

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MODELAGEM FÍSICA DE COLUNAS GRANULARES
COMPACTADAS DE RCC PARCIALMENTE REFORÇADAS COM
GEOSINTÉTICOS

JORDAN LOPES ALBINO

São Carlos
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MODELAGEM FÍSICA DE COLUNAS GRANULARES
COMPACTADAS DE RCC PARCIALMENTE REFORÇADAS COM
GEOSINTÉTICOS

JORDAN LOPES ALBINO

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Linha de Pesquisa: Estudo e desenvolvimento de sistemas de infraestrutura geotécnica

Orientador: Prof. Dr. Fernando H. M. Portelinha

Co-orientador: Prof. Dr. Tales M. de Oliveira

São Carlos
2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Jordan Lopes Albino, realizada em 14/03/2019:

Prof. Dr. Fernando Henrique Martins Portelinha
UFSCar

Prof. Dr. Ennio Marques Palmeira
UnB

Profa. Dra. Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha
EESC/USP

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Ennio Marques Palmeira e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Prof. Dr. Fernando Henrique Martins Portelinha

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar forças para conseguir chegar até o fim. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos pelo suporte técnico, instalações e pelo conhecimento técnico repassado pelo corpo docente. Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando H. M. Portelinha, pelo empenho, dedicação, atenção, orientação, confiança e conhecimento necessário para o desenvolvimento do trabalho. Agradeço também pelas lições profissionais e pessoais transmitidas durante nosso convívio.

Ao técnico do laboratório de geotecnia Sidnei Muzetti (*In memoriam*), que me ajudou inestimavelmente desde meu primeiro dia no laboratório. Descanse em paz. Aos amigos e companheiros de trabalho Marcão e Fábio, pela dedicação e pelo esforço em me ajudar.

Aos meus pais Rildo e Marta e ao meu irmão Ronan, pelo amor incondicional e suporte durante essa importante etapa. À minha afilhada Estela pela compreensão da ausência e pelo carinho. À minha cunhada Leonor, por ser sempre amiga e presente. Aos meus avós pelo apoio, amor e ensinamentos que sempre carreguei.

Ao Prof. Dr. Tales Moreira de Oliveira, Professor da Universidade Federal de São João del Rey, pela colaboração científica na pesquisa. Aos professores do Departamento de Engenharia Civil, por todo o conhecimento transmitido e pelas lições profissionais desde minha graduação.

Aos colegas de pós-graduação, pela amizade e convivência ao longo desta etapa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa e pelo apoio financeiro dado ao projeto (Processo No. 2017/06295-3). As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do autor e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

RESUMO

ALBINO, Jordan Lopes. **Modelagem Física de Colunas Granulares Compactadas de RCC Parcialmente Reforçadas com Geossintéticos**. 2019, 121p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2019.

Colunas granulares são comumente utilizadas para o melhoramento de solos e geralmente associada a um modelo de fundação direta. O material de preenchimento das colunas, geralmente, trata-se de brita, areia ou uma mistura destes. A substituição desses materiais por Resíduos de Construção Civil (RCC), além de reduzir o impacto ambiental gerado pelos RCC's, pode ainda reduzir o consumo de materiais britados da natureza, e conseqüentemente, o consumo de recursos naturais bem como os impactos de sua exploração. As colunas granulares estão geralmente associadas a técnica de encamisamento total do fuste com uso de geossintéticos a fim de melhorar o confinamento lateral e a rigidez da coluna quanto aplicada na melhoria de solos moles. Em solos argilosos de baixa estabilidade, o encamisamento total pode não ser necessário, considerando a existência das tensões laterais de confinamento em maiores profundidades. Contudo, buscou-se neste estudo avaliar o comportamento mecânico e mecanismos de funcionamento de colunas granulares, utilizadas como melhoramento de subsolo para sapatas, preenchidas com RCC compactado e parcialmente reforçadas com geossintéticos. Foram realizadas provas de carga em placa e em colunas em laboratório em modelo 1g (10:1) (campo: laboratório). Ensaios de prova de cargas em placa e em coluna foram executados nas seguintes condições: (i) solo de fundação; (ii) solo melhorado com coluna de RCC; (iii) solo melhorado com coluna de RCC reforçada com camadas horizontais de geogrelha na região superficial do fuste, com espaçamento de 2,5 cm entre reforços; (iv) solo melhorado com coluna de RCC com encamisamento parcial na região superficial do fuste. Os ensaios foram instrumentados com célula de carga acoplada ao atuador pneumático para medir a carga aplicada ao sistema. O deslocamento vertical foi monitorado com transdutores de deslocamento na placa, enquanto células de tensão total foram instaladas na ponta e no topo das colunas para análise de transferência de carga. Os resultados mostram que a utilização de colunas granulares com RCC reduziu significativamente os níveis de deslocamento do sistema coluna-placa e também melhorou a capacidade de suporte do solo, pois quando a coluna foi solicitada, os agregados se rearranjaram e esse rearranjo ocasionou em uma densificação no solo da região, melhorando com isso a rigidez do sistema. Para o sistema com a utilização de encamisamento parcial da coluna com geotêxtil, obteve-se uma eficiência melhor quanto à redução dos deslocamentos verticais comparado às outras configurações de colunas avaliadas no trabalho. No caso do encamisamento, o geossintético atribui ao fuste da coluna o confinamento lateral necessário para que a coluna não se deforme lateralmente melhorando, conseqüentemente, a rigidez do sistema. Entre o sistema com e sem reforço de geogrelha, não foi observada uma melhoria significativa da capacidade de suporte, mas sim da rigidez do sistema solo-coluna. O estudo mostrou que a utilização das colunas granulares com RCC como elemento de melhoramento de solo pode ser muito benéfica na redução dos deslocamentos, principalmente quando da utilização de geossintéticos, mesmo sob efeito de inundação.

Palavras-chave: Colunas Granulares Compactadas, Geogrelha, Resíduo de Construção Civil, Modelo Físico.

ABSTRACT

ALBINO, Jordan Lopes. **Physical Modeling of Compressed Granular Columns Partially Reinforced RCC with Geosynthetics**. 2019, 121p. Master's Dissertation. Postgraduate Program in Civil Engineering. Federal University of São Carlos, São Carlos, SP, 2019.

Granular Columns have been intensively used as soil improvement for spread footings, embankments and other applications. The filling material of columns is generally crushed stone or sand. However, replacing these natural materials for construction-recycled wastes would provide a sustainable uses for this this material without losing technical benefits provided by natural filling material. In soft soils, geosynthetics have been applied as encasement of granular columns improving lateral confinement and, consequently, the stiffness and bearing capacity. Most of studies in literature involving geosynthetic-encased columns are limited for improvement of soft soils, whereas limited are the applications in cohesive soils with low bearing capacity. Therefore, this study aims to evaluate the mechanical and geotechnical behavior of construction waste granular columns reinforced with geosynthetics used as ground improvement of shallow foundations in a low strength cohesive soil. In order to provide viability of this technique, it was evaluate the mechanical behavior of granular columns partially reinforced with geosynthetics as encasement and as internally layered reinforcements. The study was based on load plate tests of small-scale 1-g physical models constructed in laboratory (10:1). The simulated foundation soil used in this research was a sandy-clay material with relatively low shear strength and stiffness. The column length was 40 cm with pre-compacted diameter of 5.5 cm. The steel plate was 20 cm in diameter and 3 cm thickness. Four load plate tests were performed: (i) on the foundation soil; (ii) on the soil improved with unreinforced granular column; (iii) on layered reinforced geogrid granular column; (iv) on the partially encased column. For the layered reinforced column, geogrids were positioned spaced each 2.5 cm from the top of the column, comprising in four layers of reinforcements. In the case of the partially encased columns, the geotextile covered the length of 11 cm (2D) from the top of the column. The tests were instrumented with load cell, displacement transducers for settlement monitoring, and earth pressure cells positioned at the base and at the top of the column for assessment of load transference during tests. Results demonstrated that the use of granular columns with recycled wastes reduced vertical displacement and improved bearing capacity of soil. The use geogrid layered reinforcement columns led to a significant improvement on the stiffness of foundation soil, although not changing the bearing capacity. On the other hand, the use of the partially encasement columns was found to improve both bearing capacity and stiffness. The study demonstrate the viability of using of recycled construction waste columns as a soil reinforcement providing sustainable and technical benefits mainly when using geosynthetics reinforcements.

Keywords: Geosynthetic, Granular columns, Construction and Demolition Waste, Encased Columns, physical modelling.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1. Colunas Granulares em solos de baixa capacidade de carga	18
2.2. Colunas Granulares em solos moles	28
2.3. Colunas TIPO RAP	31
2.4. Uso de Geossintéticos em fundações.....	36
2.5. Características Geotécnicas de RCC	42
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	46
3.1. Câmara de Ensaio e Pórtico de Reação	46
3.1.1. Análise do efeito de borda.....	47
3.2. Solo de fundação	48
3.3. Material de preenchimento (RCC).....	52
3.4. Geossintéticos	57
3.5. Preparação dos Ensaios.....	60
3.6. Instrumentação	64
3.7. Programa de ensaios.....	65
3.8. Execução de ensaio.....	69
3.9. Métodos de extrapolação de curva carga versus deslocamento vertical e previsão da capacidade de carga de colunas e solos melhorados para fundação em sapatas.....	71
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1. Análise das provas de cargas em placa.....	73
4.1.1. Métodos de extrapolação da curva de prova de carga em placa	76
4.1.2. Análise da transferência de carga da coluna para o solo ao longo da profundidade	77

4.1.3. Módulo de rigidez, Taxa de Carregamento (RC), Razão de concentração de tensão (RCT)	82
4.1.4. Exumação das colunas após prova de carga em placa	86
4.2. Análise das provas de carga estática nas colunas isoladas comparadas às placas.....	87
4.2.1. Métodos de extrapolação da curva de prova de carga em colunas	91
4.2.2. Análise da transferência de carga do topo das colunas para a ponta das colunas.....	92
4.2.3. Módulo de rigidez das colunas.....	94
4.2.4. Exumação das colunas após provas de cargas	95
4.3. Análise da instalação das colunas	97
4.4. Provas de cargas em placa em ensaios inundados.....	99
4.4.1. Métodos de extrapolação da curva de prova de carga em colunas	101
4.4.2. Análise da transferência de carga do topo das colunas para a ponta das colunas.....	102
4.4.3. Módulo de rigidez do sistema inundado	104
4.4.4 Exumação da coluna após prova de carga	106
4.5. Previsão de capacidade de carga.....	107
4.5.1. Previsão da capacidade de carga do solo melhorado.....	107
4.5.2. Previsão da capacidade de carga das colunas	107
5. CONCLUSÕES.....	109
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	113
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Prova de carga para o sistema	21
Figura 2 – Efeito do encamisamento de colunas granulares em solos colapsíveis ..	24
Figura 3 – Gráfico Tensão <i>versus</i> recalque para provas de cargas inundadas.....	26
Figura 4 - (a) Coluna rígida solo coesivo; (b) coluna rígida solo granular; (c) coluna flexível solo coesivo; (d) coluna flexível solo granular	27
Figura 5 - Tensão axial limitante em relação à espessura de camada de solo mole no topo da coluna.....	29
Figura 6 – Processo executivo RAP	32
Figura 7 – Resultados dos estudos de Stuedlein e Holtz (2012): (a) Comparação dos métodos de compactação e graduação do material; (b) Tensão de ruptura em relação ao comprimento da coluna e graduação do agregado; (c) Tensão de ruptura quanto ao método utilizado e comprimento da coluna	33
Figura 8 – Abaulamento em coluna RAP singular	35
Figura 9 – Taxa de eficiência (LR) em função do recalque para diâmetro igual a (a) 60 mm, (b) 80 mm e (c) 100 mm	39
Figura 10 – Abaulamento para: (a) coluna de areia; (b) coluna com geotêxtil de menor módulo de rigidez (Geo1) transversal; (c) coluna com geotêxtil de menor módulo de rigidez (Geo1) longitudinal; (d) coluna com geotêxtil de módulo de rigidez mediano (Geo2) transversal; (e) coluna com geotêxtil de módulo de rigidez mediano (Geo2) longitudinal; (f) coluna com geotêxtil de maior módulo de rigidez (Geo3) longitudinal	40
Figura 11 – Esquema de (a) Coluna de areia (b) Encamisamento da coluna (c) Reforço com camadas horizontais de geossintético	41
Figura 12 – (a) Pórtico de reação e câmara de ensaio; (b) Celulose revestindo as paredes da câmara e antiaderente; (c) Sistema de aplicação de cargas	47
Figura 13 – Análise do efeito de borda no <i>PlaxisV8</i> [®]	48
Figura 14 – Cisalhamento direto utilizado no experimento	50
Figura 15 – (a) Curvas Tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento do ensaio de cisalhamento direto não inundado; (b) Variação do volume dos corpos de prova durante o cisalhamento; (c) Curvas Tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento do ensaio de cisalhamento direto inundado; (d) Variação do volume dos corpos de prova durante o cisalhamento inundado	51

Figura 16 – Envoltória de tensões de cisalhamento direto em solo não inundado e inundado	51
Figura 17 – (a) Coleta de material para composição gravimétrica e utilização na pesquisa; (b) Separação tátil-visual	52
Figura 18 – (a) RCC utilizado na pesquisa; (b) Composição gravimétrica do RCC..	53
Figura 19 – Curvas granulométricas para o RCC	54
Figura 20 – Curva de compactação do RCC	55
Figura 21 – (a) Tensão cisalhante no RCC não inundado;. (b) variação volumétrica por deslocamento no RCC não inundado;. (c) Tensão cisalhante no RCC inundado;. (d) variação volumétrica por deslocamento no RCC inundado	56
Figura 22 - Envoltória de tensões do RCC para cisalhamento direto	56
Figura 23 – Geossintéticos usados na pesquisa: (a) geogrelha "tela fachadeira"; (b) geotextil não-tecido para encamisamento da coluna	58
Figura 24 – Ensaio de tração realizados no DEMA/UFSCar: (a) geogrelha; (b) geotêxtil	59
Figura 25 – Curva média do ensaio de tração: (a) geogrelha; (b) geotêxtil	59
Figura 26 – Preparação do solo: (a) Peneiramento do solo; (b) separação do solo por lotes em sacos plásticos; (c) marcas de 5 centímetros para facilitar e controlar a compactação do solo	60
Figura 27 – Controle de compactação: (a) Cilindro de aferição de compactação; (b) Umidade após compactação – método da frigideira	61
Figura 28 – (a) Perfuração do solo; (b) Inserção do RCC na coluna; (c) Compactação das camadas; (d) Finalização com camada de areia e célula de tensão total no topo da coluna.....	63
Figura 29 – Curvas de calibração das células de tensão total: (a) Ponta da coluna de 200 kPa; (b) Topo da coluna de 500 kPa; (c) Calibração célula de carga 20kN; (d) Calibração do transdutor de deslocamento (LVDT)	65
Figura 30 - (a) Instrumentação no solo; (b) Instrumentação na coluna sem geossintético; (c) Instrumentação na coluna com geogrelha; (d) instrumentação na coluna encamisada com geotêxtil não tecido	67
Figura 31 – (a) Prova de carga em coluna sem reforço geossintético; (b) Prova de carga em coluna com reforço em geogrelha na horizontal; (c) Prova de carga em coluna com encamisamento parcial em geotêxtil não tecido; (d) Análise do efeito de instalação das colunas	68

Figura 32 – Estágios de carregamento para os respectivos ensaios de placa não inundados.....	70
Figura 33 – Estágios de carregamento para os respectivos ensaios em colunas	70
Figura 34 – Estágios de Carregamento para os ensaios em placa em condição inundada	71
Figura 35 - Tensão aplicada à placa <i>versus</i> tensão a uma profundidade de 2B da prova de carga em placa no solo de fundação.....	73
Figura 36 – Gráfico Tensão <i>versus</i> Deslocamento Vertical para as Provas de Carga em placa não inundado (a) solo; (b) solo e coluna RCC; (c) solo, coluna RCC e geogrelha na horizontal; (d) solo, coluna RCC encamisada	74
Figura 37 – Cargas medidas no topo das colunas em provas de cargas não inundadas	78
Figura 38 – Transferência de Carga no sistema placa-coluna RCC.....	80
Figura 39 - Transferência de Carga no sistema placa-coluna RCC e geogrelha na horizontal.....	80
Figura 40 - Transferência de Carga no sistema placa-coluna RCC e encamisamento parcial.....	81
Figura 41 - Módulo de rigidez da placa para o solo natural, solo com coluna RCC, solo com coluna RCC e geogrelha na horizontal e solo com coluna RCC encamisada com geotêxtil não-tecido	83
Figura 42 – Razão de Carregamento (RC) <i>versus</i> deslocamento	84
Figura 43 - Razão de Concentração de Tensão <i>versus</i> deslocamento	85
Figura 44 - Exumação das colunas (a) sem reforço (b) com reforço horizontal (c) encamisamento com geotêxtil não tecido	87
Figura 45 – Curva de carga no topo da coluna <i>versus</i> deslocamento vertical para as colunas; (a) RCC (b) RCC + GGH; (c) RCC encamisada	88
Figura 46 – Cargas no topo e na ponta das colunas: (a) RCC; (b) RCC + GGH; (c) RCC Encamisada	93
Figura 47 – Módulo de rigidez das colunas isoladas	94
Figura 48 – Exumação das colunas: (a) RCC; (b) RCC + GGH; (c) RCC + GTNT Enc.	95
Figura 49 – Retirada das amostras indeformadas.....	96
Figura 50 – Exumação das colunas após instalação: (a) coluna RCC; (b) coluna RCC + GGH; (c) coluna RCC encamisada	98

Figura 51 – Curvas de tensão <i>versus</i> deslocamento vertical para as condições inundada e não inundada: (a) solo de fundação; (b) coluna RCC encamisada	100
Figura 52 – Transferência de carga da placa para a coluna no ensaio inundado ..	103
Figura 53 – Comparativo entre tensões na coluna nas condições inundada e não inundada para (a) topo da coluna RCC encamisada; (b) Ponta da Coluna RCC encamisada.....	104
Figura 54 – Módulo de rigidez do sistema para as condições inundada e não inundada.....	105
Figura 55 – Coluna exumada após prova de carga na condição inundada.....	106

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de ruptura em colunas granulares.....	19
Tabela 2 - Resumo das propriedades características do solo de fundação.....	49
Tabela 3 - Propriedades dos geossintéticos em miniatura e escala real	60
Tabela 4 – Métodos de estimativa de capacidade de carga	72
Tabela 5 – Carga de Ruptura local pelos métodos de interpretação em kN.....	76
Tabela 6 – Carga de ruptura para as três colunas.....	91
Tabela 7 – Grau de compactação por camada analisada.....	96
Tabela 8 – Grau de compactação por camada devido ao efeito de instalação.....	98
Tabela 9 – Métodos de interpretação das provas de cargas inundadas	102
Tabela 10 – Previsão da capacidade de carga	107
Tabela 11 – Previsão de capacidade de carga das colunas.....	108

1. INTRODUÇÃO

A incessante produção de Resíduos de Construção Civil (RCC), aliada ao exaurimento de locais para a disposição do material, tem sido alvo de grande preocupação quanto ao impacto ambiental que este resíduo pode causar. Por outro lado, a intensa exploração de reservas de recursos naturais com o intuito de extrair matéria prima para a construção civil, também gera um impacto ambiental de importante relevância. Atualmente, esforços tem sido dedicados a reusar o RCC como material de engenharia, em substituição aos materiais naturais, desde que atenda tanto ao viés técnico como o sustentável.

Vieira e Pereira (2015) revisaram a literatura sobre o uso de RCC na engenharia geotécnica e relataram que esse resíduo pode ter bom resultado se devidamente aplicado como sub-base de pavimentos. Ainda, mostraram que, se devidamente separados e compactados, podem ser utilizados como material de aterros de estruturas de solo reforçado. Outra aplicação dos resíduos que se faz presente na engenharia geotécnica é como material de preenchimento para colunas granulares compactadas (ARAÚJO JÚNIOR, 2010; ALKHORSHID, 2017).

Outros materiais que também vêm ganhando espaço na engenharia geotécnica são os geossintéticos. Esses materiais têm sido aplicados como reforços em diferentes soluções geotécnicas tais como estruturas de contenções, reconstituição de taludes, aterros sobre solos moles e estaqueados, proteção de dutos enterrados e confinamento de colunas em solos moles (ALEXIEW et al., 2016; RAVEENDRAN; THOMAS, 2017; MIRANDA et al., 2017; SALEM et al., 2018; FONSECA et al., 2018).

Dentre os diferentes geossintéticos existentes no mercado, as geogrelhas são muito utilizadas em muros de contenção, pois oferecem uma melhor interação com o solo devido à sua geometria (AVESANI NETO e PORTELINHA, 2016). Obras de dutos enterrados também utilizam geogrelhas para atenuar as tensões nas paredes dos dutos, devido à boa resistência de interface solo-geogrelha apresentada pelo compósito (PORTELINHA et al., 2016; RAVEENDRAN e THOMAS, 2017). Geotêxteis tecidos são empregados em muros de contenção por apresentarem boa rigidez e resistência à tração (PORTELINHA et al., 2014). Uma opção de utilização de geotêxtil não-tecido na engenharia geotécnica é em drenagens de barragens pois o tapete

drenante diminui as deformações na face do talude, assim como os recalques superficiais (SARAN e VISWANADHAM, 2018). Não obstante, geotêxtil não-tecido também pode ser empregado em muro de contenções (LU et al., 2014; COSTA et al., 2016).

Em aterros sobre solos moles, comumente utilizam-se colunas granulares como melhoramento de fundação. Essas colunas utilizam geotêxteis no encamisamento do fuste e esse reforço se faz necessário porque, além de conferir um confinamento lateral e rigidez, diminui também o consumo do material de preenchimento da coluna. Outro fato importante é que, devido ao encamisamento da coluna, a deformação lateral (abaulamento) pode ser amenizada (HONG et al., 2016). O abaulamento é o principal modo de ruptura para colunas que respeitam a ordem de grandeza de $L \geq 4D$ (L é o comprimento da coluna e D é o diâmetro da coluna). O geotêxtil tecido também possibilita que a coluna de brita exerça uma função de dreno vertical, acelerando o processo de adensamento do solo. Apesar das colunas encamisadas serem muito aplicadas a solos moles, há ainda a necessidade de se verificar a aplicabilidade da técnica em outros tipos de solos, tais como solos argilosos de baixa capacidade de carga, porém não necessariamente moles. Dos estudos existentes na literatura dcolumam-se os conduzidos por Barksdale e Bachus (1983), Aiban (2002), Elshazly et al. (2007), Ahmad (2008), Sadek e Shahrour (2008), Jadid (2013) e Noui e Bouzid (2017).

As colunas granulares também podem se romper por cisalhamento, principalmente superficial, atingindo o topo da coluna (BARKSDALE e BACHUS, 1983). As geogrelhas, nesse caso, podem ser empregadas na horizontal ao longo do comprimento da coluna para amenizar os efeitos do cisalhamento, principalmente, no topo da coluna, diminuir o abaulamento, diminuir os níveis de deslocamentos verticais e melhorar a rigidez das colunas (GHAZAVI et al., 2018; HONG et al., 2018).

As colunas granulares de compactação são utilizadas como reforço para solos de baixa capacidade de carga para apoiar fundações superficiais. O mecanismo da compactação dá-se por camadas de compactação dinâmica e, diferentemente de colunas escavadas, a cada camada o solo na região da coluna se densifica, conferindo ao solo uma compactação radial. Tal mecanismo melhora a rigidez do solo circunvizinho, reduz os níveis de deslocamentos verticais e melhora a capacidade de suporte do terreno.

No que tange ao material de preenchimento das colunas, a maioria dos estudos existentes na literatura aplicam materiais granulares naturais (BARKSDALE; BACHUS, 1983; MURUGESAN; RAJAGOPAL, 2006, 2007, 2010; GNIEL; BOUAZZA, 2009; GHAZAVI; NAZARI AFSHAR, 2013; GHAZAVI et al., 2017; GARG et al., 2018; HONG et al., 2019)

Entretanto, escassos são os estudos envolvendo a substituição do material natural de preenchimento da coluna, por resíduos industriais, de mineração ou de construção (ARAÚJO JÚNIOR, 2010; FENG et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2016; ALKHORSHID, 2017; MEDEIROS-JUNIOR et al., 2017)

Entende-se que as peculiaridades de comportamento geotécnico de RCC bem como suas limitações para aplicações mecânicas justificam a falta de estudos na literatura envolvendo RCC's em colunas. Nesse contexto, o presente trabalho sugere a aplicação de RCC's em colunas granulares reforçadas com geossintéticos como uma técnica de melhoramento de solos para fundações superficiais em edificações de pequeno e médio porte com o uso de colunas granulares. Tal avaliação foi conduzida em laboratório por meio de modelos físicos 1g em escala 1:10 (laboratório: campo). Em termos de projeto, a pesquisa avaliou diferentes métodos de previsão usados em colunas granulares convencionais, mostrando assim a aderência dos resultados experimentais da presente pesquisa.

Pretendeu-se com o presente trabalho compreender os mecanismos de funcionamento das colunas sugeridas, os mecanismos de transferência de carga entre sapata, coluna e solo, e, principalmente, a função do geossintético na melhoria da capacidade de carga. Pretende-se dessa forma, viabilizar a utilização dos RCC em colunas granulares, principalmente, em solos argilosos baixa/média resistência.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral estudar o uso de resíduo de construção civil (RCC) como material de preenchimento em colunas granulares compactadas reforçadas com geossintéticos para melhoramento de solos, em modelo 1-g (1:10). Para tal, avaliou-se a aplicabilidade de geogrelhas como camadas de reforços horizontais ao longo do fuste na região do topo da coluna, e encamisamento parcial das colunas com uso de geotêxteis. Especificamente, este trabalho buscou:

- Avaliar a capacidade de carga em placa e na coluna dos sistemas com o uso de colunas granulares compactadas com RCC com e sem os reforços geossintéticos (geogrelha e geotêxtil não tecido);
- Identificar os mecanismos de funcionamento das colunas granulares reforçadas com geossintéticos;
- Avaliar a eficiência do sistema ao usar reforços horizontais e encamisamento parcial;
- Verificar o mecanismo de transferência de carga entre coluna e solo, quando submetidos a um carregamento axial (vertical) em placa;
- Verificar a influência da compactação na melhoria radial do solo de fundação;
- Verificar a mobilização de tensões das colunas com e sem reforços geossintéticos;
- Avaliar os métodos de previsão de capacidade de carga de colunas granulares e solo melhorado;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. COLUNAS GRANULARES EM SOLOS DE BAIXA CAPACIDADE DE CARGA

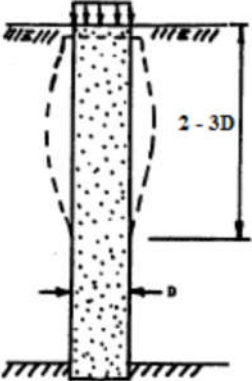
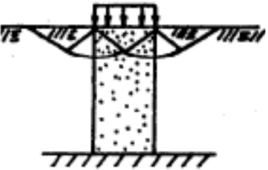
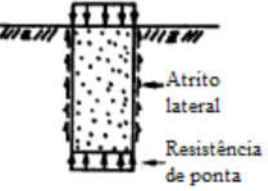
O melhoramento de solos, por meio de colunas granulares, é bem difundido quando se trata de fundações para aterros, estruturas ou silos sob solos com baixa capacidade de carga, ou solos moles (CASTRO, 2014). No início do século XIX, esta técnica já havia sido utilizada para substituir colunas de madeira que, devido a flutuação do nível d'água do lençol freático, se degradavam com o tempo, comprometendo a estrutura. Entretanto, o uso contínuo de colunas granulares só ganhou espaço no início de 1950 (BARKSDALE e BACHUS, 1983).

Levando-se em consideração os métodos executivos de colunas granulares, a vibro-substituição (processo úmido) e vibro-deslocamento (processo seco) são os mais comumente utilizados na prática. A construção das colunas granulares envolve a substituição parcial do solo pelos elementos de melhoria, geralmente atravessando todo o material frágil. Nesse contexto, a técnica nomeada vibro-substituição ou processo úmido, trata-se de quando, no processo executivo, for utilizado o jateamento de água para o avanço da coluna. Nesse método, o trado escava o solo, retirando o solo do furo e o agregado da coluna é inserido e compactado por método de vibração. Por outro lado, o vibro-deslocamento ou processo seco, dá-se quando o processo de avanço das colunas no solo parcialmente saturado é realizado sem o uso de jato d'água. No vibro-deslocamento o martelo insere o agregado da coluna no solo, por vibração, porém não há um furo previamente escavado (BARKSDALE e BACHUS, 1983).

Mesmo com o aumento do uso da técnica no início da década de 50, poucos trabalhos relacionados aos métodos de execução foram desenvolvidos na época. Barksdale e Bachus (1983) desenvolveram um trabalho mostrando o projeto e construção de colunas granulares para reforço de solos coesivos e areias siltosas. Dentro desse estudo foram mostrados métodos de construção das colunas granulares, desempenho do sistema, viabilidade de aplicação, mecanismos de ruptura, análise da capacidade de carga, histórico de caso, dentre outros. Os autores foram os primeiros a descrever os modos de ruptura das colunas granulares, estas podendo romper-se em três diferentes modos: abaulamento, que é causado devido a

uma deformação lateral excessiva (abaulamento); cisalhamento, causado pelo cisalhamento do material da coluna juntamente com o solo, geralmente na superfície; e deslocamento vertical excessivo (recalque vertical excessivo). A Tabela 1 descreve os possíveis modos de ruptura de acordo com os autores.

Tabela 1 - Tipos de ruptura em colunas granulares

	<p>Ruptura por expansão lateral excessiva (<i>bulging</i>): Ruptura mais comum em colunas constituídas de material granular de grandes comprimentos, com cota de assentamento em substratos rígidos. Ocorre quando a coluna possui resistência ao confinamento lateral insuficiente por parte do solo envolvente. Esta ruptura tende ocorrer numa profundidade de até 4 vezes o diâmetro da coluna (HUGHES e WITHERS, 1974) . Este é o mecanismo de ruptura mais frequente de ser encontrado na prática.</p>
	<p>Ruptura por cisalhamento: É mais comum de acontecer em colunas de comprimento reduzido e assentadas em camada rígida. A ruptura gera um efeito normalmente no topo da coluna.</p>
	<p>Ruptura por assentamento vertical excessivo: Quando se tem colunas na condição de flutuantes com reduzido comprimento ou com comprimento insuficiente para suportar por atrito lateral a carga solicitante tem-se os critérios que definem a ruptura por recalque vertical excessivo, desde que exista uma insuficiente capacidade resistente da ponta no substrato. A coluna sofre, nestas condições, deformações verticais, ou seja, “afunda-se no solo”, antes de ocorrer a ruptura por expansão lateral.</p>

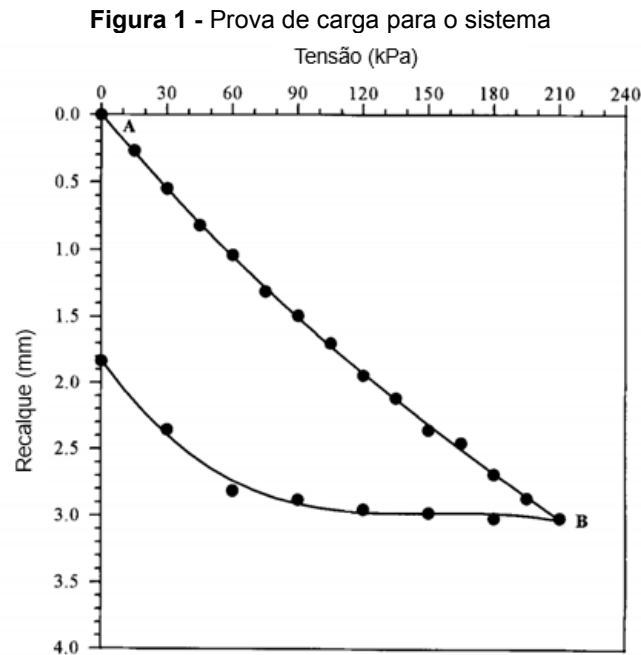
Fonte: adaptado de Barksdale e Bachus (1983).

Vale ressaltar que os tipos de ruptura mencionados na Tabela 1 ocorreram para colunas granulares inseridas em solos coesivos ou arenosos com baixa/média resistência, pelos métodos construtivos de vibro-substituição ou vibro-deslocamento, com carregamento aplicado na área da seção transversal das colunas. A aplicação de grupos de colunas é mais comumente utilizada para obras sob solos moles e nesses casos a combinação dos modos de ruptura mencionados na Tabela 1 se faz presente (MUIR WOOD et al., 2000; GHAZAVI e NAZARI AFSHAR, 2013).

Em solos coesivos ou arenosos, as colunas granulares desempenham a função de melhoramento da capacidade de carga do solo e redução de recalques, como visto por Barksdale e Bachus (1983). Contudo, não somente estes autores descreveram a aplicabilidade de colunas granulares à este tipo de solo, mas também vários autores explicaram os mecanismos presentes neste sistema de reforço de diferentes formas (AIBAN, 2002; ELSHAZLY et al., 2007; AHMAD, 2008; SADEK e SHAHROUR, 2008; JADID, 2013; NOUI e BOUZID, 2017). A região da costa litorânea da Arábia Saudita, por exemplo, constitui-se de uma areia fofa com pouco silte e compactidade fofa a muito fofa com presença de nível d'água quase superficial. Por isso, com o intuito de reduzir os recalques, melhorar a capacidade de suporte deste solo e acelerar o processo de adensamento, a técnica de reforço de subsolo com colunas granulares tornou-se muito empregada na região (AIBAN, 2002; AHMAD, 2008).

Aiban (2002) avaliou a eficiência do espaçamento entre unidades de colunas granulares executadas como reforço de uma casa de bombas na região do Golfo da Arábia Saudita. O solo dessa região, segundo o autor, consistiu de uma areia siltosa com densidade média e uma camada entre 2 e 4 m do mesmo material, porém com uma densidade menor. A instalação das colunas foi realizada pelo método da vibro-substituição com comprimento total de 6 metros e diâmetro de 90 cm. O espaçamento avaliado para essas colunas foi de 1,5m de centro a centro. O material utilizado como preenchimento granular foi a escória de aciaria com partículas entre 6 mm e 75 mm. Antes e após a instalação das colunas foram realizados ensaios de SPT, CPT e de placa para avaliar o desempenho do reforço adotado. Os ensaios de CPT realizados mostraram um aumento em até quatro vezes no q_u em algumas camadas. Nenhum melhoramento foi observado para camadas abaixo da ponta da coluna. Segundo o autor, houve um aumento no valor de q_u a uma distância de até 300 mm em relação à periferia da coluna devido a densificação do solo pela compactação. Relata-se ainda que a curva carga-recalque da coluna granular (Figura 1) apresentou um

comportamento que não condiz com o comportamento de solos, pois o segmento AB é linear e crescente. Isso pode ter sido um indicio de que a placa utilizada não foi suficientemente rígida para o nível de tensão aplicado. Ainda assim, o autor mostrou que a aplicação da técnica resultou em um recalque menor que 2 mm para a tensão de projeto esperada de 100 kPa, mostrando um bom desempenho da aplicação da técnica.



Fonte: Adaptado de Aiban (2002).

Ahmad (2008) utilizando-se da mesma região de estudo de Aiban (2002), retratou o melhoramento de solos da costa da Arábia Saudita, com colunas granulares, por meio de um estudo de caso. O projeto baseou-se na premissa de 100 kPa de capacidade de carga do solo, com recalques aceitáveis de 25 mm para sapatas isoladas e corridas e 50 mm para radiers. As colunas variaram entre 10 e 11 m de profundidade com um diâmetro nominal de 90 cm. O material granular de preenchimento aplicado à coluna apresentou um ângulo de atrito 40° e grãos com diâmetro variando entre 25 e 100 mm. Os espaçamentos entre as colunas variaram de acordo com o tipo de fundação e foram consideradas malhas triangulares e retangulares de disposição de colunas para atingir os 100 kPa de capacidade de carga. Ahmad (2008) realizou ensaios de CPT, antes e após a execução das colunas, para quantificar a melhoria do solo e os mesmos comprovaram a melhoria do subsolo

diante de seus resultados. Ensaios de prova de carga em escala real também foram realizados para verificar se foi alcançada a capacidade de carga pretendida. O resultado da prova de carga revelou uma capacidade de carga 1,5 vezes maior do que a pretendida, confirmando a eficácia da técnica já reportada por Aiban (2002).

Elshazly et al. (2007) também estudaram a técnica de colunas granulares aplicadas a solos com baixa capacidade de carga. Os autores analisaram os recalques de fundações circulares, em escala real, sobre solo de fundação reforçado com colunas granulares. Os autores revelaram em seu estudo que o método de vibro-deslocamento é mais efetivo na execução das colunas uma vez que as vibrações e deslocamentos laterais densificam e consolidam o solo. Esse efeito dos deslocamentos causa um aumento da tensão lateral e, conseqüentemente, um aumento no valor do empuxo passivo (K_0) após a instalação da coluna.

Foram consideradas colunas granulares com comprimento entre 5 e 50 m. Uma razão de substituição de área de 29% foi utilizada e também foram consideradas diferentes relações entre o diâmetro da fundação sobre o comprimento das colunas. Como resultado, os autores revelaram que houve uma melhora nos níveis de recalque considerando as fundações com dimensões maiores. Por outro lado, a melhoria dos níveis de recalque diminuiu com o aumento da área da fundação em relação a área da coluna. As melhorias de comportamento observadas foram atribuídas ao processo executivo por vibro-deslocamento.

Mesmo existindo estudos sobre o melhoramento de solos sob fundações diretas em solos de baixa capacidade de suporte, poucos estudos envolvendo o efeito da excentricidade de cargas nessas fundações sob solos melhorados com colunas granulares haviam sido desenvolvidos. Por isso, Sadek e Shahrour (2008) utilizaram uma modelagem em elementos finitos, em três dimensões, para avaliar o efeito da excentricidade de carga em uma sapata assente em um solo melhorado por uma coluna granular. A sapata quadrada possuiu 80 cm de lado e a profundidade de assentamento foi de 30 cm, enquanto o diâmetro da coluna e seu comprimento foram de 70 cm e 7 m, respectivamente. O solo era composto por uma camada superficial de 5 m de profundidade de uma argila siltosa, seguida de 2 m de areia siltosa e, por fim, 3 m de uma camada de pedregulhos com areia. A resistência da camada superficial foi variada a fim de se analisar a influência da resistência lateral no sistema coluna-solo. O valor do carregamento foi igual para as duas situações, com a magnitude de 250 kN aplicados na vertical.

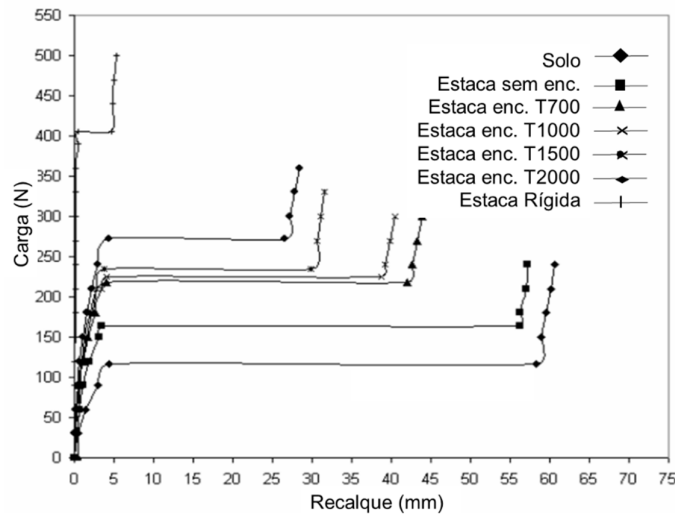
Para a camada superficial mais resistente, observou-se um deslocamento vertical de 4 cm, enquanto para a camada menos resistente, 14 cm, o que é um nível de recalque inaceitável em termos práticos. O deslocamento excessivo pode ser explicado pelo baixo confinamento lateral proporcionado pelo solo superficial menos resistente. Esta falta de confinamento lateral por parte do solo gerou uma deformação lateral excessiva (abaulamento) no topo da coluna, refletindo em um deslocamento maior do sistema. Quanto ao sistema com excentricidade, os autores concluíram que uma excentricidade de até 20 cm não afetou a resposta do sistema coluna-solo de maneira significativa.

Apesar da técnica de reforço do subsolo com o emprego de colunas granulares parecer um método aplicável a todo e qualquer tipo de solo, este também apresenta suas limitações. Ayadat et al. (2008) analisaram o modo de ruptura de colunas granulares assentes em solos colapsíveis por meio de ensaios de laboratório. Os ensaios foram realizados em escala reduzida considerando colunas com diâmetro igual a 23 mm e os comprimentos variados entre 250 (penetração parcial) e 410 mm (penetração total da coluna). Todos os ensaios foram realizados com uma tensão vertical de 100 kPa em toda a câmara, além da tensão axial aplicada somente à área da coluna. Os resultados mostraram que a coluna granular de melhoramento não mostrou melhora nos níveis de recalque no processo de colapso do solo. Por outro lado, a capacidade de carga para o solo em seu estado seco foi melhorada devido à presença da coluna. Porém, essa melhora foi drasticamente reduzida quando ocorreu a inundação. Por meio de análise numérica, os autores revelaram que, durante a inundação de um elemento de solo colapsível, a pressão lateral ao redor desse elemento diminuiu e houve uma redução drástica de volume resultado da deformação axial, assim como lateral.

As principais diferenças da inserção das colunas granulares em solos não colapsíveis e solos colapsíveis foram notadas como sendo as diferenças no estado de tensões presentes e diferença em volume. Nos solos colapsíveis houve uma grande perda de tensão horizontal, comprometendo o desempenho do reforço. Encontrou-se que, para as amostras de diâmetros e alturas menores e uma razão de H/D igual a 2, a deformação lateral foi 5 vezes maior que a deformação vertical. Os autores ainda revelaram que um dos modos de controlar a colapsibilidade seria por meio do encamisamento da coluna granular com material geossintético, conferindo à coluna um confinamento lateral, melhorando com isso, sua capacidade de suporte. As curvas

da Figura 2 abaixo ilustram, dentre outros aspectos, o efeito do encamisamento em colunas granulares inseridas em solos colapsíveis.

Figura 2 – Efeito do encamisamento de colunas granulares em solos colapsíveis



Fonte: Adaptado de Ayadat et al. (2008).

Ainda dentro do universo de melhoramento de solos colapsíveis e discordando dos resultados de Ayadat et al. (2008), Araújo et al. (2009) desenvolveram um estudo em laboratório e em campo de colunas granulares encamisadas com geossintéticos. Para tal, os autores utilizaram-se do solo presente na região de Brasília em que o descreve como solo colapsível. Os autores realizaram provas de cargas em colunas granulares, com e sem encamisamento, inseridas em solos colapsíveis variando o tipo de agregado que compõe a coluna e o geossintético. Foram considerados como agregados para a composição das colunas os materiais areia e brita. Quanto aos geossintéticos, para a coluna de areia foi utilizado um geotêxtil tecido, enquanto que para a coluna de brita, uma geogrelha foi utilizada no encamisamento. As colunas possuíam diâmetro de 0,4 m e um comprimento total de 8 m. Quanto aos ensaios de laboratórios, utilizou-se um ensaio triaxial de grandes dimensões no qual as dimensões das amostras foram de 0,3 m de diâmetro e 0,45 m de altura.

Os resultados para as colunas de areia mostraram uma melhoria de capacidade de carga, de 66 a 81% das colunas encamisadas em relação às não encamisadas. A coluna de brita encamisada com geogrelha mostrou uma capacidade de carga entre 4% e 26% em relação à convencional. Uma melhoria menos significativa foi notada para o caso das colunas de brita, pois houve quebra dos grãos de brita no ato da

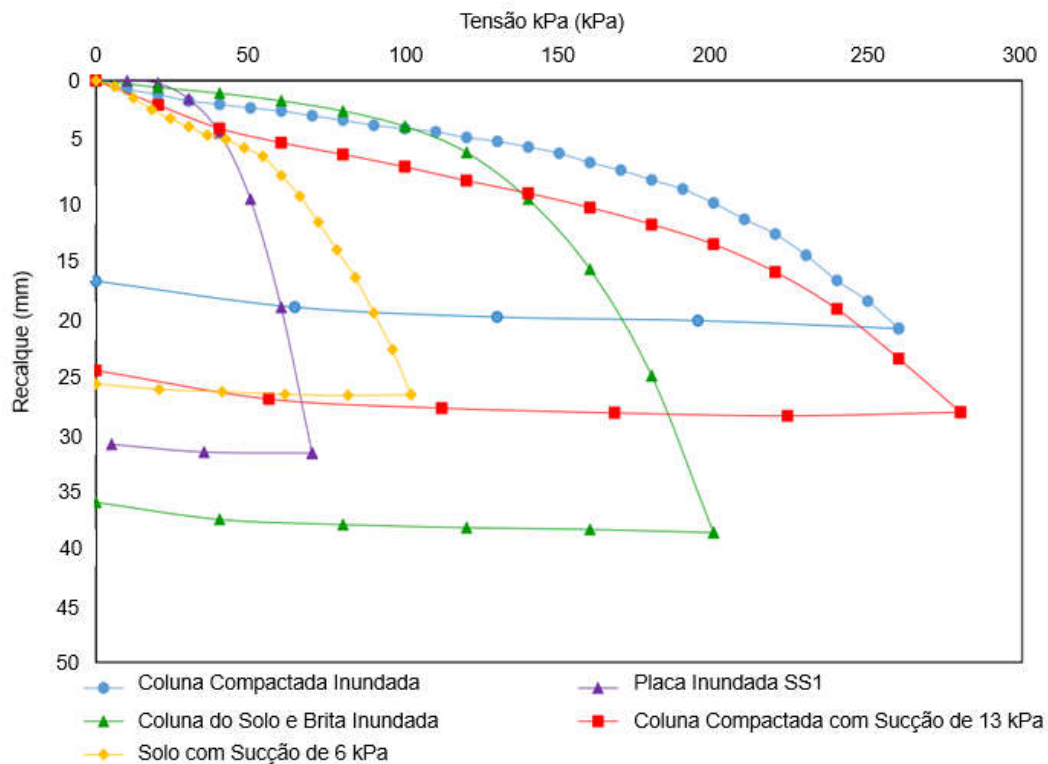
execução da prova de carga, o que fez com que o desempenho dessa coluna fosse pior do que para a coluna de areia encamisada. Os autores avaliaram também o efeito do colapso do solo, devido ao umedecimento da região onde as colunas foram instaladas. Para este efeito de inundação, notou-se uma redução da capacidade de carga para a coluna de areia convencional em até 60%, enquanto que para a mesma coluna encamisada a redução da capacidade de carga foi de 28%, evidenciando assim, a importância da utilização do encamisamento em solos colapsíveis.

Freitas (2016) avaliou uma técnica de melhoria de solos colapsíveis por meio de colunas de solo laterítico compactado, em vez de se utilizar areia ou brita como material de preenchimento. Neste experimento foram realizadas colunas granulares em escala real em um solo colapsível. Utilizou-se de provas de cargas em solo com e sem colunas compactadas, com e sem inundação. Para a execução das colunas em campo a autora utilizou-se do pilão de colunas Strauss, o qual realizou a perfuração do solo por meio de queda livre até a profundidade de 3,5 m, auxiliando na compactação do solo na região do furo. Foram construídas duas colunas de solo compactado e uma de solo e brita compactada. Ao final da perfuração constatou-se um diâmetro de aproximadamente 25 cm para as colunas, antes da compactação. Foram também analisados os efeitos da instalação ao longo do raio das colunas. Os resultados de Freitas (2016) mostraram que, para o efeito de instalação, as colunas de solo compactado surtiram efeito em até uma distância de $3,2D$ (3,2 vezes o diâmetro da coluna) em relação ao eixo da coluna. Por outro lado, as colunas de solo e brita densificaram a região ao entorno da coluna em até $1,8D$. A autora concluiu que a técnica de colunas de compactação foi eficiente para a redução de recalques em solos colapsíveis. Baseado na Figura 3 com apenas uma coluna de solo compactada o solo apresentou uma melhora na capacidade de carga de 4 vezes, enquanto a coluna de brita e solo 2,8 vezes, ambos na condição inundada.

Embora o desenvolvimento da técnica com o uso de colunas granulares de melhoramento de solo para aplicação em fundações superficiais tenha sido alvo constante de estudos, a estimativa da capacidade de carga para esse sistema, por outro lado, é pouco retratada na literatura. Jadid (2013) apresentou uma estimativa prática para computar a capacidade de carga do solo melhorado com coluna granular sob fundações superficiais usando o método de vibro-substituição. As investigações envolveram o uso de colunas granulares em sapatas isoladas e em radiers melhorando um solo arenoso de média/baixa capacidade de carga. As camadas de

solo consideradas nas análises foram de 1,5 m de areia siltosa, seguida de areia siltosa muito fofa até 3,5 m de profundidade. Abaixo dessas camadas considerou-se uma camada de areia siltosa medianamente compacta até uma profundidade variável entre 5,5 a 6,5 m. Assumiu-se que a capacidade de carga sem placa do solo melhorado com a coluna granular foi de 200 kPa e os recalques máximos aceitáveis para sapata isolada e radier foram de 25 mm e 50 mm, respectivamente. Jadid (2013) utilizou o *software* VIBRI para modelar o melhoramento de solo. Baseado na capacidade de carga pré-determinada, o programa calculou o espaçamento entre colunas para fornecer o melhoramento desejado para um diâmetro nominal específico e profundidade. O melhoramento foi confirmado quando, para o espaçamento avaliado, os recalques para as fundações foram obedecidos.

Figura 3 – Gráfico Tensão versus recalque para provas de cargas inundadas

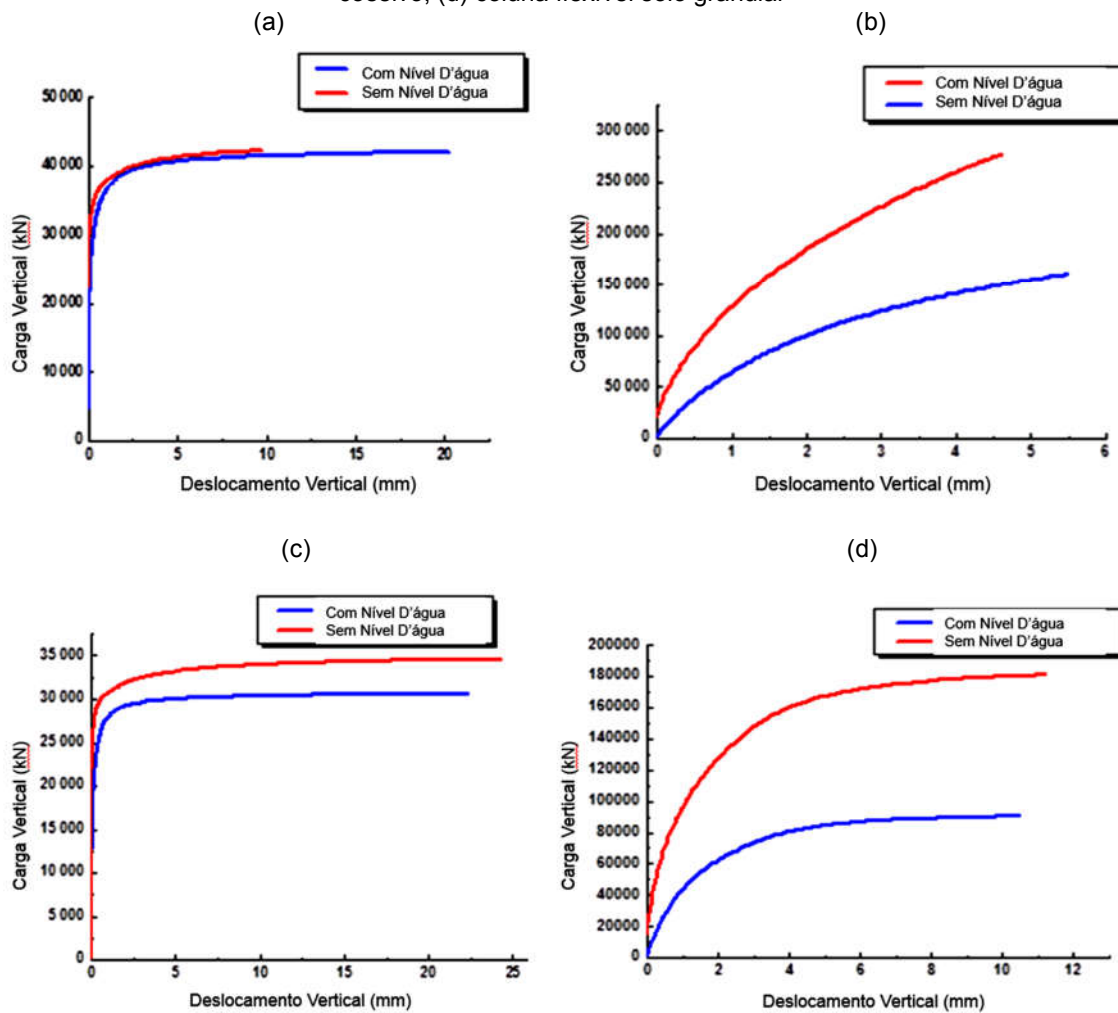


Fonte: Freitas (2016).

O espaçamento igual a 1,5 m de centro a centro foi o que melhor atendeu a todas as fundações, tanto para as malhas triangulares, bem como para quadrangulares. Para as sapatas isoladas de largura de 4,8 m ou menores, os recalques foram iguais ou menores que 25 mm, como proposto. Para radiers entre 4,8 e 8 m de largura os recalques também atenderam ao pressuposto no problema, 50 mm.

Ainda que se tenham sido estudadas colunas granulares, para se efetivar o uso das mesmas necessita-se de estudos comparativos para comprovar a eficácia na utilização dessa metodologia como melhoramento de solos, em face de outras metodologias. Por isso, Noui e Bouzid (2017) realizaram um estudo comparativo do comportamento de solos argilosos e arenosos melhorados com colunas granulares e colunas rígidas por meio do uso de simulação numérica 3D de elementos finitos. Considerou-se a influência da plasticidade e a presença de nível d'água no comportamento do sistema inclusão-solo. Resultados típicos de Noui e Bouzid (2017) são mostrados na Figura 4.

Figura 4 - (a) Coluna rígida solo coesivo; (b) coluna rígida solo granular; (c) coluna flexível solo coesivo; (d) coluna flexível solo granular



Fonte: Adaptado de (NOUI e BOUZID, 2017).

As curvas da Figura 4 permitem observar que, para as colunas rígidas, a presença de nível d'água não modificou o comportamento carga-recalque para os solos coesivos. Todavia, para fundação em solo granular percebeu-se uma melhora do comportamento carga-recalque quando da presença de NA. Quanto às colunas flexíveis (colunas granulares), a presença de nível d'água em ambos os solos provocou, para um mesmo nível de recalque, uma queda significativa na capacidade de carga, chegando a reduções de 12% para solos coesivos, e 50% para solos arenosos.

2.2. COLUNAS GRANULARES EM SOLOS MOLES

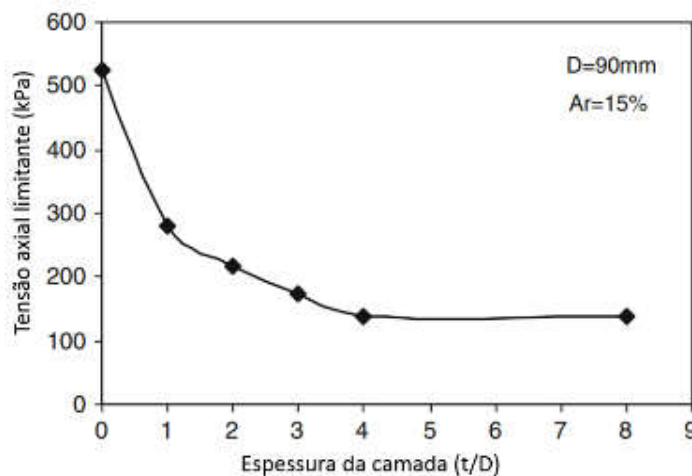
Tratando-se de colunas granulares aplicadas a solos moles, um tubo de revestimento de mesmo diâmetro da coluna é utilizado, a fim de manter a integridade do fuste no ato da instalação. Ainda, técnicas de encamisamento de colunas granulares com o uso de geossintéticos têm se tornado muito aplicáveis quando se trata de solos moles (ALEXIEW et al., 2011; SHAHU et al., 2012; TANDEL et al., 2012; GHAZAVI e NAZARI AFSHAR, 2013; KUMAR et al., 2013; KUMAR e JAIN, 2013; HONG et al., 2016; THAKARE e AHMED, 2016).

Estudos mostrando a evolução da técnica de melhoramento de solos com colunas granulares vêm sendo desenvolvidos ao longo dos últimos anos. Black et al. (2011) descreveram o comportamento de recalque de fundações em sapatas sob colunas granulares assentes em solo mole. Os autores, por meio do modelo geométrico de célula unitária, estudaram a influência dos parâmetros: (i) razão entre comprimento e diâmetro das colunas; (ii) razão de substituição de área; e (iii) configuração de colunas em grupo/simples, na efetividade do desempenho da técnica de colunas granulares quanto aos recalques verticais. A razão de substituição de área é dada como a relação da área da seção transversal da coluna granular sobre a área de influência da coluna. Por meio de ensaios de modelos físicos de escala reduzida, os autores observaram que os recalques poderiam ser igualmente controlados usando colunas mais curtas com uma razão de substituição de área maior ou colunas maiores com uma taxa de substituição de área menor. Eles ainda descobriram que houve, para o caso do estudo, um intervalo onde a razão de substituição de área fora otimizada para o controle de recalques, e essa razão ocorreu dentro de uma faixa de 30-40%. Vale ressaltar que esse intervalo se deve à configuração para a qual os ensaios foram realizados e que

esse intervalo pode variar de acordo com a resistência ao cisalhamento do solo, assim como a rigidez, não sendo, portanto, válido como uma regra geral.

Shivashankar et al. (2011) realizaram um estudo experimental do comportamento de colunas granulares em perfis de solos compostos por mais de uma camada. Eles realizaram ensaios de prova de carga em placa em tanques de célula unitária, composto por uma camada de argila mole sobrepondo uma camada de silte relativamente resistente, variando a espessura da camada de solo mole. O carregamento foi aplicado de duas diferentes formas, em toda área do tanque de célula unitária e somente na área da seção transversal da coluna granular. A execução da prova de carga em toda a área do tanque objetivou na estimativa da rigidez do solo melhorado, enquanto a prova de carga na área de seção transversal da coluna buscou estimar a capacidade axial limite suportada pela coluna. A taxa de substituição de área utilizada por Shivashankar et al. (2011) foi de 15%, e a profundidade de solo mole variou de 1D, 2D, 3D e 4D. Os autores ainda mostraram que, em casos de solo homogêneo, o melhoramento do solo com o uso de colunas granulares depende intrinsecamente da resistência do solo que envolve a coluna. Em provas de carga aplicada em toda a área do tanque a rigidez e a capacidade de carga diminuíram com o aumento da camada de solo mole. Para camadas maiores que 2D o melhoramento mostrou ser constante, ou seja, a presença de uma camada resistente a uma profundidade maior que 2D foi insignificante, como pode ser observado na Figura 5, no gráfico tensão axial limitante por espessura da camada normalizada pelo diâmetro da coluna (t/D).

Figura 5 - Tensão axial limitante em relação à espessura de camada de solo mole no topo da coluna



Fonte: adaptado de Shivashankar et al. (2011).

Observa-se na Figura 5 que a argila mole não conseguiu prover uma tensão confinante lateral para a coluna, fazendo com que a mesma sofresse ruptura por abaulamento até uma camada de 2D (duas vezes o diâmetro da coluna), concordando com resultados de Hughes e Withers (1974). O desempenho de colunas granulares em camadas de solos moles foi comprometida uma vez que esta não oferece confinamento lateral suficiente, conseqüentemente, as colunas requerem reforço para reduzir o abaulamento. No caso da prova de carga aplicada à coluna, provou-se que quanto maior a camada de solo mole, menor foi o limite de capacidade de carga axial.

O comportamento de solos moles melhorados com a técnica de colunas granulares também foram estudados por Madhav (2013) e Mani e Nigee (2013). Ambos autores relataram que as colunas granulares melhoraram a capacidade de carga e reduziram os deslocamentos em solos moles. Segundo Madhav (2013), a capacidade de carga do solo melhorado com colunas granulares aumentou em um intervalo de 50-100% da carga do solo sem melhoramento, enquanto que os recalques foram reduzidos da ordem de 3 a 4 vezes. Madhav (2013) também concluiu que a maior parte dos recalques ocorreu durante o estágio de carregamento e que os recalques pós-construção foram mínimos. Mani e Nigee (2013) ainda complementaram as conclusões de Madhav (2013) descrevendo que as colunas granulares, por acelerarem os processos de adensamento devido aos caminhos de drenagem criados pelos elementos de melhoramento do solo, permitiram que a construção pudesse ser iniciada mais rapidamente.

Indraratna et al. (2013) usando o método de diferenças finitas, analisaram um solo melhorado com coluna granular, sob carregamento de aterro, com base na hipótese de deformação livre, considerando os efeitos de colmatação, arqueamento e zona reforçada. A modelagem numérica foi capaz de prever a dissipação da pressão neutra, o adensamento ao longo do tempo, o mecanismo de transferência de carga e a região de melhoria do solo. Para validar os resultados, os autores dispuseram de dados de campos e modelos teóricos e as soluções apresentaram acurácia em relação à modelagem numérica. Concluiu-se que o efeito de colmatação retardou o processo de adensamento, e os recalques cresceram com o tempo apresentando estabilização da taxa em curva assintótica. Ainda, a zona reforçada afetou a distribuição de tensão vertical por melhorar as características de rigidez da coluna e do solo. Por fim, devido

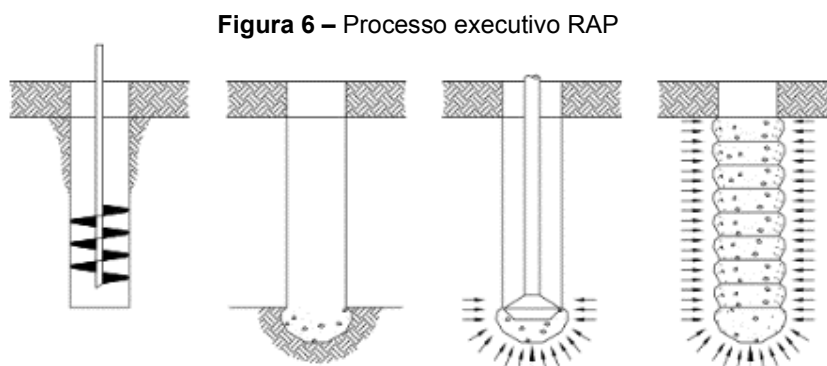
ao efeito de arqueamento os recalques foram influenciados pela variação de diâmetro e espaçamento das colunas.

Castro (2014) elaborou um modelo 2D e 3D de elementos finitos para avaliar desempenho de colunas granulares inseridas sob uma fundação rígida, além de analisar a influência da taxa de substituição de área e o comprimento crítico da coluna. Este último parâmetro refere-se ao comprimento no qual a coluna granular não reduz mais os recalques ou não melhora a capacidade de carga do solo. Pelo seu estudo o autor obteve as seguintes conclusões: (a) o número de colunas e a disposição delas sob a fundação pouco influenciou na curva carga-recalque para a modelagem; (b) existiu um comprimento crítico de coluna em torno de duas vezes o lado da sapata (2B); (c) e a relação comprimento da coluna por diâmetro da coluna por si só não foi relevante, ou seja, dependeu dos parâmetros taxa de substituição de área e comprimento da coluna para incorporação na modelagem. O autor também constatou que uma taxa de substituição de área elevada tornou a solução de melhoramento de solo menos eficiente para redução de recalques.

2.3. COLUNAS TIPO RAP

Embora sejam popularmente conhecidos dois métodos de execução de colunas granulares, vibro-deslocamento e vibro-substituição, outro método vem ganhando espaço. Trata-se das colunas tipo RAP (*Rammed Aggregates Piers*), as quais foram desenvolvidas, segundo Pitt et al. (2003), por Dr. Nathaniel Fox em meados dos anos 80 com intuito de fornecer uma tecnologia para reduzir recalques sob fundações superficiais, melhorando para isso a capacidade de suporte do solo. O processo de construção das colunas do tipo RAP consiste em: (1) perfuração de um poço com diâmetro variando entre 60 cm e 90 cm e uma profundidade entre 2 m e 7 m abaixo da superfície; (2) um bulbo de fundo formado, inserindo-se uma camada de agregado no fundo da abertura; (3) compacta-se o agregado usando equipamento chanfrado, patenteado e especialmente concebido para esta finalidade, implicando na aplicação de uma alta energia de compactação; (4) finas camadas com elevações de 30 cm de agregado bem calibrado granulometricamente introduzidas no orifício seguidas de compactação para formação do fuste (HANDY et al., 1999). O resultado é um elemento muito rígido, densificado, que se apresenta com um elevado ângulo de atrito e, devido ao processo de compactação, densifica o solo circunvizinho, fazendo com

que haja uma melhoria do confinamento lateral do solo (HANDY et al., 1999). Ilustrações do processo executivo e da mobilização de tensões em colunas RAP são mostradas nas Figura 6.

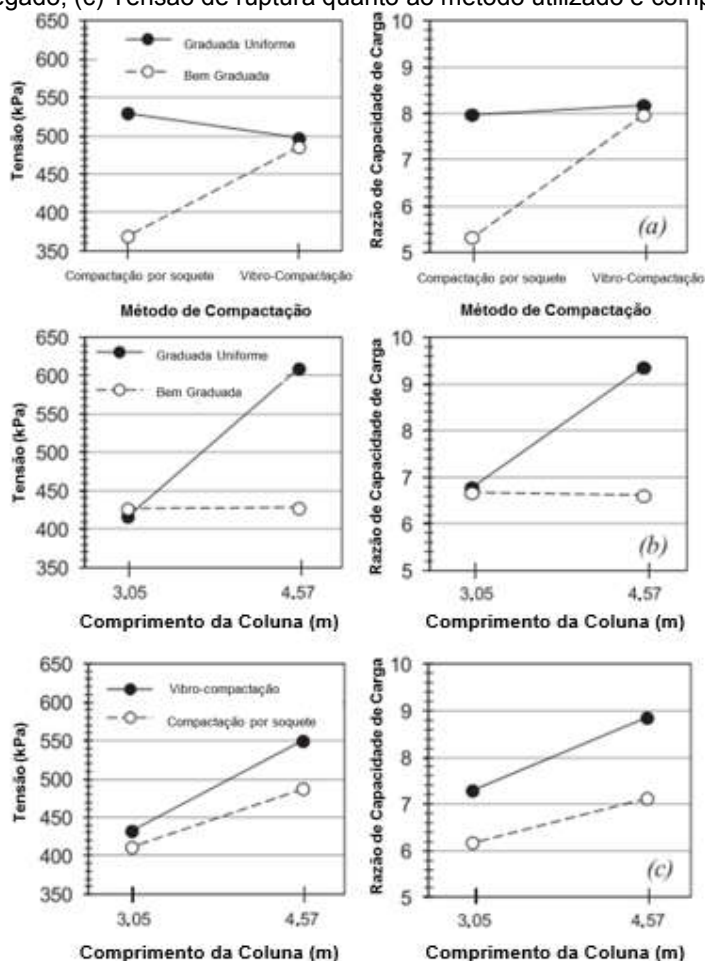


Fonte: (PITT et al., 2003).

Stuedlein e Holtz (2012) analisaram experimentalmente ensaios de provas de carga em sapatas assentes sobre solo argiloso reforçado com colunas granulares (colunas RAP). Os autores conduziram ensaios de campo em escala real para avaliar o efeito da granulometria do agregado da coluna, comprimento de coluna e métodos de compactação no desempenho do sistema. Os ensaios foram realizados em sapatas com dimensões pequenas (0,76 m) suportadas por uma única coluna e sapatas com maiores dimensões (2,74 m) apoiadas sobre um grupo de colunas granulares. Os métodos de instalação analisados incluíram: (1) agregado vibro-compactado sem pré-escavação; (2) empilhamento vibro-compactado sem pré-escavação e com cimento adicionado; (3) empilhamento vibro-compactado com pré-escavação da cavidade; (4) empilhamento com compactação adulterada com pré-escavação da cavidade. Os autores revelaram que o método de compactação por soquete obteve um desempenho melhor para agregado graduado uniformemente em face dos bem graduados. Porém, para o método de compactação por vibração, o agregado bem graduado apresentou desempenho semelhante à do uniformemente graduado (Figura 7a) para a matriz de solo argiloso do estudo. A Figura 7b mostrou que, para colunas com comprimento de 3,05 m, a tensão de ruptura independe da graduação do agregado, se bem ou uniformemente graduado. Todavia, para o comprimento de 4,57 m, o agregado uniformemente graduado apresentou melhor desempenho em relação ao bem graduado. Por fim, a Figura 7c mostrou que, independentemente do método

de compactação, o comprimento da coluna aumentou a tensão de ruptura do sistema. Ainda, as colunas compactadas por vibração apresentaram um desempenho superior às compactadas por soquetes.

Figura 7 – Resultados dos estudos de Stuedlein e Holtz (2012): (a) Comparação dos métodos de compactação e graduação do material; (b) Tensão de ruptura em relação ao comprimento da coluna e graduação do agregado; (c) Tensão de ruptura quanto ao método utilizado e comprimento da coluna



Fonte: adaptado de Stuedlein e Holtz (2012).

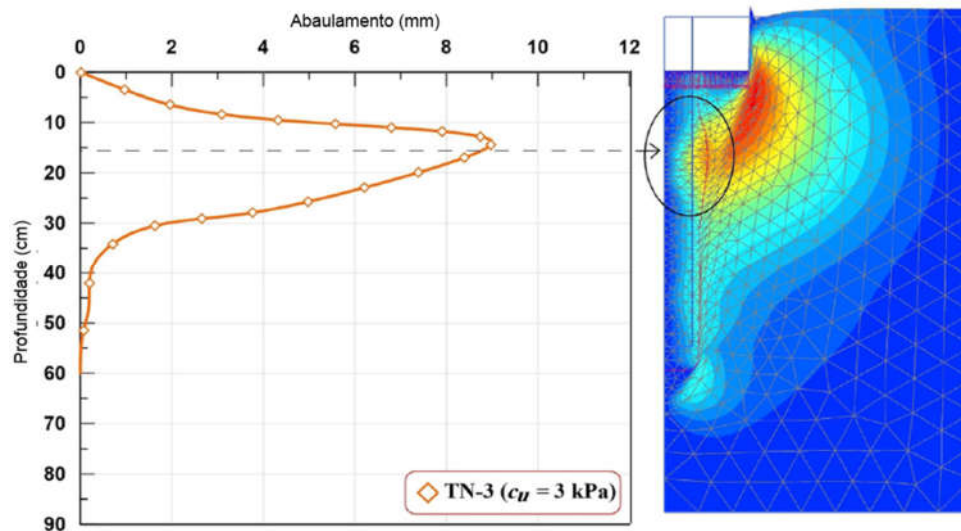
Similarmente, Osman e Hashim (2013) avaliaram experimentalmente as colunas RAP como reforço de solo para sapata. Para isso, realizaram um estudo comparativo entre ensaios de prova de carga no solo sem reforço e com reforço, utilizando em campo colunas RAP com diâmetro de 20 cm e 60 cm de comprimento. A interpretação da curva carga-recalque se deu pelos métodos de Davisson (1972), Fuller e Hoy (1970), Butler e Hoy (1977), critério de 90% Brinch-Hansen (1963), critério de 80% Brinch Hansen (1963), De Beer (1967), Mazurkiewicz (1972), Chin (1970,1971), e Vander Veen (1953). Os métodos de Davisson, Chin Mazurkiewicz e Brinch Hansen

não foram aplicáveis às análises do estudo. O método de Beer apresentou a menor interpretação da previsão de capacidade de carga para o estudo e foi usada por Osman e Hashim (2013) para a comparação das provas de cargas com e sem reforço. Os autores concluíram que houve uma melhoria de 2,3-4 vezes da capacidade de carga do solo reforçado em relação ao solo natural e que o módulo de elasticidade do elemento de reforço (coluna RAP) variou de 5-40 vezes o módulo de elasticidade do solo provando ser benéfico o uso da técnica como reforço em camadas superficiais para o solo estudado.

Embora a eficiência das colunas tipo RAP tivesse sido confirmada por Stuedlein e Holtz (2012) e Osman e Hashim (2013), pouco se conhecia sobre o comportamento dessas colunas quando outros materiais de preenchimento eram utilizados. Nesse sentido, Oliveira et al (2016) estudaram a técnica da coluna tipo RAP com o uso de escória de aciaria como agregado dando um viés sustentável à esse rejeito. Os autores adaptaram o martelo de SPT para executar a compactação das camadas de agregado. Os ensaios de prova de carga foram realizados em placa, coluna, coluna sem ponta e placa assente sobre coluna. Os pesquisadores revelaram que, para o campo experimental do estudo, a relação entre carga de ponta e carga por atrito lateral foi da ordem de 50%. Com a inserção de apenas uma coluna assente sob uma sapata, verificaram uma melhoria significativa da capacidade de carga do sistema reforçado bem como do recalque, evidenciando a eficiência da técnica para o agregado alternativo.

Demir et al. (2017) realizaram uma investigação numérica e experimental do comportamento das colunas RAP sob placas assentes em um solo areno-argiloso, em diferentes condições de resistência não drenada, dentro de um tanque de ensaio de escala reduzida. Em seu experimento, os pesquisadores consideraram uma coluna RAP padrão com 10 cm de diâmetro e 60 cm de comprimento, sujeita a um carregamento vertical aplicado a uma placa de 30 cm de diâmetro, para o caso de uma coluna isolada, e a uma placa de 70 cm, para o caso de grupo de colunas. Concluiu-se que, em termos de capacidade de carga, as colunas RAP são mais eficientes quanto maior for a resistência não drenada do solo. Corroborando os resultados de Hughes e Withers (1974), os autores afirmaram que a ruptura por abaulamento foi observada para os ensaios em colunas isoladas. Adicionalmente, o abaulamento ocorreu em 1,5D em relação ao topo da coluna e tal resultado foi condizente ao apresentado pela análise numérica, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Abaulamento em coluna RAP singular



Fonte: Adaptado de Demir et al (2017).

Foi observado, por meio das células de tensão instaladas no interior do tanque, que as tensões suportadas pela coluna foram maiores que as tensões suportadas pelo solo. Tal fato foi decorrente da elevada rigidez do elemento de reforço quando comparada à rigidez do solo. Em solos sob a mesma condição de resistência não drenada, para grupo de colunas, os incrementos de tensão lateral no solo circunvizinho foram maiores que para coluna isolada.

Ainda que tivessem sido estudados o comportamento das colunas RAP atuando no melhoramento do solo e os métodos de cálculo que mais se adequam à esta técnica, pouco se sabia sobre o efeito da instalação das colunas RAP nas propriedades do solo. Então, Saftner et al. (2017) desenvolveram um estudo abordando este tema. Os autores realizaram ensaios de campo (CPT e DMT) antes e após a instalação da coluna RAP. Não obstante, para o CPT foi realizado um ensaio adicional após a instalação. Além de verificar as mudanças nas propriedades do solo, eles também focaram no incremento de resistência ao longo do tempo depois de instalado o elemento de reforço. Os resultados mostraram um ganho na tensão horizontal após a instalação de em torno de 100%, mostrando a real melhora do confinamento lateral do solo devido a inserção do reforço. Por meio do CPT foi possível constatar um ganho de resistência de 33% ao longo de um mês considerando o ensaio realizado após a instalação das colunas RAP.

2.4. USO DE GEOSSINTÉTICOS EM FUNDAÇÕES

Uma outra forma de melhorar as características geotécnicas do solo é por meio do uso de geossintéticos atuando em diversos segmentos de obras como muro de contenção, aterros sobre solos moles, reforço de fundações, atenuante de tensões em dutos enterrados, dentre outros (GÓNGORA, 2011; AVESANI NETO, 2014; FEI, 2014; ZORNBERG, 2015; ALEXIEW et al., 2016; YU et al., 2016; RAVEENDRAN e THOMAS, 2017; MIRANDA et al., 2017; SALEM et al., 2018; SONG et al., 2018; WANG et al., 2018). Dentre os geossintéticos existentes os mais utilizados como reforços são as geogrelhas e os geotêxteis pois a interação destes com a massa de solo restringe os deslocamentos e aumenta a segurança da estrutura (PEREIRA et al., 2014).

Em fundações rasas, geossintéticos têm sido aplicados para reforçar o solo abaixo de sapatas por meio de camadas recompactadas compostas por uma ou mais camadas de reforços geossintéticos. Muitos estudos mostram que as camadas de reforços promovem aumento da capacidade de carga do solo de fundação e a redução de recalques (DEMERCHANT et al., 2002; YOON et al., 2004; GHOSH et al., 2005; PATRA et al., 2005, 2006; SAWWAF e EL, 2007; LATHA e SOMWANSI, 2009; ABU-FARSAKH et al., 2013; SHAHIN et al., 2017).

Em seus estudos Latha e Somwanshi (2009) e Abu-Farsakh et al. (2013) apresentaram resultados de laboratório e análises numéricas de uma sapata assente sobre um solo arenoso com camadas de reforços em geogrelha e geocélulas, para os primeiros autores e geogrelha e geotêxtil, para os últimos autores. Os autores variaram o tipo de geossintético, a profundidade de aplicação sob a fundação, a quantidade de reforços aplicados e a largura dos geossintéticos na zona reforçada e compararam a capacidade de carga e recalques aos ensaios realizados somente no solo arenoso de fundação. Shahin et al. (2017) utilizaram os mesmos procedimentos dos autores acima com a diferença de que o reforço fora aplicado a um solo mole. A pesquisa de Latha e Somwanshi (2009) revelou que a profundidade efetiva da zona reforçada foi igual a duas vezes o lado da sapata (2B) e o espaçamento ótimo entre os reforços foi igual à metade do lado da sapata (B/2), sendo esse último resultado também encontrado pelos autores Shahin et al. (2017).

Latha e Somwanshi (2009), Abu-Farsakh et al. (2013) e Shahin et al. (2017) também perceberam que o layout e configuração dos geossintéticos tiveram mais

influência na capacidade de carga do solo reforçado do que a resistência à tração do material compósito. Porém, os últimos autores consideraram relevante para a efetividade do reforço o coeficiente de atrito de interface solo-geossintético. Segundo Abu-Farsakh et al. (2013), com a utilização de duas camadas ou mais de reforço, os recalques podem ser reduzidos em 20% em todos os níveis de tensão na fundação. Os autores também perceberam que areia reforçada com geogrelha e geotêxtil deram melhores resultados que aquelas reforçadas só com geogrelha ou somente geotêxtil.

Estudos envolvendo colunas granulares com reforço de geotêxtil ou geogrelhas para melhoramento de solos têm sido desenvolvidos e os resultados mostraram-se benéficos quanto ao uso desse material (SHARMA et al., 2004; MURUGESAN e RAJAGOPAL, 2006, 2007, 2010; GNIEL e BOUAZZA, 2009; TANDEL et al., 2012; GHAZAVI e NAZARI AFSHAR, 2013; KUMAR et al., 2013; HONG et al., 2016; GHAZAVI et al., 2018). Segundo Barksdale e Bachus (1983), o abaulamento é a ruptura mais comum que ocorre em colunas granulares sem encamisamento. Isto se deve ao fato de que, em regiões próximas à superfície, as tensões laterais do solo são menores, permitindo que ocorra o abaulamento por falta de confinamento. Para tentar solucionar o problema de deformação lateral excessiva, Sharma et al. (2004) utilizaram geogrelhas na parte superior das colunas granulares como elementos de reforço mostrando a redução do efeito de abaulamento. De maneira similar, Murugesan e Rajagopal (2006, 2007, 2010) mostraram que o abaulamento ocorreu a partir da superfície até duas vezes o diâmetro da coluna e que o encamisamento seria eficiente cobrindo essa profundidade. Ainda, os autores mostraram que com o encamisamento houve uma diminuição da compressão das colunas granulares, e conseqüentemente, uma redução do abaulamento. Adicionalmente, um aumento bastante considerável da capacidade de carga do elemento encamisado foi notado em relação à coluna sem encamisamento em solo mole.

Gniel e Bouazza (2009) realizaram ensaios em escala reduzida para colunas granulares inseridas em solo mole e encamisadas, parcialmente e totalmente, com geogrelhas e compararam os resultados. Os ensaios foram realizados tanto para uma coluna isolada como para um grupo de colunas. Os resultados obtidos por esses autores revelaram que em colunas parcialmente encamisadas, tanto para isolada como para o grupo de coluna, houve uma redução constante na deformação vertical com o aumento do encamisamento. Também relataram que houve um significativo aumento na rigidez da coluna para o encamisamento total da coluna. O trabalho de

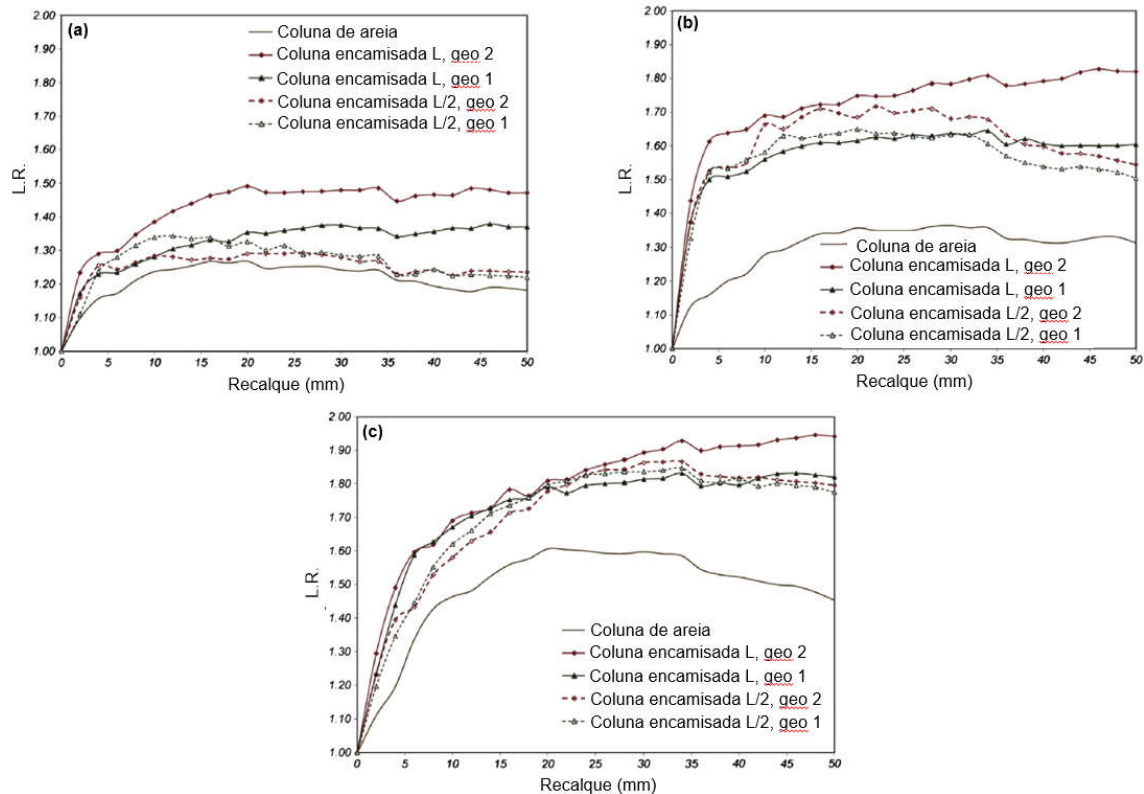
Tandel et al. (2012) abordou ensaios em escala reduzida de colunas de areia encamisadas com geotêxtil sob carregamento estático em período curto e também análises numéricas para carregamentos em longos períodos. Os resultados apontados no artigo mostraram que: (i) a capacidade de carga da coluna aumentou com o encamisamento; (ii) as pressões de confinamento geradas nas colunas de areia foram maiores para reforços mais rígidos; (iii) o desempenho de colunas com diâmetros menores foi melhor do que o de colunas com diâmetros maiores, uma vez que a mobilização da tensão de confinamento é maior em colunas com pequenos diâmetros, tornando-as mais rígidas.

Mesmo tendo sido estudados diferentes tipos de geossintéticos no encamisamento, poucos são os estudos abordando o mesmo tipo de geossintéticos para diferentes diâmetros de colunas. Murugesan e Rajagopal (2007) revelaram que o efeito do encamisamento diminuiu com o aumento do diâmetro da coluna. De forma similar, Ghazavi e Nazari Afshar (2013) investigaram o efeito do encamisamento sob mesmas condições para diferentes diâmetros em ensaios de prova de carga, em escala reduzida, em placa de 20 cm de diâmetro. Para efeitos comparativos foram realizados os ensaios de placa: (i) no solo; (ii) solo com coluna; (iii) solo com coluna e encamisamento parcial; (iv) solo com coluna e encamisamento total; (v) e em grupo de colunas. Os autores realizaram os ensaios em escala reduzida (1-g) em solo mole e os diâmetros variaram em 60, 80 e 100 mm. Verificou-se que o abaulamento foi a ruptura ocasionada nas provas de cargas em colunas isoladas, com as profundidades variando de 1D-2D das cabeças das colunas corroborando os resultados de Murugesan e Rajagopal (2006). Para o grupo de colunas, os pesquisadores revelaram que a ruptura ocorreu em uma combinação de abaulamento com deflexões laterais.

Segundo os autores, a taxa de concentração de tensão (SCR) foi maior em colunas encamisadas do que naquelas sem encamisamento. Entende-se por SCR a relação entre a tensão na coluna e a tensão no solo para um dado carregamento. Este resultado pode ser facilmente justificado pelo aumento de rigidez da coluna quando esta é encamisada, absorvendo assim maiores tensões e dissipando para o solo ao redor menores magnitudes de tensão. Essa taxa diminuiu com o aumento do recalque e do diâmetro das colunas. Por fim, os autores determinaram a eficiência das diferentes colunas granulares relacionando a capacidade de carga última de uma coluna com a capacidade de carga última do solo (LR) e concluíram que LR aumentou

com o encamisamento, com a resistência do geotêxtil e com o aumento do diâmetro da coluna, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Taxa de eficiência (LR) em função do recalque para diâmetro igual a (a) 60 mm, (b) 80 mm e (c) 100 mm

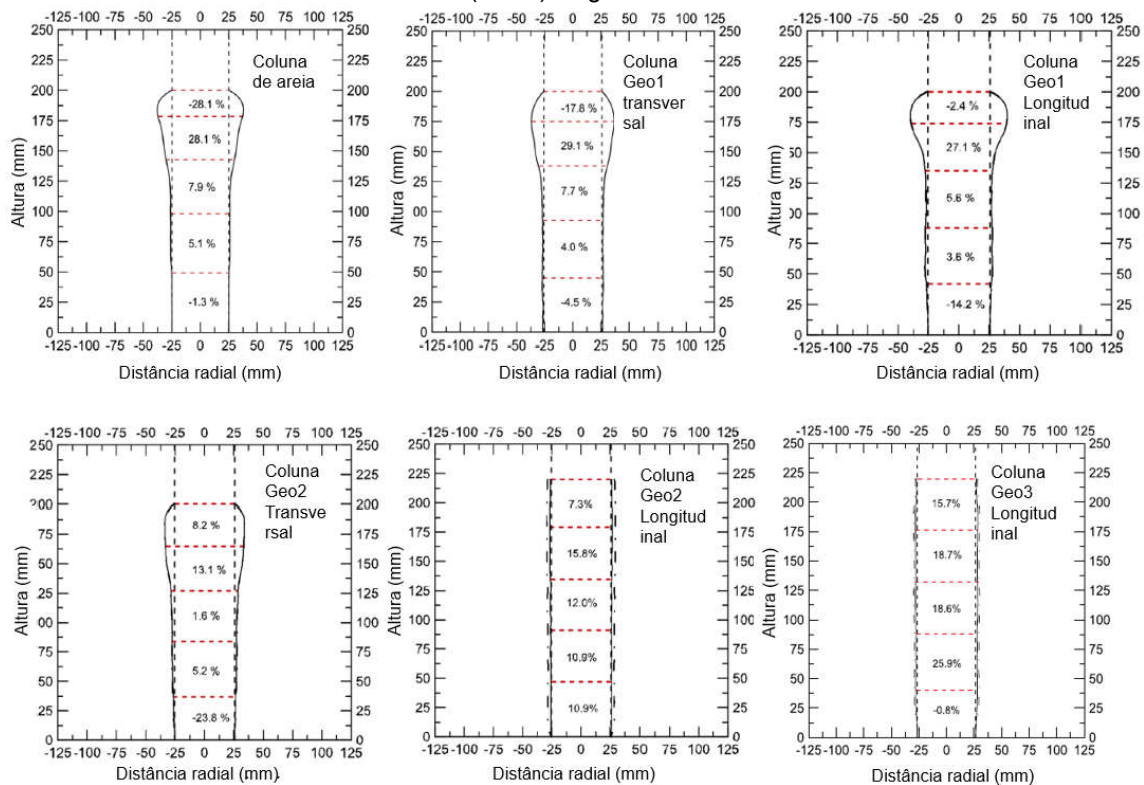


Fonte: Adaptado de Ghazavi e Nazari Afshar (2013).

Diferentemente de Ghazavi e Nazari Afshar (2013), os pesquisadores Hong et al. (2016) realizaram experimentos com colunas granulares sob condições pré-determinadas variando as propriedades dos geotêxteis aplicados ao encamisamento. Utilizaram-se três diferentes geotêxteis não-tecidos (Geo1, Geo2 e Geo3) em suas duas direções, longitudinal e transversal. Foram realizados ensaios de prova de carga em placa em coluna com diâmetro de 50 mm e comprimento de 250 mm, em solo mole, respeitando L/D maior ou igual a 4 proposto por Hughes e Withers (1974). Como resultado, os pesquisadores revelaram que, em colunas não encamisadas e encamisadas com geotêxtil de baixa rigidez, o abaulamento ocorreu até $1,5D$ (diâmetro da coluna) da cabeça da coluna, resultado condizente com a literatura (MURUGESAN e RAJAGOPAL, 2006; GHAZAVI e NAZARI AFSHAR, 2013). O aumento na rigidez implicou no aumento da profundidade com que o abaulamento

ocorreu, sendo quase imperceptível para o geotêxtil de maior rigidez e resistência, ou seja, a coluna com o encamisamento absorveu praticamente toda a tensão aplicada à sua cabeça, como ilustra a Figura 10. Para os casos em que o geotêxtil rompeu, a liberação da tensão confinante causou um abaulamento em excesso. Mesmo assim, a capacidade de suporte fornecida foi maior do que para colunas não encamisadas.

Figura 10 – Abaulamento para: (a) coluna de areia; (b) coluna com geotêxtil de menor módulo de rigidez (Geo1) transversal; (c) coluna com geotêxtil de menor módulo de rigidez (Geo1) longitudinal; (d) coluna com geotêxtil de módulo de rigidez mediano (Geo2) transversal; (e) coluna com geotêxtil de módulo de rigidez mediano (Geo2) longitudinal; (f) coluna com geotêxtil de maior módulo de rigidez (Geo3) longitudinal

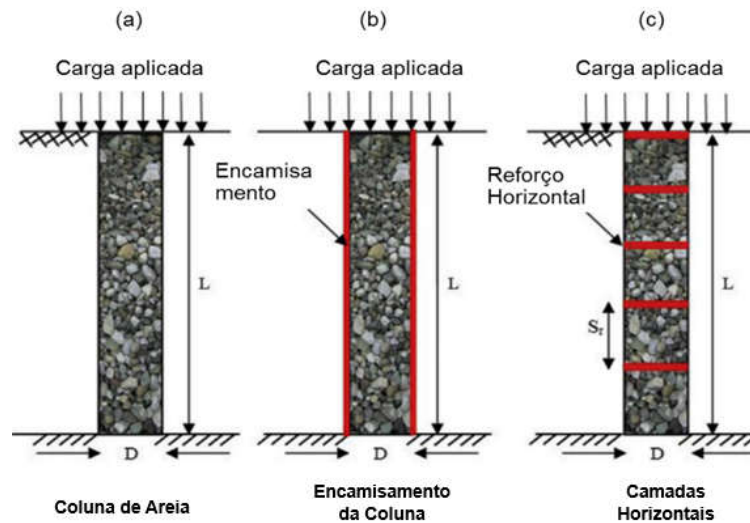


Fonte: Adaptado de Hong et al (2016).

Uma outra maneira de melhorar o confinamento lateral da coluna dá-se pela inserção de geossintético em camadas horizontais (Figura 11) ao longo do comprimento da coluna. Um estudo deste método foi abordado recentemente por Ghazavi et al. (2018). Os autores utilizaram-se dos mesmos preceitos de seu trabalho em 2013, realizando ensaios de provas de cargas para colunas com diferentes diâmetros, 60, 80 e 100 mm, assim como em grupos de colunas com 60 mm e também diferentes tipos de geossintéticos. Durante a execução das colunas foi mantida a

distância entre as camadas reforçadas de $1D$ e também considerou-se o reforço no comprimento total da coluna bem como no comprimento parcial (metade da coluna).

Figura 11 – Esquema de (a) Coluna de areia (b) Encamisamento da coluna (c) Reforço com camadas horizontais de geossintético



Fonte: Adaptado de Ghazavi et al (2018).

Os resultados dos autores apontaram uma eficiência significativa quanto ao uso do geotêxtil em camadas horizontais. Tal reforço foi mais efetivo quando aplicado no comprimento total da coluna, sendo que para a metade da coluna reforçada também houve um acréscimo relevante. Conforme visto em literatura (MURUGESAN e RAJAGOPAL, 2006; GHAZAVI e NAZARI AFSHAR, 2013; HONG et al., 2016) em solos moles a ruptura das colunas granulares sem reforço ocorre em uma profundidade de até $2D$ do topo da coluna. Utilizando as camadas horizontais como reforço os autores perceberam que ocorreu um abaulamento limitado pelos reforços em cada camada. Na análise numérica, quando o espaçamento entre os reforços foi diminuído, o abaulamento ocorreu de forma igual em todo o comprimento da coluna e com isso os autores identificaram que o espaçamento entre as camadas de $0,25D$ gerava o melhor resultado para análise. A diminuição no nível de abaulamento percebida pelos autores entre colunas reforçadas horizontalmente e colunas sem reforço se deu pela superfície de atrito entre o agregado e o geossintético e o ângulo de atrito do próprio material de preenchimento da coluna. Os autores ainda relatam que, para grupos de colunas reforçadas horizontalmente, ocorreu uma combinação de dois tipos de ruptura, abaulamento e cisalhamento, como descreveu Barksdale e

Bachus (1983). Os autores também revelaram que o uso de geogrelhas, ao invés de geotêxtil, melhorou a capacidade de suporte das colunas reforçadas horizontalmente. Isso decorreu do fato de que as geogrelhas apresentam uma interface atritiva maior com os agregados do que os geotêxteis. Diferente de seus resultados para encamisamento vertical de Ghazavi e Nazari Afshar (2013), Ghazavi et al. (2018) mostraram que a eficácia do reforço horizontal melhorou com o aumento do diâmetro e isto pode ser explicado pelo aumento de atrito de interface entre agregado e geossintético em virtude do aumento do diâmetro da coluna.

Como conclusão final, os autores compararam os valores obtidos neste experimento com os experimentos de 2013 (entende-se: GHAZAVI; NAZARI AFSHAR, 2013) e perceberam que para uma mesma área de material de reforço, comparando com o total encamisamento da coluna, os reforços horizontais podem fornecer até 30% a mais de capacidade de carga, se obedecido o espaçamento de $0,25D$. Ainda, as forças de tensão máxima foram menores em reforços horizontais do que em encamisamento total.

2.5. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE RCC

Técnicas de reuso de RCC são de grande valor para a engenharia nacional pois, além de implicar em redução significativa de custos, contribui-se para o meio ambiente criando alternativas de reusos de RCC's que são tão intensamente produzidos na construção civil. Segundo Carneiro et al. (2001), os RCC's vem sendo utilizado como agregado para inúmeras finalidades na construção civil e também na pavimentação rodoviária, sendo empregado como substituto às matérias-primas hoje utilizadas nestes setores.

No que tange a composição e caracterização dos RCC's, de acordo com Palhaci et al. (2013), esse resíduo é composto de restos de praticamente todos os materiais e componentes utilizados pela indústria da construção civil, como brita, areia, materiais cerâmicos, argamassas, concretos, madeira, metais, papéis, plásticos, pedras, tijolos, tintas, etc., e sua composição química está vinculada à estrutura de cada um dos constituintes presentes na mistura. A variedade na composição química dos RCC's se dá pelos tipos de construção que, por sua vez, são decorrentes da cultura dos diversos países e regiões (MARQUES NETO e SCHALCH, 2010). Agregados oriundos da reciclagem de RCC podem ser aplicados em argamassas de assentamento de tijolos

e blocos ou em revestimentos de residências. As vantagens de se utilizar esse material podem ser percebidas nos próprios canteiros de obras, pela redução do consumo de cimento e cal e pelo ganho na resistência à compressão do material reciclado em relação às argamassas convencionais (ZORDAN, 1997).

Arulrajah et al. (2013) avaliaram as propriedades geotécnicas e geoambientais da aplicação de resíduos de construção e demolição em sub-base de pavimentos. Foram avaliados 5 tipos de resíduos, dentre eles: agregado de concreto reciclado, agregado triturado de bloco cerâmico, resíduo de rocha, agregado de asfalto reciclado e agregado de vidro fino. As propriedades geotécnicas dos agregados reciclados foram analisadas por meios de ensaios de caracterização física e mecânica dos materiais. Para tal, realizaram ensaios de granulometria, gravidade específica, absorção de água, compactação, abrasão Los Angeles, granulometria pós-compactação, índice de descamação, condutividade hidráulica, CBR e ensaios triaxiais. As propriedades geoambientais foram analisadas pelos ensaios de pH, teor orgânico, concentração total e lixiviação do material para uma gama de constituintes contaminantes. Com exceção do agregado de vidro e asfalto reciclado, os outros materiais reciclados apresentaram uma coesão drenada variando entre 41 e 46 kPa e ângulo de atrito drenado entre 49 e 51°. Para complementar as propriedades geotécnicas os autores realizaram ensaios triaxiais cíclicos nos agregados e revelaram que os agregados de concreto, de bloco cerâmico e resíduo de rocha obtiveram desempenho satisfatório com 98% de grau de compactação e teor de umidade a 70% da umidade ótima para a energia de compactação modificada. Quanto às propriedades geoambientais, os resultados mostraram que o pH de todos materiais foi superior a 7, indicando serem materiais alcalinos. O teor orgânico para os materiais reciclados foi baixo, enquanto para o agregado de asfalto foi alto. Os autores concluíram que os agregados de concreto e resíduo de rocha obtiveram desempenho superior ou similar aos materiais tipicamente aplicados em sub-base de pavimentação. Os agregados triturados de bloco cerâmico, de vidro fino e asfalto podem ser aplicados em sub-base, porém necessitam de aditivos ou materiais com qualidade superior para serem misturados à eles para melhorar as características desses agregados.

Similarmente aos estudos de Arulrajah et al. (2013), Bhushan et al. (2019) realizaram a caracterização geotécnica de concreto triturado para aplicação, como material de preenchimento, em muros mecanicamente estabilizados (*MSE walls*). Os autores realizaram ensaios de granulometria, gravidade específica, absorção de água,

permeabilidade, compactação e esmagamento no material para obter os parâmetros de caracterização desses materiais e compará-los às especificações de materiais de preenchimento para *MSE walls*. Também foram realizados os ensaios de pH para analisar a resistividade à corrosão e difração de raio X para obter a composição química do resíduo. Os resultados do ensaio de compactação na energia de Proctor modificado, indicaram que o material reciclado obteve valor muito similar ao material virgem utilizado como agregado, da ordem de 19,35 kN/m³. Os resultados do ensaio de pH concordaram com os resultados de Arulrajah et al. (2013), com pH maior que 7, indicando que o agregado de concreto triturado possui natureza alcalina. A condutividade hidráulica foi da ordem de 10⁻⁵ e os autores consideraram o material como sendo de baixo potencial de drenagem. Como conclusão, afirmaram que os agregados de concreto triturado poderiam ser aplicados como material de preenchimento de muros mecanicamente estabilizados.

Vieira e Pereira (2015) realizaram uma pesquisa envolvendo uma revisão dos estudos relacionados à valorização do RCC em aplicações geotécnicas, com uma ênfase maior à aplicação desse material como agregado em bases de pavimentação e como material de preenchimento para estruturas reforçadas com geossintéticos. Dentre as conclusões observadas pelos autores destacou-se que, para aplicação do RCC como agregado em substituição às britas, os valores de CBR foram similares àqueles obtidos de material convencionalmente utilizado. Alguns materiais que dão origem ao RCC, como por exemplo os tijolos, tiveram que ser misturados aos outros materiais mais duráveis para garantir um bom desempenho do material reciclado na aplicação em sub-base de pavimentos. Quanto à aplicação do RCC como material de preenchimento para estruturas reforçadas com geossintético, os autores encontraram que os RCC's, quando propriamente separados e compactados, apresentaram uma resistência ao cisalhamento muito similar ao material comumente utilizado para reaterro de estruturas reforçadas com geossintéticos.

Corroborando o tema de Vieira e Pereira (2015), Cardoso et al. (2016) também realizaram uma revisão bibliográfica das propriedades físicas mais importantes dos diferentes tipos de RCC comparados à agregados naturais, e qual a influência dessas propriedades no comportamento mecânico e hidráulico quando o RCC era compactado. Os autores revelaram que as propriedades físicas do agregado reciclado depende não somente do tipo de material, mas também do processo de fabricação/trituração. Foi preferida compactação realizada por vibração em vez

daquelas que utilizavam impacto, uma vez que, por vibração gera-se menos porcentagem de finos. Geralmente, o uso de material oriundo do concreto e da alvenaria irá aumentar o teor de umidade ótimo da compactação e diminuir o peso específico aparente seco máximo, enquanto que para o agregado oriundo do asfalto o teor de umidade ótimo irá diminuir. Os valores de CBR encontrados para o material reciclado oriundo do concreto geralmente foram maiores do que para agregado natural, sempre atendendo as prerrogativas de normas. Quanto ao material reciclado oriundo de alvenaria, os resultados de CBR foram muito aquém do esperado e considerou-se a adição de resíduo de concreto para melhores os índices de CBR. Ainda, resultados mostraram que o uso de resíduo de concreto para aplicação em base ou sub-base de pavimentos possuiu melhor desempenho do que a aplicação de agregados naturais.

Suddepong et al. (2018) avaliaram o comportamento da resistência de interface entre agregado reciclado de concreto e geogrelha para aplicação em pavimentos. Os autores analisaram o efeito do tamanho da abertura da geogrelha, a resistência à tração da geogrelha, a granulometria do agregado e a tensão normal aplicada ao material compósito na resistência de interface agregado-geogrelha. Os autores fizeram o uso de um aparato de cisalhamento direto de grande porte para a realização dos ensaios. Foram utilizados três tipos de abertura de geogrelhas com resistência à tração diferentes e duas amostras de agregado de concreto reciclado com diferentes granulometrias. Os autores revelaram que a resistência de interface está intrinsecamente relacionada à abertura da geogrelha e também com as partículas do agregado menores que a abertura da geogrelha. A resistência à tração da geogrelha pouco interferiu nos resultados do ensaio, pois as geogrelhas não atingiram a ruptura durante os ensaios de cisalhamento. A geogrelha impediu que o agregado reciclado de concreto se rearranjasse e as forças de intertravamento entre partículas aumentaram, fato comprovado pelo deslocamento vertical *versus* a resistência de interface. Quanto maior a porcentagem de material mais fino que a abertura da geogrelha, maior foi a resistência de interface, devido ao maior intertravamento gerado entre as partículas mais finas.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Propôs-se a execução e monitoramento em laboratório, em escala reduzida, de colunas granulares compactadas com o uso de RCC beneficiado (granulometria de areia) como agregado e geossintético como reforço horizontal ou como encamisamento da coluna.

3.1. CÂMARA DE ENSAIO E PÓRTICO DE REAÇÃO

Os ensaios de placa foram executados em escala 1:10 (laboratório: campo), onde os modelos físicos foram abrigados dentro de um tanque de concreto armado (formato cilíndrico), conforme Figura 12a. As dimensões do tubo de ensaios são 100 cm diâmetro e 100 cm de altura. Estas dimensões foram utilizadas a fim de que não se obtivesse efeito de bordas nos ensaios de prova de carga em placa de acordo com Hong et al. (2016) e Khabbazian et al. (2010). Foi também prevista uma cobertura com uma camada de folha lisa de celulose lubrificada com graxa antiaderente para evitar efeitos de atrito nas paredes da câmara, conforme ilustrado na Figura 12b.

Para auxiliar na resistência aos esforços de tração nas paredes da câmara de concreto, gerada pela compactação do solo, reforços externos em talhas com catracas foram utilizados circunscritos ao seu diâmetro externo. A câmara que abrigou os ensaios foi disposta sobre o pórtico de reação no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de São Carlos (LabGEO/UFSCar), (Figura 12a).

A placa rígida utilizada para a realização da prova de carga rápida em placa foi constituída de aço, com diâmetro de 20 cm e espessura igual a 3 cm. No centro da placa existe uma abertura no formato de semi-esfera, à qual foi acoplada uma esfera utilizada como rótula. O sistema de aplicação de carga consistiu na utilização de um atuador pneumático com capacidade para aplicar 20 kN de carga. No curso do atuador foi acoplado uma célula de carga com capacidade de 20 kN, cuja extremidade inferior possuiu um furo que se encaixou na rótula, de acordo com o indicado na Figura 12c. O pórtico de reação do sistema de aplicação de carga possui 2,25 m de altura e largura de 2,40 m. Para auxiliar na reação do sistema de carga foi utilizada uma viga de reação com 2,40 m de comprimento e 0,25m de altura (Figura 12a) composta por duas chapas

de aço rígidas, na qual o atuador foi instalado. A viga de reação possui um sistema para alça-la e descê-la conforme a etapa de execução do ensaio. Para fixa-la em uma determinada altura, contou-se com dois pinos de aço que a acoplava ao pórtico de reação, travando o sistema e impedindo a movimentação do sistema de reação.

Figura 12 – (a) Pórtico de reação e câmara de ensaio; (b) Celulose revestindo as paredes da câmara e antiaderente; (c) Sistema de aplicação de cargas



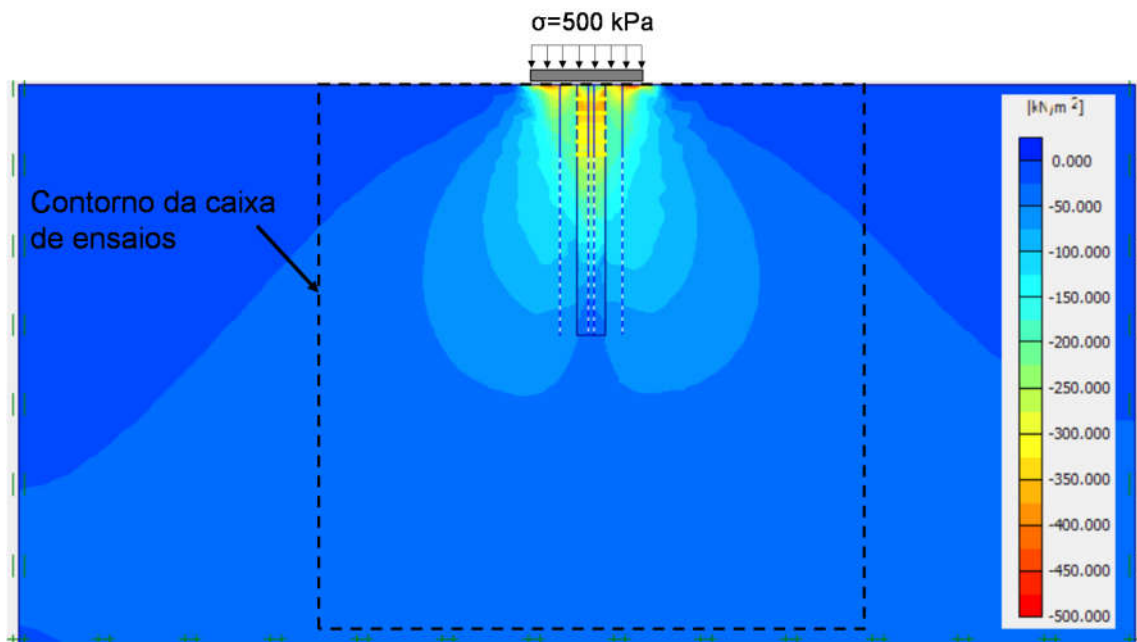
3.1.1. Análise do efeito de borda

Hong et al. (2016) analisaram a influência do efeito de borda em provas de carga em modelos reduzidos. Os autores utilizaram tanques com diferentes diâmetros (200mm, 300mm, 400mm e 500mm) para realizarem prova de carga em uma coluna de 70 mm de diâmetro. De acordo com os autores, para os diâmetros do tanque iguais ou maiores que 300 mm, as curvas de carga *versus* deslocamento apresentaram-se bem próximas. Ainda, segundo os autores, a distância do centro da fundação à borda do tanque foi maior do que 2 a 2,5 vezes o diâmetro da sapata, região onde ocorre a cunha de ruptura superficial (CHUMMAR 1972 *apud*. HONG et al. 2016). Khabbazian et al. (2010) também sugeriram que um tanque com 4 vezes o diâmetro da coluna minimizaria os efeitos de reflexão de tensões nos resultados do ensaio.

Mesmo as dimensões do tanque estando de acordo com o proposto pelos autores acima, ou seja, entre 4-5D não há efeito de borda, o efeito de borda foi avaliado por meio de modelagem numérica com uso do programa computacional de elementos finitos *PlaxisV8*®. Foi modelada uma prova de carga em placa no sistema solo-coluna granular sem reforços geossintéticos, com as mesmas dimensões a serem usadas no

programa experimental. Foi considerada uma tensão de ruptura de 500 kPa, assumida com base nos resultados do programa experimental que serão apresentados ao longo do trabalho e desprezou-se o atrito entre solo e caixa. A Figura 13 mostra o efeito de borda nas paredes do tanque onde foram executados os ensaios.

Figura 13 – Análise do efeito de borda no *PlaxisV8*®



Conforme observado na Figura 13, as paredes do tanque não influenciaram nos resultados do ensaio.

3.2. SOLO DE FUNDAÇÃO

O solo de fundação empregado constituiu de um material argilo arenoso residual de basalto, com classificação CH no Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), coletado na cidade de Santa Gertrudes, SP. Foram realizados ensaios de caracterização geotécnica resumidos na Tabela 2. O ensaio de compactação foi realizado na energia Proctor normal.

Nos modelos físicos, o solo de fundação foi compactado com um grau de compactação igual a 85% e teor de umidade de 24% com base nos parâmetros ótimos de compactação Proctor Normal. Esse grau de compactação foi selecionado no sentido de simular o estado físico natural em que o solo se encontrava nas condições de campo. A caracterização mecânica do solo de fundação envolveu ensaios de

compressão simples, segundo a ABNT NBR 12770/1992, (média de 5 determinações) e cisalhamento direto. As amostras foram compactadas na umidade ótima de 24% com grau de compactação de 85%. Como resultado, o ensaio de compressão obteve-se uma resistência média a compressão não-confinada de 31,69 kPa. Ressalta-se que este ensaio foi realizado somente como uma estimativa de se obter a resistência não drenada do solo para fins utilização nas previsões de capacidade de carga.

Tabela 2 - Resumo das propriedades características do solo de fundação

Propriedades	Normas	Valores
		Areia - 36%
Granulometria	NBR 7181 (2016)	Silte - 14%
		Argila - 50%
LL	NBR 7180 (2016)	51,4
IP (%)	NBR7180(2016)/NBR6459 (2016)	21,46
W _{ot} (%)	NBR7182 (2016)	24
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	NBR7182 (2016)	16,8
G _s	NBR9813 (2016)	2,97

IP – Índice de plasticidade, W_{ot} – teor ótimo de umidade para compactação, $\gamma_{dm\acute{a}x}$ – Peso específico aparente seco máximo, G_s – Densidade relativa dos grãos

Os ensaios de cisalhamento direto não drenados foram realizados com base na norma ASTM-D3080-11 (2011), nas condições inundada e não-inundada, com a finalidade de se obter parâmetros de resistência do solo. Para tal, utilizou-se o equipamento de cisalhamento direto presente no Labgeo da UFSCar, conforme a Figura 14. O molde utilizado para moldar os corpos de prova era circular e tinha dimensões de 6,33 cm de diâmetro e altura de 2,85 cm. O ensaio foi executado a uma velocidade de 0,7 mm/minuto e a envoltória de resistência foi calculada considerando como critério de parada 8 mm.

Para a condição inundada, os corpos de prova foram deixados em imersão em água por 24 horas antes de realizar o ensaio. Ensaíram-se amostras compactadas no mesmo grau de compactação e umidade ótima utilizados nos modelos físicos. O ensaio de cisalhamento foi realizado para tensões confinantes iguais a 50, 100, 200 e 300 kPa, sobre condições não inundadas. Para a condição inundada foram consideradas as tensões confinantes de 100, 150, 200 e 300 kPa. A Figura 15a a 15d mostram as curvas das tensões cisalhantes *versus* deslocamento e variação volumétrica *versus* deslocamento dos ensaios inundados e não inundados. O ângulo de atrito do solo de fundação na condição não inundada foi de 25° e o intercepto

coesivo 26,03 kPa. Para a condição inundada o ângulo de atrito obtido foi de 9° e um intercepto coesivo de 37 kPa, como mostrado na Figura 16. Foi notado que o transdutor de deslocamento vertical para o corpo de prova com tensão de confinamento de 200 kPa na condição inundada não realizou as leituras, conforme visto na Figura 14d.

Figura 14 – Cisalhamento direto utilizado no experimento

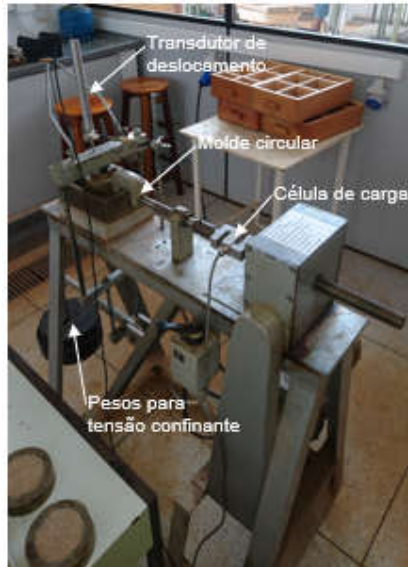


Figura 15 – (a) Curvas Tensão cisalhante *versus* deslocamento do ensaio de cisalhamento direto não inundado; (b) Variação do volume dos corpos de prova durante o cisalhamento; (c) Curvas Tensão cisalhante *versus* deslocamento do ensaio de cisalhamento direto inundado; (d) Variação do volume dos corpos de prova durante o cisalhamento inundado

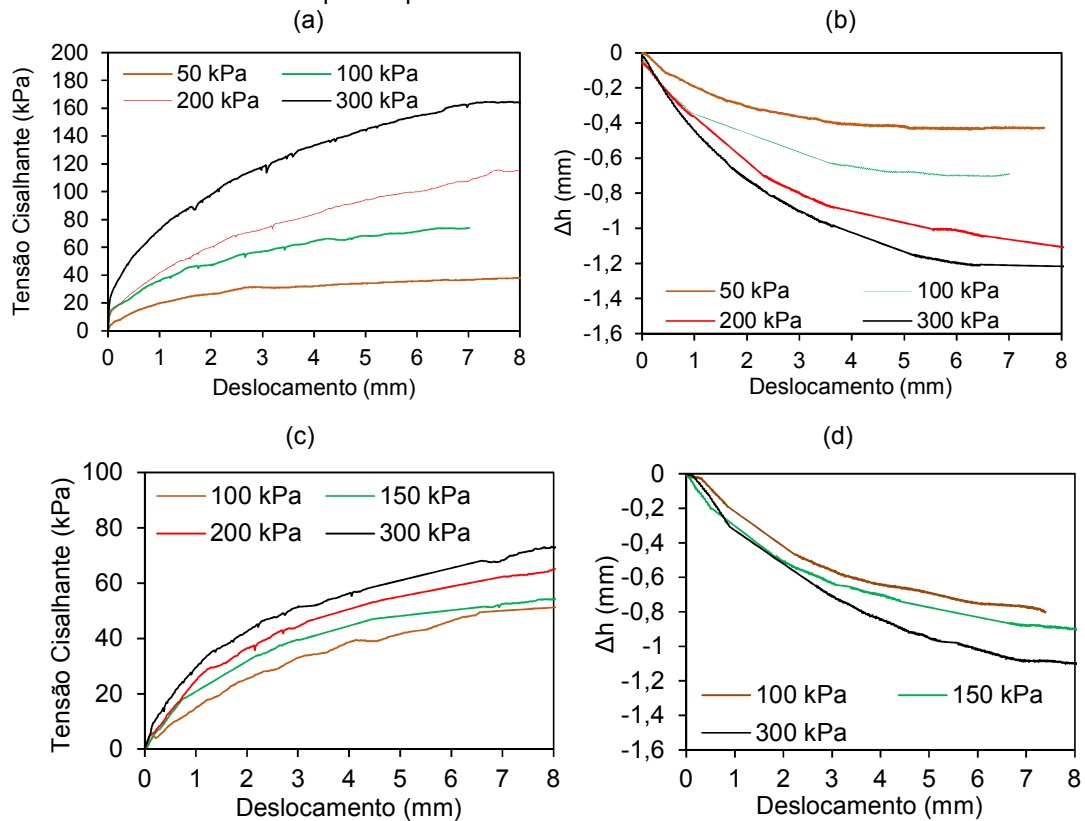
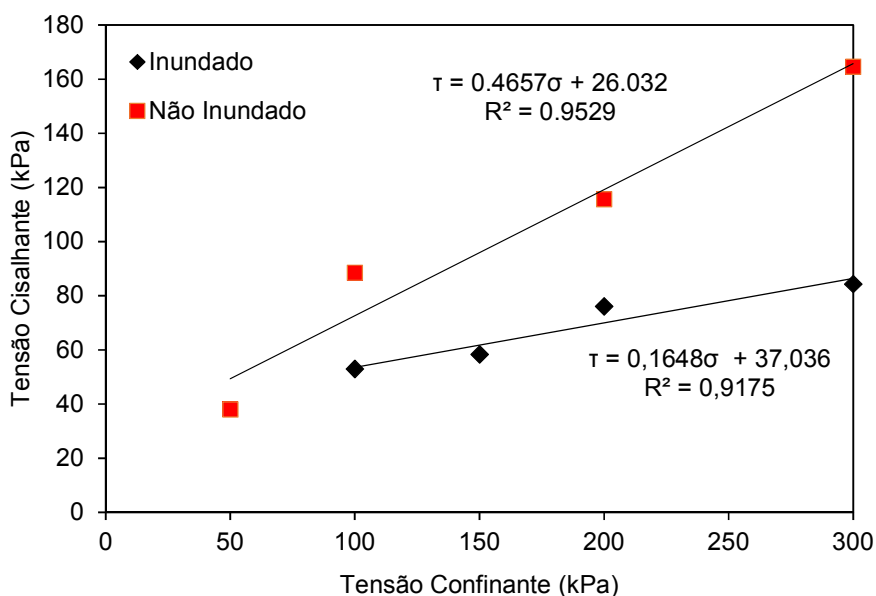


Figura 16 – Envoltória de tensões de cisalhamento direto em solo não inundado e inundado



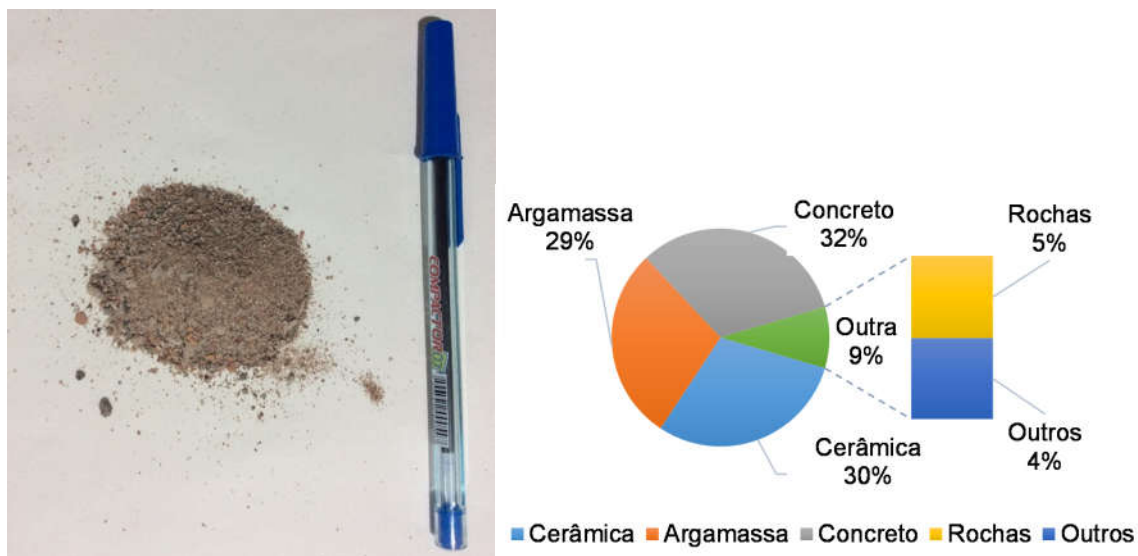
3.3. MATERIAL DE PREENCHIMENTO (RCC)

O agregado utilizado como material de preenchimento da coluna consistiu de um resíduo de construção civil (RCC) beneficiado no aterro de resíduos da cidade de São Carlos, SP. Trata-se de um produto com granulometria muito similar à da areia. A composição gravimétrica do RCC foi realizada por meio separação tátil-visual (ABNT-NBR 7250/1982) e pesagem total e parcial das partes constituintes do resíduo. A Figura 17a e b ilustram a usina com locais de extração do material para composição, bem como do material beneficiado, e a separação tátil-visual, respectivamente. Na Figura 18a é ilustrado o RCC utilizado no experimento. A composição gravimétrica é mostrada na Figura 18b.

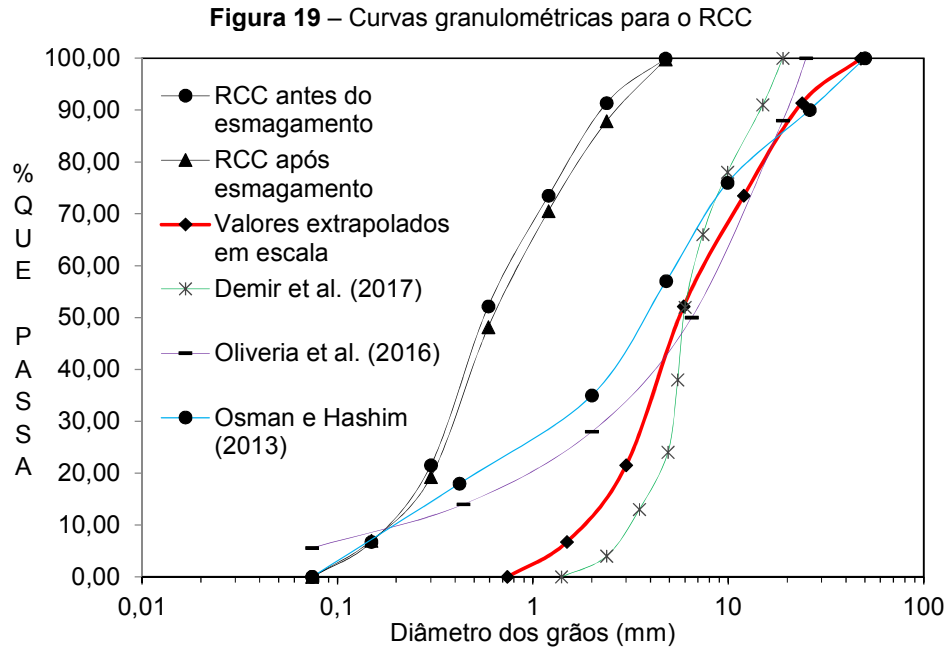
Figura 17 – (a) Coleta de material para composição gravimétrica e utilização na pesquisa; (b) Separação tátil-visual



Figura 18 – (a) RCC utilizado na pesquisa; (b) Composição gravimétrica do RCC



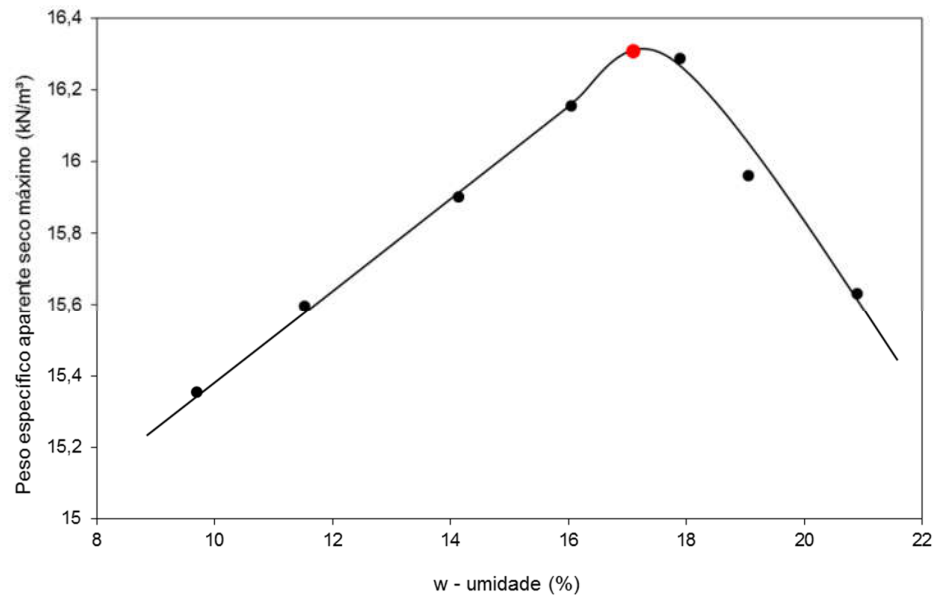
As granulometrias utilizadas para colunas granulares nos trabalhos de Osman e Hashim (2013), Oliveira et al. (2016) e Demir et al. (2017) foram utilizadas como referência para este estudo. Para selecionar o material da coluna em modelo reduzido, aplicou-se uma escala de redução de 1:10 (laboratório:campo), nesta granulometria, para a obtenção da curva granulométrica do agregado utilizado neste experimento. O RCC foi homogeneizado e peneirado de acordo com a norma da ABNT NBR 7181/2016, e posteriormente caracterizado. O material que passou na peneira #0,42mm foi desprezado, de forma a obedecer a escala 1:10. A curva granulométrica do RCC utilizado na coluna do modelo reduzido se encontra na Figura 19. Uma vez que RCC's podem apresentar fragilidade frente a esforços, o ensaio de esmagamento foi realizado, de acordo com a ABNT NBR 9938/1987. Na Figura 19 também é apresentada a curva granulométrica realizada após o ensaio de esmagamento com carregamento uniforme de 40 kN a cada minuto até atingir 400 kN, que comprova a resistência do material à quebra. Na Figura 19 é mostrada também a granulometria extrapolada pela escala 1:10 utilizada neste experimento para a escala real, juntamente com as curvas granulométricas das referências utilizadas para o estudo.



No entanto, vale lembrar que o esmagamento foi realizado com a parcela fina utilizada no modelo reduzido. Portanto, o grau de quebra para partículas em escala real não foi avaliado neste experimento. Cabe observar que, o grau de quebra pode se alterar com o tamanho dos grãos.

O ensaio de compactação foi realizado para o RCC na energia de Proctor intermediária, a fim de se obter uma energia maior para o RCC no ato da execução da coluna, em relação ao solo. Por meio do ensaio obteve-se um peso específico aparente seco máximo de $16,25 \text{ kN/m}^3$ e $17,6\%$ de umidade ótima, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Curva de compactação do RCC



Ainda, realizou-se ensaio de compressão simples no RCC, com base na norma ABNT NBR 12770/1992. Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizada a umidade ótima de 17,6%, obtida do ensaio de compactação e um grau de compactação de 100%. Como resultado encontrou-se um valor médio de 50,9 kPa, desvio padrão de 4,969, coeficiente de variação de 9,76% e deformação média na ruptura de 1,78%.

Ensaio de cisalhamento direto drenado, baseado na norma ASTM-D3080-11, foi utilizado para caracterizar o resíduo quanto à resistência, aplicando-se um grau de compactação igual a 100%, e com umidade ótima igual a 17,6%, nas condições inundada e não inundada. A metodologia desse ensaio seguiu os mesmos procedimentos realizados para solo, com mesma velocidade de ensaio e corpos de provas e envoltória de resistência com critério de parada em 6 mm. Para a condição inundada foi realizada a inundação do corpo de prova juntamente com a tensão confinante por um período de 24 horas. As tensões confinantes adotadas foram de 25, 50, 100, 200 e 300 kPa para a condi o não inundada e 100, 150, 200 e 300 kPa para a condi o inundada. O  ngulo de atrito obtido foi de 42  e o intercepto coesivo igual a 37,7 kPa para a condi o de amostra não inundada, enquanto que para a condi o inundada obteve-se um ângulo de atrito de 25  e um intercepto coesivo de 29 kPa. As Figuras 21a a 21d apresentam os resultados dos ensaios para as duas condi es ensaiadas. A Figura 22 ilustra as envoltórias de resistências obtidas do ensaio de cisalhamento direto do RCC inundado e não inundado.

Figura 21 – (a) Tensão cisalhante no RCC não inundado; (b) variação volumétrica por deslocamento no RCC não inundado; (c) Tensão cisalhante no RCC inundado; (d) variação volumétrica por deslocamento no RCC inundado

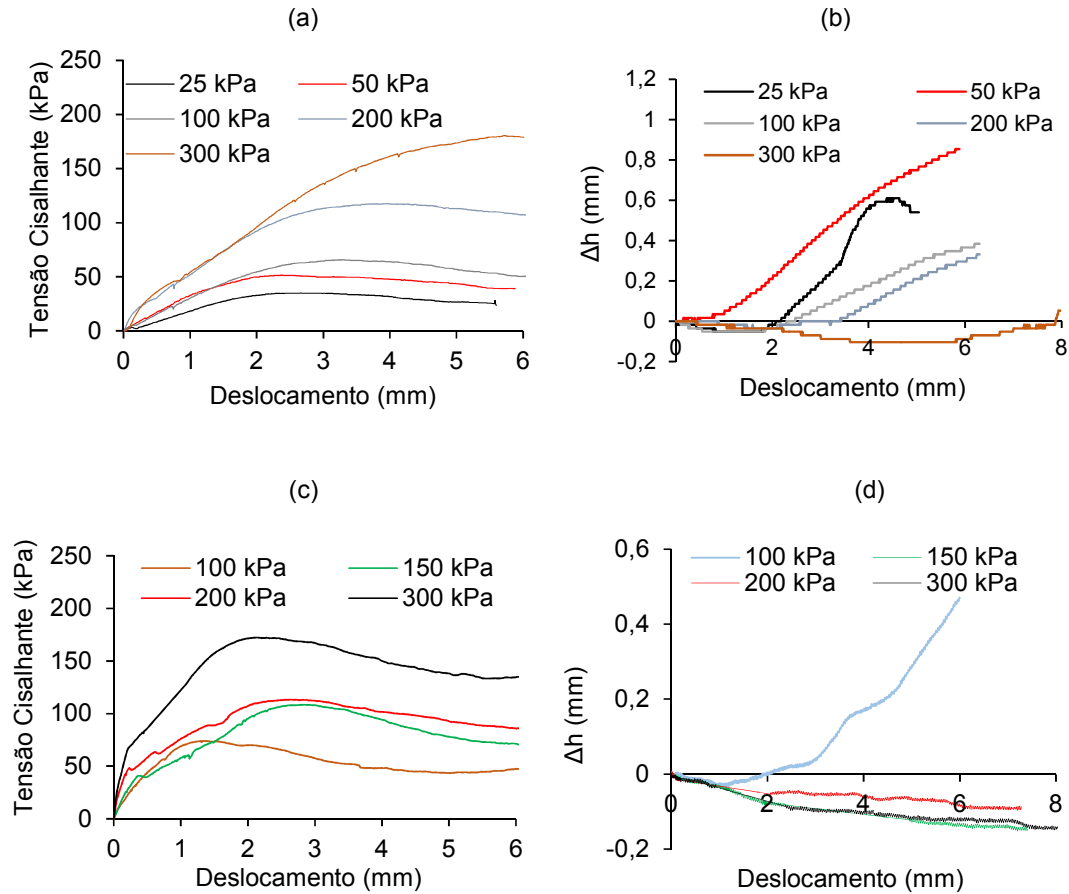
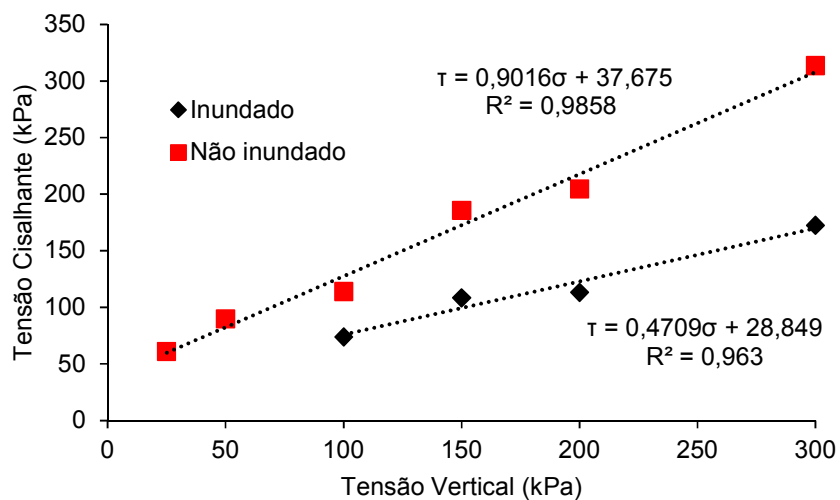


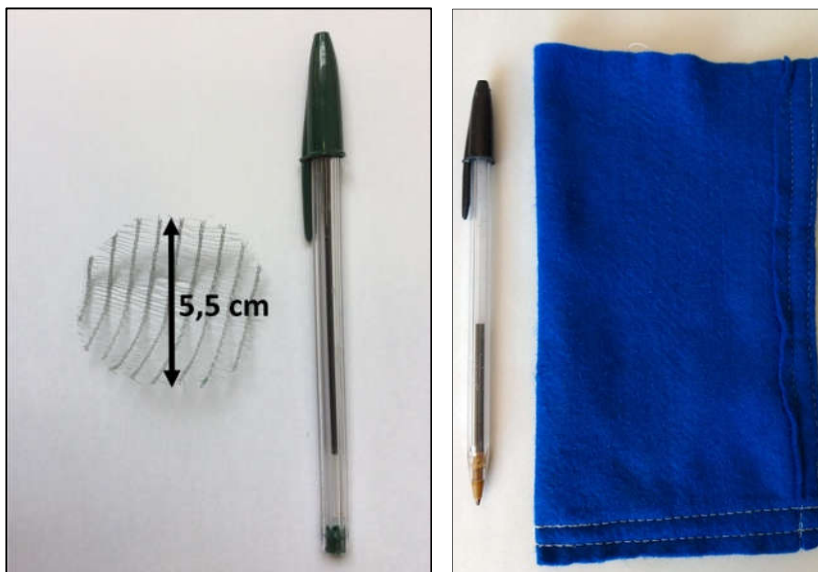
Figura 22 - Envoltória de tensões do RCC para cisalhamento direto



3.4. GEOSSINTÉTICOS

Tratando-se de modelos reduzidos, procurou-se obter geossintéticos que representassem, em escala reduzida, as mesmas características que geossintéticos em escala real. Devido a maior aderência de interface, escolheu-se trabalhar com geogrelhas como reforços horizontais nas colunas. Com o intuito de simular uma geogrelha biaxial com abertura de aproximadamente 2 cm (transversal) por 4 cm (longitudinal), optou-se pela utilização de telas de polietileno comercialmente vendidas como “tela fachadeiras”. A escala obedeceu a relação de (1:10) para as medidas da tela fachadeira de 0,2 cm (transversal) por 0,4 cm (longitudinal). Ainda, para a escolha do material que foi utilizado em escala reduzida utilizou-se o estudo de Jewell et al. (1984), o qual sugere que, entre a abertura da geogrelha e o diâmetro médio das partículas, deve haver uma relação que otimiza a resistência passiva ocorrentes na geogrelha. Essa relação, segundo os autores, é dada com $b/D_{50} \geq 3$. Observando as curvas granulométricas da Figura 19, pode-se perceber que o D_{50} do material é de aproximadamente 0,5 mm. Relacionando esse valor com a abertura de 0,2 cm (2mm), observa-se um valor igual a 4, estando, portanto, adequada a interação da tela fachadeira com o material utilizado. As geogrelhas foram devidamente cortadas no mesmo diâmetro do furo da coluna ($D=5,5$ cm) como mostra a Figura 23a. No caso do encamisamento parcial das colunas, adotou-se um geotextil não-tecido de poliéster, comercialmente vendido como “feltro”, no intuito de simular as características do geotêxtil tecido comumente usado como encamisamento em escala real, com comprimento de 11 cm e diâmetro de 5,5cm. Neste estudo foi utilizado como encamisamento um geotextil não-tecido de poliéster com espessura de 1,127 mm e gramatura de 180 g/cm², como mostra a Figura 23b.

Figura 23 – Geossintéticos usados na pesquisa: (a) geogrelha "tela fachadeira"; (b) geotêxtil não-tecido para encamisamento da coluna
(a) (b)



Para caracterização mecânica da geogrelha e do geotêxtil não-tecido, em miniatura, foi realizado o ensaio de tração do tipo faixa estreita baseado na norma ASTM D882-2012. Foram utilizadas duas garras bipartidas e uma prensa com célula de carga e sensor de deslocamento para a execução do ensaio. As amostras foram cortadas de acordo com o prescrito na norma e a montagem do ensaio está ilustrada na Figura 24a e 24b. Por meio da realização deste ensaio, obteve-se as curvas apresentadas nas Figuras 25a e 25b para o material do modelo físico 1-g. Utilizando a similitude de escala proposta por Viswanadham e König (2004), foi realizada a extrapolação para o protótipo, também apresentado na Tabela 3.

Figura 24 – Ensaio de tração realizados no DEMA/UFSCar: (a) geogrelha; (b) geotêxtil



Figura 25 – Curva média do ensaio de tração: (a) geogrelha; (b) geotêxtil

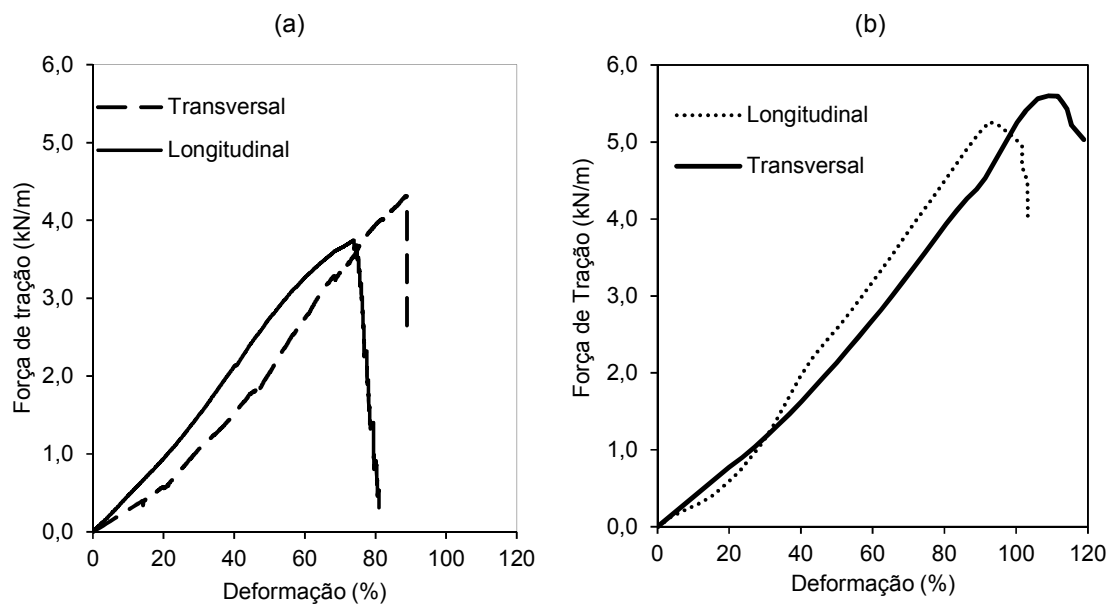


Tabela 3 - Propriedades dos geossintéticos em miniatura e escala real

Propriedades	Geotextil não tecido 1g	Geotextil não-tecido Protótipo	Geogrelha 1g	Geogrelha Protótipo
Deformação na ruptura (%)	109	109	88,8	88,8
Dimensões (diâmetro x altura) (m)	0,055 x 0,11	0,55 x 1,1	0,055	0,55
Área (m ²)	0,0214	2,14	0,0024	0,24
Resistência à tração (kN/m)	5,60	560	4,31	431
Módulo secante (kN/m) (5%)	3,87	387	4,5	450
Abertura (mm) ou gramatura (g/cm ²)	180	180	2 x 4	20 x 40

3.5. PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS

Primeiramente, o solo foi peneirado, loteado em sacos plásticos, hermeticamente fechados, cada um com 30 kg, e esperou-se a homogeneização do solo por 24 horas, como ilustra as Figuras 26a e 26b. Após, foram coletadas amostras em cada saco para a verificação da umidade, por meio de estufa a 105°C durante 24 horas e posterior correção da umidade. A umidade de ensaio foi de 24% e a correção da umidade foi realizada em cada lote com o auxílio de betoneira para misturar o solo e uma proveta com capacidade de 1000 ml.

Figura 26 – Preparação do solo: (a) Peneiramento do solo; (b) separação do solo por lotes em sacos plásticos; (c) marcas de 5 centímetros para facilitar e controlar a compactação do solo



Depois de corrigida a umidade, esperou-se que o solo ficasse por 24 horas hermeticamente fechado para que ocorresse a perfeita homogeneização da umidificação em toda a massa de solo. Então, camadas de 5 cm de solo foram compactadas manualmente dentro do tubo de concreto, como ilustra a Figura 26c, com auxílio de um soquete manual, sendo que para cada camada foram necessários 70,09 kg de solo para atingir o grau de compactação de 85%, conforme pretendido. A cada duas camadas compactadas, para todos os ensaios realizados, foram retiradas amostras indeformadas pelo método de cilindro de cravação para aferir o grau de compactação, como mostra a Figura 27a. Para o controle do grau de compactação, foi utilizado o método de frigideira para aferir a umidade após a compactação, devidamente calibrado com o método da estufa (Figura 27b). Objetivou-se obter um grau de compactação igual a 85%, que corresponde ao grau de compactação do solo natural, mas, em virtude da dificuldade de se controlar a força aplicada ao soquete, foi permitida uma variação de $\pm 3\%$.

Figura 27 – Controle de compactação: (a) Cilindro de aferição de compactação; (b) Umidade após compactação – método da frigideira



As camadas foram enumeradas de 1 a 20 da base do tanque até a superfície para facilitar o controle da compactação. As camadas seguintes só foram liberadas para a compactação após a aferição do grau de compactação da camada anterior.

Referindo-se à execução da coluna, por meio da fórmula de energia de compactação, determinou-se o número de golpes por camada para o uso do soquete de 2,5 Kg, caindo de uma altura de queda de 30,5 cm, para uma estimativa de se alcançar a energia de Proctor intermediária igual a 12,6 kgf/cm²/cm, conforme proposto por Oliveira et al. (2016). A razão de substituição de área do solo, também conhecida como taxa de cobertura, em relação à coluna foi de 7,56%. A coluna foi dividida em 8 camadas de 5 cm para a sua compactação, sendo inseridos 180,21 gramas de RCC por camada e um volume total de 950,33 cm³. A fórmula da energia foi apresentada na equação (1).

$$E = \frac{PhnN}{V} \quad (1)$$

Onde:

P: Peso do soquete (kg);

h: altura de queda;

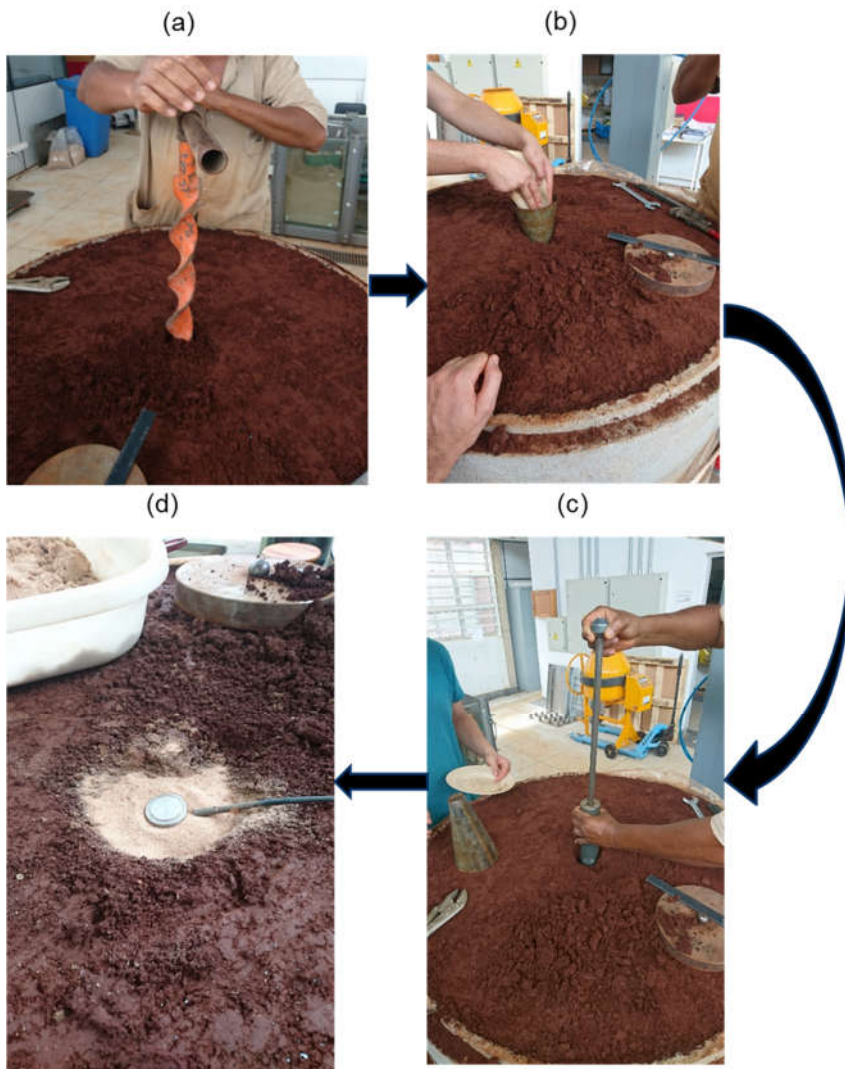
N: Número de golpes;

n: número de camadas;

V: Volume do solo compactado.

O número de golpes calculado para a execução da coluna na tentativa de se obter a energia de compactação intermediária foi de 19,29 golpes, arredondados para 20 golpes. O processo executivo da coluna está ilustrado na Figura 28a a 28d.

Figura 28 – (a) Perfuração do solo; (b) Inserção do RCC na coluna; (c) Compactação das camadas; (d) Finalização com camada de areia e célula de tensão total no topo da coluna



Como nos cálculos não se previu a deformação lateral do solo, foram necessárias 13 camadas de solo em vez de 8, com 180,21 gramas de RCC em cada camada, consumindo um total de 2342,73 g de material. O RCC foi compactado na umidade ótima e com grau de compactação igual a 100%.

No ato da execução da compactação, nas camadas 12 e 20 (entende-se: 40 cm de profundidade e na superfície, respectivamente) foram instaladas as células de tensão total para avaliar as tensões no topo e na ponta da coluna. As células de tensão total foram cobertas por uma pequena camada de areia, conforme visto na Figura 28d.

Por fim, após a alocação da célula de tensão total no topo da coluna, foi finalizada a última camada e assentada a placa ao sistema de melhoramento de solo. Um

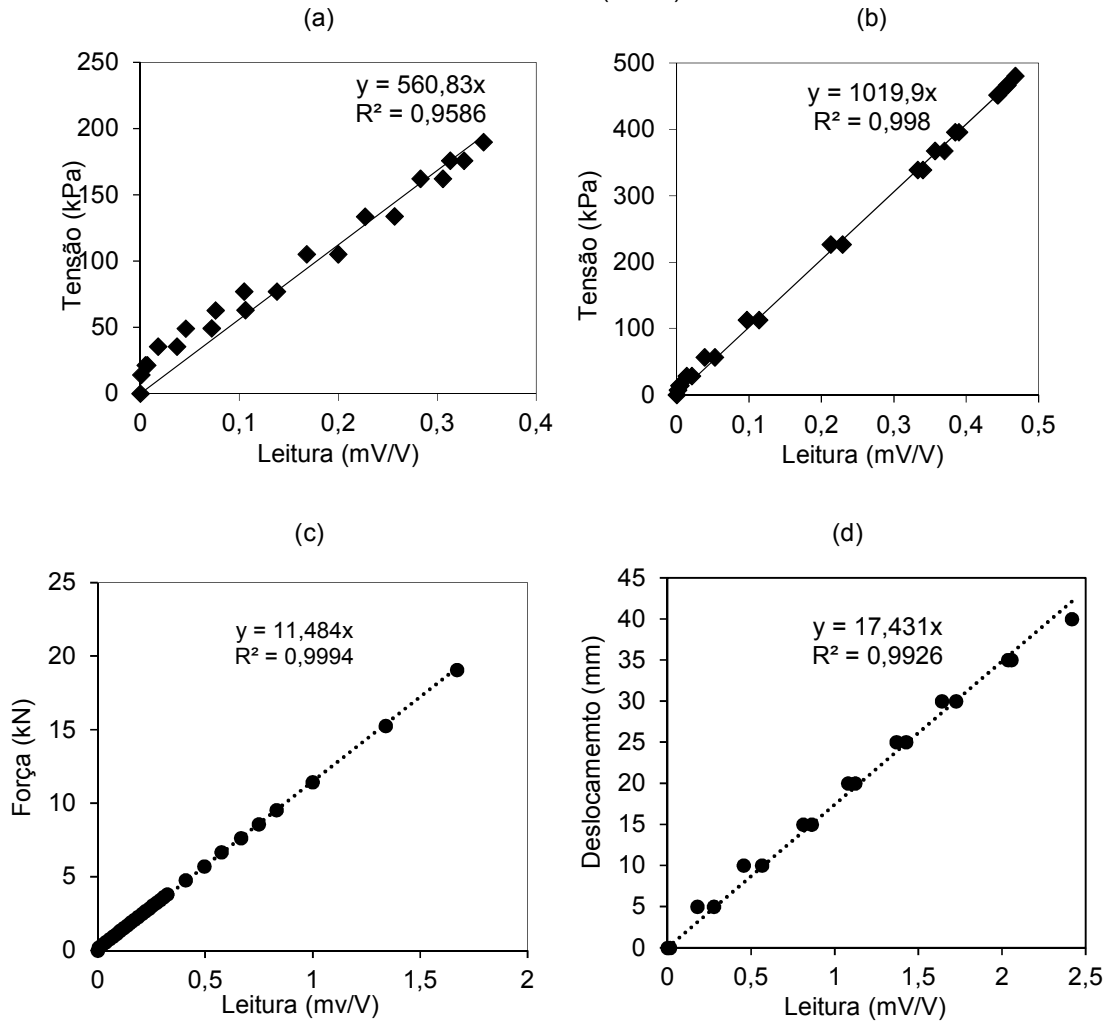
cuidado foi tomado para garantir a coincidência dos centros da coluna e da placa para que não houvesse excentricidade no sistema.

Além da aquisição dos dados já mencionados, foi realizada também aquisição analógica por meio de relógio comparador.

3.6. INSTRUMENTAÇÃO

O programa de instrumentação consistiu no monitoramento das tensões no solo no topo e na ponta da coluna granular, bem como do deslocamento vertical da placa ou topo. O monitoramento das tensões foi realizado com o uso de 2 células de tensões totais, uma com capacidade de 200 kPa na ponta e outra com capacidade de 500 kPa no topo da coluna. Sobre a placa foram instalados 1 transdutor de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) e 1 relógio comparador para aferir os deslocamentos. As leituras das células de tensão total foram obtidas por meio do sistema de aquisição de dados D5 da *Vishay*, enquanto as leituras dos transdutores foram obtidas pela aquisição de dados do tipo NI USB-6008, da *National Instruments*. As calibrações das células de tensão total foram realizadas imersas em areia, assim como ocorreu o acamamento das células em areia nos ensaios de provas de cargas. As curvas de calibração das instrumentações encontram-se nas Figuras 29a a 29d.

Figura 29 – Curvas de calibração das células de tensão total: (a) Ponta da coluna de 200 kPa; (b) Topo da coluna de 500 kPa; (c) Calibração célula de carga 20kN; (d) Calibração do transdutor de deslocamento (LVDT)



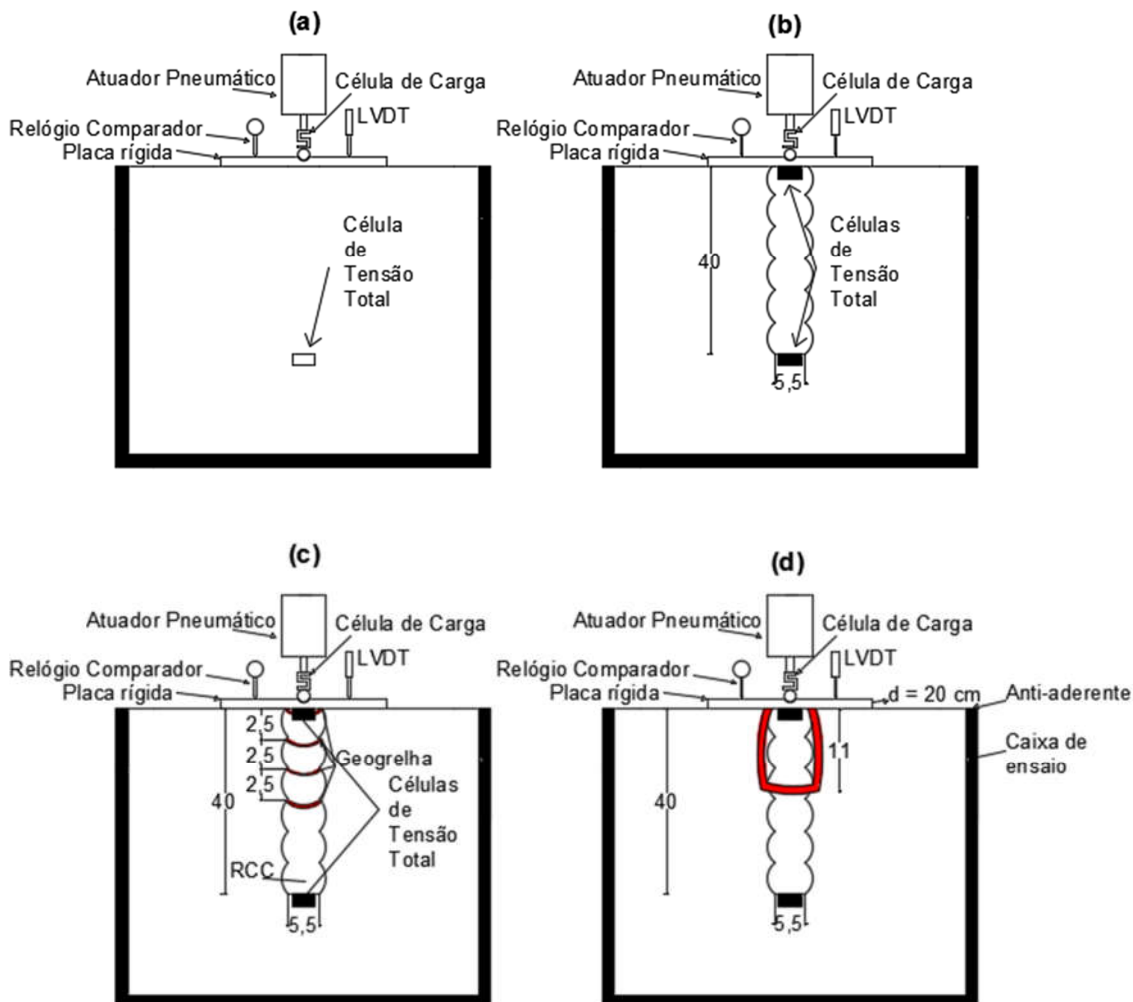
3.7. PROGRAMA DE ENSAIOS

Este trabalho contemplou a avaliação de uso de reforços geossintéticos em diferentes configurações em colunas granulares incluindo posicionamentos horizontais e encamisamento parcial. Geogrelhas foram utilizadas como reforço horizontal no topo da coluna granular, até uma profundidade de 2D (duas vezes o diâmetro da coluna), enquanto o geotêxtil não tecido foi utilizado como encamisamento parcial até a mesma profundidade. Utilizou-se a profundidade de 2D como critério de parada em virtude de que o abaulamento, principal método de ruptura para este tipo de coluna, ocorre principalmente até a profundidade de 2D, como visto por diversos

autores (MURUGESAN; RAJAGOPAL, 2006; GHAZAVI; NAZARI AFSHAR, 2013; HONG et al., 2016).

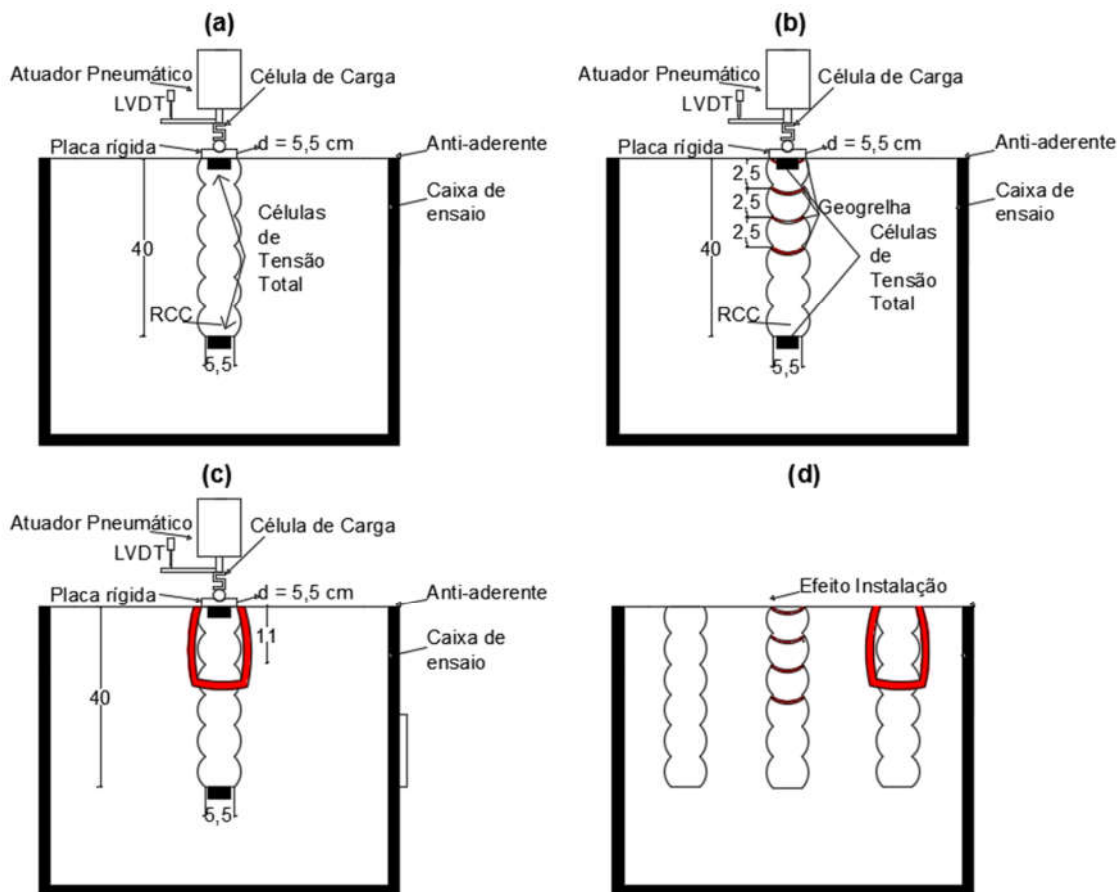
Inicialmente, quatro provas de cargas em placas foram realizadas: i) uma no solo de fundação; ii) coluna sem reforço geossintético na horizontal; iii) coluna com reforço em geogrelha na horizontal; iv) coluna com encamisamento parcial, conforme descrito nas Figuras 30a a 30d. As linhas horizontais de geogrelha foram posicionadas até uma profundidade de 2 vezes o diâmetro (D) da coluna em relação à superfície, com o intuito de restringir o abaulamento que ocorre nessa região. A aplicação da geogrelha foi realizada em 4 camadas de 2,5 cm (0,45D) ao longo do comprimento 2D em relação à superfície, a fim de simular a aplicação do reforço em camadas de 25 cm para a escala real. Com a utilização de um trado helicoidal manual, realizou-se a perfuração do solo, com o centro da coluna coincidindo com o centro da placa, com um diâmetro igual a 5,5 cm e comprimento igual a 40 cm. Essas dimensões foram escolhidas para que a ponta da coluna fosse instalada na região onde o bulbo de tensão da sapata era igual a 90 % da tensão aplicada na placa, ou seja, aproximadamente onde ($h = 2B$), segundo Poulos & Davis (1974).

Figura 30 - (a) Instrumentação no solo; (b) Instrumentação na coluna sem geossintético; (c) Instrumentação na coluna com geogrelha; (d) instrumentação na coluna encamisada com geotêxtil não tecido



Ensaio de provas de cargas em colunas também foram realizados com o intuito de se conhecer o comportamento das colunas, para as diferentes configurações de geossintéticos. Sendo assim, foram realizadas três provas de cargas somente nas colunas: v) na coluna de RCC sem reforço geossintético; vi) na coluna de RCC com reforço em geogrelha na horizontal; e vii) na coluna de RCC com encamisamento parcial de geotêxtil. Também nesta fase, foram executadas as três configurações das colunas, porém sem a execução da prova de carga, a fim de se avaliar o efeito de instalação das colunas no solo circundante. As Figuras 31a a 31d mostram as diferentes configurações de geossintéticos nas colunas com e sem execução de prova de carga.

Figura 31 – (a) Prova de carga em coluna sem reforço geossintético; (b) Prova de carga em coluna com reforço em geogrelha na horizontal; (c) Prova de carga em coluna com encamisamento parcial em geotêxtil não tecido; (d) Análise do efeito de instalação das colunas



Por fim, ao terminar os 7 ensaios, observou-se a aplicação de geossintético à coluna que configurou o melhor desempenho do sistema e realizou-se um ensaio de prova de carga em placa sobre efeito de inundação. O sistema de melhor desempenho foi aquele com encamisamento parcial com geotêxtil não-tecido e, por isso, foi utilizado na análise da inundação. Previamente ao ensaio inundado, foi realizado um ensaio de permeabilidade com carga variável no solo, baseado na NBR 14545 (ABNT, 2001), resultando em um coeficiente de permeabilidade (k) igual a $2,73 \times 10^{-5}$ cm/s. Seriam necessários 3,16 dias para que a água percolasse por todo o tanque de ensaio (solo de fundação) antes da execução do ensaio. Porém, deixou-se fluir água por um período de 7 dias antes da execução das provas de cargas. Para se avaliar o efeito da inundação com água no sistema, também foi realizada a inundação no solo sem a coluna de reforço, ou seja, solo natural.

3.8. EXECUÇÃO DE ENSAIO

Para meios de comparação foram realizadas provas de carga: (i) no solo de fundação; (ii) no sistema coluna-placa nas com RCC sem geossintéticos; (iii) no sistema coluna-placa com RCC e reforço de geogrelhas na horizontal; (iv) no sistema coluna-placa com RCC encamisado parcialmente com geotêxtil não-tecido; (v, vi, vii) nas três colunas separadamente; (viii) no solo inundado; (ix) no sistema coluna-placa com RCC encamisado parcialmente com geotêxtil não-tecido na condição inundada.

A execução do ensaio de prova de carga à compressão em placa no modelo reduzido foi baseada nas normas NBR 6.489 (ABNT, 1984) e NBR 12.131 (ABNT, 2006) visto que se tratou-se de um sistema de fundação superficial com melhoramento em coluna granular sob a sapata e para este sistema não há uma norma específica.

Os ensaios de prova de carga com coluna (placa e coluna) de melhoria foram realizados em estágios iguais e sucessivos de 1,57 kN (50 kPa), porém com um estágio a mais de carregamento para os sistemas com reforço em geogrelha na horizontal, visto que os deslocamentos não foram expressivos para o mesmo estágio final de carregamento. Depois, iniciou-se a fase de descarregamento em 5 estágios de 3,14 kN (100 kPa) cada um com 10 minutos, com a leitura dos respectivos deslocamentos tomada de minuto a minuto do início ao fim de cada estágio. Na prova de carga da coluna RCC obteve-se um nível maior de tensão aplicado, que para os outros ensaios foram evitados em virtude de se atingir o limite de capacidade da célula de tensão total instalada no topo das colunas.

Para a prova de carga no solo, visto que os deslocamentos foram mais significativos, foram dados acréscimos menores de tensão, sendo realizados 10 estágios de carregamento, com aproximadamente 20 kPa e 5 estágios de descarregamento de aproximadamente 40 kPa. A carga aplicada por estágio foi mantida por 10 minutos, independentemente da estabilização dos deslocamentos. As leituras dos deslocamentos foram realizadas de minuto a minuto do início ao fim de cada estágio. Nas Figuras 32, 33 e 34 estão ilustrados os estágios de carregamento para cada ensaio de prova de carga. Por meio dos dados coletados, possibilitou-se a plotagem dos gráficos de tensão *versus* deslocamento.

Figura 32 – Estágios de carregamento para os respectivos ensaios de placa não inundados

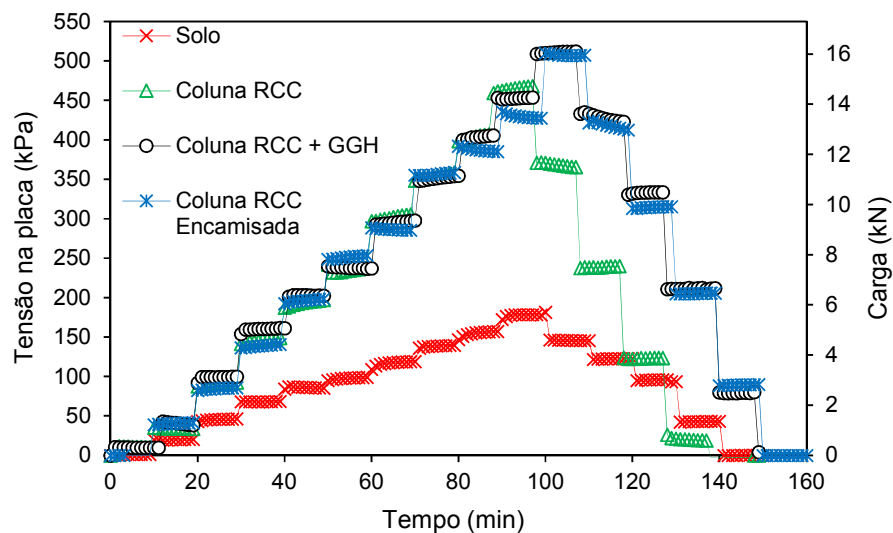


Figura 33 – Estágios de carregamento para os respectivos ensaios em colunas

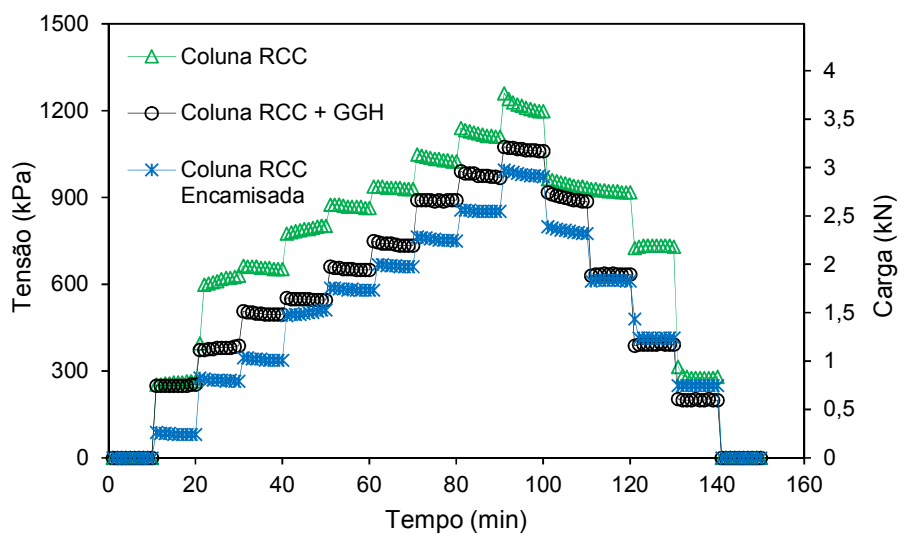
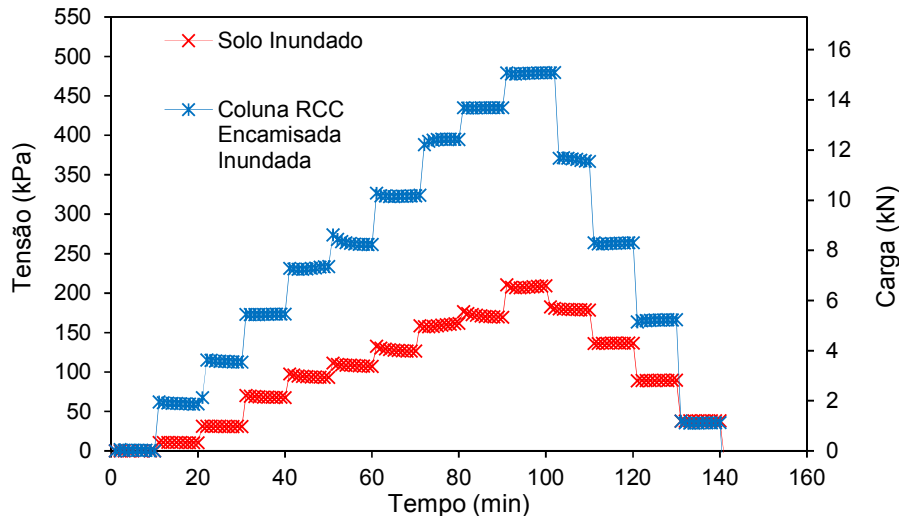


Figura 34 – Estágios de Carregamento para os ensaios em placa em condição inundada



3.9. MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO DE CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO VERTICAL E PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DE COLUNAS E SOLOS MELHORADOS PARA FUNDAÇÃO EM SAPATAS

Diante das curvas de tensão *versus* deslocamento obtidas experimentalmente, necessitou-se da utilização de métodos de extrapolação da curva para a obtenção da tensão de ruptura para os ensaios realizados. Dentre os métodos de extrapolação existentes na literatura para interpretação das curvas, os seguintes foram escolhidos os métodos de Terzaghi (1951), Van der Veen (1953), Brinch-Hansen (1963), Método da Inclinação das Tangentes (Kulhawy e Hirany, 1989) e Decóurt (1996).

Mesmo que o objetivo desta pesquisa seja uma análise qualitativa dos dados das provas de carga, realizou-se também uma análise quantitativa por meio dos métodos de previsão de capacidade de carga para cada um tipo de coluna e também para a sapata sobre solo melhorado com as colunas. A Tabela 4, apresenta os métodos utilizados para a estimativa da capacidade de carga para o solo com e sem a coluna de melhoramento. Por não haver métodos para estimativa da capacidade de carga para colunas com geogrelha na horizontal, as previsões de capacidade de carga para esse tipo de coluna não foram realizadas. Entende-se que seria necessário realizar uma modelagem numérica a fim de se obter parâmetros precisos para a estimativa da capacidade de carga dessas colunas.

Tabela 4 – Métodos de estimativa de capacidade de carga

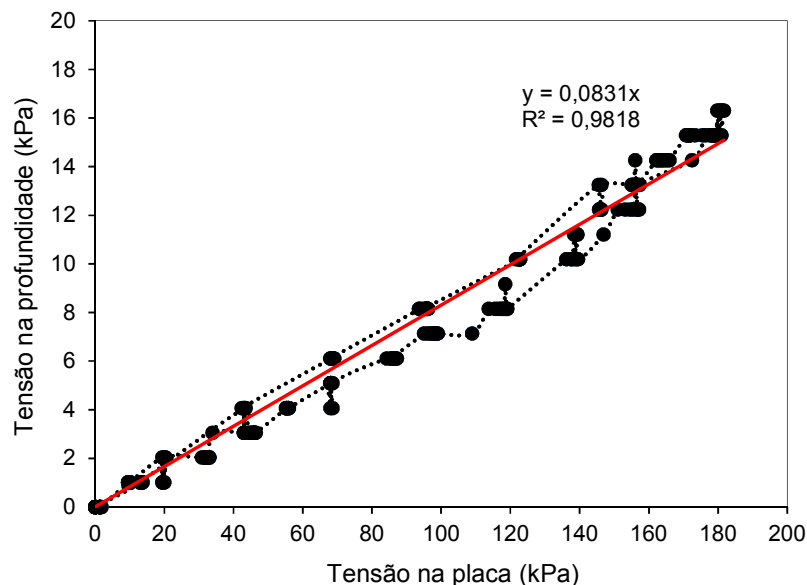
Prova de carga	Formulação teórica	Autor
Solo	$q_u = 1,3cN_c + \gamma_1 DN_q + 0,3\gamma_2 N_\gamma$	Terzaghi (1943)
Solo	$q_u = 5C_u(1 + 0,2\frac{D_f}{B})(1 + 0,2\frac{B}{L})$	Das (2017)
Solo + Coluna RCC	$q_u = [\sigma'_{r0} + k_p s_u] \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2})$	Hughes et al. (1975)
Solo + Coluna RCC	$q_u = [\sigma'_{r0} + k_p s_u] \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2}) a_r + d_c d_d N_c s_u (1 - a_r)$	Stuedlein e Holtz (2013)
Solo + Coluna RCC	$q_{sc} = (q_u)^{1,66} (\frac{S}{D})^{-0,17} (\frac{L}{d_{sc}})^{0,57} (\frac{S}{d_{sc}})^{-1,36}$	Bora e Dash (2014)
Solo + Coluna RCC	$q_u = 15,34(c_u)^{0,401} (A_s)^{0,266} (N_s)^{0,084} (\frac{L}{D})^{0,526}$	Fattah et al. (2017)
Coluna RCC Encamisada	$q_u = \frac{T - r_c \gamma'_c D \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}{r_c \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}$	Van Impe e Silence (1986)
Coluna RCC Encamisada	$\sigma_v = (\sigma_{r0} + 4c_u + p_c) K p_{col}$	Murugesal e Rajagopal (2010)
Coluna RCC Encamisada	$\sigma_v = (\sigma_{r0} + 4c_u + \frac{1 + \text{sen}\varphi}{1 - \text{sen}\varphi} + \frac{2T}{d}) \tan^2(45 + \frac{\varphi_c}{2})$	Tandel e al. (2014)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE DAS PROVAS DE CARGAS EM PLACA

De forma a justificar a utilização da coluna em 40 cm de profundidade, foi executado um ensaio de prova de carga em placa no solo com monitoramento das tensões na profundidade de duas vezes o lado da sapata. A Figura 35 mostra a curva de representação do ensaio de carga rápida no solo sem coluna, considerando a tensão aplicada à placa *versus* a tensão que chega a uma profundidade de 40 cm (duas vezes o diâmetro da sapata – 2B).

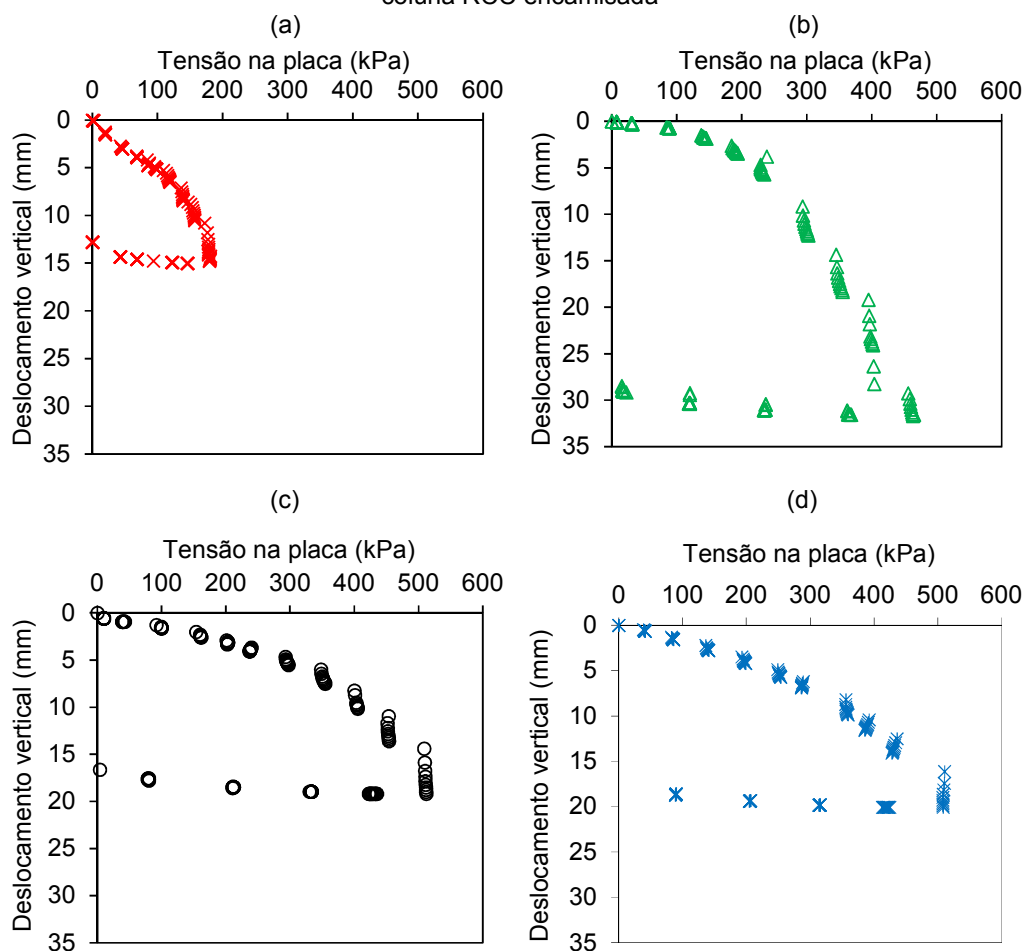
Figura 35 - Tensão aplicada à placa *versus* tensão a uma profundidade de 2B da prova de carga em placa no solo de fundação



Nota-se que que em torno de 8,3% (coeficiente angular da equação no gráfico da Figura 35) da tensão aplicada na placa chegou a uma profundidade de 40 cm (2 vezes o lado da sapata – 2B), concordando com os estudos de Poulos & Davis (1974) baseados na Teoria da Elasticidade. Este resultado, juntamente com a contribuição de Castro (2014), o qual relatou que existe um comprimento crítico para colunas de aproximadamente duas vezes o lado da sapata (40 cm) que torna o sistema mais eficiente, foram considerados para definir o comprimento da coluna de 40 cm (2B).

A Figura 36a, b, c e d mostram as curvas tensão – deslocamento referentes aos ensaios de prova de carga em placa realizados no solo de fundação, no sistema solo/coluna granular com RCC, solo/coluna granular RCC reforçado com geogrelha na horizontal e solo/coluna granular de RCC encamisada parcialmente com geotêxtil, respectivamente.

Figura 36 – Gráfico Tensão versus Deslocamento Vertical para as Provas de Carga em placa não inundado (a) solo; (b) solo e coluna RCC; (c) solo, coluna RCC e geogrelha na horizontal; (d) solo, coluna RCC encamisada



Na Figura 36a, prova de carga em placa sobre o solo, pode-se notar que, a partir de 120 kPa e no par ordenado 6,5 mm de deslocamento vertical, começou a ocorrer uma taxa de deslocamentos verticais para um mesmo estágio de carregamento, ou seja, houve aumento do deslocamento vertical da placa para uma mesma carga. Observou-se que, para o último estágio de carregamento, isto é, 180 kPa, ocorreu uma taxa de deslocamento vertical de 4mm. Da mesma forma, na Figura 36b, prova de

carga em placa sobre solo melhorado com coluna RCC, a taxa de deslocamento vertical começou a ocorrer a partir de 300 kPa e 9,15 mm para o deslocamento vertical. Esta diferença entre o início da taxa de deslocamento vertical da prova de carga do solo para o solo reforçado com a coluna RCC, evidencia uma melhora na rigidez do solo reforçado. Pode-se notar também, que até aproximadamente 184 kPa na prova de carga do solo reforçado com coluna RCC, os deslocamentos verticais se mantiveram entre os primeiros 5 mm. Observando a curva da Figura 36a, para o mesmo nível de tensão, os deslocamentos verticais foram da ordem de 15 mm. Ainda, comparando-se as duas curvas das Figuras 36a e 36b, ao traçar uma reta imaginária tangente aos estágios iniciais, quanto maior a inclinação em relação ao eixo das abcissas, menor a rigidez do sistema, com isso observou-se uma rigidez maior para o solo reforçado com coluna RCC. A rigidez dos sistemas será mostrada no item 4.6 do presente capítulo.

As Figuras 36c e 36d mostram as curvas das provas de cargas em placa realizadas sobre o solo melhorado com coluna RCC e reforços geossintéticos, geogrelha na horizontal e encamisamento com geotêxtil, respectivamente. Notou-se que a taxa de deslocamento vertical começou a ocorrer para o nível de tensão de 350 kPa e 6,5 mm no par ordenado, ocorrendo um aumento gradativo da taxa nos estágios posteriores. Em relação à coluna sem reforço geossintético, observou-se que a taxa de deslocamentos verticais começou a ocorrer para um nível de tensão ainda maior. Tal fato evidencia que os reforços geossintéticos, tanto a geogrelha quanto o geotêxtil, contribuíram para melhorar a rigidez do sistema. De outra forma, a inclinação da reta tangente imaginária passando pelos estágios iniciais das Figuras 36c e 36d aparenta ser menos inclinada do que a inclinação das curva das Figuras 36a e 36b, evidenciando a melhora na rigidez pelo uso dos reforços geossintéticos.

Por fim, comparando as curvas das Figuras 36c e 36d, entre as colunas com geogrelha e geotêxtil, houve um aumento mais gradativo da taxa de deslocamentos verticais a partir de 350 kPa para a coluna com geogrelha. Com esta observação pode-se inferir que a rigidez na coluna com geotêxtil é maior do que para a coluna com geogrelha em virtude de a última permitir uma taxa de deslocamento vertical cada vez maior para os estágios posteriores. Também pode ser inferido que a capacidade de carga da coluna com geotêxtil foi maior do que para a coluna com geogrelha. A capacidade de carga será discutida no item 4.2 deste trabalho.

4.1.1. Métodos de extrapolação da curva de prova de carga em placa

O uso de métodos para extrapolação das curvas de provas de cargas, faz-se necessário a fim de se obter a ruptura local do solo ensaiado. Vários são os métodos utilizados nessa extrapolação de provas de cargas, alguns geométricos e outros matemáticos. Dentre os vários existentes na literatura, utilizou-se de 2 geométricos Terzaghi (1951) e Método de Inclinação das Tangentes (1989) e 3 matemáticos Van der Veen (1953), Brinch-Hansen (1963) e Decourt (1996). Os resultados estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Carga de Ruptura local pelos métodos de interpretação em kN

Métodos	Solo	Coluna RCC	Coluna RCC + GGH	Coluna RCC Encamisada
Terzaghi (1951)	6,4	12,3	16,3	16,1
Van der Veen (1953)	7	17,2	17,5	20
Brinch-Hansen (1963)	10	11,2*	21,3	25,2
Tangente (1989)	5,3	7,8	14,3	13,6
Decourt (1996)	9,7	25,3	22,5	27,3

*Método não aplicável para essa coluna

De acordo com os dados apresentados na Tabela 5, percebe-se que houve um intervalo no qual as cargas de rupturas dos sistemas podem se encaixar. Para o solo, percebe-se que o intervalo de cargas variou de 5,3 kN a 10 kN, com o método das Tangentes apresentando o menor valor de carga de ruptura e o de Brinch-Hansen o maior valor. Observando o intervalo do sistema com coluna RCC, nota-se que o intervalo das cargas de ruptura variou de 7,8 kN a 25,3 kN, sendo o menor valor obtido pelo método das Tangentes e o maior pelo método de Decourt. Ressalta-se que, para este sistema, o método de Brinch-Hansen obteve uma convergência da curva de ruptura antes da curva real da prova de carga e por isso foi evidenciado como não aplicável a esse sistema. Quanto ao sistema de coluna RCC e geogrelha, o intervalo de cargas de rupturas pelos métodos de extrapolação foi de 14,3 kN a 22,5 kN, com o menor valor para o método das Tangentes e o maior para o método de Decourt. Por último, o sistema de coluna RCC com encamisamento parcial obteve um intervalo de cargas de rupturas de 16,1 kN a 27,3 kN, sendo o menor valor para o método de Terzaghi e o maior valor para o método de Decourt.

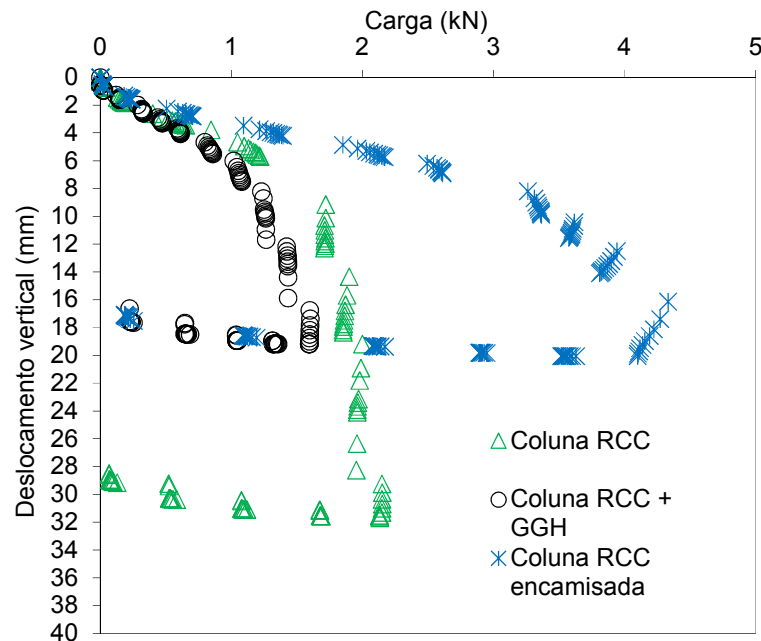
De um modo geral, percebe-se que o método de Decourt (1996) obteve resultados muito otimistas em relação aos outros métodos. Ressalta-se porém, que esses métodos são extrapolações das curvas e uma análise mais criteriosa quanto à carga de ruptura dos sistemas se faz necessária.

Os resultados da Tabela 5 mostraram que houve uma melhoria evidente da capacidade de carga do solo devido ao uso da estaca como melhoramento de subsolo para sapatas. O uso de geossintéticos foram ainda mais significantes na melhoria da capacidade de carga. Porém, apesar de haver uma melhoria expressiva da capacidade de carga com o uso de geossintéticos, esses materiais foram ainda melhores em se tratando da redução da deformação do sistema placa-solo. Observou-se a partir das Figuras 36a a 36d, que o uso do encamisamento refletiu significativamente na redução dos deslocamentos verticais no sistema estaca-placa. Nesse caso, o encamisamento com geotêxtil amenizou o abaulamento no topo da estaca granular, concentrando ainda mais as tensões no topo da estaca, transferindo as tensões para níveis mais profundos e, desta forma, amenizando as deformações ocorrentes no solo. O mesmo fato foi percebido devido ao uso de geogrelhas na horizontal no topo da estaca. Apesar de não haver uma melhoria significativa da capacidade de carga devido ao uso da estaca sem reforço e com geogrelha, a melhoria refletiu-se na redução das deformações da placa, e conseqüentemente, na melhoria da rigidez do sistema como um todo.

4.1.2. Análise da transferência de carga da coluna para o solo ao longo da profundidade

As cargas no topo das colunas com geogrelha, geotêxtil e sem reforço geossintético foram tomadas durante os ensaios de prova de carga em placa e estão plotadas no gráfico da Figura 37. Foi considerado que o topo da coluna e o solo na região circundante na superfície sofreram as mesmas deformações e por isso, o deslocamento vertical ocorrido na placa foi mesmo que aquele referente ao topo da coluna. As cargas da ponta da coluna também foram tomadas, porém os deslocamentos ocorridos na ponta não correspondem àqueles que ocorrem na placa e por isso não foi possível a plotagem do gráfico carga na ponta da coluna *versus* deslocamento vertical.

Figura 37 – Cargas medidas no topo das colunas em provas de cargas não inundadas



Analisando as curvas da Figura 37, observou-se que, para carregamentos de até 0,5 kN aproximadamente, as três curvas têm o mesmo comportamento, sendo quase sobrepostas. Isso implica, para pequenos deslocamentos, uma tendência de mesma rigidez para as três colunas. Contudo, ao se analisar os deslocamentos verticais de maiores magnitudes, percebeu-se que a coluna encamisada obteve o melhor desempenho, ou seja, suportou mais cargas com menos deformações, implicando em uma rigidez maior por parte da coluna com encamisamento. Um fato inesperado ocorreu com a coluna com geogrelha na horizontal em relação à coluna sem reforço geossintético. Esperava-se que a coluna com reforço obtivesse um melhor desempenho em face da coluna sem reforço, o que não ocorreu como pode ser visto na Figura 37. Porém, ao se analisar as curvas da tensão na placa para as duas colunas, percebeu-se que a coluna com reforço em geogrelha obteve o melhor desempenho. A explicação para este ocorrido é que a coluna com reforço em geogrelha na horizontal conseguiu densificar o solo melhor na região circunvizinha do que a coluna sem o reforço em geogrelha, e por isso, apesar de apresentar pior desempenho da carga no topo da coluna pelo deslocamento, a coluna com geogrelha apresentou melhor desempenho nas tensões na placa pelas deformações.

Ao se observar as taxas de deslocamentos verticais na Figura 37, para cada um dos estágios, notou-se uma diferença entre os desempenhos das colunas. A coluna sem reforço geossintético começou a registrar uma taxa de deslocamento vertical a

partir do estágio de carregamento de 1,7 kN aproximadamente, estando até este carregamento com a taxa de deslocamento vertical praticamente constante. De outra forma, para o mesmo nível de carregamento, deixado aproximadamente por 10 minutos, não houve deslocamento significativo para os estágios de carregamento até 1,7 kN. Explorando agora a taxa de deslocamento vertical da coluna com geogrelha na Figura 37, percebeu-se que para o estágio de carregamento de 1,02 kN aproximadamente, começou a haver uma taxa de deslocamento vertical, que se tornou ainda mais evidenciada para o estágio de carregamento de 1,23 kN, aproximadamente. Comparando-se o início da variação da taxa das duas colunas, sem reforço e com geogrelha, notou-se que a coluna sem reforço apresentou uma rigidez maior, do que a coluna com reforço em geogrelha.

Em relação à coluna com encamisamento, na Figura 37, observou-se que a partir de 3,26 kN começou a haver uma taxa de deslocamento vertical. Para este nível de carga, o deslocamento vertical esteve em torno de 8 e 9 mm. Tomando-o como referência, as colunas sem reforço e com geogrelha na horizontal, respectivamente, obtiveram como cargas, valores de 1,72 kN e 1,23 kN. Esse aumento de carga no topo da coluna foi principalmente ocasionado devido à restrição do abaulamento causado pelo encamisamento parcial da coluna. Com isso, conclui-se que a coluna de melhor desempenho foi a coluna com encamisamento parcial. Como o foco do trabalho foi o melhoramento do solo para assentamento de fundações diretas, pode-se dizer que, apesar de o topo da coluna com geogrelha ter suportado uma carga menor do que o topo da coluna sem o reforço (Figura 37), ao se observar as tensões na placa (Figura 36), o sistema com geogrelha apresentou um melhor desempenho, conferindo então à essa última coluna, um melhor comportamento tensão-deslocamento vertical, quanto ao melhoramento do solo.

Para a melhor compreensão da transferência de carga entre a coluna e o solo construiu-se os gráficos das Figuras 38, 39 e 40. Os gráficos foram tratados em termos de carga, ao invés de tensões pois, como as tensões são dependentes das áreas a que as forças estão sendo aplicadas, as tensões que chegam às colunas, seja no topo ou na ponta, seriam muito maiores do que aquelas aplicadas à placa. Não obstante, pelo fato de não ser possível a plotagem de gráficos representando a carga na ponta da coluna pelo deslocamento que ocorreu na ponta da coluna, fez-se necessário a construção de um gráfico que representasse essa transferência de cargas às pontas das colunas. Portanto, os gráficos das Figuras 38, 39 e 40, mostram a relação das

cargas de ponta e topo da coluna, em relação à carga aplicada à placa, bem como a carga transmitida ao solo circundante. A carga transmitida ao solo foi obtida levando-se em consideração a razão de substituição de área (taxa de cobertura). Para tanto, multiplicou-se a tensão no topo da coluna pela relação de áreas entre a coluna e a sapata e dividiu-se pela porção representativa da placa na área total (desconsiderou-se a área da coluna), conforme Wissmann et al. (2000).

Figura 38 – Transferência de Carga no sistema placa-coluna RCC

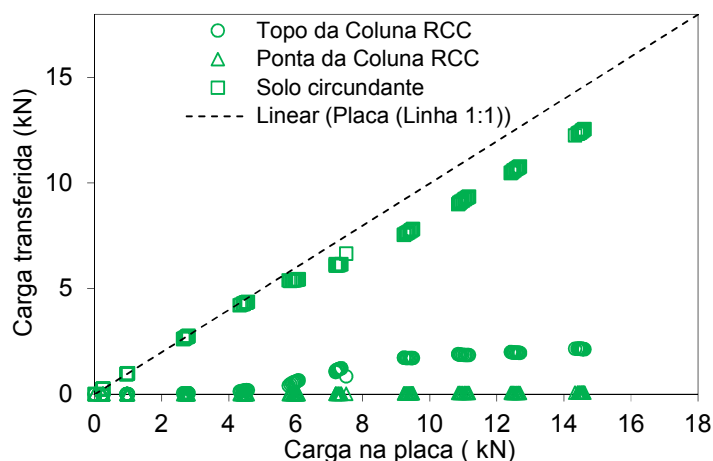


Figura 39 - Transferência de Carga no sistema placa-coluna RCC e geogrelha na horizontal

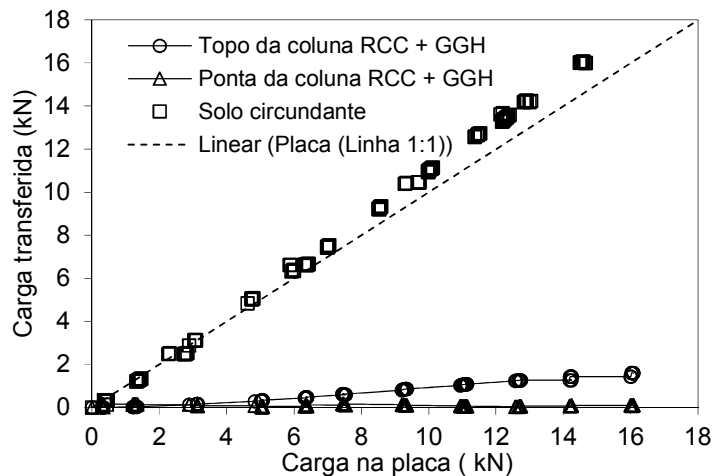
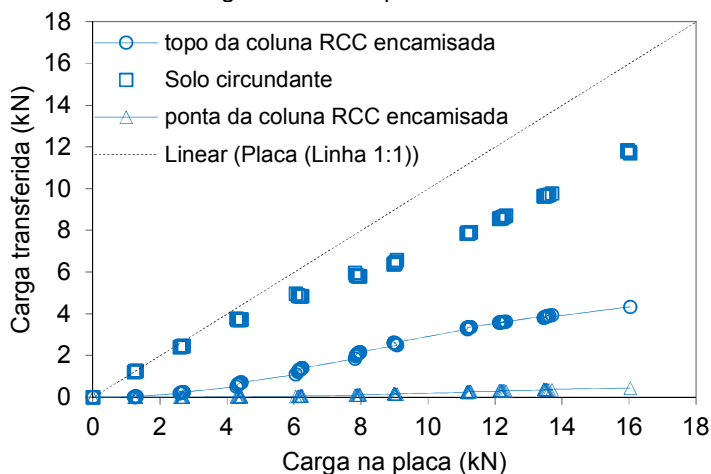


Figura 40 - Transferência de Carga no sistema placa-coluna RCC e encamisamento parcial



As Figuras 38, 39 e 40 mostram que todos os sistemas ensaiados tiveram cerca de 80% da carga aplicada à placa transferida ao solo melhorado. Com isso, notou-se que a coluna granular não tem a função de fundação profunda, ou seja, de transferir a carga para camadas de melhor capacidade de suporte, mas sim de reforçar o solo superficial para acomodação do carregamento.

Para os dados do ensaio da coluna de RCC sem reforço (Figura 38) percebeu-se que 85% da carga aplicada foi transferida ao solo, e 15% (2,19 kN), registrado pela célula instalada no topo da coluna, dissipada pela coluna ao longo da profundidade, ou seja, pela resistência de atrito lateral da coluna. Tal conclusão é tomada pelo fato das leituras das tensões na ponta terem sido nulas ao longo de todo o ensaio. Conclui-se, então, que a carga foi dissipada lateralmente ao longo do fuste da coluna, até antes de chegar à sua ponta.

No caso da coluna reforçada com geogrelhas (Figura 39) pode-se extrair que praticamente toda carga aplicada à placa foi transferida ao solo. Pode-se observar que o topo da coluna nesse caso captou somente 8,9% da carga aplicada à placa. Ao mesmo tempo, a coluna demonstrou melhoria na capacidade de carga nos mesmos níveis da coluna RCC sem reforço. No entanto, nota-se na Figura 36 que o nível de deslocamento vertical foi menor para a coluna com geogrelha. Isso indica que o mecanismo em torno dessa técnica, para baixos valores de deslocamento vertical, pode estar associado a melhoria lateral devido o processo executivo por compactação. Para maiores valores de deslocamento vertical a geogrelha passa a mobilizar tensões reduzindo o deslocamento vertical total em relação à coluna sem reforço, devido a

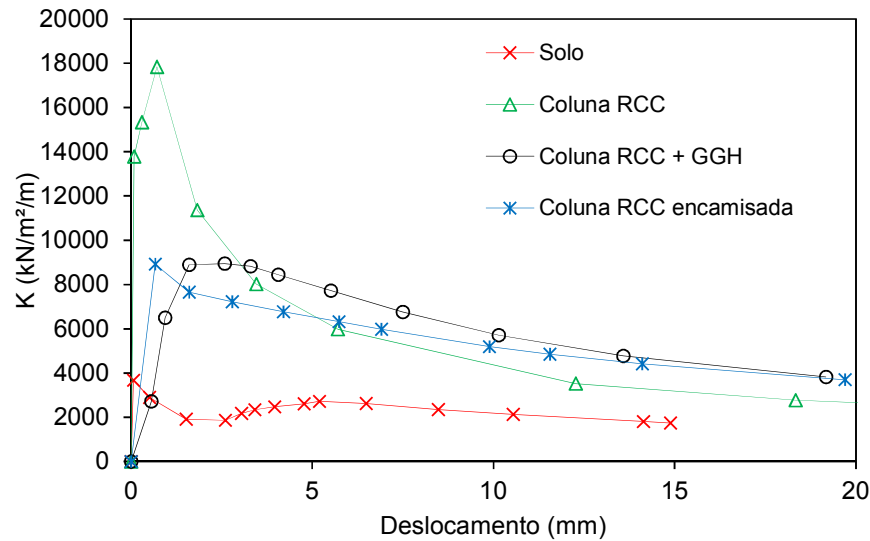
redução do abaulamento e por evitar a ruptura por cisalhamento. Os resultados obtidos da ponta da coluna para o sistema com reforço de geogrelha na horizontal foram também próximos de zero ao longo de todo ensaio indicando mobilização por atrito lateral.

A Figura 40 permitiu constatar que o uso do encamisamento parcial com geotêxtil proporcionou uma maior mobilização das tensões pela coluna. Cerca de 72% da carga aplicada à placa foi transferida ao solo. O restante, devido a maior rigidez imposta principalmente devido ao uso do encamisamento, deveu-se à coluna. Então, além de restringir o abaulamento no topo da coluna, o encamisamento também permitiu a transferência de um carregamento à ponta da coluna. Esse carregamento representou 1% da carga aplicada à placa. Isso também mostrou a importância do atrito lateral na composição estrutural da coluna, pois se dos 27% do carregamento contido no topo da coluna, apenas 1% chegou à ponta, significa que os 26% da carga aplicada à placa foi resistida pelo atrito lateral da coluna, ou seja, 4,17 kN resistidos pelo atrito lateral.

4.1.3. Módulo de rigidez, Taxa de Carregamento (RC), Razão de concentração de tensão (RCT)

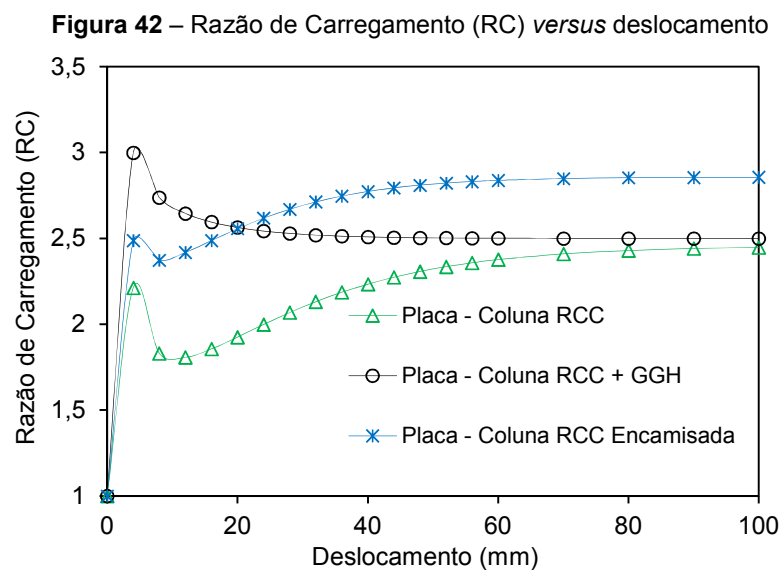
O módulo de rigidez foi obtido das curvas de provas de cargas baseando-se na formulação de Timoshenko e Goodier (1951), que considera uma tensão normal aplicada em uma fundação superficial circular rígida assente em um solo homogêneo. A Figura 41 ilustra as curvas do módulo de rigidez da placa no solo (K) *versus* deslocamento para os quatro ensaios realizados.

Figura 41 - Módulo de rigidez da placa para o solo natural, solo com coluna RCC, solo com coluna RCC e geogrelha na horizontal e solo com coluna RCC encamisada com geotêxtil não-tecido



Observando as curvas da Figura 41, percebeu-se que, para pequenos deslocamentos, o sistema com coluna sem reforço geossintético apresentou uma rigidez de pico maior que os sistemas sem reforços geossintéticos. No processo de instalação das colunas, os reforços geossintéticos dificultam a compactação lateral das colunas e por isso, inicialmente apresentam módulo de rigidez menor que o sistema sem reforço. Além disso, no caso do encamisamento, de acordo com (EBGEO, 2011), a camisa de geotêxtil precisa primeiramente expandir para que ela comece a contribuir com o sistema. Essa expansão é denominada alargamento de ativação da camisa. O solo apresentou a menor rigidez de pico, 3,67 MPa, conforme esperado. A rigidez tanto do sistema com geogrelha na horizontal, quanto do encamisamento, apresentaram-se bem semelhantes no gráfico da Figura 41. Ambos valores de pico foram de 9 MPa aproximadamente. Outro fato que pode ser constatado, foi que para grandes deslocamentos as curvas convergem para um valor de K. Tal valor reflete a carga de ruptura de cada sistema. Como pode ser notado, o sistema com menor capacidade de carga foi o do solo natural. O sistema com coluna RCC sem reforço geossintético foi o que apresentou a segunda menor capacidade de carga para a placa, condizendo com a convergência da curva verde (triângulos) na Figura 41. Os dois sistemas com reforços geossintéticos apresentaram capacidade de carga bem semelhantes, e por isso a convergência das curvas tendem para um valor bem aproximado. Contudo, ressalta-se que a maior diferença entre os dois sistemas com reforços geossintéticos foi dado pelas deformações, e não pelo carregamento.

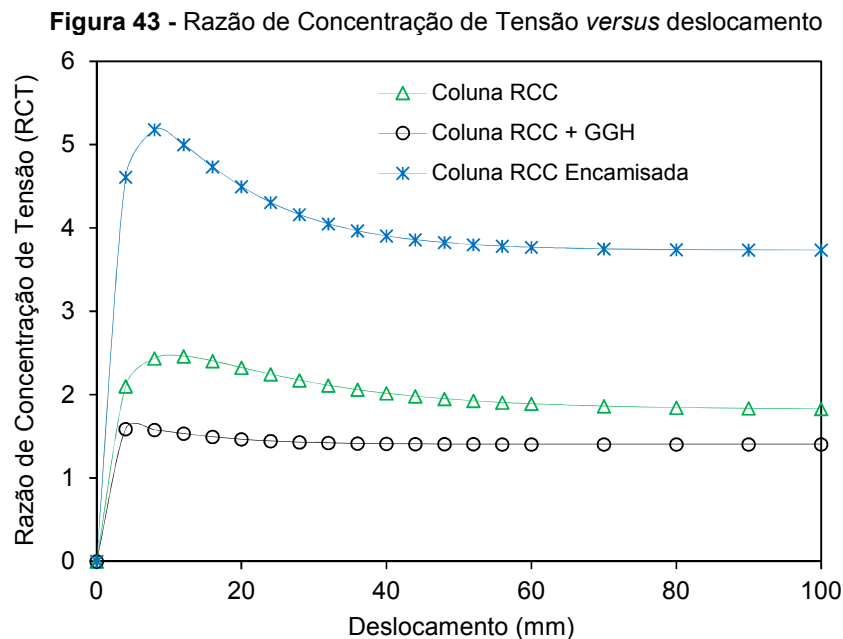
Ghazavi e Nazari Afshar (2013) determinaram a eficiência das colunas granulares, do ponto de vista de capacidade de carga por meio de um gráfico definido como Razão de Carregamento (RC) (*Load Ratio*) pelo deslocamento da placa. Essa RC é uma relação entre a carga última obtida da placa reforçada com coluna granular pela carga última da placa na prova de carga em placa do solo natural. Portanto, a RC mede a eficiência do uso da coluna granular com e sem reforço geossintético frente ao solo natural. A Figura 42 mostra as curvas RC para cada tipo de coluna em relação ao solo natural.



De acordo com a Figura 42, para deslocamentos até a ordem de 20 mm, a coluna RCC obteve um pico de eficiência maior, da ordem de 3 vezes. Os valores de RC, tanto para a coluna com geogrelha, quanto para a coluna com geotêxtil, obtiveram um pico discreto para deslocamentos da ordem de 4 mm, depois sofreram um decréscimo até o deslocamento de 8 mm, e a partir daí voltaram a crescer. Existiu uma diferença entre as curvas da coluna encamisada e a reforçada com geogrelha, uma vez que a coluna encamisada a partir de 20 mm, transpassou a curva da coluna RCC, e com isso tornou-se a mais eficiente. Para deslocamentos muito elevados a eficiência do sistema de melhoramento com encamisamento mostrou uma eficiência de 2,86 (RC). O sistema com coluna RCC, para grandes deslocamentos, apresentou um valor de RC igual a 2,5 e o sistema de coluna com geogrelha na horizontal um valor de RC igual a 2,45. Pode-se notar que quase não houve diferença, para grandes

deslocamentos, entre a eficiência dos sistemas das colunas com e sem reforço. Essa semelhança para grandes deslocamentos infere que a geogrelha não possui característica primordial de melhorar a capacidade de carga, mas sim reduzir as deformações ocorrentes no sistema.

Outro gráfico também utilizado do trabalho de Ghazavi e Nazari Afshar (2013) também foi utilizado para contribuir com as interpretações dos dados obtidos nessa pesquisa. Trata-se da Razão de Concentração de Tensão (RCT) (*Stress Concentration Ratio*). A RCT foi utilizada por aqueles autores para relacionar a tensão na coluna com a tensão transmitida ao solo circundante. Para relacioná-las, Ghazavi e Nazari Afshar (2013) utilizara-se de um gráfico de RCT por deslocamento. Então, baseado no trabalho citado acima, a Figura 43 apresenta a RCT para cada uma das colunas.



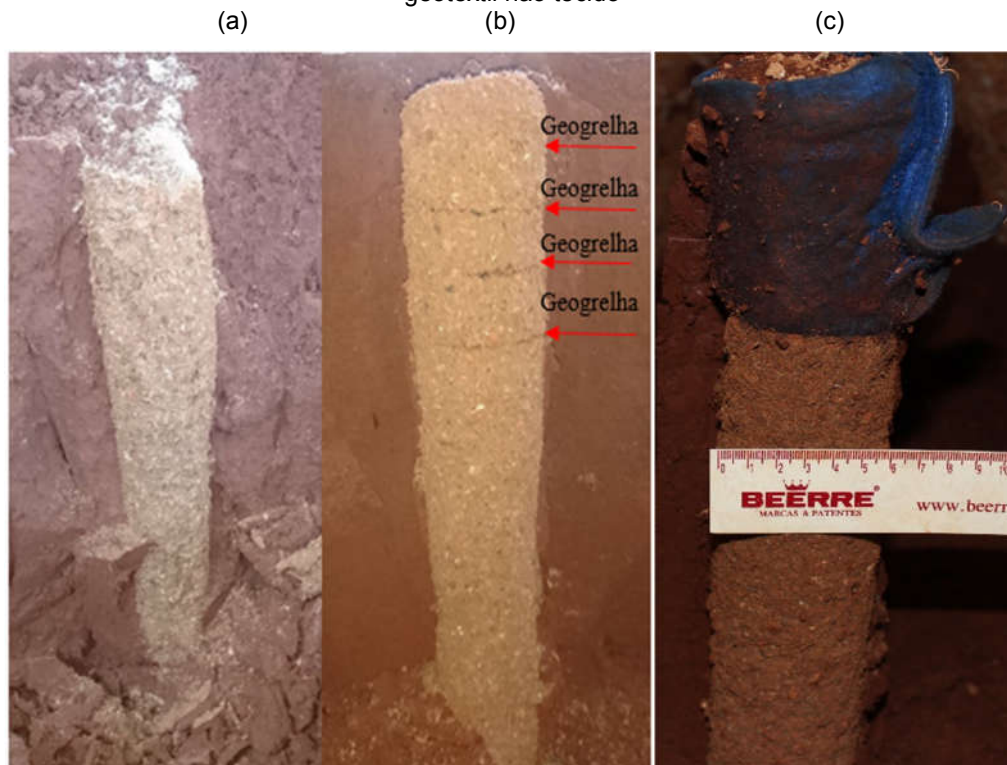
Os picos das curvas da Figura 43 podem ser explicados pelo rearranjo das partículas na coluna. Quando houve o rearranjo das partículas, os agregados das colunas se tornaram mais densificados, aumentando o intertravamento entre os grãos do agregado das colunas. Com o aumento do carregamento e do deslocamento, o material granular tende a mover-se lateralmente para o solo circundante. Porém, devido ao uso da camisa, isso não foi permitido. Então, a concentração de tensão na coluna encamisada em relação ao solo circundante foi da ordem de 4 vezes àquela

registrada no solo. Da mesma forma, a coluna RCC também se expandiu lateralmente e transferiu parte da carga ao solo circundante. A RCT para esta coluna foi da ordem de 2. Por fim, a coluna com geogrelha apresentou a RCT mais baixa. Pode-se dizer que no ato da instalação, as geogrelhas na horizontal, por auxiliar no intertravamento das partículas, evitam que os agregados se reorganizem. Durante a prova de carga, os níveis de tensão atingem a resistência de interface entre a geogrelha e o RCC e, então, um rearranjo entre as partículas começa a surgir, ainda pequeno pois há a resistência de interface agindo e impedindo uma movimentação maior das partículas. Mesmo ocorrendo a deformação lateral, esta se faz menor e por isso a RCT para esse tipo de coluna foi menor. O valor de RCT para a coluna com geogrelha foi de 1,40.

4.1.4. Exumação das colunas após prova de carga em placa

Foi feita a exumação das colunas conforme Figuras 44, logo após as provas de cargas em placa. Percebe-se que as colunas apresentaram um leve abaulamento no topo da coluna, porém não categorizou a ruptura das colunas em nenhum dos ensaios. A Figura 44a mostra a fotografia da exumação da coluna sem reforço, enquanto as Figuras 44b e 44c apresentam as colunas reforçada com geogrelha e encamisada, respectivamente. Nota-se que o abaulamento para a coluna sem reforço geossintético foi mais expressivo.

Figura 44 - Exumação das colunas (a) sem reforço (b) com reforço horizontal (c) encamisamento com geotêxtil não tecido



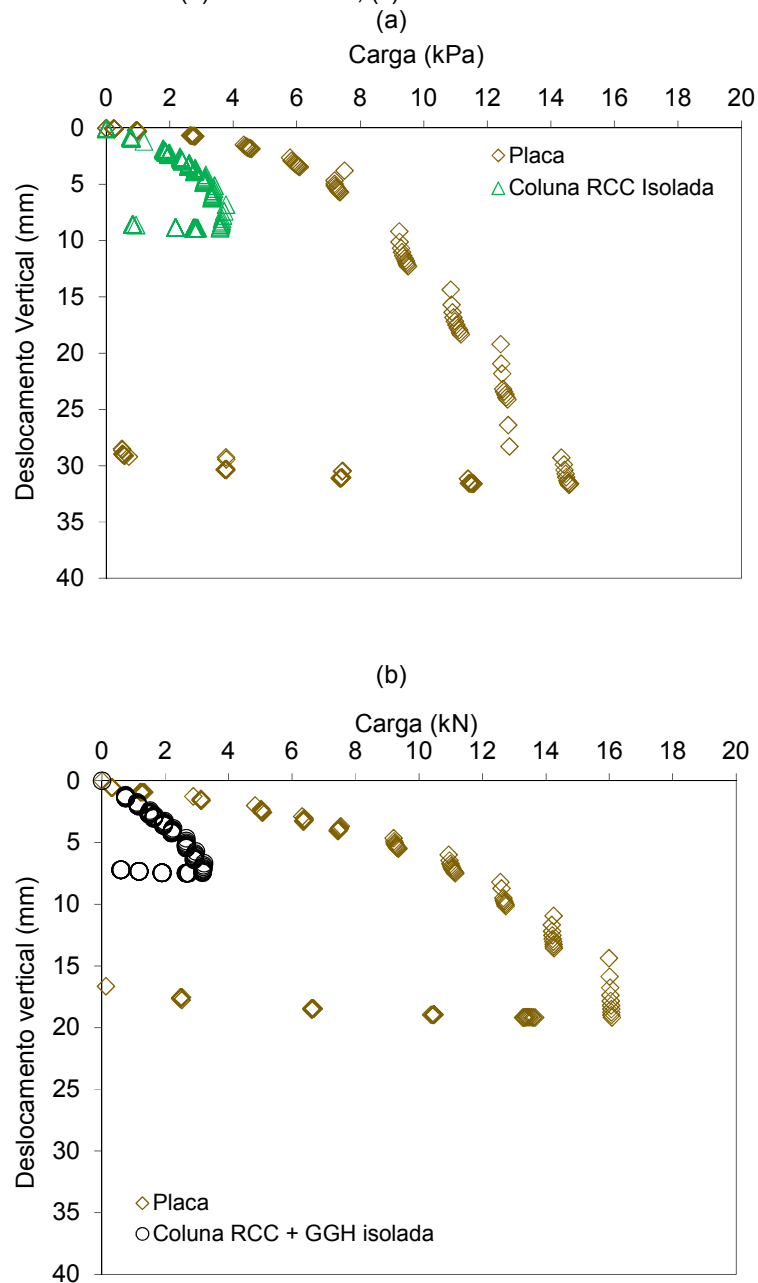
O abaulamento do fuste foi diminuído com a utilização do reforço (GGH) porque a geogrelha fez com que houvesse um maior intertravamento entre camadas e redistribuição das tensões, diminuindo assim o abaulamento nas camadas superiores, conforme já descrito por Ghazavi et al. (2018). Por outro lado, o encamisamento parcial impediu que ocorresse o abaulamento no topo da coluna e dessa forma garantiu uma menor deformação na coluna. Ainda, ao final do ensaio encamisado percebeu-se que todo o fuste da coluna se manteve com 6 cm de diâmetro, destruindo então a hipótese de ruptura por abaulamento para este caso. Quanto ao geotêxtil utilizado para o encamisamento parcial, foi observado ao final do ensaio que o mesmo permaneceu intacto.

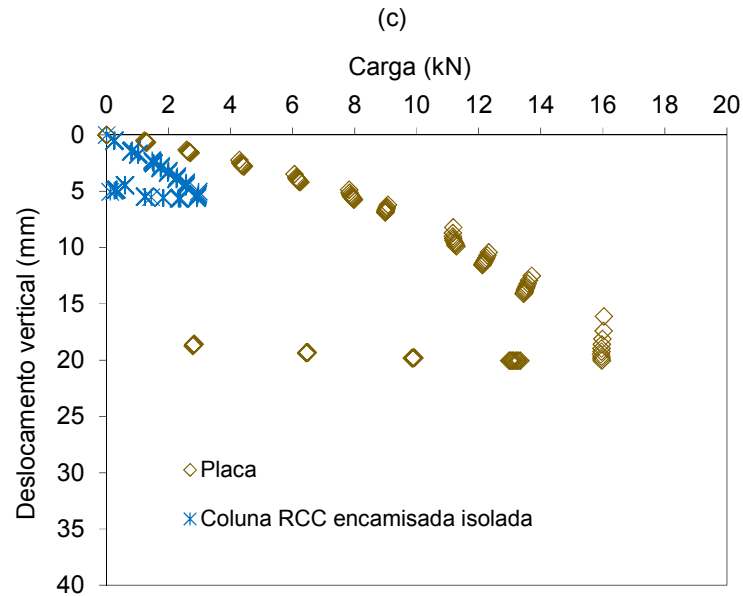
4.2. ANÁLISE DAS PROVAS DE CARGA ESTÁTICA NAS COLUNAS ISOLADAS COMPARADAS ÀS PLACAS

Para auxiliar na compreensão do mecanismo de funcionamento das colunas granulares, também foram realizadas provas de cargas somente nas colunas isoladas. As Figuras 45a, b e c apresentam as curvas de carga no topo da coluna pelo

deslocamento vertical registrado no topo para as três colunas, juntamente com as respectivas curvas das provas de cargas que foram realizadas na placa para as três situações.

Figura 45 – Curva de carga no topo da coluna *versus* deslocamento vertical para as colunas; (a) RCC
(b) RCC + GGH; (c) RCC encamisada





Comparando-se as Figuras 45a, b e c com as Figuras 38, 39 e 40 pode-se perceber como ocorreu a transferência de cargas das colunas para o solo. Para a coluna RCC sem reforço (Figuras 38), tomando como referência o valor de 9,5 kN aplicado à placa, a célula inserida no topo da coluna registrou uma carga de 1,72 kN. Na Figura 45a, ao se isolar a coluna e realizar a prova de carga, confrontando com o resultado obtido para os ensaios em placa, obteve-se um valor de 3,26 kN no topo da coluna para os mesmos 9,5 kN. Essa diferença de 1,72 kN para 3,26 kN pode ser atribuída à contribuição da área da placa maior que a área da coluna, que aplica a carga no solo. Como o diâmetro da placa é maior que o da coluna, o solo circunvizinho à coluna se densifica na execução da prova de carga, contribuindo com a diminuição das deformações do sistema placa-coluna. Porém, ao se isolar a coluna, percebe-se que, uma vez que não houve a densificação do solo circunvizinho, a contribuição da coluna passou a ser maior. Pode-se dizer que no sistema coluna-placa a carga transferida ao solo representou cerca de 82% da carga aplicada à placa (9,5 kN). Por outro lado, para a coluna isolada, pode-se perceber que a carga transferida ao solo representou cerca de 66% da carga aplicada à placa. Essa diferença é atribuída à densificação do solo na região circunvizinha durante a execução da prova de carga.

Analisando as Figuras 45b e 39, para a coluna com reforço em geogrelha, tomando-se como referência a carga aplicada à placa de 10,93 kN, a carga registrada no topo da coluna foi de 1,02 kN. Ao se observar a coluna com geogrelha isolada, para o mesmo nível de carregamento, registrou-se uma carga de 3,17 kN. Essa diferença

de 2,15 kN pode ser explicada pela densificação no solo citada acima. Percebe-se que no sistema coluna-placa a carga transferida ao solo representou cerca de 90% da carga aplicada à placa, enquanto para a coluna isolada, a carga transferida ao solo foi de cerca de 71% da carga aplicada à placa. A diferença nas porcentagens é explicada pela densificação do solo circunvizinho.

Confrontando as Figuras 45c e 40, tomando-se como referência um valor de 7,82 kN aplicado à placa, a carga no topo foi de 1,85 kN. Analisando a coluna encamisada isolada percebe-se para a mesma carga, a carga no topo da coluna foi de 2,92 kN. Pode-se dizer que o sistema coluna-placa transferiu ao solo cerca de 76% da carga aplicada à placa, enquanto que para a coluna encamisada isolada, a carga transferida ao solo foi em torno de 62,6%.

Percebe-se que para o sistema com geogrelha foi o sistema que mais transferiu carga ao solo e o sistema com encamisamento foi o que menos transferiu carga ao solo. Tal fato explica o mecanismo de transferência de carga de cada um dos tipos de coluna. Para a coluna sem reforço, no ato da instalação há um rearranjo entre as partículas que densifica o solo na região. Na execução do ensaio, o rearranjo continua a ocorrer. A inserção da geogrelha na horizontal ameniza o rearranjo das partículas por causa da resistência de interface na instalação. Na execução da prova de carga, há um ponto em que a carga aplicada ao sistema é maior que a resistência de interface entre agregado e geogrelha. Então, ocorre um rearranjo das partículas. Para o caso do encamisamento, na instalação da coluna a camisa impede que haja um rearranjo das partículas para densificar o solo. O rearranjo ocorre somente dentro da camisa e o intertravamento entre as partículas é mais evidente. Na execução da prova de carga, a coluna precisa sofrer uma expansão para ativar a camisa.

A partir das Figuras 45a, b e c, pode-se extrair que, baseado no formato da curva, a coluna isolada que apresentou o melhor desempenho foi a coluna encamisada, seguida da coluna com geogrelha na horizontal e por último a coluna sem reforço geossintético. Apesar do nível de carregamento não ter sido o mesmo, percebeu-se uma taxa maior dos deslocamentos verticais para os níveis finais de carregamento na coluna RCC sem reforço. Além disso, não se pode considerar, com base no formato da curva das colunas reforçadas com geossintético, que houve a ruptura, pois no carregamento a relação carga-deslocamento vertical permaneceu praticamente retilínea para as colunas com geossintéticos, enquanto que para a coluna sem reforço houve uma tendência a se ter uma assíntota vertical. Na Figura 45a nota-se uma

rigidez significativa para pequenos deslocamentos verticais para coluna de RCC sem reforço, no início do ensaio. Porém, devido ao rearranjo das partículas da coluna ao longo do ensaio, que por sinal aumentou os níveis de deslocamentos verticais para carregamentos posteriores, a rigidez diminuiu. A curva da coluna com geogrelha na horizontal (Figura 45b) apresentou inicialmente uma rigidez menor que a coluna RCC sem reforço. Porém, o rearranjo entre as partículas não ocorreu na mesma intensidade que ocorreu para a coluna RCC. O rearranjo entre as partículas, nesse caso, foi amenizado pela resistência de interface entre a geogrelha e o RCC, que impediu que o material se rearranjasse dentro da coluna. Por isso, para carregamentos maiores, a taxa de deslocamento vertical foi menor e a rigidez dessa coluna permaneceu praticamente constante.

Na Figura 45c, para a coluna encamisada parcialmente, no início do ensaio foi observada uma rigidez também menor que a coluna RCC sem reforço. Porém, para os estágios posteriores de carregamento, a taxa de deslocamento vertical diminuiu e a rigidez permaneceu praticamente constante. Para o caso do encamisamento, o rearranjo entre as partículas foi necessário para que ocorresse o alargamento de ativação da camisa, segundo (EBGEO, 2011), e o geossintético fosse, então, solicitado. Quando isso ocorreu, a camisa de geossintético impediu que houvesse rearranjo entre as partículas e transferiu o carregamento para regiões mais profundas. Tal fato fez com que a taxa de deslocamento vertical fosse praticamente constante para o restante do ensaio, permanecendo, assim, com a rigidez inicial.

4.2.1. Métodos de extrapolação da curva de prova de carga em colunas

Para interpretar as curvas das provas de cargas em colunas utilizou-se os mesmos métodos para as provas de cargas em placas. Foi necessária a utilização desses métodos uma vez que não ficou evidenciada a carga de ruptura nas curvas da Figura 45a, b e c. A Tabela 6 apresenta os valores de carga de ruptura local obtidos pelos diferentes métodos, com a média, desvio padrão e coeficiente de variação para as diferentes colunas.

Tabela 6 – Carga de ruptura para as três colunas

Métodos	Coluna RCC	Coluna RCC + GGH	Coluna RCC Encamisada
Terzaghi (1951)	3,5	3	3,1
Van der Veen (1953)	4	5	6,5

Métodos	Coluna RCC	Coluna RCC + GGH	Coluna RCC Encamisada
Brinch-Hansen (1963)	5,4	7,5	12,5
Tangente (1989)	3,7	3,9	4,6
Decóurt (1996)	5,3	8	13,6

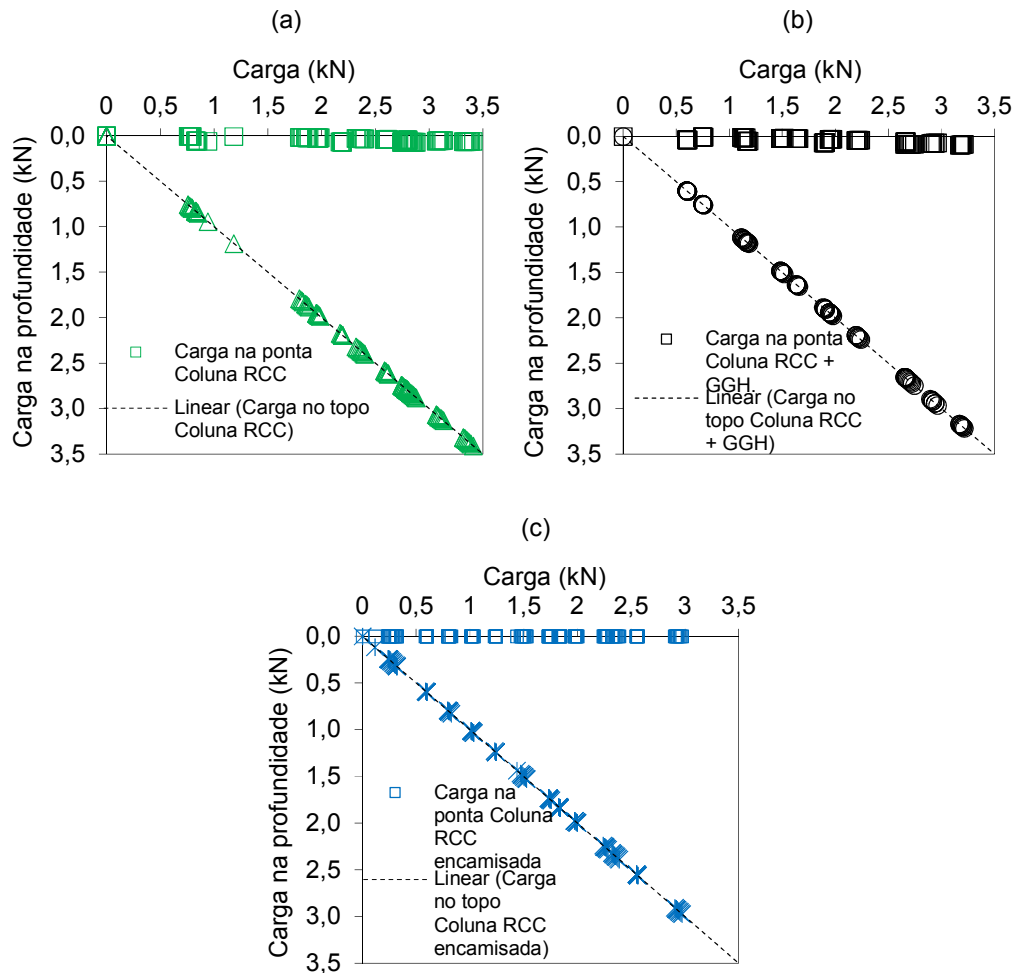
De acordo com os dados apresentados na Tabela 6, percebe-se que houve um intervalo no qual as cargas de rupturas dos sistemas podem se encaixar. Observando os valores das cargas de ruptura da coluna RCC isolada, nota-se que houve um intervalo das cargas de ruptura variando de 3,5 kN a 5,4 kN, sendo o menor valor obtido pelo método de Terzaghi e o maior pelo método de Brinch-Hansen. Quanto ao sistema de coluna RCC e geogrelha, o intervalo de cargas de rupturas pelos métodos de extrapolação foi de 3 kN a 8 kN, com o menor valor para o método de Terzaghi e o maior para o método de Decóurt. Por último, o sistema de coluna RCC com encamisamento parcial obteve um intervalo de cargas de rupturas de 3,1 kN a 13,6 kN, sendo o menor valor para o método de Terzaghi e o maior valor para o método de Decóurt.

De um modo geral, percebe-se que o método de Terzaghi (1996) obteve resultados mais conservadores em relação aos outros métodos. Ressalta-se porém, que esses métodos são extrapolações das curvas e uma análise mais criteriosa quanto à carga de ruptura das colunas se faz necessária.

4.2.2. Análise da transferência de carga do topo das colunas para a ponta das colunas

Diferentemente das análises de transferência dos ensaios em placa, em que o solo circundante apresentava contribuição significativa na mobilização de tensões geradas pela placa, as provas de carga em colunas podem captar a transferência de tensões sem considerar a parcela de contribuição do solo. Dessa forma, pode-se captar a resistência devido atrito lateral e ponta de forma precisa. As tensões foram tomadas tanto no topo das colunas quanto na ponta a fim de se analisar como ocorreu a transferência das tensões ao longo da profundidade. As Figura 46a, b e c mostram a transferência das cargas da ponta em relação às cargas que chegam à base para as colunas isoladas.

Figura 46 – Cargas no topo e na ponta das colunas: (a) RCC; (b) RCC + GGH; (c) RCC Encamisada



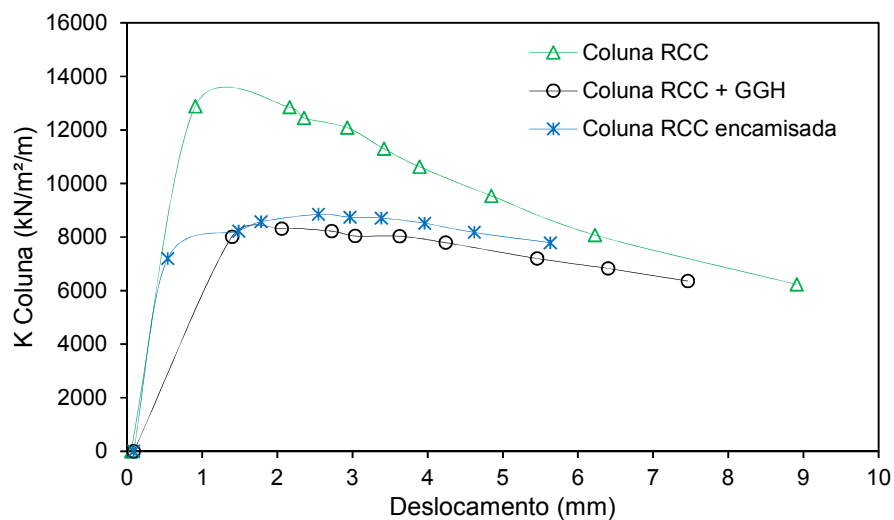
As cargas da ponta da coluna com encamisamento (Figura 46c) não foram lidas pois o fio da célula de tensão arrebentou durante a execução da prova de carga na coluna isolada. Acredita-se que se esse percalço não tivesse ocorrido, parte da carga estaria sendo transmitida à ponta da coluna encamisada, porém somente cerca de 1% da carga do topo, como pode ser visto no item 4.1.4 deste trabalho. Analisando as Figuras 46a e 46b, as quais foram tomadas as leituras de ponta, não foi perceptível a transmissão de carga do topo para a ponta. Pode ser que o nível de carregamento não tenha sido o suficiente para que isso ocorresse. Porém, o limite da célula de tensão total foi respeitado e por isso houve a necessidade de se parar o ensaio com esse nível de carregamento. Uma conclusão que pode ser tirada dessas figuras foi que as

cargas que chegam ao topo foram dissipadas ao longo do fuste das colunas, não sendo transmitidas às pontas, ressalvando-se a coluna encamisada.

4.2.3. Módulo de rigidez das colunas

Utilizando-se os dados obtidos das provas de cargas nas colunas, foi possível o cálculo do módulo de rigidez pelo deslocamento ao longo do ensaio para cada uma das colunas. A Figura 47 apresenta o módulo de rigidez para cada uma das colunas.

Figura 47 – Módulo de rigidez das colunas isoladas



A Figura 47 mostrou o desenvolvimento do módulo de rigidez ao longo do deslocamento no topo das colunas. Para pequenos deslocamentos, da ordem de até 5 mm, percebeu-se que a coluna de maior rigidez foi a coluna RCC, com um pico em 1 mm de 12,9 MPa, e isso pode ser explicado pelo rearranjo das partículas que densificou a região para pequenos deslocamentos. Quando observados os deslocamentos tendendo a 10 mm, observou-se que as curvas tendem a se cruzar, passando a coluna encamisada a obter o maior módulo de elasticidade, seguida da coluna com geogrelha e depois a coluna RCC. A rigidez nas colunas com geossintéticos, geogrelha e encamisamento, tem um decréscimo menor de módulo de elasticidade de um estágio para o outro de carregamento. Isso ocorreu pois o geossintético precisa de uma determinada deformação para que ele comece a ser

solicitado. Quando a solicitação ocorre, o material consegue manter mais constante o valor do módulo de elasticidade, mesmo para maiores deslocamentos.

4.2.4. Exumação das colunas após provas de cargas

Após o término das provas de cargas, as três colunas foram exumadas e tomadas as dimensões ao longo da profundidade, para se analisar como ocorreram as deformações nas colunas. As Figuras 48a, b e c, mostram as colunas depois de exumadas.

Figura 48 – Exumação das colunas: (a) RCC; (b) RCC + GGH; (c) RCC + GTNT Enc.
(a) (b) (c)



Juntamente com a exumação das colunas, nas camadas 20 (topo), 18 (2D- 11 cm) e 12 (ponta), foram retiradas amostras indeformadas do solo circundante à coluna para

avaliar o efeito da coluna isolada no solo ao redor. A Figura 49 mostra como foi realizado o procedimento. A Tabela 7 mostra o grau de compactação por camada, o diâmetro e a distância ao centro da coluna.

Figura 49 – Retirada das amostras indeformadas



Tabela 7 – Grau de compactação por camada analisada

	Local	Distância ao centro	Profundidade da camada (cm)	GC (%)
Coluna RCC	tangenciando	5 cm	0	91
	2d	11 cm	0	90
	tangenciando	5 cm	10	92
	2d	11 cm	10	92
	tangenciando	5 cm	40	89
	2d	11 cm	40	88
Coluna RCC + GGH	tangenciando	5 cm	0	95
	2d	11 cm	0	90
	tangenciando	5 cm	10	91
	2d	11 cm	10	90
	tangenciando	5 cm	40	87
	2d	11 cm	40	86
Coluna RCC Encamisada	tangenciando	5 cm	0	93
	2d	11 cm	0	90
	tangenciando	5 cm	10	91
	2d	11 cm	10	91
	tangenciando	5 cm	40	87
	2d	11 cm	40	87

Observou-se, na Tabela 7, que no topo das colunas (profundidade $z = 0\text{cm}$) o grau de compactação foi de um intervalo entre 90-95%, a depender da distância do centro. Para a camada 18, a 10 cm de profundidade, o grau de compactação variou entre 90-92% e para a camada 12 (ponta da coluna) o grau de compactação variou entre 86-89%. O fato de, na ponta da coluna, ter-se valores próximos a 85% de grau de compactação (grau de compactação imposto ao solo, como condição natural) constatou que a essa profundidade não chegou quase nenhum carregamento. Isso pode ser explicado pelo fato de que à profundidade de 40 cm o confinamento lateral exercido pelo solo sobre a coluna, foi o suficiente para não permitir a densificação do solo naquela região. Conforme previsto, a transferência de carga ocorreu, em sua maior porção, na parte do topo da coluna, onde o confinamento lateral do solo foi menor. Também foi notado que os diâmetros foram maiores no topo das colunas, variando quase que insignificativamente na profundidade, conforme visto na última coluna da Tabela 7. Considerando as deformações radiais, pode-se dizer que, até a distância de 2D do centro da coluna, houve influência tanto da instalação da coluna quanto da execução da prova de carga. O mesmo foi observado para a análise de instalação das colunas conforme visto no item seguinte.

4.3. ANÁLISE DA INSTALAÇÃO DAS COLUNAS

Para checar se o abaulamento das colunas ocorria no ato da instalação foi necessário realizar as três colunas sem a execução da prova de carga e depois exumá-las. A Figura 50a, b e c mostram as colunas exumadas após a instalação. A Tabela 8 mostra o grau de compactação ao longo da profundidade para a instalação das três colunas.

Figura 50 – Exumação das colunas após instalação: (a) coluna RCC; (b) coluna RCC + GGH; (c) coluna RCC encamisada



Tabela 8 – Grau de compactação por camada devido ao efeito de instalação

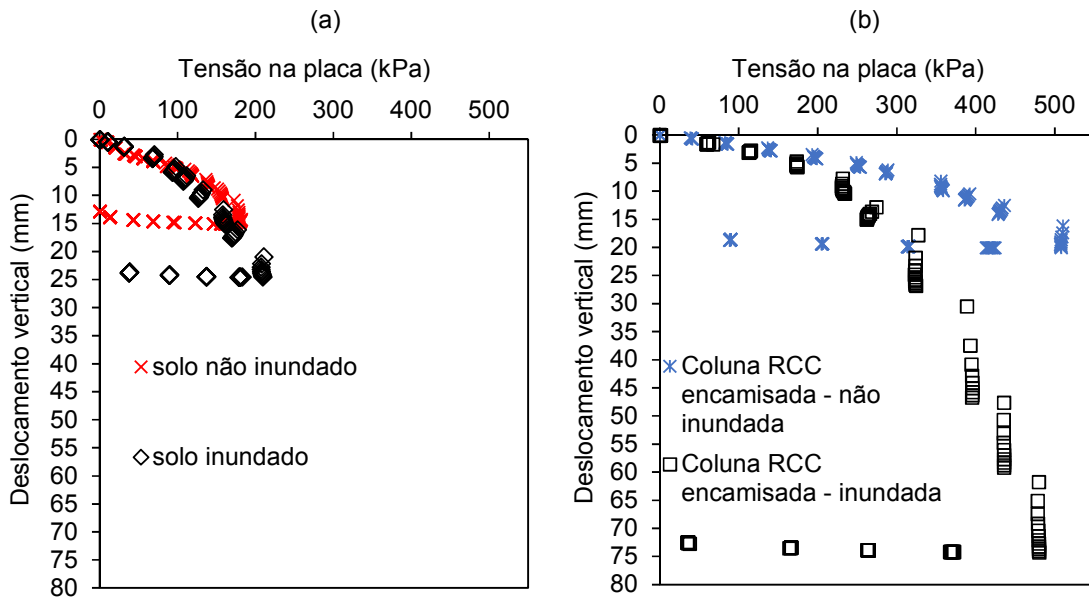
	Local	Distância ao centro	Profundidade da camada (cm)	Nº da Camada	GC (%)
Coluna RCC	tangenciando	5 cm	0	20	93
	2d	11 cm	0	20	93
	tangenciando	5 cm	10	18	91
	2d	11 cm	10	18	91
	tangenciando	5 cm	40	12	88
	2d	11 cm	40	12	86
Coluna RCC + GGH	tangenciando	5 cm	0	20	92
	2d	11 cm	0	20	92
	tangenciando	5 cm	10	18	93
	2d	11 cm	10	18	91
	tangenciando	5 cm	40	12	87
	2d	11 cm	40	12	86
Coluna RCC Encamisada	tangenciando	5 cm	0	20	93
	2d	11 cm	0	20	92
	tangenciando	5 cm	10	18	94
	2d	11 cm	10	18	93
	tangenciando	5 cm	40	12	88
	2d	11 cm	40	12	86

Para o efeito de instalação, o grau de compactação no topo variou entre 92-93%, de acordo com a Tabela 8, para ambas colunas. Na profundidade 11 cm, o grau de compactação variou entre 91-94%. Por fim, para a profundidade 40 cm o grau de compactação variou entre 86-88%. Da mesma forma como concluído de acordo com os dados da Tabela 7, a região circundante do topo das colunas obteve melhor grau de compactação. À medida em que se aprofundou na exumação das colunas esse grau de compactação também diminuiu. Na camada 12, o grau de compactação foi praticamente aquele imposto ao solo em condição natural, ou seja, sem reforço. Comparando-se os resultados das Tabela 7 e Tabela 8, ficou evidenciado a importância da instalação na contribuição da densificação do solo. Constatou-se que, a maior parte do grau de compactação adquirida na região circunvizinha à coluna, deu-se pelo efeito da instalação, porém houve também uma pequena parcela devido à aplicação da carga.

4.4. PROVAS DE CARGAS EM PLACA EM ENSAIOS INUNDADOS

As provas de cargas inundadas foram realizadas para verificar o efeito da sucção do solo, a degradação do resíduo e a plasticidade do solo ao longo da execução da prova de carga. Foram realizados dois ensaios inundados: um no solo natural e o outro no solo melhorado com a coluna parcialmente encamisada com geotêxtil não tecido, pois foi a que obteve a melhor eficiência conforme visto anteriormente. O ensaio de inundação foi montado da mesma forma que os outros e no fim de toda a instalação deixou-se infiltrar a água no tanque por um período de 7 dias, sem que se formasse lâmina d'água. A inundação do solo ocorreu de tal forma a simular uma chuva de baixa pluviometria caindo constantemente sobre um solo por um período de 7 dias, 24 horas por dia. Após os 7 dias a prova de carga foi realizada para os dois ensaios. As Figuras 51a e b mostram as curvas de provas de cargas inundadas.

Figura 51 – Curvas de tensão *versus* deslocamento vertical para as condições inundada e não inundada: (a) solo de fundação; (b) coluna RCC encamisada



Ao se analisar as curvas das provas de cargas no solo na Figura 51a , constatou-se que, com a inundação, houve mais deformação na placa do que para a condição não inundada, especialmente quando se tratou de maiores carregamentos. De outra forma, o solo sob efeito de inundação perdeu um pouco a resistência. Isso também foi comprovado pelas envoltórias de cisalhamento direto inundado e não inundado, pois apesar de ter um valor maior de coesão, o ensaio inundado apresentou uma menor inclinação da envoltória e conseqüentemente menor a resistência do solo inundado para tensões confinantes maiores.

Comparando-se agora a inundação no solo natural, na Figura 51a, com o solo melhorado com a coluna encamisada, na Figura 51b, percebeu-se que para o último estágio de carregamento do solo inundado os deslocamentos verticais eram da ordem de 25 mm para um nível de tensão de 210 kPa. Para esta mesma tensão na curva inundada da coluna encamisada, os deslocamentos verticais foram da ordem de 6 mm aproximadamente. Aparentemente, a coluna encamisada, mesmo na condição inundada melhorou o desempenho do sistema solo-coluna-placa, por reduzir o nível de deslocamento vertical. Pode-se também notar que para maiores níveis de tensão, foi notória a diferença no comportamento tensão-deslocamento vertical do solo reforçado com a coluna encamisada para o solo natural, comprovando-se então a eficácia no uso da técnica de melhoramento de solos. Outro resultado que pode ser

observado por meio das Figuras 51a e b, foi que a rigidez do sistema com coluna encamisada na condição inundada foi maior que para o solo na mesma condição, uma vez que o sistema reforçado suportou mais tensões com menores níveis de deslocamento vertical.

Analisando-se o sistema com a coluna encamisada nas duas condições (Figura 51b), foi observado que para níveis de tensões até 200 kPa, o comportamento das curvas tensão-deslocamento vertical dos sistemas foram similares. Porém, a partir de 200 kPa, os níveis de deslocamentos verticais foram muito maiores para a condição inundada do que para a não inundada. Não obstante, as taxas de deslocamentos verticais também foi muito maior para esta condição, chegando a ter estágios com aproximadamente 10 mm. Para o último estágio de carregamento da condição inundada, cerca de 480 kPa, os deslocamentos verticais foram da ordem de 75 mm. Tomando agora o mesmo nível de tensão para a condição não inundada, os deslocamentos verticais foram em torno de 15 mm. Essa diferença bastante notória, foi claramente devido à inundação. Pelas curvas de tensão inundada e não inundada do solo natural, constatou-se que houve uma perda da resistência devido à inundação do sistema. Porém, a inundação não refletiu tanto no aumento dos deslocamentos verticais. Acredita-se que o RCC possa estar sendo degradado pelo efeito da inundação, diminuindo sua resistência com o tempo. Porém, mesmo ficando evidenciado que a inundação diminuiu a resistência da coluna encamisada com a inundação, quando comparado ao solo natural, a eficiência do sistema foi satisfatória. Pode-se ainda dizer que a água, ao infiltrar no agregado da coluna, modifica as condições de intertravamento entre as partículas, diminuindo essa forçá. Essa diminuição no intertravamento dos agregados gera um nível de deslocamento vertical maior, uma vez que as partículas precisam se reorganizar.

4.4.1. Métodos de extrapolação da curva de prova de carga em colunas

Os mesmos métodos utilizados para a extrapolação das curvas de tensão *versus* deslocamento vertical dos ensaios de placas e colunas, também foram utilizados para o sistema inundado. Na Tabela 9 estão apresentados os métodos e os valores médios com desvio padrão e coeficiente de variação. Foi inserido também na mesma tabela, os valores referentes aos ensaios não inundados a título de comparação.

Tabela 9 – Métodos de interpretação das provas de cargas inundadas

Métodos	Solo	Coluna RCC + GTNT Enc.
Terzaghi (1951)	5,9	9,4
Van der Veen (1953)	8	16,6
Brinch-Hansen (1963)	9,5	16,95
Tangente (1989)	4,2	7,4
Decóurt (1996)	11,76	20,47

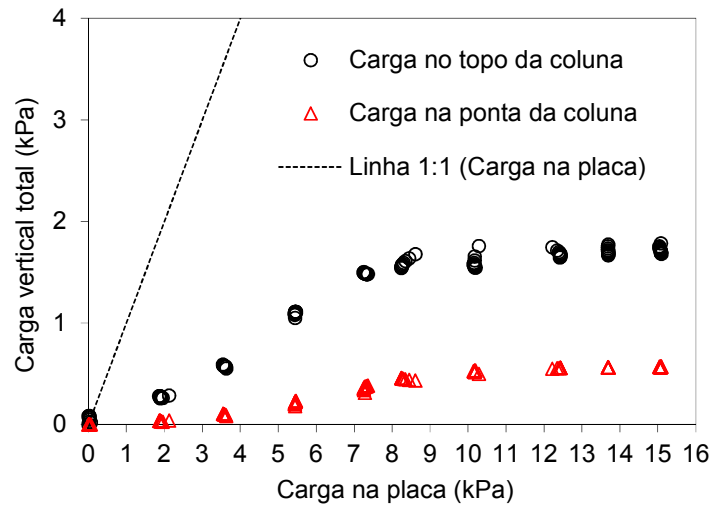
De acordo com os dados apresentados na Tabela 9, percebe-se que houve um intervalo no qual as cargas de rupturas dos sistemas podem se encaixar. Observando os valores das cargas de ruptura do solo de fundação inundado, nota-se que houve um intervalo das cargas de ruptura variando de 4,2 kN a 11,76 kN, sendo o menor valor obtido pelo método das Tangentes e o maior pelo método de Decourt. Quanto ao sistema inundado com coluna RCC encamisada parcialmente, obteve-se um intervalo de cargas de rupturas de 7,4 kN a 20,47 kN, sendo o menor valor para o método das Tangentes e o maior valor para o método de Decóurt.

De um modo geral, percebe-se que o método das Tangentes (1989) obteve resultados mais conservadores em relação aos outros métodos. Por outro lado, o método de Decóurt (1996), para o estudo em questão, obteve valores de carga de ruptura mais otimistas. Ressalta-se porém, que esses métodos são extrapolações das curvas e uma análise mais criteriosa quanto à carga de ruptura das colunas se faz necessária.

4.4.2. Análise da transferência de carga do topo das colunas para a ponta das colunas

A análise de transferência de carga da placa para a coluna e da coluna para o solo foi realizada também para a coluna RCC encamisada na condição inundada. Para tal, tomou-se as medidas de tensão no topo e na ponta da coluna, ou seja, a 40 cm de profundidade. A Figura 52 esboça a transferência de carga da placa para o topo e a ponta da coluna no ensaio inundado. Também na Figura 52, foi plotada a linha 1:1 que significaria a transmissão completa de toda carga aplicada à placa para a coluna.

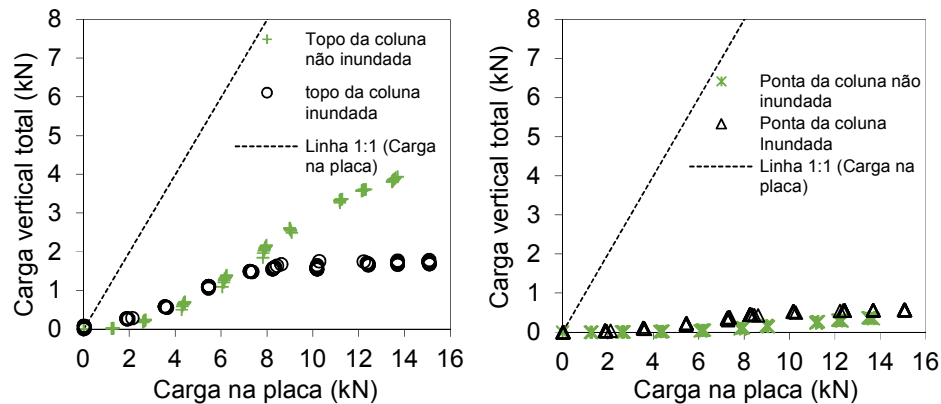
Figura 52 – Transferência de carga da placa para a coluna no ensaio inundado



Analisando as curvas da Figura 52, pode-se dizer que dos 15,07 kN aplicados à placa, cerca de, 1,7 kN, aproximadamente 11% da carga aplicada à placa ao final do carregamento, foi transmitida ao topo. Então, ao final do carregamento, cerca de 89% da carga aplicada à placa foi dissipada pelo solo, na superfície. Comparando essa transferência de carga ao solo nas condições inundada (89%) e não inundada (72%), percebe-se uma diferença entre as duas condições. Tal condição deve-se à inundação do sistema que enfraquece o intertravamento entre partículas, permitindo uma maior transferência de carga ao solo, resultando em maiores deformações. As cargas medidas na ponta apresentaram, ao final do carregamento, um valor que representou apenas 4% da carga aplicada à placa. Isso foi um indício de que a coluna na condição inundada funcionou também como reforço de subsolo e não como um agente dissipador de tensões na profundidade. Ficou evidenciado esse fato quando se exumou a coluna, pois percebe-se que ocorreu abaulamento logo na parte inferior do encamisamento parcial, que fez com que o solo se densificasse na região, conforme visto no item 4.4.5.

As Figuras 53a, e b apresentam as cargas para os ensaios inundados e não inundados, no topo e na ponta da coluna em relação à carga aplicada à placa, respectivamente. A linha 1:1 refere-se à carga aplicada à placa e foi mostrada nas Figuras 52, 53a e b como um referencial para se analisar a transferência de carga na profundidade do solo.

Figura 53 – Comparativo entre tensões na coluna nas condições inundada e não inundada para (a) topo da coluna RCC encamisada; (b) Ponta da Coluna RCC encamisada

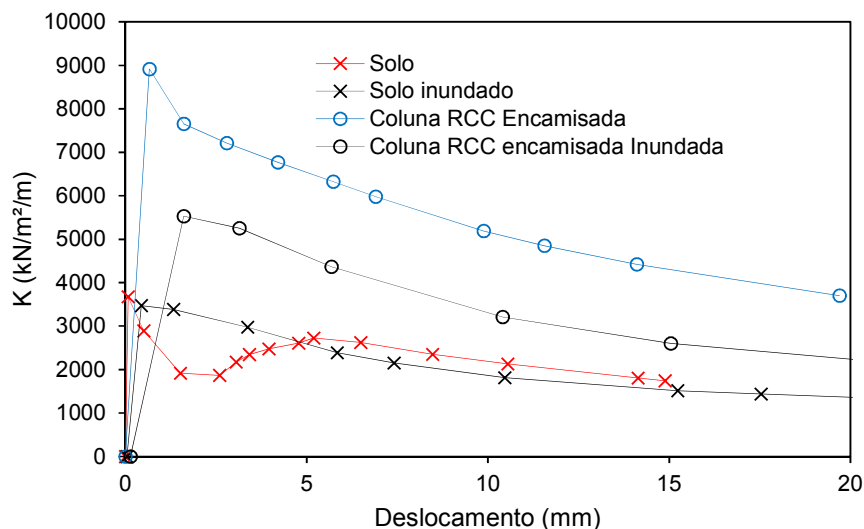


Analisando a Figura 53a e utilizando-se como referência a carga aplicada ao sistema de 13,5 kN aproximadamente, percebe-se que, quando ocorreu a inundação, a carga concentrada no topo da coluna foi reduzida de 3,84 kN, para 1,69 kN. Isso representa um aumento da transferência de carga para o solo quando o sistema foi inundado. Sem a inundação, cerca de 72% da carga aplicada à placa foi transferida ao solo. Quando ocorreu a inundação a porcentagem de carga transferida ao solo aumentou de 72% para 87,5% aproximadamente, ou seja, a eficiência da coluna foi reduzida devido a presença da inundação. Essa redução deve-se ao fato de que a água penetra nos vazios do agregado da coluna e diminui a força de intertravamento entre partículas. Porém, ao se observar a ponta da coluna para situação inundada e não inundada (Figura 53b), a diferença não foi tão notória. Acontece que independentemente da inundação, as cargas que chegam até a ponta da coluna são irrisórias e com isso, conclui-se a coluna trabalha primordialmente pela resistência lateral. Nesse caso, o efeito de inundação fez com que as paredes do fuste ficassem menos resistentes. No momento em que a coluna foi solicitada, se caso tivesse resistência lateral suficiente, ela transmitiria a carga para a profundidade. Porém, como o fuste estava comprometido, houve um abaulamento da região no corpo da coluna que fez com que a carga no topo da coluna fosse reduzida. Isso pode ser visto após a exumação da coluna que pode ser vista no item 4.4.5.

4.4.3. Módulo de rigidez do sistema inundado

Para analisar o efeito da inundação na rigidez do sistema com melhoramento de solos e com solo natural, necessitou-se a confecção dos gráficos da Figura 54. Nela estão apresentadas as curvas de módulo de rigidez para a condição inundada e não inundada como efeito comparativo. O módulo de rigidez foi calculado baseado nos estudos de Timoshenko e Goodier (1951).

Figura 54 – Módulo de rigidez do sistema para as condições inundada e não inundada.



Baseado nas curvas do módulo de elasticidade do solo da Figura 54, constatou-se que, independentemente da inundação do solo, o módulo de elasticidade tende a ser o mesmo ao longo do deslocamento da placa, com pico em 3,4 MPa, mesmo havendo alguma divergência entre eles. Isso ocorreu porque o comportamento da curva tensão-deslocamento vertical do solo inundado e não inundado foi muito similar, com uma pequena melhoria quando o solo estava na condição não inundada, concordando com a curva da Figura 54 para o solo.

Por outro lado, para a coluna RCC encamisada, o módulo de rigidez não tende a ser o mesmo para as duas condições. Percebeu-se, por meio das curvas da Figura 54 que a condição não inundada possuiu uma rigidez maior para pequenos deslocamentos, com pico em 9 MPa, aproximadamente, enquanto na condição inundada esse valor não passou de 5,5 MPa. Mesmo para deslocamentos maiores, a rigidez da placa manteve-se superior para a condição não inundada. Portanto, o efeito da inundação para o sistema melhorado com coluna encamisada diminuiu significativamente o módulo de rigidez da placa, para o ensaio em questão.

4.4.4 Exumação da coluna após prova de carga

Após o término da prova de carga na condição inundada, a coluna foi exumada. A Figura 55 apresenta a coluna exumada com perceptível abaulamento logo após o encamisamento com geotêxtil não-tecido.

Figura 55 – Coluna exumada após prova de carga na condição inundada



Analisando a Figura 55 foi possível perceber que o abaulamento da coluna inundada ocorreu logo após o encamisamento. Caso não houvesse o encamisamento, muito provavelmente, o abaulamento ocorreria nessa região onde está a camisa. O encamisamento permitiu que as cargas concentradas inicialmente no topo da coluna, fossem transmitidas a regiões mais profundas ao longo da coluna. Porém, não se teve registro significativo de cargas de ponta. Então, entende-se que a diferença entre as cargas no topo da coluna não inundada para a inundada, foi dissipada logo após o término do encamisamento, gerando o abaulamento na região.

4.5. PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA

4.5.1. Previsão da capacidade de carga do solo melhorado

De acordo com os resultados obtidos no item 4.1.1 desse trabalho, na Tabela 5, foram apresentados os intervalos de valores de carga de ruptura encontrados pelos métodos de extrapolação de provas de cargas para o solo, para o solo com coluna RCC e para o solo reforçado com a coluna encamisada. Os intervalos e previsões de capacidade de carga para o sistema com geogrelhas na horizontal não foram apresentados, pois não se encontrou na literatura, a previsão de capacidade de carga para este tipo de sistema. A Tabela 10 mostra algumas previsões de capacidade de carga obtidas de acordo com o prescrito na metodologia.

Tabela 10 – Previsão da capacidade de carga

Prova de carga	Intervalo dos métodos de interpretação (kN)	Previsão de Carga (kN)	Autor
Solo	5,3-10	6,06	Terzaghi (1943)
Solo	5,3-10	5,97	Das (2017)
Solo + Coluna RCC	7,8-25,3	20,17	Hughes et al. (1975)
Solo + Coluna RCC	7,8-25,3	8,34	Stuedlein e Holtz (2013)
Solo + Coluna RCC	7,8-25,3	13,88	Bora e Dash (2014)
Solo + Coluna RCC	7,8-25,3	4,84	Fattah et al. (2017)
Coluna RCC encamisada	13,6-27,3	3,97	Murugesal e Rajagopal (2010)
Coluna RCC encamisada	13,6-27,3	10,47	Tandel e al. (2014)

Pode-se notar na Tabela 10 que as previsões de capacidade de carga para o solo foram bem precisas, se encaixando dentro do intervalo dos métodos de extrapolação. Em se tratando do solo reforçado com colunas granulares, percebe-se que, com exceção do método proposto por Fattah et al. (2017), todos os outros estiveram dentro do intervalo das cargas de ruptura. Para as colunas encamisadas, ambos os métodos utilizados não se adequaram ao intervalo proposto. Porém, não quer dizer que os valores encontrados não sejam reais pois alguns dos métodos considerados acima tratam-se de previsões em escalas reais, e divergências já seriam esperadas.

4.5.2. Previsão da capacidade de carga das colunas

Após a interpretação das curvas das provas de cargas realizadas nas colunas, realizou-se a estimativa da capacidade de carga das colunas pelos métodos mencionados na metodologia. A Tabela 11 apresenta os valores obtidos para as previsões de acordo com cada autor e os valores médios obtidos das extrapolações das curvas.

Tabela 11 – Previsão de capacidade de carga das colunas

Prova de carga	Intervalo dos métodos de interpretação (kN)	Previsão de Carga (kN) (kN)	Autor
Solo + Coluna RCC	3,5-5,4	1,53	Hughes et al. (1975)
Solo + Coluna RCC	3,5-5,4	1,53	Stuedlein e Holtz (2013)
Solo + Coluna RCC	3,5-5,4	0	Bora e Dash (2014)
Solo + Coluna RCC	3,5-5,4	1,16	Fattah et al. (2017)
Coluna RCC encamisada	3,1-13,6	2,23	Van Impe e Silence (1986)
Coluna RCC encamisada	3,1-13,6	3,97	Murugesal e Rajagopal (2010)
Coluna RCC encamisada	3,1-13,6	0,79	Tandel e al. (2014)

Baseado nas previsões de capacidade de carga, pode-se dizer que para as colunas RCC os valores obtidos foram muito aquém do intervalo de carga obtida pelos métodos de extrapolação. Entende-se que seria necessária a utilização de outros métodos ou ainda a criação de um método de previsão de carga que se adequasse melhor à esse tipo de coluna granular. Por outro lado, a coluna parcialmente encamisada obteve um método que se encaixou no intervalo das extrapolações. O método de Murugesal e Rajagopal (2010) foi o método mais preciso para as colunas parcialmente encamisadas. Vale ressaltar que as extrapolações são modelos geométricos ou matemáticos para a obtenção de uma carga de ruptura. Porém, pode ser que a ruptura ocorra antes ou após a carga estimada pelos métodos.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo buscou representar em escala reduzida a aplicação de RCC como agregado de colunas granulares compactadas, visando um destino técnico e sustentável ao resíduo. Notou-se que o RCC apresentou boa resistência ao esmagamento, sendo passível de uso para compactação em colunas granulares. Porém, devido a heterogeneidade do material, deve-se considerar a variabilidade e a composição gravimétrica quando da aplicação do resíduo nas colunas, pois um aumento na quantidade de cerâmica na composição gravimétrica, por exemplo, poderia alterar as características mecânicas do material. Outro efeito que se deve levar em consideração é o da quebra dos grãos de RCC quando em escala real. Tal efeito pode influenciar a resistência final do sistema, diminuindo a capacidade de carga geotécnica em relação ao modelo reduzido idealizado.

As provas de carga mostraram uma melhoria no desempenho da fundação superficial quando da utilização das colunas granulares como melhoramento do subsolo. Vale lembrar que os ensaios realizados foram em escalas reduzidas (1:10) e serviram apenas para avaliar o comportamento do sistema de melhoramento em relação ao solo no experimento de forma qualitativa devido ao efeito de similitude restritiva.

Observou-se ainda, uma redução significativa nas deformações do sistema quando da aplicação do reforço da geogrelhas na horizontal nas colunas granulares compactadas com RCC, comprovando-se assim a eficiência quanto ao uso do geossintético para o trabalho em questão. Uma melhoria ainda mais significativa foi evidenciada quando se utilizou a coluna RCC com encamisamento parcial em geotêxtil, pois além de reduzir significativamente os níveis de deslocamentos verticais presentes na placa, o geotêxtil auxiliou na melhoria da rigidez do sistema, principalmente para maiores deslocamentos e com isso melhorou também a capacidade de carga no sistema.

Comparando-se as colunas com e sem reforço com geogrelha, pode-se perceber que apesar de o reforço não melhorar a capacidade de carga do sistema de forma significativa, uma redução nos níveis de deslocamento vertical foi notoriamente

observada em virtude do maior intertravamento entre as partículas após determinado nível de deslocamento vertical. Em outras palavras, o uso de geogrelhas na horizontal melhorou o módulo de rigidez de todo o sistema, para os estágios de carregamentos finais, diminuindo os deslocamentos verticais.

Comparando-se os sistemas de reforço com coluna RCC e coluna RCC encamisada, percebeu-se para o módulo de rigidez que, apesar de no início do carregamento a curva da coluna sem reforço ter obtido um pico mais elevado devido a um melhor intertravamento entre as partículas, quando se observou o comportamento dessa curva para deslocamentos maiores o resultado obtido foi inferior ao da coluna encamisada. O mesmo ocorreu na eficiência dos sistemas com encamisamento e sem. Para deslocamentos de até 20 mm, o sistema com coluna sem encamisamento se mostrou mais eficiente. Porém, após esse deslocamento, as curvas se cruzaram e a coluna com encamisamento passou a ser mais eficiente. Também percebeu-se que a coluna encamisada conseguiu absorver mais carga no topo, transmitindo parte do carregamento para a ponta da coluna. Esse fato não foi possível de ser observado na coluna sem encamisamento, pois devido ao abaulamento presente no topo da coluna, o carregamento foi dissipado e não chegou à ponta da coluna.

Baseado nos resultados obtidos nesse experimento pode-se concluir que a transferência de carga nas colunas RCC sem reforço geossintético ocorreu após as partículas se rearranjarem. Esse rearranjo de partículas fez com que houvesse um alívio nas cargas do topo da coluna RCC, ao mesmo tempo que densificou o solo circunvizinho. Já para as colunas com reforço horizontal em geogrelha, pode-se constatar que o rearranjo só ocorreu quando a resistência de interface foi vencida pela carga aplicada ao sistema. Então, houve um rearranjo entre as partículas, de menor magnitude, que fez com que o solo se densificasse na região circunvizinha à coluna. Por fim, no encamisamento, como o material foi compactado dentro da camisa, houve um intertravamento inicial entre as partículas. A camisa só se mobilizou após um rearranjo de partículas que fez com que a tração da camisa fosse ativada. Tal fato foi contundente com o módulo de rigidez que atingiu o ápice entre as três curvas dos ensaios, após certo deslocamento. Uma vez que a camisa impediu que a coluna se abaulasse, parte da carga no topo da coluna foi transferida para regiões após o encamisamento, porém não chegaram à ponta da coluna.

Levando agora em consideração as duas colunas com geossintéticos, percebeu-se uma certa discrepância entre os desempenhos apresentados, com um ponto positivo para a coluna encamisada. Quando medida a eficiência dessas colunas, os valores de eficiência da coluna encamisada foram sempre superiores ao da coluna com geogrelha. Não obstante, as curvas de provas de cargas mostraram-se, para os mesmos níveis de tensões, taxas de deslocamentos verticais muito menores quando da utilização do encamisamento. Acredita-se que mudando o material utilizado como geogrelha nesse experimento, os valores de taxa de deslocamento vertical possam ser ainda mais reduzidos, mostrando assim, mais evidentemente, o uso benéfico da geogrelha na horizontal de colunas granulares.

Ao se realizar a exumação das colunas granulares para se observar somente o efeito da compactação, constatou-se que, no ato da instalação houve densificação do solo circunvizinho. Ao se comparar à exumação das colunas após provas de cargas, foi observado que o que mais influenciou na densificação do solo circundante foi a instalação das colunas e não a execução da prova de carga em si.

Provas de cargas com o sistema inundado também foram realizadas. Percebeu-se que para o solo na condição inundada e não inundada não houve uma diferença significativa da perda de resistência devido à inundaçãõ. Porém, quando se inundou o sistema reforçado com coluna RCC encamisada parcialmente com geotêtil não-tecido, observou-se a partir de 250 kPa, um aumento significativo tanto das taxas de deslocamentos verticais para os estágios superiores, quanto dos deslocamentos verticais propriamente ditos. Entende-se que a inundaçãõ pode ter lubrificado as partículas dos grãos, impedindo um intertravamento entre as partículas da forma como ocorreu no ensaio não inundado. Outra explicação para este fato, pode ser que o solo tenha perdido parte da sua resistência para o nível de carregamento utilizado. Foi notado um abaulamento bastante expressivo logo após o término do encamisamento. Ainda, não se pode desprezar que o contato da água com o RCC pode ter gerado degradação de alguns constituintes desse material heterogêneo.

Pode-se dizer que a técnica de colunas de RCC compactadas para melhoramento de solos além de trazer benefícios como viabilidade de construções em terrenos de baixa capacidade de suporte e redução nos custos de implantação das obras, pode ter um viés ambiental muito importante dando um fim sustentável a um resíduo de construção civil produzido em larga escala mundialmente. Se combinado com um

geossintético adequado, seja por lançamento em camadas horizontais ou encamisamento, sua viabilidade pode ser ainda mais interessante, melhorando de forma mais significativa o desempenho do solo na região.

Entende-se que este trabalho se limitou apenas a um tipo de RCC, que foi recolhido e beneficiado na cidade de São Carlos, SP. Devido ao fato de o RCC ser um material muito heterogêneo, mais estudos envolvendo uma diversificação dos RCC's devem ser realizados, antes de se padronizar o uso do mesmo para fins de melhoramento de subsolo.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por mais que se tenha realizado um estudo minucioso das colunas granulares assentes em solos argilosos de baixa capacidade de carga, entende-se que ainda há espaços para novos estudos envolvendo colunas granulares. Dentre os estudos que ainda precisam ser desenvolvidos, podem ser mencionados:

- Provas de cargas em escala real tomando os devidos efeitos de similitude desse modelo reduzido;
- Ensaios com encamisamento total da coluna, geogrelhas em todo o fuste da coluna;
- Ensaios alterando o diâmetro da placa para analisar a influência do tamanho da sapata;
- Ensaios aumentando a quantidade de colunas sob a sapata (grupo de colunas);
- Novos materiais como agregado da coluna, outros tipos de RCC;

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-FARSAKH, M.; CHEN, Q.; SHARMA, R. **An Experimental Evaluation of the Soils and Foundations**, v. 53, n. 2, 2013, p. 335–348.

AHMAD, S. F. **Ground Improvement of a Beach Structure Complex By Means of Stone Columns – a Saudi Arabian Case History**. n. 7, 2008, p. 1–8.

AIBAN, S. **Effectiveness of Stone Columns: Field Assessment**. Deep Foundations 2002, n. Bush 1973, 2002, p. 1187–1199.

ALEXIEW, D.; PLANKEL, A.; THOMSON, G. **A geogrid-reinforced landslide stabilization: 20 years passed**. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Japanese Geotechnical Society Special Publication., 2016.

ALEXIEW, D.; KUSTER, V.; ASSINDER, P. **An Introduction to Ground Improvement using Geotextile Encased Columns (GEC)**. Proceedings of the Fifteenth African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011.

ALKHORSHID, N. R. **Analysis Of Geosynthetic Encased Columns In Very Soft Soil**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, 2017. 146 p.

ARAÚJO JÚNIOR, E. L. **Uso De Resíduos De Construção E Demolição (RCD) Em Colunas De Compactação Para Melhoramento De Solos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Pernambuco. 2010.166 f.

ARAÚJO, G. L. S., PALMEIRA, E. M. & CUNHA, R. P. **Behaviour of geosynthetic-encased granular columns in porous collapsible soil**. Geosynthetics International 16, No. 60, 2009, p. 433–451.

ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M. M.; BO, M. W. **Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 25, n. 8, p. 1077–1088, 2013.

ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

_____ **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

_____ **NBR 6459**: Solo – Determinação o limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

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

_____ **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____ **NBR 7181**: Análise Granulométrica, Rio de Janeiro, 2016.

_____ **NBR 7182**: Ensaio de Compactação, Rio de Janeiro, 2016.

_____ **NBR 9813**: Solo — Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação. Rio de Janeiro, 2016.

_____ **NBR 12131**: Prova de carga estática em colunas. Rio de Janeiro, 2006.

ASTM – American Society for Testing Materials. **ASTM D3080M-11**, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

AVESANI NETO, J. O. **Instrumentação de Muro Reforçado com Geossintéticos com face em Geobloco H**. Revista Fundações e Obras Geotécnicas, Vol. 45, 2014, p. 46-51.

AVESANI NETO, J. O.; FUTAI, M. M. **Aspectos gerais do uso de geossintéticos em reforço de aterros sobre solos moles**. XVIII Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica, 2016. pag. 19-22 Out. 2016. Acesso: 8 Fev. 2017.

AVESANI NETO, J. O.; PORTELINHA, F. H. M. **Aspectos Gerais Sobre o Uso de Geossintéticos em Muros e Taludes Reforçados**. XVIII Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica, 2016. pag. 19-22 Out. 2016. Acesso: 17 Mar. 2017.

AYADAT, T.; HANNA, A. M. **Encapsulated stone columns as a soil improvement technique for collapsible soil**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, v. 9, n. 4, 2005, p. 137–147.

AYADAT, T.; HANNA, A.; ETEZAD, M. **Failure Process Of Stone Columns In Collapsible Soils**. Archive of SID. v. 21, n. 2, 2008, p. 135–142.

BARKSDALE, R. D.; BACHUS, R. C. **Design and Construction of Stone Columns Vol. 1**. Rep. No. FHWA/RD-83/026, n. Dezembro 1983, p. 210, 1983.

BLACK, J. A.; SIVAKUMAR, V.; BELL, A. **The Settlement Performance Of Stone Column Foundations**. Géotechnique, v. 61, n. 11, 2011, p. 909–922.

BRAUNS, J. **“Initial bearing capacity of stone columns and sand piles.”** Vol. I, Proc., Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques in Engineering Practice, New South Wales Institute of Technology, Sydney, Australia, 1978, p. 497-512.

BRINCH HANSEN, J. **A Revised and Extend Formula for Bearing Capacity**, Boletim Número 28, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, 1970. p. 5-11.

CARDOSO, R.; SILVA, R.V.; BRITO, J.; DHIR, R. **Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review**. Waste Management, v. 49, 2016, p. 131–145.

CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção: projeto entulho bom**. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 2001. cap. 5, p. 144-187.

CASTRO, J. **Numerical modelling of stone columns beneath a rigid footing**. Computers and Geotechnics, v. 60, 2014, p. 77–87.

CINTRA, J. C.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Tensão Admissível em Fundações Diretas**. Editora Rima. 1ª Edição. São Carlos, 2003.

CINTRA, J. C.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas: Projeto geotécnico**. Oficina de Textos; São Paulo, 2011. 142p.

COSTA, C. M. L.; ZORNBERG, J. G.; BUENO, B. DE S.; COSTA, Y. D. J. **Centrifuge evaluation of the time-dependent behavior of geotextile-reinforced soil walls**. Geotextiles and Geomembranes, v. 44, n. 2, p. 188–200, 2016.

DEMERCHANT, M.R; VALSANGKAR, A.J.; SCHRIVER, A.B. **Plate load tests on geogrid-reinforced expanded shale lightweight aggregate**. Geotextile and Geomembranes, 2002. p. 173–190.

DEMIR, S.; ÖZENER, P.; KIRKIT, M. **Experimental and Numerical Investigations of Behavior of Rammed Aggregate Piers**. Geotechnical Testing Journal, v. 40, n. 3, 2017, p. 411-425.

ELSHAZLY, H.; HAFEZ, D.; MOSSAAD, M. **Settlement of circular foundations on stone- column-reinforced grounds**. Ground Improvement , v.11, n. 3, 2007, p. 163–170.

FEI, K.; **A Simplified Method for Analysis of Geosynthetic Reinforcement Used in Pile Supported Embankments**. The Scientific World Journal. Hindawi Publishing Corporation, 19 Ago. 2014. Acesso: 18 Mar. 2017.

FENG, S.-J.; SHI, Z.-M.; SHEN, Y.; LI, L.-C. **Elimination of loess collapsibility with application to construction and demolition waste during dynamic compaction**. Environmental Earth Sciences, v. 73, n. 9, p. 5317–5332, 2015.

FILGUEIRA, A. R. G. **Análise técnica e econômica da aplicação de geocélulas para reforço de fundações diretas: estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC – Modalidade: Artigo Científico). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016, 16p.

FONSECA, E. C. A.; PALMEIRA, E. M.; BARRANTES, M. V. **Load and Deformation Mechanisms in Geosynthetic-Reinforced Piled Embankments**. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, v. 4, n. 4, p. 32, 2018.

GARG, V.; SHARMA, J. K.; DEEP, K.; GROVER, S. **Stiffening Effect on Settlement Reduction for a Single End Bearing Granular Pile**. International Journal of Recent Trends in Engineering and Research, v. 4, n. 4, p. 455–462, 2018.

GARNIER, J.; GAUDIN, C.; SPRINGMAN, S.M.; CULLIGAN, P.J.; GOODINGS, D.; KONIG, D.; KUTTER, B.; PHILLIPS, R.; RANDOLPH, M.F.; THOREL, L. **Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling**. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, v. 7, n. 3, 2007, p. 01-23.

GHAZAVI, M.; NAZARI AFSHAR, J. **Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns**. Geotextiles and Geomembranes, v. 38, 2013, p. 26–36.

GHAZAVI, M.; YAMCHI, A. E.; AFSHAR, J. N. **Bearing capacity of horizontally layered geosynthetic reinforced stone columns**. Geotextiles and Geomembranes, v. 46, n. 3, 2018, p. 312–318.

GHOSH, A.; GHOSH, A.; BERA, A. K. **Bearing capacity of square footing on pond ash reinforced with jute-geotextile**. Geotextiles and Geomembranes, v. 23, n. 2, 2005, p. 144–173.

GNIEL, J.; BOUAZZA, A. **Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns**. Geotextiles and Geomembranes, vol. 27, 2009, pp. 167-175.

GOLAIT, Y. S.; PADADE, A. H. **Analytical and experimental studies on cemented stone columns for soft clay ground improvement**. International Journal of Geomechanics, v. 17, n. 4, 2017, p. 1–18.

GREENWOOD, D. A. **Mechanical improvement of soils below ground surface**. Proc., Conf. on Ground Engineering, Institution of Civil Engineers, London, 1970.

GÓNGORA, I. A. G. **Utilização de geossintéticos como reforço de estradas não pavimentadas: influência do tipo de reforço e do material de aterro**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília – DF. 2011, 105 p.

GHOSH, A.; GHOSH, A.; BERA, A.K. **Bearing capacity of square footing on pond ash reinforced with jute-geotextile**. Geotextile and Geomembranes 11 (5), 2005, p. 144–173.

HANDY, R.L.; FOX, N.S.; WISSMANN, K.J.. **Short Aggregate Piers Reinforce Soils Near Tunnels**. Geotechnical Special Publication No. 90: Geo-Engineering for Underground Facilities, ASCE, 1999, pp. 1039-1047.

HANSEN, J. B. **Discussion on hyperbolic stress-strain response**. Cohesive soils. ASCE Journal for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 89 (SM4), 1963. p.241-242.

HONG, Y. S.; WU, C. SEN; YU, Y. S. **Model tests on geotextile-encased granular columns under 1-g and undrained conditions**. Geotextiles and Geomembranes, v. 44, n. 1, 2016, p. 13–27.

HONG, Y.-S.; WU, C.S.; CHEN, G.L.; CHIEN, C.W. **1-g Model Test on Internally Reinforced Granular Columns**. Geotechnical Testing Journal, 2018, p. 1-28.

HUGHES, J.M.O.; WITHERS, N.J. **Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns**. Ground Engineering (London), 1974, p. 42–49.

HUGHES, J.M.O.; WITHERS, N.J.; GREENWOOD, D.A. **A field trial of the reinforcing effect of a stone column in soil**. Géotechnique. 1975, p. 31–44.

HUANG, J.; LE, V.; BIN-SHAFIQUE, S.; PAPAGIANNAKIS, A.T. **Experimental and numerical study of geosynthetic reinforced soil over a channel**. Geotextiles and Geomembranes, 43, 2015, p. 382-392.

INDRARATNA, B.; BASACK, S.; RUJIKIATKAMJORN, C. **Numerical Solution of Stone Column–Improved Soft Soil Considering Arching, Clogging, and Smear Effects**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. Vol.139, n. No.3, 2013, p. 377–394.

JADID, M. N. **A practical approach for computing soil bearing capacity under shallow foundations using vibro-replacement method**. International Refereed Journal of Engineering and Science, v. 2, n. 5, 2013, p. 54–62.

JEWELL, R. A.; MILLILGAN, G. W. E.; SARSBY, R. W.; e DUBOIS, D. **Interaction between soil and geogrids**. Proc. Symposium on polymer grid reinforcement in civil engineering. Science and Engineering Research Council and Netlon Limited, (Mar. 22-23). 1984.

KUMAR, R.; JAIN, P. K. **Expansive Soft Soil Improvement by Geogrid Encased Granular Pile**. International Journal on Emerging Technologies, 2013, p. 55-61. Acesso: 01 Fev. 2017.

KUMAR, U.; TANDEL, Y. K.; SOLANKI, C. H. **Effect of Geosynthetic Encasement on Sand Column in Soft Soil**. Int. J. Struct. & Civil Engg. Res., v. 2, n. 3, 2013, p. 1–8.

LATHA, G. M.; SOMWANSHI, A. **Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand**. Geotextiles and Geomembranes, v. 27, n. 4, 2009, p. 281–294.

LAWTON, E. C.; WARNER, B. J. **Performance of a group of geopier elements loaded in compression compared to single geopier elements and unreinforced**

- soil.** Department of Civil & Environmental Engineering, n. UUCVEEN 04-12, 2004, 257p.
- LU, L.; WANG, Z. J.; FENG, H.; ARAI, K. **Analysis of Long-Term Deformation of Reinforced Retaining Wall Using Optical Fiber Sensor Geotextile.** Applied Mechanics and Materials, v. 580–583, p. 338–343, 2014.
- MADHAV, M.R., e VITKAR, P.P. **Strip footing on weak clay stabilized with granular trench.** Canadian Geotechnical Journal. 1978, p. 605–609.
- MADHAV, M.R., e MIURA, N. **Soil improvement. Panel report on stone columns.** Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India. Vol. 5, 1994, p. 163–164.
- MADHAV, M. R. **Granular piles - construction, design and behaviour.** JNT University, 2013, 16p.
- MANI, K.; NIGEE, K. **Focus on Ground Improvement. International Journal of Innovative Research in Science,** Engineering and Technology, v. 2, n. 11, 2013, p. 6451–6456.
- MARQUES NETO, J. C. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil.** São Carlos: Rima, 2005, 162p.
- MARQUES NETO, J. DA C.; SCHALCH, V. **Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição: Estudo da Situação no Município de São Carlos-SP,** Brasil. São Carlos: Rima, v. 36, 2010.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; BALESTRA, C. E.; LIMA, M. G. **Applicability of recycled aggregates in concrete piles for soft soil improvement.** Waste Management & Research, v. 35, n. 1, p. 56–64, 2017.
- MEYERHOF, G. G. **Shallow foundations.** Journal of Soil Mechanics and Foundations Division ASCE, Vol. 91, n. 2, 1965, p.21-31.
- MIRANDA, M.; COSTA, A. DA; CASTRO, J.; SAGASETA, C. **Influence of geotextile encasement on the behaviour of stone columns: Laboratory study.** Geotextiles and Geomembranes, v. 45, n. 1, p. 14–22, 2017.
- MUIR WOOD, D.; HU, W.; NASH, D. F. T. **Group effects in stone column foundations: model tests.** Géotechnique, v. 50, n. 6, 2000, p. 689–698.
- MURUGESAN, S.; RAJAGOPAL, K. **Geosynthetic-encased stone columns: Numerical evaluation.** Geotextiles and Geomembranes, v. 24, n. 6, 2006, p. 349–358.
- MURUGESAN, S e RAJAGOPAL, K. **Model tests on geosynthetic-encased stone columns.** Geosynthetics International, Vol. 14, No. 6, 2007, p. 346-354.

MURUGESAN, S.; RAJAGOPAL, K. **Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 136, n. 1, 2010, p. 129–139.

NOUI, T. K. A.; BOUZID, T. **Behavior of the Foundation of Bridge Reinforced by Rigid and Flexible Inclusions.** International Journal of Structural and Construction Engineering, v. 11, n. 11, 2017, p. 1526–1530.

OLIVEIRA, T. M.; BICALHO, L.A.; BATISTA, S.H.; SÁ, R.L.L.; SOUZA, N.C; GOMES, W. R.; VILELA, A.G.; REZENDE, J.P.; MAIA, W.O.; COSTA, Y.P.P. **Estaca RAP Modificada.** XVIII Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica, 2016. p. 19-22. Acesso: 8 Fev. 2017.

OSMAN, M. A.; HASHIM, S. H. **Experimental Evaluation of Geopier Foundation,** Journal of BRR v. 14, 2013, p. 27–40.

PALHACI, M. C. J. P.; NICOLA, R. e HELLMEISTER, L. A. V. **O Processo De Construção Tecno-artística Por Meio Da Reciclagem.** VIII International Conference on Engineering and Computer Education, 2013, 06p. Acesso: 30 Jan. 2017.

PATRA, C.R.; DAS, B.M.; ATALAR, C. **Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid reinforced sand.** Geotextile and Geomembranes, 2005, p. 454–462.

PATRA, C.R.; DAS, B.M.; BHOI, M.; SHIN, E.C. **Eccentrically loaded strip foundation on geogridreinforced sand.** Geotextile and Geomembranes, 2006, p. 254–259.

PEREIRA, V. R. G.; CAMPOS, M.V.W.; AVESANI NETO, J.O.; FRANÇA, F.A.N. **Associação de técnicas tradicionais e inovadoras de estabilização e reforço de maciço de solo.** Geosoluções, 2014.

PHAM, H. T. V. **Support Mechanism of Rammed Aggregate Piers.** Doctor's Thesis. Iowa State University, 2005. 223p.

PITT, J.M.; WHITE, D.J.; GAUL, A.; HOEVELKAMP, K. **Highway applications for rammed aggregate piers in Iowa soils.** No. Iowa DOT Project TR-443. 2003, 166p.

PORTELINHA F. H. M.; BUENO B. S.; ZORNBERG, J. G. **Performance of nonwoven geotextile-reinforced walls under wetting conditions: laboratory and field investigations.** Geosynthetics International, Vol. 20, 2013. p. 90–104.

PORTELINHA, F.H.M., ZORNBERG, J.G., PIMENTEL, V. **Field performance of retaining walls reinforced with woven and nonwoven geotextiles.** Geosynthetics International. Vol. 2014. 21 (4), p. 270-284.

PORTELINHA, F. H. M.; DA SILVA, V. A. N. e TABILE, R. A. **Uso De Geogrelha Para Atenuação De Tensões Em Tubulações Enterradas: Seção Experimental De**

Campo. XVIII Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica, 2016. p. 19-22. Acesso: 01 Fev. 2017.

RAVEENDRAN, G.; THOMAS, N. **Geonet as a soil reinforcement system for the protection of buried pipelines.** 2017.

SADEK, M.; SHAHROUR, I. **Eccentricity effect on a footing supported by a stone column.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, v. 161, n. 2, 2008, p. 65–70.

SAFTNER, D.A.; ZHENG, J.; GREEN, R.A.; HRYCIW, R.; WISSMANN, K.; **Rammed aggregate pier installation effect on soil properties.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2017, p. 1-11.

SALEM, M. A.; HAMMAD, M. A.; AMER, M. I. **Field monitoring and numerical modeling of 4.4 m-high mechanically stabilized earth wall.** Geosynthetics International, v. 25, n. 5, p. 545–559, 2018.

SARAN, R. K.; VISWANADHAM, B.V.S. **Centrifuge model tests on the use of geosynthetic layer as an internal drain in levees.** Geotextiles and Geomembranes, v. 46, 2018, p. 257-276.

SAWWAF, M. A. EL. **Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope.** Geotextiles and Geomembranes, v. 25, n. 1, 2007, p. 50–60.

SHAHIN, H. M.; NAKAI, T.; MORIKAWA, Y.; MASUDA, M.; MIO, S. **Effective use of geosynthetics to increase bearing capacity of shallow foundations.** Canadian Geotechnical Journal, v. 54, n. 12, 2017, p. 1647–1658.

SHAHU, J. T.; ALI, K.; SHARMA, K. G. **Model tests on geosynthetic-reinforced stone columns: a comparative study.** Geosynthetics International, v. 19, n. 4, 2012, p. 292–305.

SHARMA, R. S; KUMAR, B. P e NAGENDRA, G. **Compressive load response of granular piles reinforced with geogrids.** Canadian geotechnical journal, vol. 41, 2004, p. 187-192.

SHIVA BHUSHAN, J. Y. V.; PARHI, P. S.; UMASHANKAR, B. **Geotechnical Characterization of Construction and Demolished (C&D) Waste.** p.27–34, 2019.

SHIVASHANKAR, R.; BABU, M.R.D.; NAYAK, S.; RAJATHKUMAR, V. **Experimental Studies on Behaviour of Stone Columns in Layered Soils.** Geotechnical and Geological Engineering, v. 29, n. 5, 2011, p. 749–757.

SILVA, R.V.; BRITO, J.; DHIR, R.K. **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production,** Constr. Build. Mater., 2014, p. 201–217.

SONG, F.; LIU, H.; MA, L.; HU, H. **Numerical analysis of geocell-reinforced retaining wall failure modes**. Geotextiles and Geomembranes, v. 46, n. 3, 2018, p. 284–296.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos – 2015**. Brasília: MCIDADES. SNSA, 2017. Acesso em: 04/10/2017

STUEDLEIN, A. W.; HOLTZ, R. D. **Analysis of Footing Load Tests on Aggregate Pier Reinforced Clay**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, p. 1091–1103.

STUEDLEIN, A. W. e HOLTZ, R. D. **“Bearing Capacity of Spread Footings on Aggregate Pier Reinforced Clay.”** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, p. 49–58.

SUDDEEPONG, A.; SARI, N.; HORPIBULSUK, S.; CHINKULKIJNIWAT, A.; ARULRAJAH, A. **Interface shear behaviours between recycled concrete aggregate and geogrids for pavement applications**. International Journal of Pavement Engineering, p. 1–8, 2018.

TAM, V. W. Y e TAM, C. M. **A review on the viable technology for construction waste recycling**. Resources. Conservation and Recycling, Vol. 47 No. 3, 2006, p: 209-221.

TANDEL, Y.K.; SOLANKI, C. H. e DESAI, A. K. **Reinforced stone column: remedial of ordinary stone column**. International Journal of Advances in Engineering & Technology, Vol. 3, Issue 2, 2012, p. 340- 348.

TEIXEIRA, Alberto Henriques; GODOY, Nelson Silveira de. **Análise, projeto e execução de fundações rasas**. In: HACHICH, Waldemar et al. Fundações: Teoria e Prática. 2. Ed. São Paulo: PINI, 1998. 751 p.

TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1943.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. 2nd ed. New York, J. Wiley, 1967, 729 p.

THAKARE, S. W.; AHMED, T. **Performance of Footing on Clayey Soil with Encased Stone Columns and Geocell Mattress**. International Journal of Engineering Research, v. 5, 2016, p. 4–8.

VAN DER VEEN, C. **The Bearing Capacity of a Pile**. In: III Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Eng., Zurich. 1953, p. 125-151.

VELLOSO, D. de A.; LOPES, F. de R. **Fundações**. 1º Reimpressão. São Paulo: Oficina de Textos, 2012, 584p.

- VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. **Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review.** Resources, Conservation and Recycling, v. 103, 2015.
- VÉŠIC, A. S. **Bearing capacity of shallow foundations.** H. F. Winterkorn; H. Y. Fang (Eds.); New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1975.
- VISWANADHAM, B. V.; KÖNIG, D. **Studies on scaling and instrumentation of a geogrid.** Geotextiles and Geomembranes, v. 22, n. 5, 2004, p. 307–328.
- WAGIH, A. M.; EL-KARMOTY, H.Z.; EBID, M.; OKBA, S.H. **Recycled Construction and Demolition Concrete Waste as Aggregate for Structural Concrete.** HBRC Journal, vol. 9, no. 3, 2013, pp. 193–200.
- WANG, L.; LIU, H.; WANG, C. **Earth pressure coefficients for reinforcement loads of vertical geosynthetic-reinforced soil retaining walls under working stress conditions.** Geotextiles and Geomembranes, v. 46, n. 4, 2018, p. 486–496.
- WHITE, D.; WISSMANN, K.; BARNES, A. **Embankment Support : A Comparison of Stone Column and Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement.** Presented, Transportation Research Board. 81st Meeting, Washington, D.C. January 13-17., 2002.
- WU, J. T. H., PHAM, T. Q., e ADAMS, M. T. **Composite behavior of geosynthetic-reinforced soil (GRS) mass.** 2013. FHWA-HRT-10- 077.
- YOON, Y.W., CHEON, S.H., KANG, D.S. **Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands.** Geotextile and Geomembranes, 2004, p. 439–453.
- YU, Y.; Bathurst, R.J.; Allen, T.M.; Nelson, R. **Physical and numerical modelling of a geogrid-reinforced incremental concrete panel retaining wall.** Canadian Geotechnical Journal, v. 53, n. 12, 2016, p. 1883–1901.
- ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Saneamento e Meio Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. 1997, 156p.
- ZORNBERG, J. G. **Performance of a Geosynthetic-Reinforced Bridge Abutment in the US.** Proceedings of the GSI-Asia 2015 Conference. Seoul, South Korea, 2015, p. 1-3.