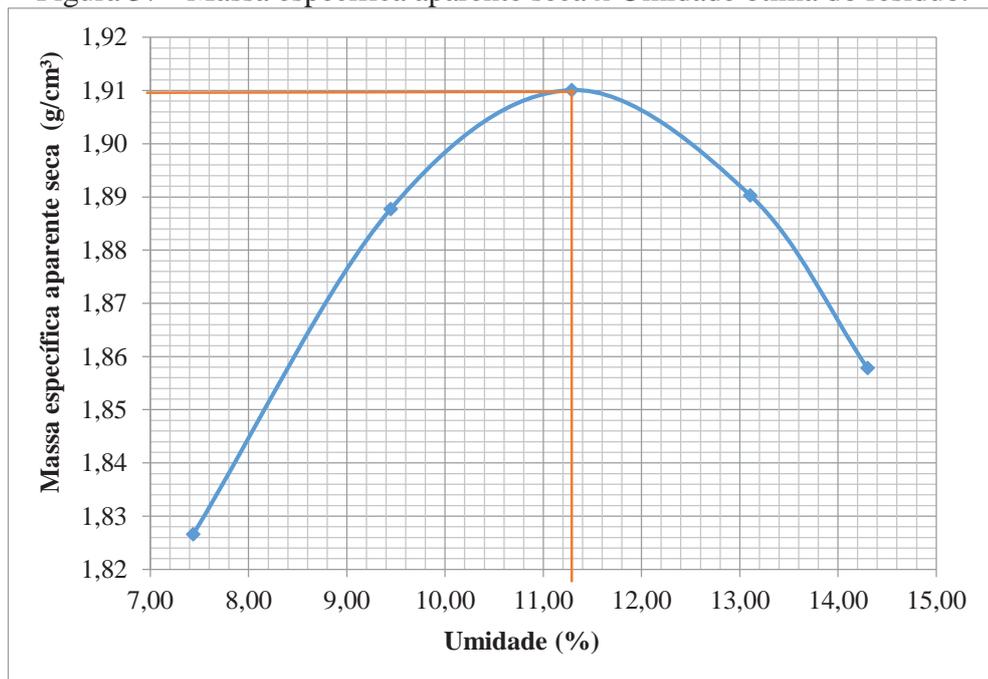
A massa específica real do resíduo foi determinada com referência na norma NBR 6508 (1984), obtendo como resultado 2,62g/cm³.

O mesmo resultado foi encontrado para o ensaio seguindo as diretrizes da norma rodoviária DNER-ME 085 (1994) e também da pesquisa de Venquiaruto et al. (2014).

4.1.3 Ensaio de Compactação

O ensaio de Compactação Proctor na Energia Normal, foi executado de acordo com a NBR 7182 (1986). Obteve-se os resultados representados na Figura 37. Onde indica que para o resíduo, a massa específica aparente seca encontrada é igual a $1,91\text{g/cm}^3$ e a umidade ótima é igual a 11,29%.

Figura 37 - Massa específica aparente seca x Umidade ótima do resíduo.



4.1.4 Ensaio de Cone de Areia

A massa específica aparente seca do resíduo após a compactado na geocélula foi determinado por meio do ensaio de Cone de Areia da norma DNER-ME 092 (1994), como apresentado no Item 3.5.2 e na Figura 30.

A Tabela 12 exhibe os resultados, onde nota-se que somente o resíduo da GL20-2 apresentou massa específica aparente seca próximo ao valor encontrado no ensaio de compactação (Item 4.1.3) e a GL10-2 foi a que mais apresentou variação com relação a massa desejada. Embora tenha-se tomado cuidado para que o resíduo possuísse umidade igual a ótima de 11,29% na hora do preenchimento, por ser ensaio de campo era difícil conservar a mesma umidade até a sua compactação, assim como a umidade do solo também variava nos dias de preenchimento da geocélula devido a fatores climáticos.

Tabela 12 - Massa específica aparente seca do resíduo.

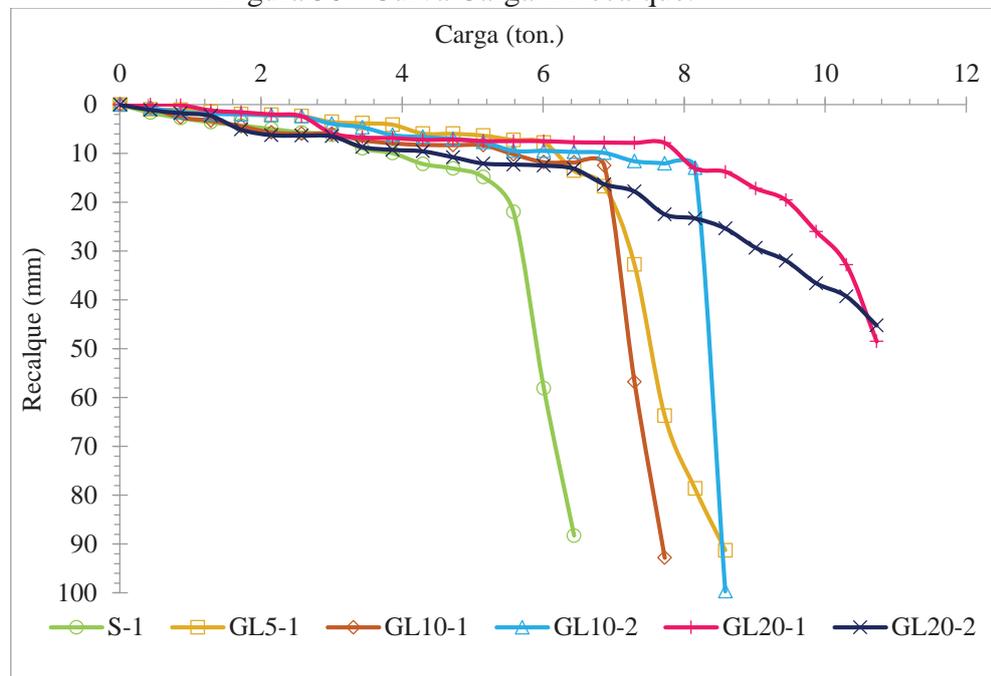
Geocélula	Massa específica aparente seca - desejada (g/cm ³)	Massa específica aparente seca - ensaiada (g/cm ³)	Varição
GL5-1	1,91	1,71	-10
GL5-2		2,12	11
GL10-1		2,05	7
GL10-2		2,32	21
GL20-1		1,76	-8
GL20-2		1,92	1

4.2 Ensaio de Placa

Os ensaios de placa foram realizados seguindo a NBR 6489 (1984). Os dados dos mesmos podem ser visualizados na Figura 38.

Como descrito na Tabela 8 foram realizados ao todo 07 (sete) ensaios, porém, o ensaio realizado na geocélula de 5cm denominada GL5-2 obteve falhas na coleta de dados devido a interferências externas, como fatores naturais, sendo assim, optou-se por não empregar o resultado do mesmo nas análises desenvolvidas nos itens a seguir.

Figura 38 - Curva Carga x Recalque.



Os resultados da Figura 38 exibem que com o aumento da carga aplicada o solo reforçado com geocélula apresenta menores recalques quando comparado com o solo não reforçado, isso se deve ao Efeito Confinamento (AVESANI NETO; BUENO, 2010) aonde a

compressão do resíduo nas células gera tensões horizontais que são distribuídas e compartilhadas com as células adjacentes mobilizando a resistência passiva do material confinado, e ao Efeito Laje (AVESANI NETO; BUENO, 2010) uma vez que as tensões verticais são transferidas para a camada subjacente do solo de forma mais ampla acarretando menores valores de tensão a fundação.

4.2.1 Verificação da carga de ruptura

A análise do comportamento da Carga x Recalque, foi realizada por meio dos critérios descritos no Item 3.5.3.1.

Da Figura 39 a Figura 44, apresenta-se os dados obtidos nos ensaios de placa com o comparativo dos critérios adotados para carga de ruptura. A Tabela 13 exhibe os valores encontrados para os diferentes critérios e a Figura 45 compara esses valores.

Figura 39 - Curva carga x recalque – S-1.

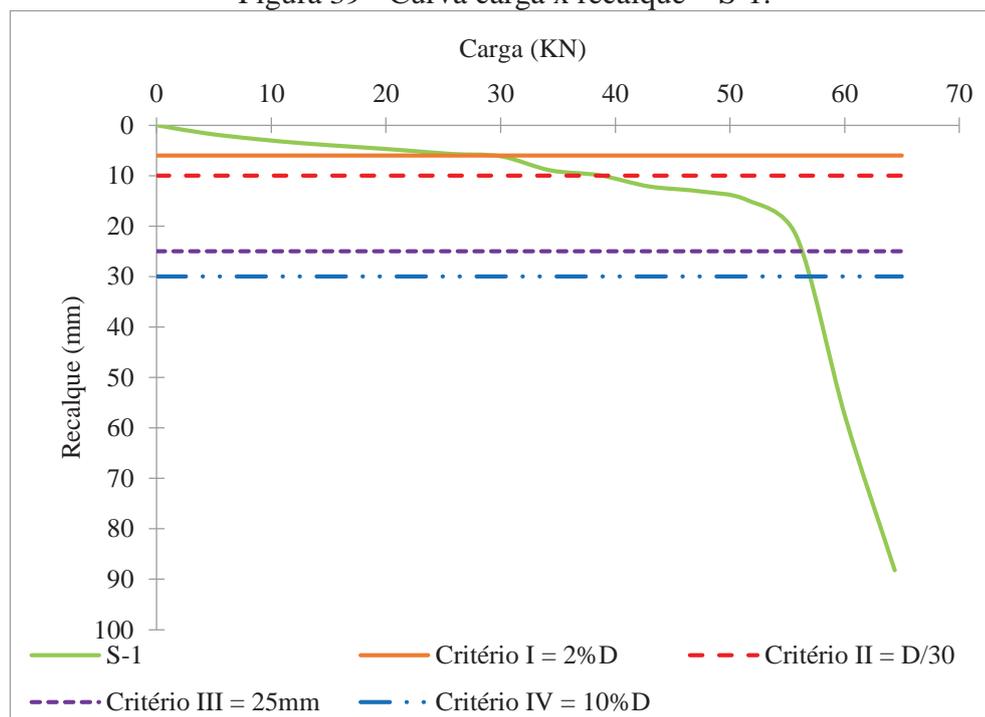


Figura 40 - Curva carga x recalque – GL5-1.

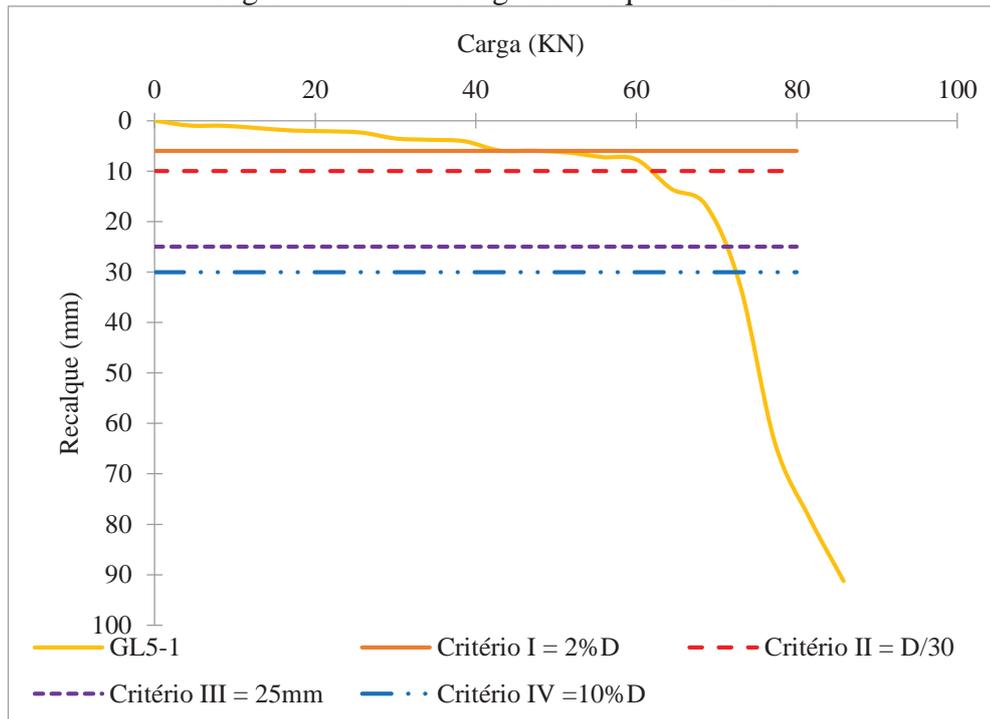


Figura 41 - Curva carga x recalque – GL10-1.

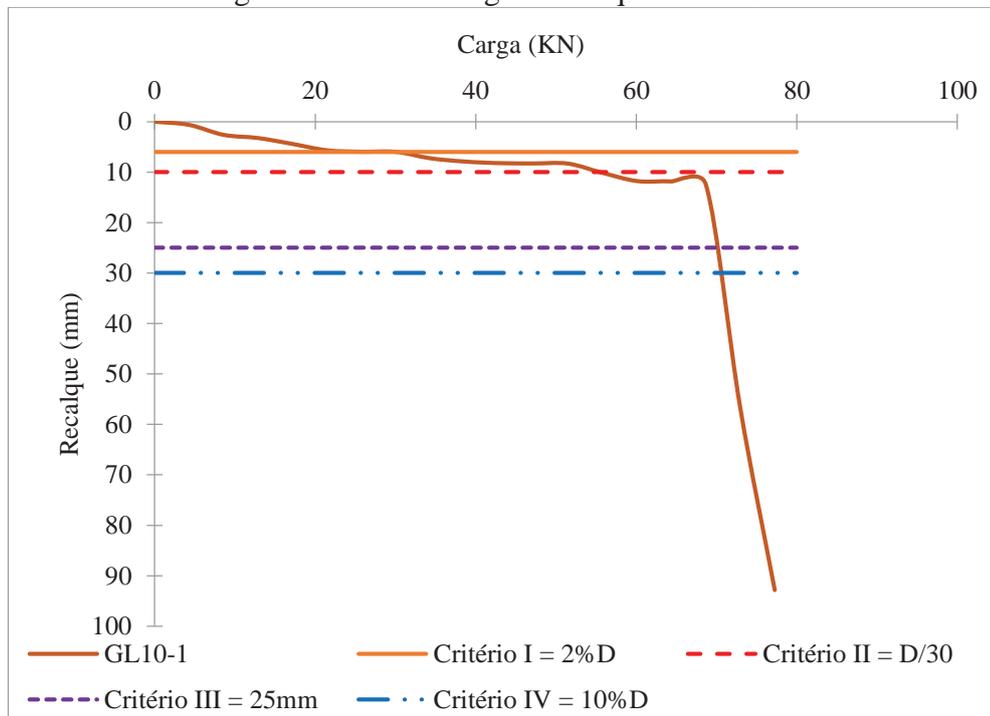


Figura 42 - Curva carga x recalque – GL10-2.

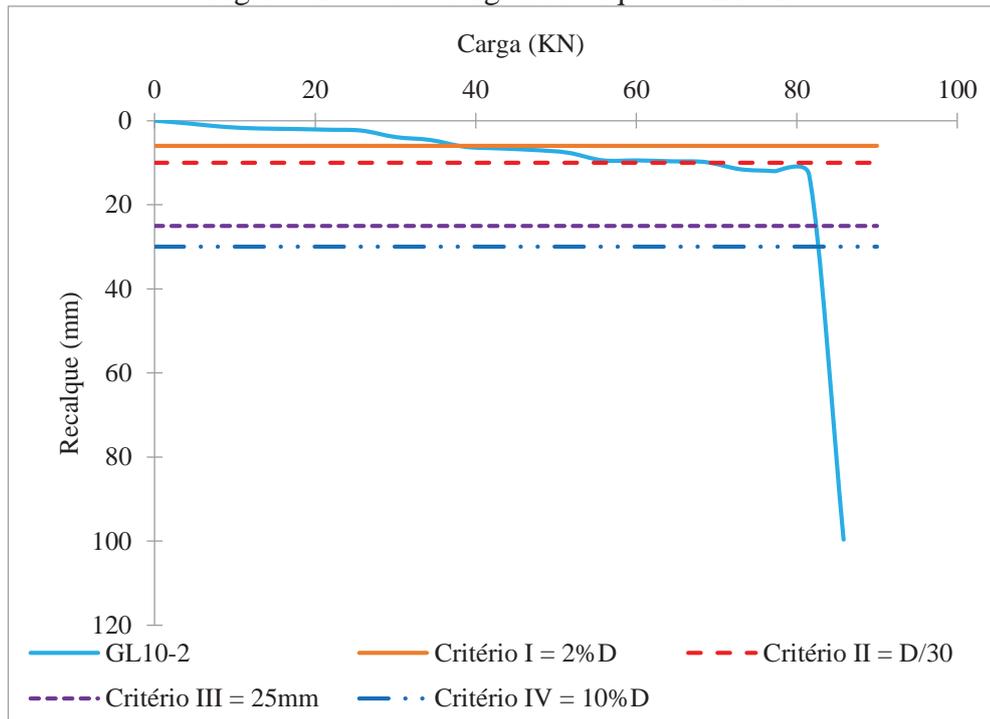


Figura 43 - Curva carga x recalque – GL20-1.

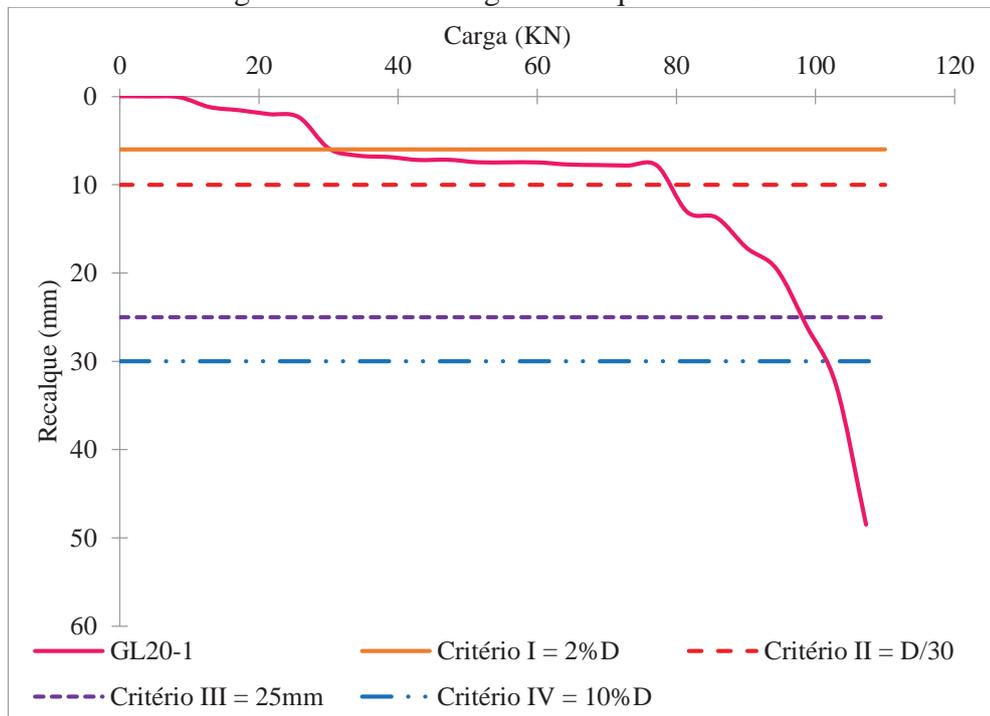


Figura 44 - Curva carga x recalque – GL20-2.

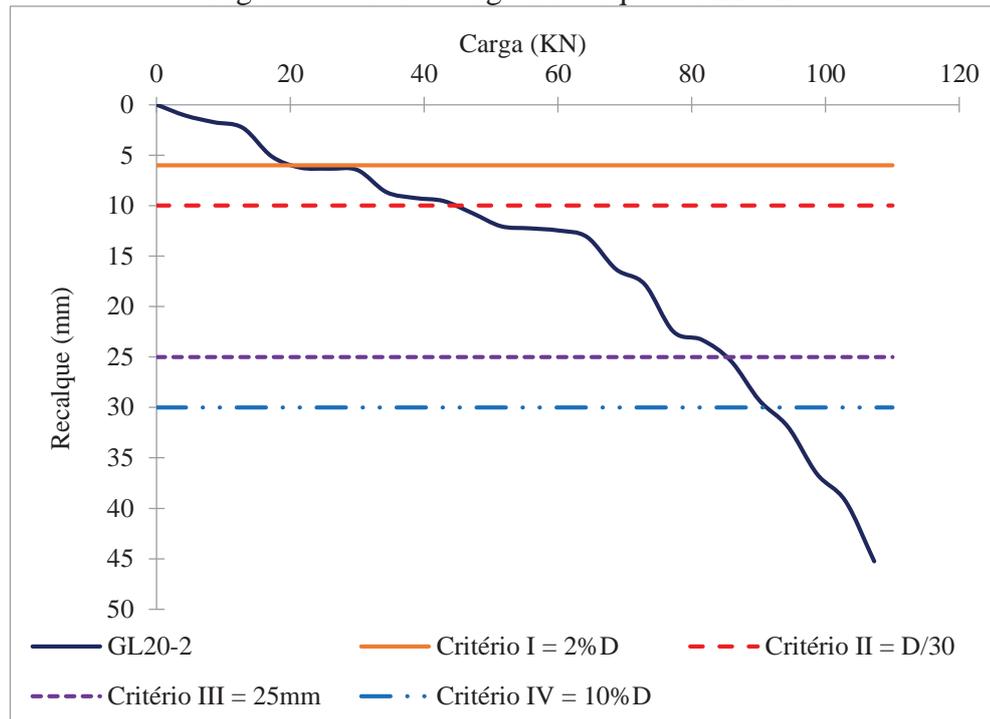


Figura 45 - Comparativo das cargas de ruptura obtida para os diferentes critérios.

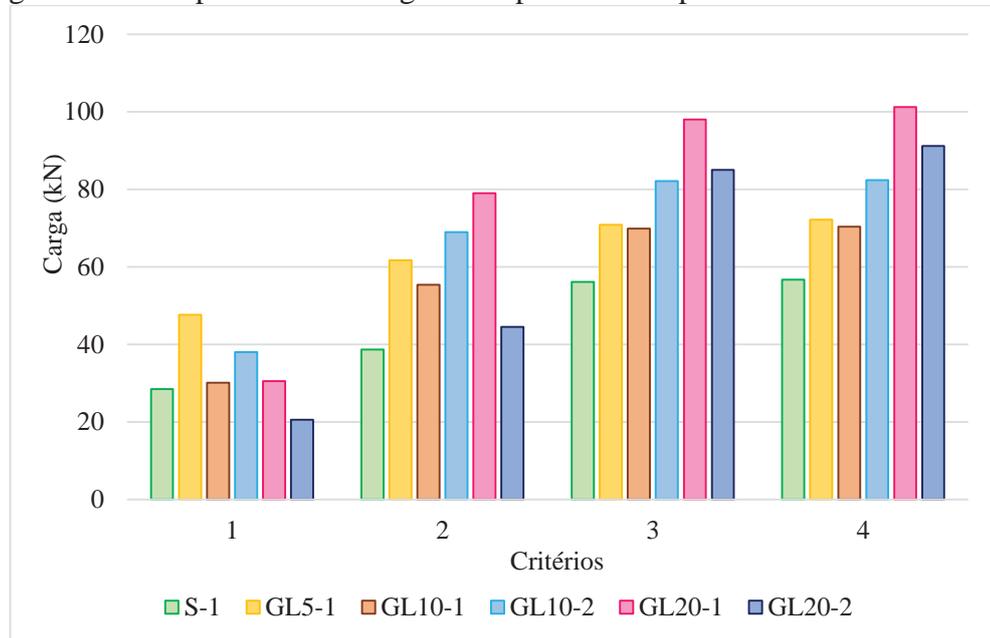


Tabela 13 - Valores de carga de ruptura e recalque para os diferentes critérios.

Carga de ruptura (kN)	Ensaio						Recalque (mm)
	S-1	GL5-1	GL10-1	GL10-2	GL20-1	GL20-2	
Critério I	28,45	47,69	30,10	38,06	30,53	20,57	6
Critério II	38,68	61,76	55,45	69,01	79,01	44,54	10
Critério III	56,16	70,89	69,89	82,14	98,06	85,08	25
Critério IV	56,75	72,23	70,37	82,39	101,25	91,26	30

Analisando a Tabela 13 e a Figura 45, nota-se que para recalques inferiores a 6mm, o emprego de geocélulas não apresenta muita influência, tanto que, o ensaio de placa realizado no centro da célula (GL20-2) apresentou resistência inferior ao solo, esse fato está relacionado com a acomodação do material de preenchimento no interior da geocélula.

Conforme aumenta-se o recalque, o solo reforçado suporta cargas mais elevadas, sendo justificado pelo Efeito Confinamento e Efeito Laje (AVESANI NETO; BUENO, 2010).

As geocélulas de 5cm e de 10cm de altura atingiram valores próximos, não apresentando para essa alteração de altura ganho de resistência. Já, as geocélula de 20cm, obtiveram um ganho de capacidade de carga médio de 28% quando comparada as demais.

O solo reforçado com GL20-1, chega a resistir 44,5kN a mais que o solo sem reforço, ou seja, o dobro da capacidade de carga, para um mesmo recalque de 30mm.

4.2.2 Desempenho da geocélula

4.2.2.1 Fator de melhoria da capacidade de carga

O fator de melhoria de capacidade de carga, apontado na Tabela 14, foi calculado de acordo com a Equação 18. O fator pode ser determinado em qualquer ponto da curva, para facilitar a avaliação e seguir um padrão, optou-se por trabalhar com os fatores que correspondessem aos recalques obtidos nos critérios de rupturas, abordados no item anterior.

Os gráficos apresentados na Figura 46 até Figura 50, fazem um comparativo da curva tensão (kPa) x recalque normalizado (S/B) (%), do solo sem reforço com o solo reforçado, onde, através desses obteve-se o f_y .

Figura 46 - Curva tensão x recalque S/B – S-1 e GL5-1.

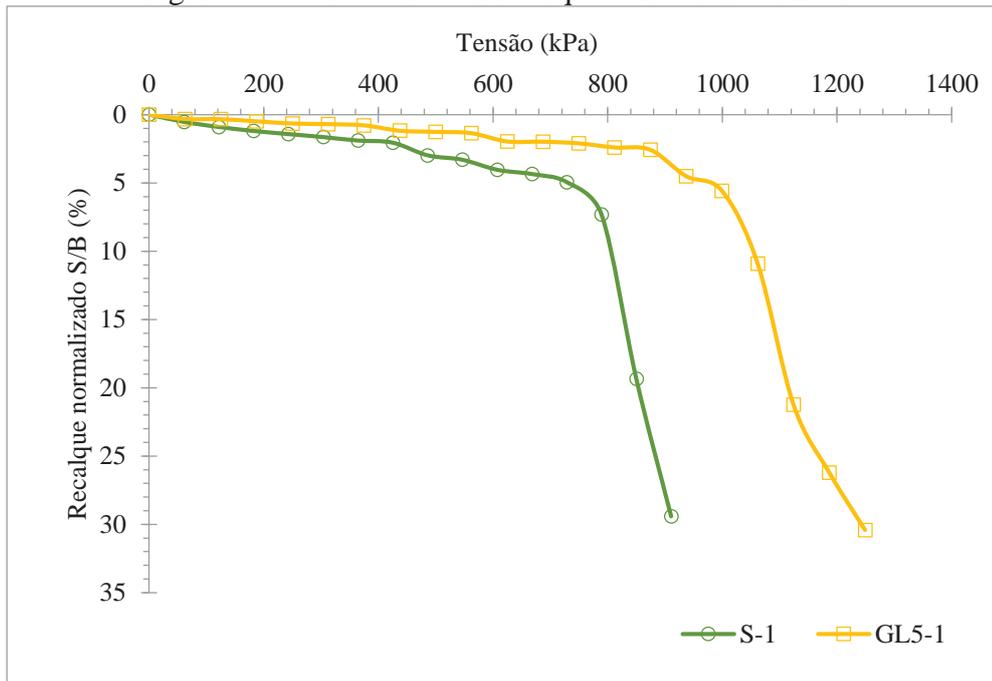


Figura 47 - Curva tensão x recalque S/B – S-1 e GL10-1.

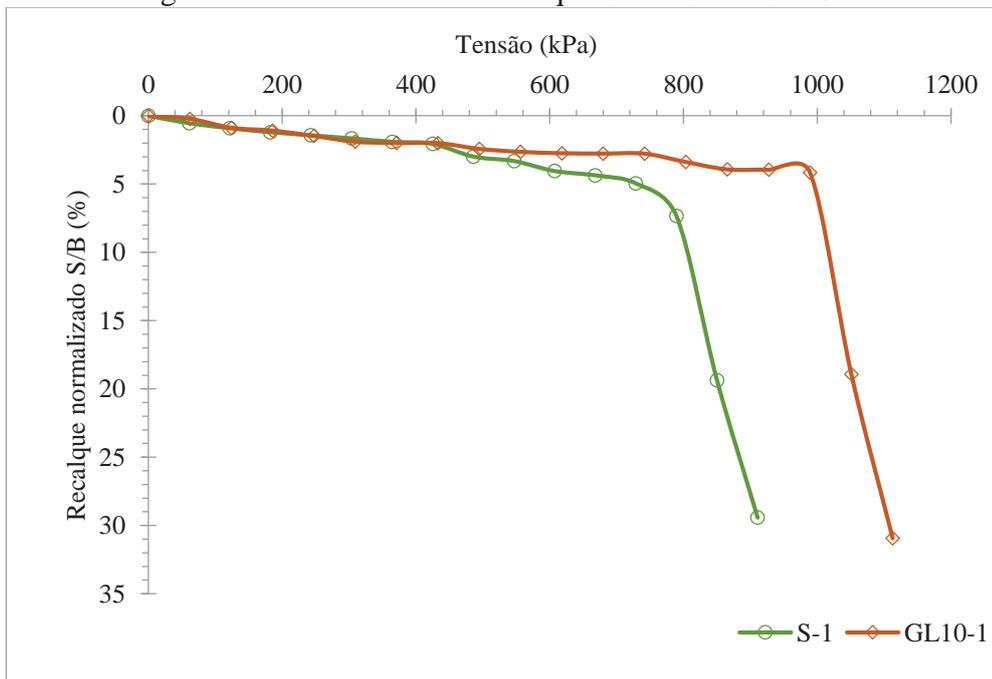


Figura 48 - Curva tensão x recalque S/B – S-1 e GL10-2.

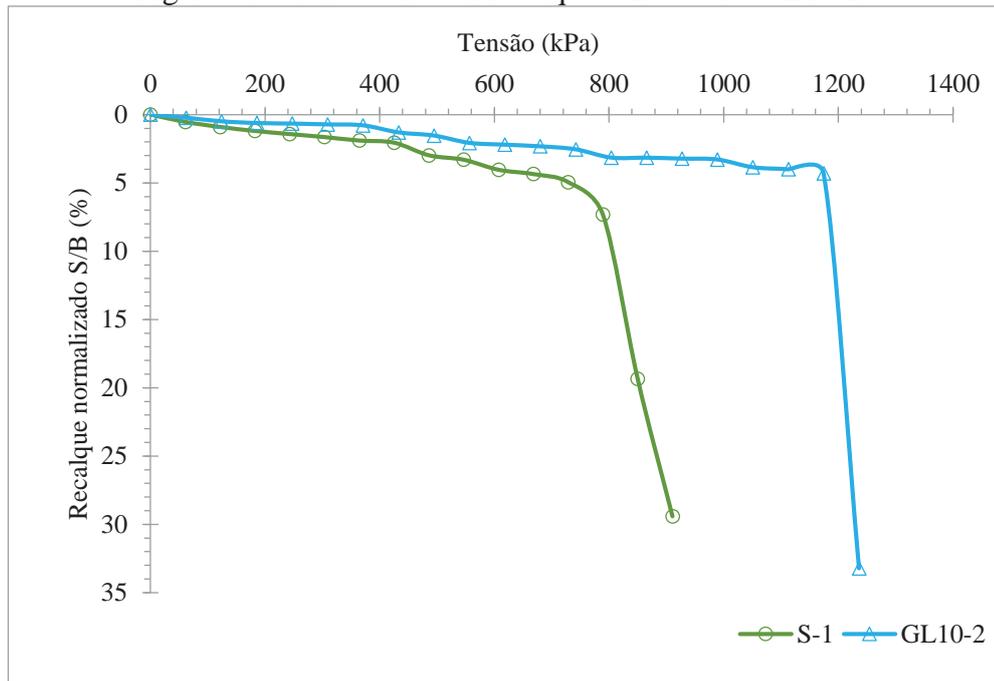


Figura 49 - Curva tensão x recalque S/B – S-1 e GL20-1.

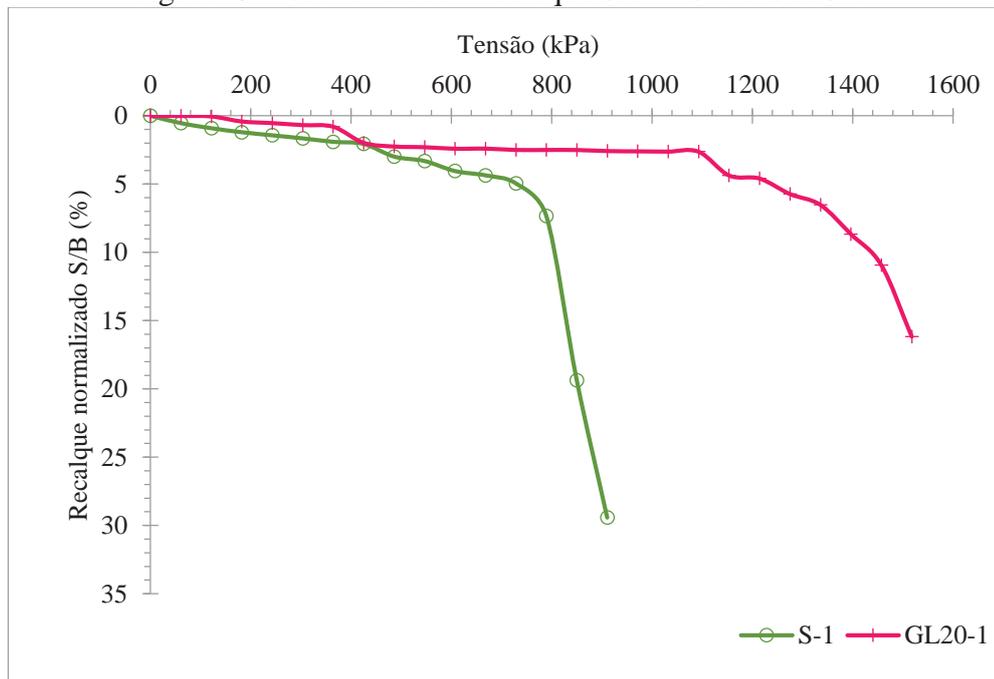


Figura 50 - Curva tensão x recalque S/B – S-1 e GL20-2.

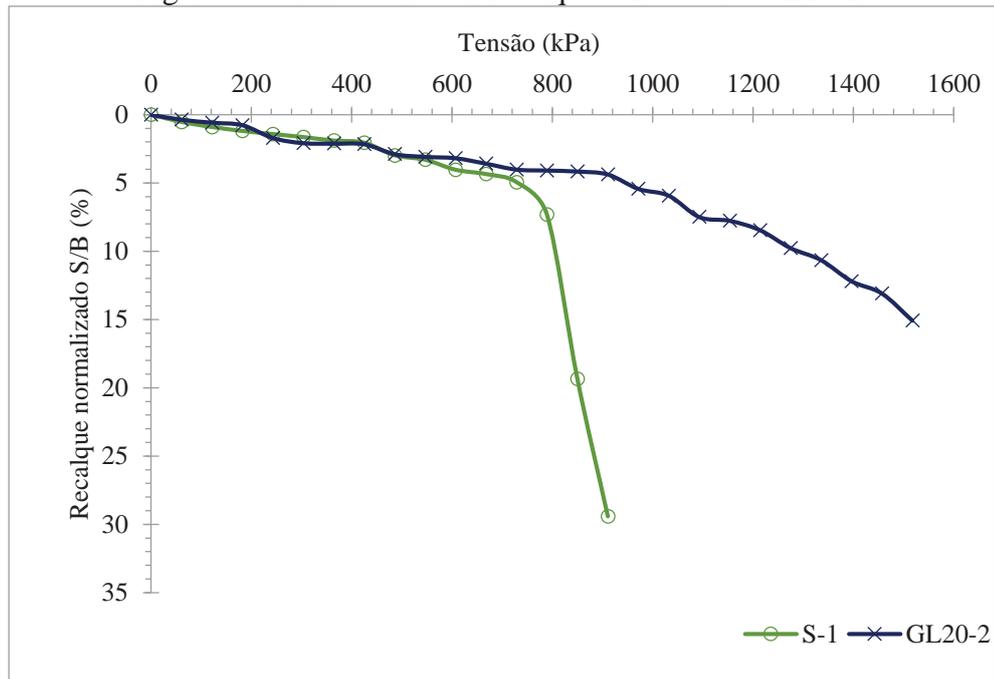


Tabela 14 - Fator de melhoria de capacidade de carga.

Recalque (mm)	Recalque normalizado	f_y				
		GL5-1	GL10-1	GL10-2	GL20-1	GL20-2
6	2%	1,71	1,08	1,36	1,07	0,72
10	3,33%	1,62	1,46	1,81	2,04	1,15
25	8,33%	1,29	1,27	1,49	1,75	1,51
30	10%	1,30	1,26	1,48	1,78	1,61

Avaliando os dados da Tabela 14, tem-se que, o solo reforçado com a geocélula apresenta para pequenos recalques (até 10mm) melhoria na capacidade de carga de até 2,04 vezes, para maiores recalques esse valor chega até 1,78 vezes. Através da média harmônica identificou-se que, na maioria dos estágios de recalque, o solo reforçado apresenta um acréscimo de capacidade de carga de pelo menos 1,36 vezes.

Observa-se na Figura 50 que o solo reforçado com geocélula de 20cm, GL20-2, não oferece melhoria na capacidade de carga do solo inicialmente, mas, esse valor se modifica com o acréscimo das tensões, melhorando em até 1,61 vezes a capacidade de carga do solo.

4.2.2.2 Porcentagem de redução no deslocamento da sapata

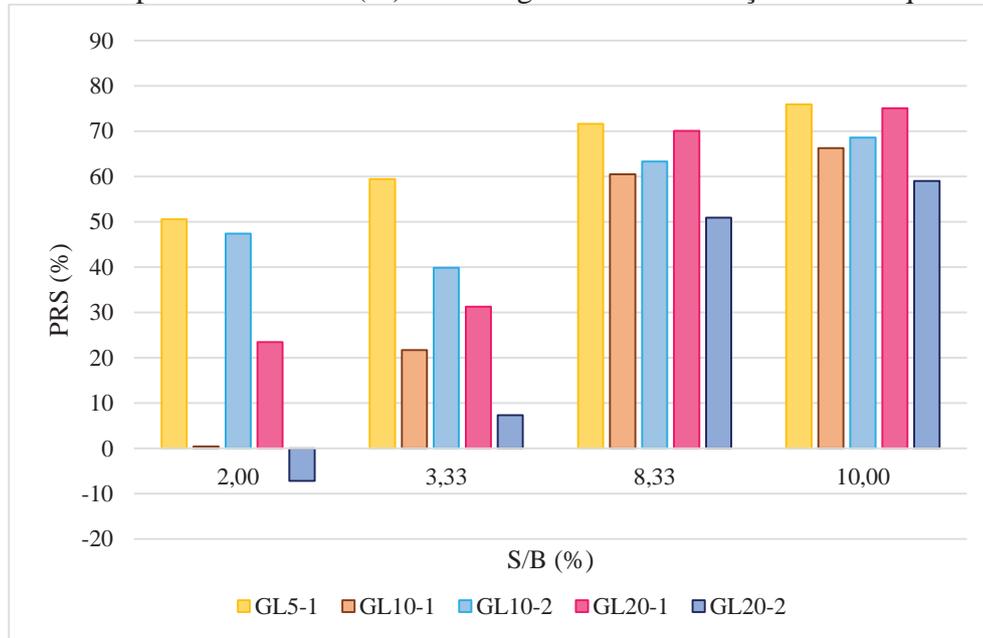
O PRS, assim como o fator de melhoria de carga, pode ser determinado para qualquer valor da curva Tensão x Recalque normativo (Figura 46 até a Figura 50). A realização dos

cálculos foi por meio da Equação 19, onde, através dos valores de Tensão (kN) correspondentes aos recalques de 6mm, 10mm, 25mm e 30mm, do solo não reforçado, obteve-se os valores de recalque do solo reforçado. A Tabela 15 indica os resultados encontrados.

Tabela 15 - Porcentagem de redução no deslocamento da sapata.

SL-1		GL5-1		GL10-1		GL10-2		GL20-1		GL20-2	
Recalque (mm)	S/B	Recalque (mm)	PRS (%)								
6	2,00	2,97	50,56	5,97	0,45	3,16	47,41	4,59	23,44	6,43	-7,16
10	3,33	4,05	59,47	7,83	21,72	6,01	39,89	6,88	31,25	9,26	7,35
25	8,33	7,10	71,62	9,88	60,49	9,18	63,30	7,48	70,10	12,27	50,93
30	10,00	7,22	75,94	10,13	66,24	9,42	68,59	7,48	75,08	12,30	59,00

Figura 51 - Comparativo do PRS (%) de cada geocélula em relação ao recalque normalizado.



Com relação aos dados obtidos na Figura 51, tem-se que o solo reforçado com geocélula pode influenciar em até 75% a redução do deslocamento da sapata quando submetido a uma tensão superior a 800kPa.

O uso de geocélula para recalques normativos acima de 8% reduzem significativamente o deslocamento da sapata, comprovando a eficácia destas, onde a redução dos recalques se deve ao efeito de confinamento gerado.

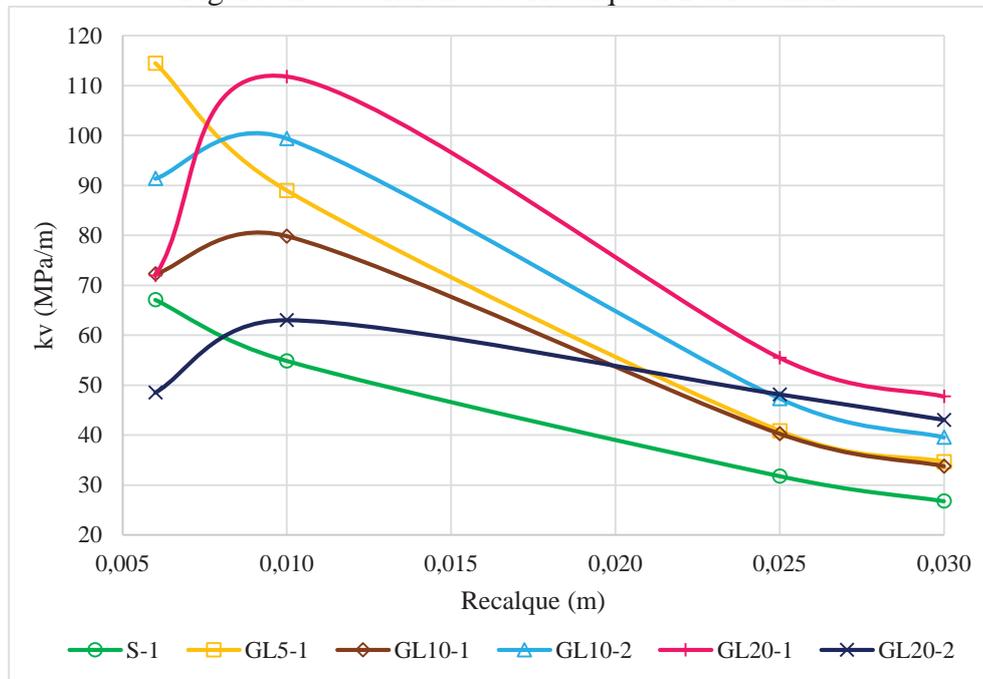
4.2.2.3 Coeficiente de recalque

O coeficiente de recalque (k_v), foi obtido empregando a Equação 20, os resultados encontrados estão descritos na Tabela 16 e na Figura 52.

Tabela 16 - Coeficiente de recalque.

Recalque (mm)	k_v (MPa/m)					
	S-1	GL5-1	GL10-1	GL10-2	GL20-1	GL20-2
6	67,09	114,47	72,26	91,36	71,98	48,51
10	54,86	88,96	79,86	99,40	111,78	63,01
25	31,78	40,84	40,26	47,32	55,49	48,14
30	26,76	34,68	33,78	39,56	47,75	43,03

Figura 52 - Coeficiente de Recalque x Deslocamento



Para o solo não reforçado, consta-se que o coeficiente de recalque reduz a medida em que aumenta a profundidade dos deslocamentos da placa, o mesmo não ocorre com o solo reforçado com geocélula, onde tem-se até 10mm ganho de capacidade de carga, após isso, pode-se até ter ganho na capacidade de carga, porém, o recalque começa a ser representativo.

4.2.2.4 Fator forma

O fator forma foi determinado para cada ensaio realizado nas geocélulas através da divisão da altura pela largura de cada célula. Na Tabela 17, tem-se os parâmetros usados e o fator melhoria de carga determinado para os critérios I, II, III e IV.

A Figura 53 aborda um comparativo do fator de melhoria de carga com relação ao fator forma.

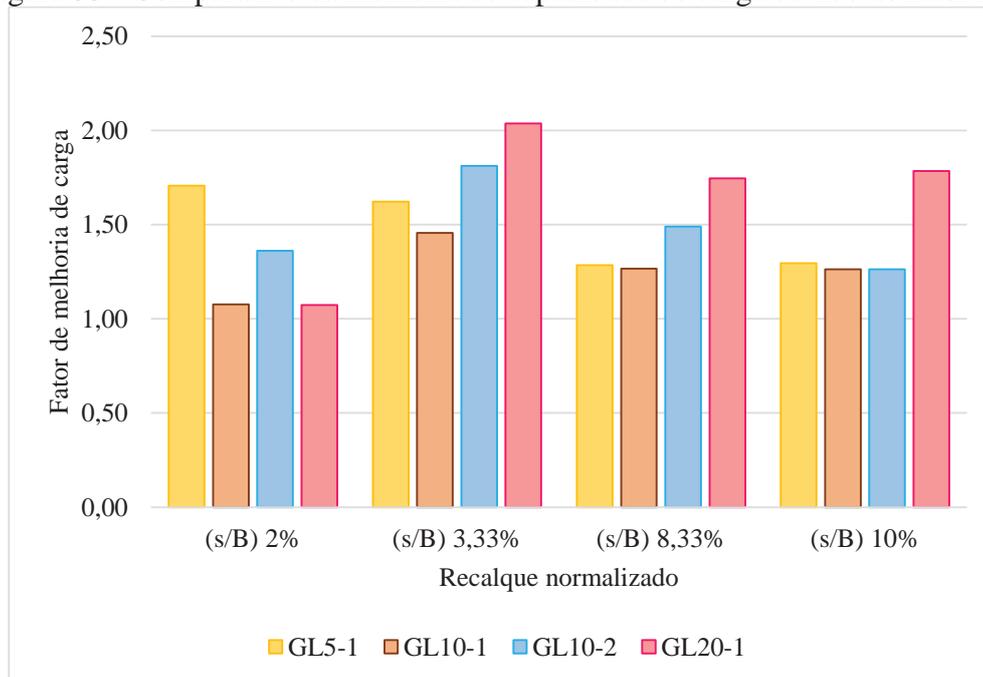
O fator forma não foi definido para a geocélula GL20-2, pois, conforme dito anteriormente, a mesma foi ensaiada com a placa no centro da célula, enquanto as demais localizavam-se nos nós.

As geocélulas, após preenchidas, exibiram diferenças de larguras, como descrito na Tabela 7 e justificado no Item 3.5.2.

Tabela 17 - Fator forma (h/d).

Geocélula	Altura (m)	Largura célula (m)	Fator forma (h/d)	f_y			
				(s/B) 2%	(s/B) 3,33%	(s/B) 8,33%	(s/B) 10%
GL5-1	0,05	0,273	0,183	1,71	1,62	1,29	1,30
GL10-1	0,1	0,297	0,337	1,08	1,46	1,27	1,26
GL10-2		0,367	0,273	1,36	1,81	1,49	1,26
GL20-1	0,2	0,367	0,545	1,07	2,04	1,75	1,78

Figura 53 - Comparativo da melhoria de capacidade de carga devido ao fator forma.



O fator forma das geocélulas com alturas de 5cm e 10cm, não apresentaram muita diferença entre si na melhoria de capacidade de carga, como pode ser visto na Figura 52, a GL5-1 apresenta valores intermediários aos das GL10-1 e GL10-2.

Comparando o fator forma, percebe-se que quando ele aumenta de 0,34 para 0,55, tem-se acréscimo de capacidade de carga.

O fator forma igual a 0,273 promove ganho de capacidade de suporte para baixas deformações.

Mandal e Gupta (1994) ao utilizarem razão forma iguais a 1,8, 2,3 e 3, obtiveram que com o aumento da altura da geocélula aumentava-se a rigidez do solo.

Ao analisar a GL10-1 e GL10-2, nota-se que pode ter havido má ancoragem das geocélulas, onde a célula com maior largura pode ter ficado com menos folga do que a de menor largura, resultando no fator forma menor, porém com maior melhoria de capacidade de carga.

4.2.2.5 Largura do reforço

A influência da largura da geocélula foi definida através da razão entre o diâmetro da placa e a largura total da geocélula ensaiada.

Tabela 18 - Largura de reforço (b/B).

Geocélula	Diâmetro placa (B) (m)	Largura geocélula (b) (m)	(b/B)	Critério I (KPa)	Critério II (KPa)	Critério III (KPa)	Critério IV (KPa)
GL5-1	0,30	0,82	2,76	687	890	1021	1040
GL10-1	0,30	0,89	2,99	434	799	1007	1014
GL10-2	0,30	1,10	3,70	548	994	1183	1187
GL20-1	0,30	1,10	3,67	432	1118	1387	1432
GL20-2	0,30	1,09	3,63	291	630	1204	1291

A partir dos resultados da Tabela 18, para geocélulas de mesma altura (GL10-1 e GL10-2), compreende-se que quanto maior a razão entre a largura da geocélula e a largura da placa, maior é a tensão que ela resiste. Sendo assim, o aumento da capacidade de carga é proporcional ao da largura.

As geocélulas ensaiadas apresentaram larguras entre 2,76 a 3,70 vezes o diâmetro da placa, aumentando em média 69% a capacidade de carga do solo, para recalque de 10mm.

Segundo Sireesh et al. (2009), a geocélula com largura próxima ao dobro do diâmetro da placa aumenta mais de 60% a capacidade de carga do solo. Já Avesani Neto (2013), através

da análise de dados Dash et al. (2003b), diz que esse valor pode ser encontrado com a largura da geocélula próximo ao diâmetro da placa.

Dash et al. (2001a) e Thallak et al. (2007) constataram que, mesmo com a largura da geocélula igual à largura da placa ($b = B$), há melhoria da capacidade de carga do solo. Ainda, para Dash et al. (2001a) e Dash et al. (2003), a largura ideal da camada de geocélula é de quatro a cinco vezes a largura da placa, acima disso a melhoria do desempenho é apenas marginal.

4.2.2.6 Posição da placa

Conforme indicado no Item 3.5.4.6, o ensaio realizado na GL20-1 ocorreu com a placa sobre o nó de ligação da célula e o ensaio GL20-2 com a placa posicionada no centro da mesma.

A Figura 54, exibe o comparativo entre os ensaios e, a Tabela 19, as tensões encontradas para os diferentes critérios de ruptura, também apresentou-se a melhoria da capacidade de carga cuja qual foi calculada com relação GL20-1 e GL20-2. Não foi apresentado o fator relacionado ao solo não reforçado, pois a mesma já foi debatida no Item 4.2.2.1

Figura 54 - Curva tensão x recalque normativo – GL20-1 e GL20-2.

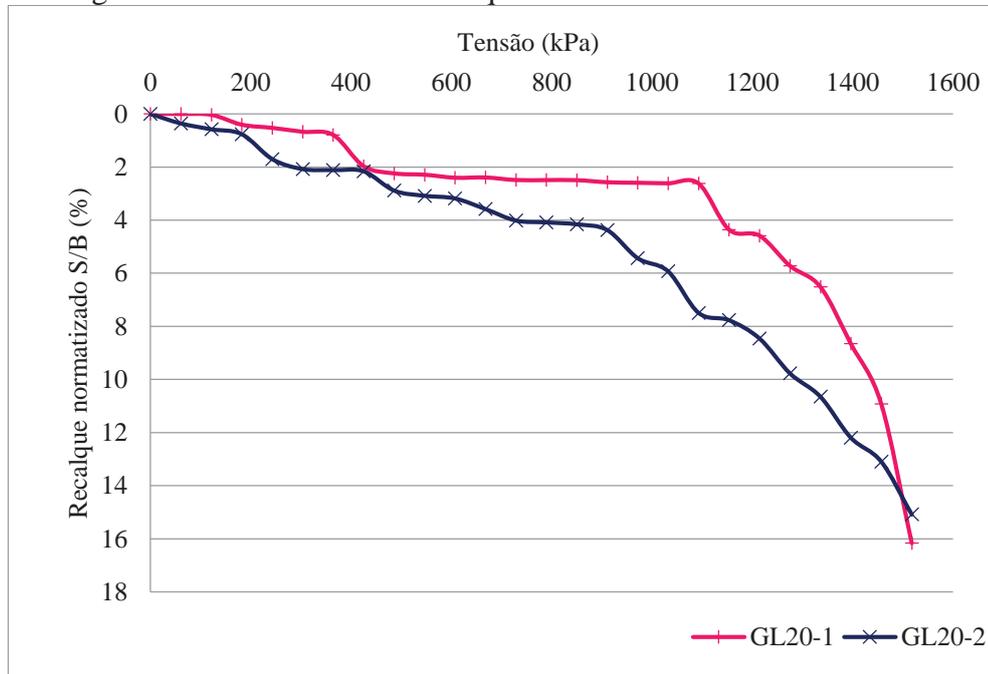


Tabela 19 - Comparativo geocélulas de 20cm.

Ensaio	Tensão de ruptura (kPa)				f_y				h/d
	Critério I	Critério II	Critério III	Critério IV	s/B 2%	s/B 3,33%	s/B 8,33%	s/B 10%	
GL20-1	432	1118	1387	1432	1,48	1,77	1,15	1,11	0,55
GL20-2	291	630	1204	1291					

Como indica a Tabela 19, o ensaio realizado com a placa disposta no nó de ligação da célula suporta cargas mais elevadas do que quando ensaiadas no centro da célula. Essa melhoria de capacidade de carga chega a 77%, para recalques de 10mm, porém, com o desenvolver do ensaio a mesma vai reduzindo.

Miguel (2016), em seus ensaios, também obteve dados superiores para geocélulas ensaiadas com placas no nó quando comparadas as ensaiadas no centro da célula.

A Figura 54 apresenta o ponto em que ambos ensaios possuem para uma mesma tensão aplicada de 1498 kPa, um mesmo recalque de 43,23mm, ou seja, um recalque normalizado de 14,33%. De acordo com os critérios de ruptura adotados, o solo já teria rompido nesse ponto de intersecção.

4.2.3 Métodos comparativos

Um dos objetivos da dissertação é comparar os dados obtidos com os determinados pelos métodos de Koerner (1994) e Presto (2008). A Tabela 20, apresenta valores de algumas propriedades do solo empregados em ambos os ensaios e, a Tabela 21 exhibe as propriedades adotadas para as geocélulas, onde, para o ângulo de atrito entre a geocélula e o material de preenchimento (δ) adotou-se 30°, esse valor se enquadra no sugerido pelo autor para geotêxtil não tecido e areia, que varia de 25° a 35°.

Tabela 20 - Propriedades do solo.

Coesão (kN/m ²)	φ (°)	Fator de capacidade de carga			Fator de forma da sapata			γ (kN/m ³)	Ka	B (m)
		Nc	Nq	N γ	Sc	Sq	S γ			
10	24	19,32	9,6	9,44	1,3	1	0,6	16,3	0,42	0,3

Tabela 21 - Propriedades da geocélula.

δ (°)	γ_Q (kN/m ³)	U (m)
30	18,73	0,03

4.2.3.1 Método de Koerner (1994)

A previsão da capacidade de carga do solo reforçado, elaborada por Koerner (1994), foi calculada através das equações descritas no Item 2.4.2.1. A Tabela 22 exhibe os resultados.

Como os ensaios realizados na presente pesquisa não possuíam instrumentação de leitura na base das geocélulas, adotou-se a carga aplicada referencial como sendo a carga cuja qual o solo sem reforço apresenta um recalque de 10mm devido a esse não apresentar comportamento de ruptura. Sendo assim, o valor da tensão ensaiada corresponde ao valor obtido para o recalque de 10mm com o emprego de reforço.

Tabela 22 - Comparação entre o método de Koerner (1994) e dados ensaiados.

Ensaio	Altura (m)	Carga (kg)	P (kPa)	σ_h (kPa)	τ (kPa)	ρ_r (calculado) (kPa)	ρ_r (ensaiado) (kPa)	Diferença (%)
GL5-1	0,05					545	890	63
GL10-1	0,1					554	799	44
GL10-2	0,1	3878	549	231	134		994	80
GL20-1	0,2					574	1118	95
GL20-2	0,2						630	10

Através dos dados percebe-se uma discrepância entre os valores de capacidade de carga estipulados por Koerner e os definidos através dos ensaios de placa executados no nó de ligação das células. Já para o ensaio realizado com a placa disposta no centro da geocélula, a diferença de carga entre o previsto e o ensaiado foi de 10%.

Segundo Avesani Neto (2013), essa diferença nos valores ocorre pelo fato de o método não levar em consideração a geometria da geocélula e não considerá-la tridimensional. Também vale ressaltar que o material de preenchimento das geocélulas ensaiadas eram resíduo e não areia, para qual o método foi desenvolvido.

4.2.3.2 Método de Presto (2008)

A capacidade de suporte do sistema, desenvolvida por Presto (2008), foi determinada por meio das equações citadas no Item 2.4.2.2, expressas na Tabela 23 e Tabela 24.

A carga aplicada corresponde a carga obtida no ensaio de placa realizado no solo não reforçado para um recalque de 10mm. Para a tensão ensaiada levou-se em consideração o valor de tensão encontrada para o recalque adotado.

Tabela 23 - Parâmetros medidos no método de Presto (2008).

Ensaio	Altura (h) (m)	Largura (d) (m)	Carga (kg)	P (kPa)	σ_{vt} (kPa)	σ_{vb} (kPa)	σ_{ht} (kPa)	σ_{hb} (kPa)	$\sigma_{hméd}$ (kPa)
GL5-1	0,05	0,2733	3870	549	542	470	229	198	213
GL10-1	0,1	0,2967	3870	549	542	355	229	150	189
GL10-2	0,1	0,3667	3870	549	542				
GL20-1	0,2	0,3667	3870	549	544				
GL20-2	0,2	0,3633	3870	549	544	226	230	95	163

Tabela 24 - Comparação entre o método de Presto (2008) e dados ensaiados.

Ensaio	I (kPa)	ρ (calculado) (kPa)	ρ (ensaiado) (kPa)	Diferença (%)
GL5-1	45	821	890	8
GL10-1	74	849	799	-6
GL10-2	60	835	994	19
GL20-1	102	878	1118	27
GL20-2	103	879	630	-28

Segundo o método de Presto (2008), o reforço com essas geocélulas oferecem uma redução na tensão de 45kPa quando reforçados com geocélulas de 5cm, o aumento da redução de tensão é proporcional ao aumento do fator forma (h/d). Para geocélulas de 20cm de altura o valor de I atinge 103kPa.

Para geocélulas de menor altura o método proposto por Presto (2008) apresenta valores próximos aos obtidos no ensaio, porém a diferença entre o ensaio e o método se eleva com o aumento da altura da geocélula.

As diferenças entre os valores calculados e ensaiados, são inferiores aos obtidos pelo método de Koener (1994), isso ocorre porque Presto (2008) avalia a geometria da geocélula.

5 CONCLUSÃO

Investigou-se através de provas de carga o comportamento do solo Campo Experimental de Geotecnia, da Universidade de Passo Fundo, e o comportamento do mesmo quando reforçado com geocélulas de 5cm, 10cm e 20cm, preenchidas com resíduo de pedras preciosas proveniente de Soledade-RS.

O resíduo foi caracterizado por meio de ensaios e foi classificado como SM (areia siltosa), bem graduado e não uniforme. Massa específica de $2,62\text{g/cm}^3$, massa específica aparente seca de $1,91\text{g/cm}^3$ e umidade ótima igual a 11,29%.

O emprego da geocélula preenchida com resíduo de beneficiamento de pedras preciosas aumenta a capacidade de carga do solo. Para recalques inferiores a 2% do diâmetro da placa, 6mm, o reforço da geocélula não obteve significativa influencia, mas, conforme aumentava-se o incremento nos solos reforçados reduzia-se o recalque dos mesmos quando comparados com S-1.

A melhoria da capacidade de carga foi de 2,04 vezes para recalques inferiores a 10mm. A GL20-2 não apresentou melhoria de capacidade de carga inicialmente, mas esse valor se modifica conforme o recalque vai ocorrendo no solo, chegando a melhorar em 1,61 vezes para recalques superiores a 10% do diâmetro da placa, 30cm.

O solo reforçado apresentou redução no recalque de até 76% quando submetido a tensão superior a 800kPa.

Através da análise do coeficiente de recalque do solo reforçado, têm-se um ganho de capacidade de carga com recalques de 10mm, após isso o valor do recalque começa a ser mais representativo.

As geocélulas de 5cm e 10cm apresentaram comportamento quase semelhante. O aumento de capacidade de suporte do solo é maior quando a altura das geocélulas passa de 10cm para 20cm.

Quando necessita-se diminuição de recalque as geocélulas de menor altura são as mais indicadas, mas para aumento de capacidade de carga o ideal é utilizar geocélulas com maiores alturas.

A posição da instalação da placa influencia na melhoria da capacidade de carga, sendo essa superior a 1,77 vezes quando situada no nó de ligação das geocélulas.

Com relação aos métodos propostos pode-se concluir que, dentro do escopo analisado, o método de Koerner (1994), embora seja o mais conservador, não reflete a realidade, uma vez que não analisa a geometria da geocélula, os valores obtidos pelo método chegaram a ser 95%

inferiores aos obtidos no ensaio. Já para o método proposto por Presto (2008) a maior diferença encontrada foi de 28%, tornando o método mais apropriado para estimativa inicial do comportamento de geocélulas preenchidas com resíduo.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros indica-se:

- Aplicar instrumentação de leitura na base da geocélula e em diferentes profundidades da fundação;
- Realizar os ensaios em laboratório, sem a existência de fatores naturais, como por exemplo o clima, afim de comparar os resultados;
- Analisar como as geocélulas preenchidas com o resíduo de beneficiamento de pedras preciosas se comportam com diferentes tipos de fundações;
- Analisar a influência da localização da aplicação de carga na geocélula.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6489**: Prova de carga direta sobre terreno de fundação. Rio de Janeiro, 1984.

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

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR ISO 10318**: Geossintéticos – Termos e Definições. Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard Classification of Soils for Engineering Purposes**: D2487. Philadelphia. 1993. 11p.

APL. **X seminário de APLS base mineral**. 2013. Disponível em: <<http://www.portalgemas.com.br/x-seminario-de-apls-base-mineral/>>. Acesso em: Novembro, 2014.

ASHA, M. N., LATHA, G. M. Use of Geocell As A Reinforcing Material For Unpaved Road Sections. In: **Golden Jubilee Conference of the Igs Bangalore Chapter, GEO-INNOVATIONS**, 2014, Bangalore. p. 1-8.

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. Tese (Doutor em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

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

BARUFFI, A. B., MIGUEL, G. D., ABIDO, L. C., FLOSS, M. F. Verificação da camada de proteção mínima recomendada para uso sobre GCL por meio de sua deformidade. **COBRANSEG 2016**: O futuro sustentável do Brasil passa por Minas.

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

BUENO, B. de S.; VILAR, O. M. Propriedades, Ensaios e Normas. In: VERTEMATTI, J. C. Manual Brasileiro de Geossintéticos. São Paulo: Blucher, 2004.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. **Lei 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em Set. 2014.

DALLA ROSA, F. **Caracterização geotécnica e estudo do comportamento carga x recalque do solo do campo experimental de geotecnia da Universidade de Passo Fundo**. 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Grau de Engenheiro Civil) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, 2003.

DALLA ROSA, F.; THOMÉ, A. Obtenção das características de Resistência e Deformabilidade de um Solo Residual de Basalto através de Ensaio de Placa. XXXI Jornada Sud-Americanas Ingenieria Estructural. In: **Anais do...** CD-Rom, p. 1-12, 2004.

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

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM. **DNER-ME 052: Solo e Agregados Miúdos – determinação da umidade com o emprego do “Speedy”**. 1994.

_____. **DNER-ME085: Material Finamente Pulverizado – determinação da massa específica real**. 04p. 1994.

_____. **DNER-ME 092: Solo – determinação da massa específica aparente in situ**, com emprego do frasco de areia. 1994.

DONATO, M. **Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno**. 2007. Tese (Doutor em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

EDLER, P. **Comportamento de estacas broca compostas de solo-cimento e resíduo de beneficiamento de pedras preciosas a partir de provas de carga estática**. 2011. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2011.

EDLER, P. et al. Comportamento de estacas escavadas compostas de solo-cimento e resíduo de beneficiamento de pedras semi-preciosas a partir de provas de carga estática. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 147-157, 2012.

ENGEPOL. **Manual de Geossintéticos**. 3 ed. Barueri/SP: Engepol Geossintéticos Ltda, 2006. Disponível em: <<http://www.nortene.com.br/resources/pdf/catalogo/manual-geossintetico-cap17.pdf>>. Acesso em: Outubro, 2014.

ENGEPOL. **Manual de Geossintéticos**. 4 ed. Barueri/SP: Engepol Geossintéticos Ltda, 2012. Disponível em: <<http://www.engepol.com/resources/pdf/catalogo/manual-geossinteticos-engepol.pdf>>. Acesso em: Outubro, 2014.

ESTADO RIO GRANDE DO SUL. Assembleia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul. **Decreto nº 38.356**, de 01 de abril de 1998. Aprova o Regulamento da Leinº 9.921, de 27 de julho de 1993, que dispõe sobre a gestão dos resíduos sólidos no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998. Disponível em: <http://www.al.rs.gov.br/legis/M010/M0100099.ASP?Hid_Tipo=TEXT0&Hid_TodasNormas=6792&hTexto=&Hid_IDNorma=6792>. Acesso em: Outubro, 2014.

_____. Assembleia Legislativa. Gabinete de Consultoria Legislativa. Lei nº 12.874, de 20 de dezembro de 2007. Declara o Município de Soledade a Capital das Pedras Preciosas.. Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://www.al.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/12.874.pdf>>. Acesso em: Outubro, 2014.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA). **Resolução nº 073**, de 20 de agosto de 2004. Dispõe sobre a co-disposição de resíduos sólidos industriais em aterros de resíduos sólidos urbanos no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/consema/Res073-04.pdf>>. Acesso em: Outubro, 2014.

FELLENIOUS, B. H. Test loading of piles and new proof testing procedure. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, ASCE, v. 101, n. 9, p. 855-869, 1975.

FERNANDES, L. R. **Estudo da cobertura do lixão “Morávia” da cidade de Medellín, Colômbia**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

FERREIRA, M. de C. **Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Grau de Engenheiro Civil) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, 2010.

GEOSYNTHTECH. **Perfored Geocel**. 2008. Disponível em: <<http://www.geosynthetics.com.cn/newsinfo.asp?ArticleID=588>> Acesso em: Setembro, 2014.

HARTMANN, L. A.; SILVA, J. T. da. **Tecnologias para o setor de gemas, joias e mineração**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2010. 320p.

IBGM. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS. **Cadeia Produtiva**. 2012. Disponível em: <http://www.ibgm.com.br/site/info_cadeia_produtiva.php>. Acesso em: Outubro, 2014.

IGS BRASIL. Associação Brasileira de Geossintéticos. **História**. 2014. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/a-igs-brasil/historia>> Acesso em: Setembro, 2014.

_____. **Os Geossintéticos**. 2014. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/os-geossinteticos>> Acesso em: Setembro, 2014.

_____. **Classificação dos Geossintéticos**. 2014. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/1.pdf>> Acesso em: Setembro, 2014.

_____. **Funções dos Geossintéticos**. 2014. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/2.pdf>> Acesso em: Setembro, 2014.

IPAR, C. E. de A. e L. **Desenvolvimento de matéria-prima para impressão tridimensional a partir de rejeitos gemológicos de ágata**. 2011. Dissertação (Mestre em Design) - Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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

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

KOMETA. **The structure of geocell**. 2001. Disponível em: <<http://www.kometa.by/Geogrid.htm>> Acesso em: Setembro, 2014.

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

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

MEDAUAR, O. (Org.). **Coletânea de Legislação ambiental, Constituição Federal**. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2009.

MENEGHETTI, L. R. R. **Bioremediação na descontaminação do solo residual de basalto contaminado com óleo diesel e biodiesel**. 2007. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2007.

MENEGOTTO, M. L. **Previsão da curva tensão-recalque de ensaios de placa em solo não saturado**. 2004. Tese (Doutor em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MENESES, L. A. de. **Utilização de geocélulas em reforço de solo mole**. 2004. 86f. Dissertação (Mestre em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-04042006-085713/pt-br.php>>. Acesso em: Outubro 2014.

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

MIGUEL, G. D. **Avaliação do desempenho de geocélulas expostas a cargas axiais através de provas de carga**, Trabalho de Conclusão de Curso (Grau de Engenheiro Civil) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

Mpz Aplicações Tecnológicas Ltda, 2015. **G-Cell Suporte de Carga em Solos Moles**. Disponível em: <<http://www.mpz.com.br/geocels.html>> Acesso em: Novembro, 2015.

OBBER. **Catálogo Fortcell Geocélula**, 2014. Disponível em: <http://www.obergeo.com.br/catalogo/catalogo_fortcel.pdf> Acesso em: Novembro, 2014.

PICOLOTTO, G. **Proposta de produção mais limpa aplicada em uma empresa de beneficiamento de pedras preciosas em Soledade – RS**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (título de Engenheiro Ambiental) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013.

PIVOTTO, E. **Utilização de areia de rejeito na produção de argamassa de levantamento e revestimento**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Grau de Engenheiro Civil) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, 2013.

PORTO, U.C.; MELO FILHO, R. S. de.; DUARTE NETO, J. O Desenvolvimento sustentável e as políticas de Sustentabilidade: uma análise do documento “ our common future”. In: MANIGLIA, E. (Org.). **Direito, políticas Públicas e Sustentabilidade**: Temas atuais. São Paulo: Cultura Acadêmica: Editora UNESPE, 2011. p. 29-50.

PRESTO (2008). **Geoweb load support system – Technical overview**. Technical Literature. Presto Products Company, Applleton, 2008. 19 p.

RUSSI, D. **Estudo do comportamento de solos através de ensaios de placa de diferentes diâmetros**. 2007. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

RUVER, C. A. **Estudo de Arrancamento de Fundações em Solos Tratados com Cimento**. 2011. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. de. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: HACHICH, W. et al. **Fundações: teoria e prática**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1998.

THALLAK S. G.; SIREESH, S.; DASH, S. K. Performance of surface footing on geocell-reinforced soft clay beds. **Geotech Geol Eng**, n. 25, p. 509-524, 2007.

THOMÉ A.; **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**. Nova ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

VENDRUSCOLO, M. A. **Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado**. 1996. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

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

VERTEMATTI, J. C. Curso Básico de Geotêxteis. **ABINT**, Jan. 2001, São Paulo. Disponível em: <<http://www.abint.org.br/cbg.html>>. Acesso em: Setembro 2014.

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

YANG, Xiaoming. et al. Accelerated Pavement Testing of Unpaved Roads With Geocell-Reinforced Sand Bases. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 32, p. 95-103, nov. 2011. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/geotexmem>>. Acesso em: 01 jul. 2015.

ZANATTA, A. L. **Plano de desenvolvimento com metodologia participativa APL pedras, gemas e joias**. Passo Fundo: Graffoluz Editora e Indústria Gráfica Ltda, 2014. 120p.

ZHOU, H., WEN, X. Model Studies On Geogrid- or Geocell-Reinforced Sand Cushion On Soft Soil, v. **Geotextiles and Geomembranes**. 26, p. 231-238, dez. 2007. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/geotexmem>>. Acesso em: 01 jul. 2015.