

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

FLÁVIO LUIZ DE CARVALHO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE
SAPATAS ASSENTES SOBRE SOLO MELHORADO COM
ESTACA MINI-RAP**

OURO BRANCO, MINAS GERAIS
JULHO DE 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

FLÁVIO LUIZ DE CARVALHO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE
SAPATAS ASSENTES SOBRE SOLO MELHORADO COM
ESTACA MINI-RAP**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Me. Tales Moreira de Oliveira

OURO BRANCO, MINAS GERAIS
JULHO DE 2018

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB) e
Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo autor

Carvalho, Flávio Luiz de.

C331e Estudo do comportamento geotécnico de sapatas assentes sobre
solo melhorado com estaca Mini-RAP / Flávio Luiz de Carvalho ;
orientador Tales Moreira de Oliveira. -- Ouro Branco, 2018.

31 p.

Trabalho de Conclusão (Graduação - Engenharia Civil) --
Universidade Federal de São João del-Rei, 2018.

1. RAP Modificada. 2. Melhoramento de solo. 3. Estaca granular. 4.
Prova de carga. 5. Modelo Reduzido. I. Oliveira, Tales Moreira de ,
orient.

II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE SAPATAS ASSENTES SOBRE SOLO MELHORADO COM ESTACA MINI-RAP.

Autores: Flávio Luiz de Carvalho

Aprovado como parte das exigências para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Me. Tales Moreira de Oliveira – UFSJ
(Orientador)

Prof. Dr. Leandro Neves Duarte – UFSJ
(Avaliador Interno)

Prof. Me Paulo Roberto Borges – UFSJ
(Avaliador Interno)

Ouro Branco-MG, 03 de Julho de 2017.

A meus grandes heróis, as pessoas mais fortes e incríveis que tive a honra de conhecer:

Meus pais, Aristides e Maria Carvalho.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa um símbolo de aprendizado e conclusão de uma etapa. Agradeço a cada um que esteve comigo ao longo desse caminho e em especial:

A minha família, pelos incentivos e apoio em todos os momentos.

Ao Infrageo, pelo suporte no desenvolvimento de diversas atividades e companheirismo de todos os seus membros.

Ao professor Tales, pela orientação acadêmica neste trabalho e em todas as pesquisas e trabalhos no Infrageo, em que pude conhecer esta incrível área: a Geotecnia. E não apenas no âmbito acadêmico, pela amizade adquirida e ensinamentos que levarei pela vida toda.

A todos meus amigos, que foram minha família em Ouro Branco, e me acompanharam nessa incrível e única jornada chamada Engenharia.

“Tão certo como nasce o sol, Ele virá nos ajudar.” Oseias 6:3

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar o melhoramento de solo devido à utilização de estacas Mini-RAP assentes sob sapatas. Executou-se em campo ensaios de caracterização do solo e quatro ensaios de prova de carga, sendo estas: i) uma prova de carga direta sobre a estaca; ii) duas provas de carga sobre uma placa rígida de aço assente sobre o solo melhorado com uma e duas estaca Mini-RAP; iii) uma prova de carga sobre uma placa rígida assente sobre o terreno nas suas condições naturais. Em laboratório, por meio de ensaio em escala reduzida tipo similitude restritiva (1g) estudou-se o comportamento geotécnico da interação solo – estaca – sapata. Os resultados indicam uma estaca altamente funcional, de bom desempenho, cujo melhoramento do solo é obtido permitindo assim o assentamento de sapatas sobre o solo melhorado.

PALAVRAS-CHAVE: RAP Modificada, Melhoramento de solo, Estaca Granular, Prova de Carga, Modelo Reduzido (1g)

ABSTRACT

This work aims to analyze the soil improvement due to the use of Mini-RAP piles assented under footing. It was carried out in the field of soil characterization tests, with four load tests, namely: i) a direct load test on a pile; ii) two load tests on a rigid steel plate on the ground improved with a Mini-RAP pile; (iii) a load test on a rigid plate resting on the ground under its natural conditions. In the laboratory, by means of a scale test, the species of restrictive model (1g) studied the geotechnical behavior of the soil - pile - footing interaction. The results indicate high functionality, good performance, better soil performance, as well as improved soil.

KEYWORDS: RAP Modificada, Soil improvement, Granular pile, Load test, Reduced model (1g).

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VII
1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Objetivo Geral e Específico	10
1.2 Organização do trabalho	10
2 REVISÃO DA LILERATURA	11
2.1 Técnicas de melhoramento de solo	11
2.2 Sapata Estaqueada.....	12
2.3 Estaca RAP	13
2.3.1 Estaca Mini-RAP (RAP Modificada).....	14
2.4 Prova de carga estática rápida.....	15
2.5 Modelo reduzido	16
3 ARTIGO	17
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1 INTRODUÇÃO

O Engenheiro tem como missão uma constante busca pela redução de custo, consumo e pelo aumento do rendimento da produtividade e utilidades de sistemas. Existem diversas possibilidades para resolução de um mesmo problema e, quase sempre, as melhores alternativas apresentam dois vieses: um técnico e outro econômico (BAZZO, 2006).

No atual mundo globalizado e era da indústria 4.0 tem-se uma dinâmica em que as empresas estão entendendo a importância de se tornarem ecologicamente corretas, gerando valor agregado a seu produto, diferentemente da década de 50 em que apenas buscavam lucro sem se importar com os impactos associados a seus processos (YEMAL et al., 2011).

Neste contexto percebe-se a necessidade da modificação de processos e readequação ao novo contexto mundial. De acordo com CORRÊA (2009) uma das pré-condições para o desenvolvimento de projetos sustentáveis é a constante busca pela inovação, buscando novas tecnologias e soluções criativas.

No âmbito da engenharia de fundações, técnicas de melhoria de solo tem se difundido nos projetos, visando atender critérios técnicos e econômicos para viabilização de obras em terrenos de baixa capacidade de suporte, uma vez que o crescimento dos grandes centros urbanos acarreta uma supervalorização das áreas mais nobres (SOARES, 2002).

Uma das técnicas de melhoramento de solos, entre as diversas possibilidades, consiste na execução de estacas de compactação (estacas granulares). Sua construção se dá por meio da compactação de agregado natural britado em furos previamente escavados. A empresa Geopier® possui em seu portfólio a estaca GP3®. Patentada pela empresa, a GP3 é executada com colunas de agregados compactados, sistema por eles denominado de Ramped Aggregate Pier® (RAP).

OLIVEIRA (2016) apresentou um protótipo denominado RAP-Modificada (neste trabalho tratada por Mini-RAP) inserida neste contexto, apresentando uma metodologia executiva simplificada, com intuito de atender edificações de médio a pequeno porte. Para tanto, utiliza-se de escória de aciaria em substituição ao agregado natural britado, sendo construída com pequeno diâmetro (15 cm).

1.1 Objetivo Geral e Específico

Este trabalho tem por objetivo geral o estudo do comportamento geotécnico de sapatas assentes sobre solo melhorado com Estaca RAP Modificada, visando fomentar a discussão de novas técnicas apresentadas ao meio geotécnico Brasileiro, que conciliem inovação e sustentabilidade.

Os objetivos específicos são:

- i) Avaliar o comportamento Sapata-estaca em escala real;
- ii) Avaliar o comportamento Sapata-estaca em modelo reduzido (1g);
- iii) Avaliar o melhoramento do solo;

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em três partes, da seguinte forma:

No capítulo 1, faz-se uma breve introdução à temática desenvolvida nesta monografia, referindo-se também aos objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2, tem-se uma breve revisão da literatura. Apresentam-se técnicas de melhoramento de solos, o conceito de Sapatas-Estaqueadas e suas vantagens, um histórico sobre as estacas RAP, sua metodologia, funcionamento e a relação com as RAP Modificadas, critérios para prova de carga e sua normatização e por fim, uma contextualização sobre trabalhos em modelo reduzido e seus benefícios.

O capítulo 3 dedica-se a apresentação do artigo, onde é apresentada de forma sucinta uma introdução, os materiais e métodos utilizados para desenvolvimento do trabalho e os resultados para este estudo.

Finalmente, tem-se as referências bibliográficas, as quais, possibilitaram a realização deste trabalho.

2 REVISÃO DA LILERATURA

2.1 Técnicas de melhoramento de solo

Têm-se diversas possibilidades de técnicas de melhoramento de solos no atual estado da arte da engenharia geotécnica. Conforme MITCHEL e JARDINE (apud SANTOS et al., 2014) essa variada gama de opções se dá devido à diversificação e características específicas de cada obra.

Quando o engenheiro se depara com depósitos de solos arenosos fofos, pode-se haver a necessidade de aplicação das técnicas de melhoramento, com o intuito do aumento da capacidade de carga e redução de recalques totais e diferenciais, visto que solos arenosos fofos conduzem à utilização de fundações profundas, sendo esta uma solução mais onerosa (MORAES, 2011).

Dentro deste universo, diversas técnicas de melhoramento de solo são utilizadas atualmente, dentre elas, pode-se citar:

- i) Técnicas de vibroflotação: Utiliza-se de um vibrador com diâmetro entre 300 e 400 mm, onde se faz a introdução de estacas de areia no solo por meio de vibração (SOARES, 2002).
- ii) Jet Grouting: Consiste na aplicação de uma calda de cimento sobre pressão elevada no solo, sendo recomendada para solos coerentes com $5 < N_{spt} < 10$ e em solos incoerentes de $N_{spt} < 20$ (RIBEIRO, 2010).
- iii) Estacas de compactação: Compostas de material granular e executadas por processos de compactação dinâmicos, onde se visa-se gerar tensões radiais no solo, que provoquem um aumento em sua resistência, reduzindo sua compressibilidade (MORAES, 2008).

2.2 Sapata Estaqueada

Quando tem-se uma associação entre elementos de fundação superficiais e uma estaca ou grupo de estacas, em um sistema onde ambas as partes são responsáveis pelo desempenho da fundação quanto a capacidade de carga e recalques, define-se os termos “Sapata-Estaqueada” e “Radier Estaqueado” (SALES, 2000).

Segundo JANUZZI e MOREIRA (2016) tem-se observado o crescimento das obras que utilizam a metodologia de associação da sapata com estacas. Objetiva-se reduzir o recalque nos elementos superficiais, melhorar a capacidade de carga do solo ou até mesmo reduzir custos. De acordo com SOUZA (2003), algumas das principais vantagens do uso de sapata estaqueada consistem em:

- i) Redução no recalque diferencial;
- ii) Prevenção de recalques entre diferentes partes carregadas de uma edificação;
- iii) Ganho global de capacidade de carga;
- iv) Maior resistência a cargas horizontais e momentos de tombamento;
- v) Redução do recalque inicial, reduzindo a probabilidade de danos estruturais;
- vi) Redução dos momentos e tensões devido à otimização da geometria do estaqueamento.

Cooke (apud SOUZA, 2003) apresenta um interessante resultado de teste realizado em laboratório, onde se avaliou o desempenho de 9, 25, 49 e 81 estacas assentes sob radier em modelo reduzido.

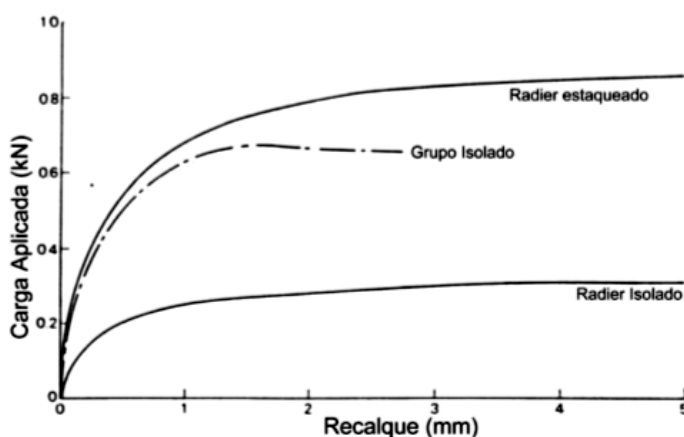


Figura 1 – Comparação do comportamento de um radier sobre 49 estacas, grupo (7x7) e um radier isolado (Cooke, apud Souza 2003)

2.3 Estaca RAP

Em 1980, o Dr. Nathaniel Fox desenvolveu o sistema Rammed Aggregate Piers, patenteado pela empresa Geopier. Buscava-se fornecer uma tecnologia que pudesse ser usada para reduzir os recalques abaixo das fundações rasas. O sistema foi introduzido na construção de edifícios comerciais em 1989. Desde então, a Geopier busca esforços para o desenvolvimento de pesquisa que vem fazendo o crescimento de suas aplicações (IOWA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2003).

Os elementos RAP tem, geralmente, cerca de 75 cm de diâmetro e variam entre 180 cm e 910 cm de comprimento. O processo construtivo das estacas RAP consiste, inicialmente, na execução de um furo para remoção do solo. Posteriormente, lança-se agregado no interior do furo e então parte-se para o processo de compactação do mesmo. Refaz-se o processo em sucessivas camadas até que se tenha realizado o total preenchimento do furo. A figura 2 ilustra o processo descrito acima.

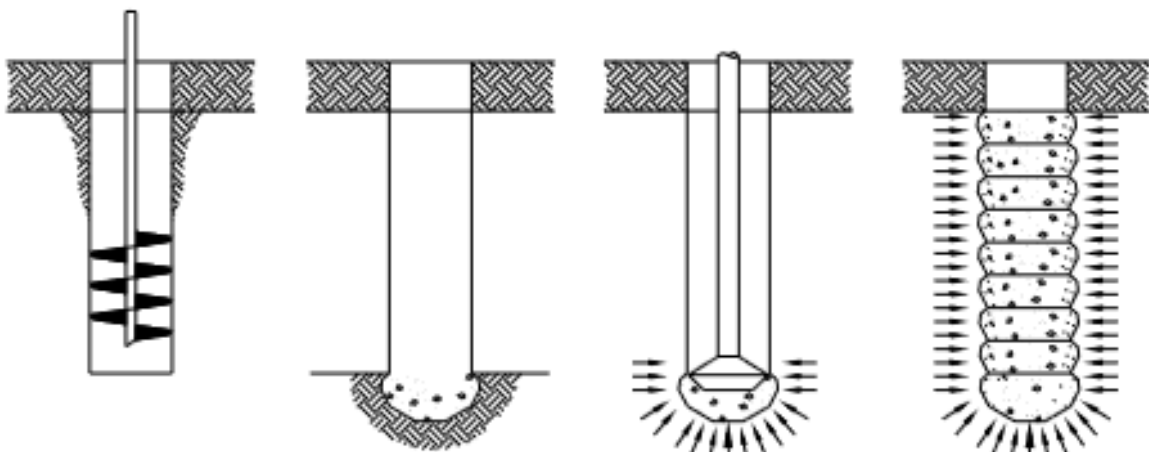


Figura 2 – Processo construtivo Geopier (Fonte: Report No. Iowa DOT Project TR-443)

A construção de elementos RAP resulta em uma estrutura vertical rígida dentro da matriz do solo. Ao se executar as estacas em solo mole, a adição de elementos RAP confere maior estabilidade ao terreno, possibilitando a movimentação de equipamentos..

2.3.1 Estaca Mini-RAP (RAP Modificada)

A RAP modificada (neste trabalho tratada por Mini-RAP) foi apresentada por OLIVEIRA (2016a) e se trata de uma nova metodologia baseada no princípio das estacas Geopier GP3 (Rammed Aggregate Piers). Buscou-se trazer contribuições geotécnicas ao meio brasileiro, para que se possa atender a obras de médio a pequeno porte com a execução de uma estaca com processo executivo simplificado e, ainda, com a utilização de escória de aciaria.

De acordo com OLIVEIRA (2016) o processo construtivo da Mini-RAP consiste em:

- i) Execução de furos com 15 cm de diâmetro até a profundidade de projeto. Recomenda-se o comprimento de 1,5 vezes o bulbo de tensão gerado pela sapata a ser assente sobre a Mini-RAP, que conforme DUARTE (apud OLIVEIRA, 2016a) configura um sistema otimizado do ponto de vista técnico econômico. Quanto ao equipamento, pode-se optar por trado mecanizado ou manual.
- ii) Quanto ao agregado, utiliza-se escória de aciaria, previamente testada com a recomendação de $n = 0,5$ na curva de Fuller-Talbot, a qual confere melhores valores de ISC.
- iii) Parte-se ao processo de compactação do material. Lança-se cerca de 30 cm de escória dentro do furo e aplica-se 17 golpes do martelo SPT, com uma altura de queda de 75 cm. Prepara-se uma haste metálica acoplada a uma sapata de 15 cm de diâmetro para compactação do material. Repete-se o processo até que seja feito o total preenchimento do furo.

Verifica-se a simplicidade do processo e a viabilização da construção de estacas de compactação, dispensando equipamentos mais sofisticados e de alto custo.

Ao realizar provas de carga sobre sapatas-estaqueadas com Mini-RAP, OLIVEIRA (2016a) apontou uma redução nos recalques na ordem de 27%, quando comparadas a sapatas convencionais.

No que diz respeito ao custo de produção, tem-se um valor de R\$28,01 por metro de estaca (15 cm de diâmetro). Levou-se em conta para esta composição de custos a utilização de trado mecanizado, Martelo Mecânico com motor elétrico, todos os suprimentos necessários e mão de obra, que incluem Operador de Martelo, Ajudantes e Engenheiro Júnior (OLIVEIRA, 2016b).

2.4 Prova de carga estática rápida

Apesar das monumentais construções dos egípcios, feitas há milhares de anos, não se tem registro documental dos critérios adotados por eles. No âmbito dos testes de carregamento, as primeiras notas se deram no século XV, feitas por Leonardo da Vinci. Também, tem-se registros de testes de carregamento em estruturas feitos por Galileo Galilei, com o intuito de avaliar as tensões sobre elas (OLIVEIRA e MORENO, 2007).

Dentre os diversos meios para se determinar as características de deformação nos solos, as provas de carga são uma das melhores alternativas. No Brasil costuma-se usar placas circulares de aço com cerca de 80 cm de diâmetro (HACHICH et al.,1998).

De acordo com a NBR 12131, o ensaio de prova de carga em estacas é executado a partir da aplicação de esforços ao elemento de fundação e a consequente leitura dos deslocamentos correspondentes. Tratando-se de prova de cargas diretamente sobre o terreno de fundação, a NBR 6489 aborda o procedimento a seguir para a instalação do ensaio:

- i) A cota do ensaio deve coincidir com a de apoio das sapatas;
- ii) Deve-se utilizar placa rígida com área mínima de 0,5 m²;
- iii) Não se deve aplicar cargas ao entorno da placa, respeitando uma distância mínima de uma vez o diâmetro da placa.
- iv) Deve-se utilizar macaco hidráulico munido de bomba e manômetro;
- v) Para leitura dos recalques, deve-se usar extensômetros com precisão de 0,01 mm;
- vi) Deve-se espaçar os medidores de recalque em, no mínimo, 1,5 vez o diâmetro da placa, em relação ao centro da estaca.
- vii) Deve-se evitar trepidações durante a execução do ensaio.

Para execução do ensaio, ainda de acordo com a NBR 6489, a carga aplicada por estágio não deve ser superior a 20% da capacidade máxima de carga do solo, sendo a aplicação em estágios sucessivos.

É comum que o resultado de uma prova de carga seja apresentado em um gráfico de Tensão x Recalque, e demais informações, como por exemplo, dados de montagem da prova de carga, placa de estaqueamento, resultados e sondagens próximos, entre outros (HACHICH et al.,1998).

2.5 Modelo reduzido

O estudo em modelo reduzido visa fornecer valores qualitativos referentes ao objetivo do estudo e torna-se mais viável uma análise em termos das diversas repetições realizadas em escala. Conforme descreve BASSET (apud GUIMARÃES, 1986), têm-se diversas vantagens ao se utilizar trabalhos em modelo reduzido:

- i) Devido a seu tamanho, são mais baratos e rápidos para construção;
- ii) Pode-se chegar a ruptura com maior segurança ou custos elevados;
- iii) Pode-se escolher as propriedades do solo de trabalho e tem-se controle dos parâmetros envolvidos;
- iv) Pode-se realizar repetições para que se faça um tratamento estatístico e ainda serem modificados de acordo com a necessidade da pesquisa.

Quanto aos tipos de ensaios em modelo reduzido, pode-se dividir em dois grupos, sendo um deles aqueles feitos em caixa ou câmaras, em que há somente a atuação da gravidade. Já os modelos centrifugados são mais sofisticados, onde se pode controlar as tensões atuantes no solo pela aceleração centrífuga (RUVÉR, 2011).

3 ARTIGO

Estudo do Comportamento Geotécnico de Sapatas Assentes sobre Solo Melhorado com Estaca Mini-RAP

RESUMO: Este trabalho tem por objetivo analisar o melhoramento de solo devido a utilização de estacas Mini-RAP assentes sob sapatas. Executou-se em campo ensaios de caracterização do solo, quatro ensaios de prova de carga, sendo estas: i) uma prova de carga direta sobre a estaca; ii) duas provas de carga sobre uma placa rígida de aço assente sobre o solo melhorado com uma e duas estaca Mini-RAP; iii) uma prova de carga sobre uma placa rígida assente sobre o terreno nas suas condições naturais. Em laboratório, por meio de ensaio em escala reduzida tipo similitude restritiva (1g) estudou-se o comportamento geotécnico da interação solo – estaca – sapata. Os resultados, indicam uma estaca altamente funcional, de bom desempenho, cujo melhoramento do solo é obtido permitindo assim o assentamento de sapatas sobre o solo melhorado.

PALAVRAS-CHAVE: Mini-RAP, Melhoramento de solo, Estaca Granular, Prova de Carga, Modelo Reduzido (1g)

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento acelerado dos grandes centros urbanos, é cada vez mais comum a utilização de solos com baixa capacidade de suporte para fundações (SOARES, 2002), principalmente pela supervalorização das áreas mais nobres (CONSTANCIO, 2010).

Quando se é verificada a necessidade de melhoramento, LOPES (2011) aponta a possibilidade de i) transferência das cargas para uma camada profunda mais competente, ii) substituição do solo local por solo de maior competência e iii) adequação dos solos para atender as solicitações impostas, através de “Técnicas de Melhoramento dos Solos”.

Neste contexto este trabalho apresenta um estudo sobre a técnica de melhoramento de solos baseada na utilização de estacas granulares compactadas. Segundo Amorim et. al. (2012) o processo de compactação é capaz de proporcionar redução do índice de vazios, aumentando a capacidade de carga da fundação e redução do recalque.

No ano de 1989 a Geopier Foundation Company desenvolveu o primeiro sistema *Rammed Aggregate Pier*[®] (RAP) e desde então milhares de estruturas em todo mundo utilizam a tecnologia, em alternativa a grandes escavações e substituições de solo ou ainda a utilização de fundações profundas (IONESCU e BECK, 2010). Especificamente, a metodologia Geopier GP3[®] consiste na execução de um furo para lançamento de agregado e compactação do mesmo, sendo este processo repetido em sucessivas camadas, até o total preenchimento do furo.

Essa metodologia proporciona ganho na resistência e rigidez do agregado devido a compactação e ainda o pressiona contra as paredes laterais do furo, gerando tensões radiais. Obtem-se, portando, aumento da capacidade suporte e redução de recalques (OLIVEIRA et al. 2016).

Buscando desenvolver um modelo que possa ser abrangente e atenda obras de pequeno e médio porte, OLIVEIRA et al. (2016) introduz ao meio geotécnico Brasileiro um estaca RAP modificada, denominada Mini-RAP, cujo processo de execução se dá de forma simplificada utilizando o equipamento de *Standard Penetration Test* (SPT). A Mini-RAP possui diâmetro de 0,15 m e fora utilizada escória de aciaria em substituição ao agregado natural britado, tendo em vista a grande disponibilidade do produto na região do estudo.

Neste trabalho realizou-se a execução de estacas Mini-RAP em campo experimental. Fez-se um estudo geotécnico da área, visando determinar suas características. Foram feitas provas de carga em placa sobre o solo natural, sobre uma e duas estacas e prova de carga diretamente sobre uma estaca. Fez-se ensaios em escala reduzida tipo similitude restritiva (1g), variando-se o comprimento e a quantidades de estacas assentes sob placa. Objetiva-se analisar o comportamento de sapatas assentes sobre o terreno melhorado com estacas Mini-RAP.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Campo Experimental

Todo trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal de São João del Rei, Campus Alto Paraopeba, na cidade de Ouro Branco (MG), tanto para os ensaios em campo experimental quanto no laboratório.

2.2 Investigação geotécnica

As características do campo experimental foram avaliadas a partir de ensaios, necessários para o dimensionamento das estacas de melhoramento Mini-RAP. Iniciou-se pela execução de sondagens de simples reconhecimento, que são imprescindíveis para que o engenheiro possa ter uma ideia geral do subsolo, antes da realização de qualquer ensaio de campo (MASSAD, 2010). Foram feitos 5 sondagens a trado com profundidade de 4 m.

Após a caracterização inicial, fez-se 5 ensaios SPT, 5 ensaios Pressiométrico de Menard (PMT), sendo que em cada ensaio PMT realizou-se a leitura em 4 profundidades distintas, ao longo do perfil do solo. Para realização do ensaio de resistência Triaxial Consolidado Isotropicamente e Drenado (CID), foram retiradas 4 amostras de blocos indeformados, ao longo de uma escavação, nas profundidades de 0,5 m, 1,5 m, 2,5 m e 3,5 m, para as quais também se realizou ensaio de cisalhamento direto inundado.

2.3 Mini-RAP

Realizou-se todo processo executivo das estacas Mini-RAP de acordo com a metodologia proposta por OLIVEIRA et al. (2016).

2.3.1 Agregado

Utilizou-se para construção das estacas em campo a escória de aciaria, devidamente beneficiada e enquadrada na curva granulométrica indicada na figura 1.

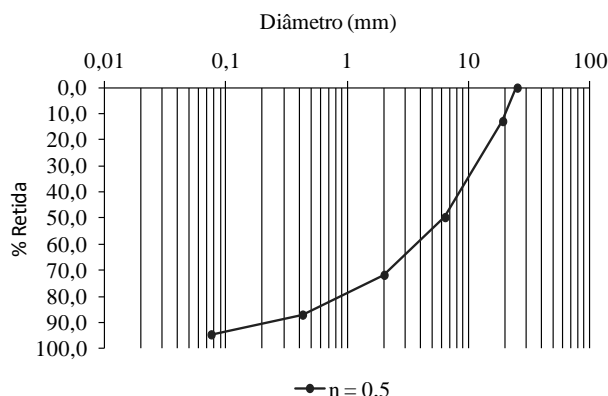


Figura 1. Curva granulométrica da escória.

2.3.2 Método executivo

De acordo com o exposto na figura 2, iniciou-se a construção da Mini-RAP a partir da escavação do furo (1). Foi utilizado trado manual tipo concha de 15 cm de diâmetro. Partiu-se para o processo de compactação do agregado (2). Utilizou-se das canarias do equipamento de SPT, com a ponta instalada sobre uma placa circular rígida de 15 cm de diâmetro. Na extremidade superior da haste, que recebeu os golpes do martelo, utilizou-se a própria peça do SPT, denominada usualmente de cabeça de bater. Para iniciar o processo de compactação inicialmente fez o lançamento de camada de escória, com de cerca de 30 cm, com a placa rígida apoiada sobre o material granular aplicou-se 17 golpes padronizados de acordo com a metodologia do ensaio SPT (3). Repetiu-se o processo até o total preenchimento do furo (4).

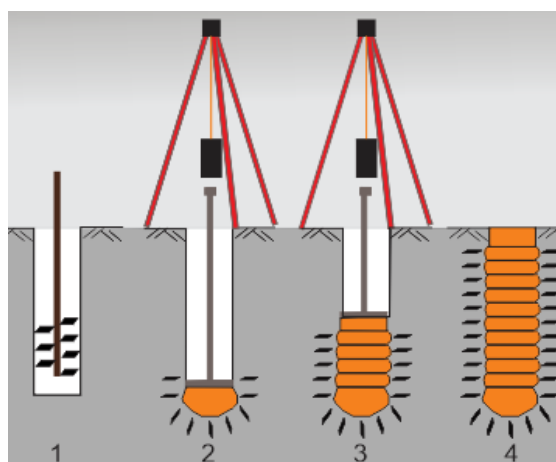


Figura 2. Processo executivo Mini-RAP.

2.4 Modelo reduzido

Realizou-se todo processo executivo das estacas Mini-RAP em modelo reduzido de acordo com a metodologia proposta por COSTA et al. (2017), com um fator de redução geométrica igual a 15%.

2.4.1 Agregado

Foi aplicado o fator de escala de 15% na curva granulométrica apresentada por meio do item 2.3.1.

2.4.2 Método construtivo do sistema

Utilizou-se de uma caixa rígida quadrada com lado de 1 m, instalada em conjunto a um pórtico metálico. A viga superior deste pórtico servira de reação, onde pode-se conectar um cilindro pneumático para aplicação de carga (regulada por registro e manômetro digital). Entre a estaca e o cilindro, instalou-se um anel dinamométrico. Para leitura do deslocamento, acoplou-se um relógio comparador ao sistema, sobre uma placa metálica de 12 cm de diâmetro, utilizada para simular uma sapata.

Para compactação do solo no interior da caixa. Foi utilizado material amostrado do campo experimental, tendo suas propriedades definidas de acordo com COSTA et al. (2017).

Para execução das estacas confeccionou-se um pequeno trado para escavação do solo compactado no interior da caixa. A sapata foi simulada por meio de uma placa metálica, de formato circular com 12 cm de diâmetro. Concebeu-se hastes rosqueadas de diferentes comprimentos para permitir a execução da compactação em diferentes profundidades. Determinou-se a energia de compactação por meio da correlação entre o peso específico de campo e do modelo reduzido, associando-se a energia de compactação para cada uma delas. Para tanto, foi definido a aplicação de 1 golpe por camada utilizando o soquete do ensaio Proctor Normal, com altura de queda de 35 cm, na confecção das estacas que possuíam 2,25 cm de diâmetro.

2.5 Ensaio de prova de carga

2.5.1 Provas de Carga em campo

Após a construção das estacas Mini-RAP no campo experimental, se iniciou a campanha de ensaios sobre as mesmas. Foram feitas 4 provas de carga. A primeira consistiu em prova de carga em placa sobre o terreno de fundação. Duas outras foram realizadas sobre a placa apoiada em uma estaca Mini-RAP e sobre duas estacas Mini-RAP. Por fim, fez-se uma prova de carga diretamente sobre a estaca, que teve seu topo devidamente preparado.

O sistema de reação utilizado consistiu em estruturas fixadas ao terreno através de elementos tracionados, conforme Figuras 3 e 4:

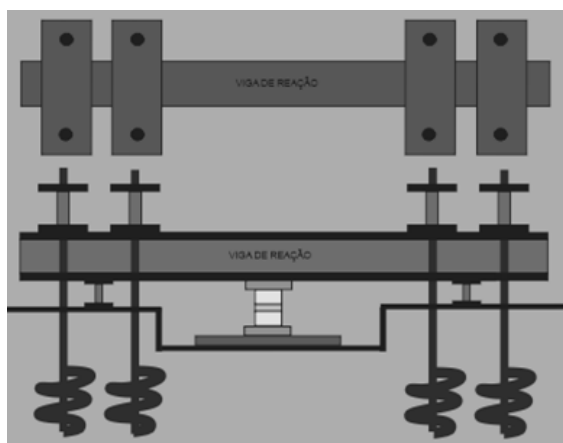


Figura 3. Sistema de reação.



Figura 4. Montagem da prova de carga.

Utilizou-se uma placa rígida com área de 0,5 m², 2 relógios comparadores com precisão de 0,01 mm, macaco hidráulico munido de bomba e manômetro, conforme figura 5.



Figura 5. Prova de carga sapata sobre Mini-RAP.

O ensaio iniciou com a anotação das leituras dos relógios comparadores, e logo após com aplicação de carga em diferentes estágios de carregamento. Os incrementos foram realizados em estágios de 10% da carga de trabalho prevista. A carga, em cada estágio, foi mantida durante 10 minutos, sendo feita a leitura dos relógios no instante de aplicação da carga e em intervalos de tempos de 1 e 10 minutos até a carga máxima proposta para o ensaio, na qual foi aferido deslocamentos nos tempos de 10, 30, 60, 90 e 120 minutos. Após a conclusão da etapa de carregamento, procedeu-se aos estágios de descarregamento, realizado em cinco estágios até o descarregamento total, conforme NBR 12131: 2006.

2.5.2 Modelo reduzido

Em modelo reduzido trabalhou-se com 2 experimentos: i) O primeiro consistia na variação da quantidade de estacas assentes sob a sapata, foram feitos 4 configurações distintas, repetindo-se 5 vezes cada ensaio. ii) No segundo foi avaliado a variação no comprimento das estacas assentes sob sapata, foram testados 4 comprimentos repetindo-se 4 vezes cada ensaio. Na figura 6 tem-se o sistema construído para execução dos ensaios e a figura 7 a geometria experimento i). Para o experimento ii) adota-se a mesma disposição das sapatas exposta na figura 7, entretando, tem-se uma estaca sob cada sapata, variando-se os comprimentos em 12, 24, 36 e 48 cm.

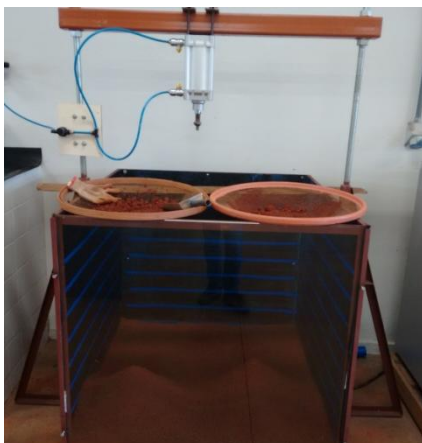


Figura 6. Sistema para ensaio em modelo reduzido.

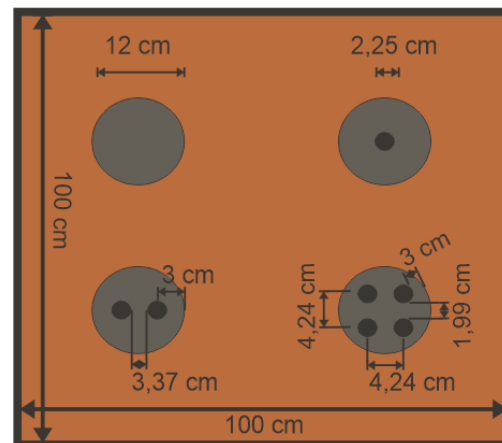


Figura 7. Geometria do estaqueamento (Experimento i).

Estando o solo compactado no interior da caixa e as estacas construídas, posicionou-se o centro da sapata sobre o centro da estaca (ou do grupo). Logo acima da sapata instala-se o anel dinamométrico que recebe a carga do pistão. Há ainda uma rótula entre o contato sapata/anel.

Determinou-se 10 estágios de carga com incrementos de 10% do valor determinado para ruptura. As leituras das cargas foram feitas por meio do anel dinamométrico ($F=kx$) onde “k” representa a constante elástica do anel e “x” a sua deformação vertical e os deslocamentos da sapata foram medidos com uso de relógio comparador devidamente posicionada sobre a sapata (placa). Foram realizadas leituras no instante de aplicação da carga e em 1 e 10 minutos.

2.5 Métodos de Análise

2.5.1 Critério de Boston

Para a interpretação dos resultados das provas de carga de campo feitas sobre placa, adotou-se o critérios do Código de Boston, sendo este em termos de recalque e ruptura.

Para as provas de carga em modelo reduzido, avaliou-se apenas qualitativamente os gráficos dos ensaios.

2.5.1 Método de Van der Veen

Para avaliação da prova de carga feita exclusivamente sobre a estaca, optou-se pelo método de Van der Veen, devido sua interpretação através de formulação matemática, sendo a metodologia que melhor se ajustou aos dados obtidos.

3 RESULTADOS

Na tabela 1 é possível visualizar as características relativas a cor e granulometria do campo experimental:

Tabela 1. Sondagem a trado.

ID	1		2		3		4		5	
	C	G	C	G	C	G	C	G	C	G
Prof. (m)										
0,0 – 0,5	4	A	5	A	2	A	4	B	4	B
0,5 – 1,0	4	A	6	A	2	A	4	B	4	B
1,0 – 1,5	4	A	7	A	2	A	4	B	4	B
1,5 – 2,0	4	A	5	A	2	A	4	B	4	B
2,5 – 2,5	4	A	6	A	2	A	4	B	4	B
2,5 – 3,0	4	A	4	A	8	A	4	B	4	B
3,0 – 3,5	4	A	3	A	4	A	4	B	4	B
3,5 – 4,0	4	A	3	A	4	A	4	B	4	B

Legenda de cores (C) e granulometria (G)

Cores: 1 – Rosa avermelhado, 2 – Rosa, 3 – Marrom Escuro, 4 – Marrom, 5 - Bege, 6 - Marrom Claro, 7- Roxo escuro e 8 - Rosa escuro.

Granulometrias:
A – Silte Arenoso Argilo;
B – Silte Argilo Arenoso.

Na tabela 2 é apresentado o resultados dos ensaios de SPT:

Tabela 2. Sondagem a simples percussão.

ID	1	2	3	4	5
Prof. (m)	NSPT (FINAL)				
1	15	10	13	11	12
2	17	10	10	8	13
3	13	15	14	8	15
4	13	16	20	8	16
5	20	22	21	7	16
6	-	-	-	-	16
7	-	-	-	-	17
8	-	-	-	-	18

Na tabela 3 é possível visualizar os resultados do ensaio PMT.

Tabela 3. Sondagem a simples percussão.

ID	Profundidade (m)	E_M (kPa)	G (kPa)	E_M/PI	CV(%)
1	1	12907	4852	17,07	
2	1	9457	3555	13,62	
3	1	16958	6375	18,66	19,20
4	1	8729	3281	13,07	
5	1	11559	4345	12,99	
1	2	15085	5671	16,93	
2	2	19955	7502	19,51	
3	2	25183	9467	23,00	11,10
4	2	15977	6006	19,92	
5	2	19518	7337	19,34	
1	3	22012	8275	17,92	
2	3	22883	8603	18,56	3,01
3	3	19393	7291	19,16	
4	3	18561	6978	19,06	
1	4	21262	7993	20,42	
2	4	21091	7929	18,99	5,92
3	4	23656	8894	18,20	

Em que “ E_M ” é o Módulo de Deformabilidade Pressiométrico de Ménard, “G” é o Módulo Cisalhante, “PI” é a pressão de limite e CV é o coeficiente de variação obtido para os ensaios.

Para os ensaios de resistência tem-se a tabela 4:

ID	Prof. (m)	Cisalhamento direto inundado		Triaxial Tipo CID	
		Parâmetros para resistência de pico		Parâmetros efetivos	
		C (kPa)	ϕ	C (kPa)	ϕ
1	0,5	25	25	39,9	25,7
2	1,5	31	28	36,8	29,6
3	2,5	40	22	24,2	29,9
4	3,5	43	20	35	23,8

Aplicando os procedimentos descritos anteriormente, foram feitas as provas de carga em campo e em modelo reduzido. A Figura 8 apresenta os valores obtidos para os ensaios de campo, apresentados na forma gráfica.

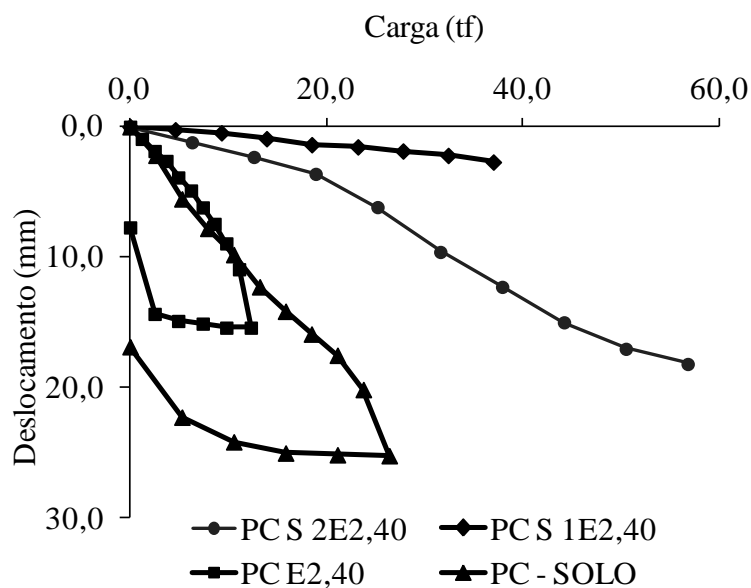


Figura8. Curva carga e deslocamento.

A curva “PC S 2E2,40” é indicativa dos resultados referentes a prova de carga feita em sapata assente sobre solo melhorado com 2 estacas Mini-RAP de 2,40 m. A curva “PC S 1E2,40” é indicativa dos resultados referentes a prova de carga feita em sapata assente sobre solo melhorado com 1 estaca Mini-RAP de 2,40 m. A curva “PC E2,40” é indicativa dos resultados referentes a prova de carga feita diretamente na estaca Mini-RAP de 2,40 m. E por fim, a curva “PC-SOLO” é referente a prova de carga efetuada sobre placa no terreno natural. Na tabela 5 pode-se encontrar os valores das cargas admissíveis do solo.

Prova de carga	Carga (tf)
PC-SOLO	8,0
PC E2,40	12,5
PC S 1E2,40	A*
PC S 2E2,40	33,0

O resultado referente ao ensaio em modelo reduzido para o primeiro experimento (variação na quantidade de estacas) é apresentado nas Figuras 9, 10, 11,12 e 13.

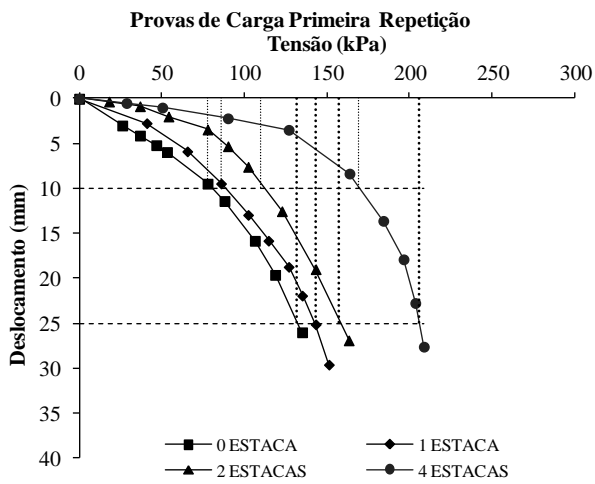


Figura 9. Experimento i) primeira repetição.

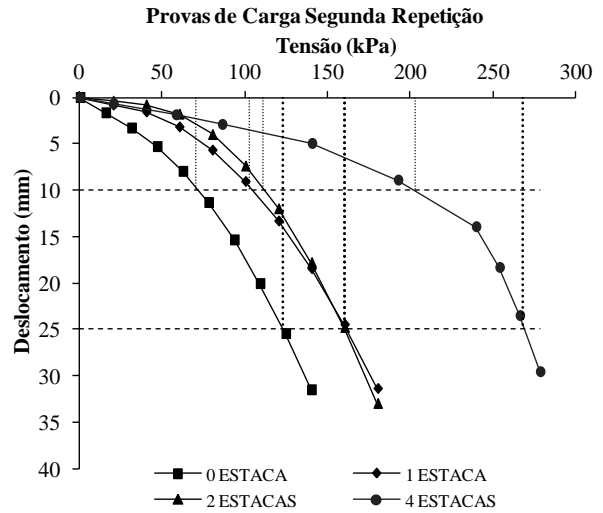


Figura 10. Experimento i) segunda repetição.

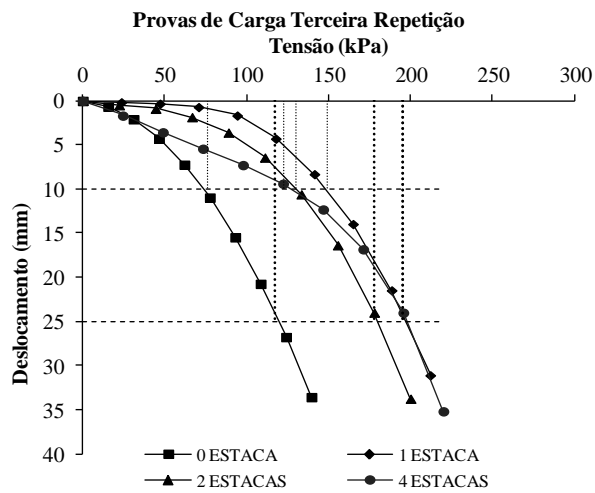


Figura 11. Experimento i) terceira repetição

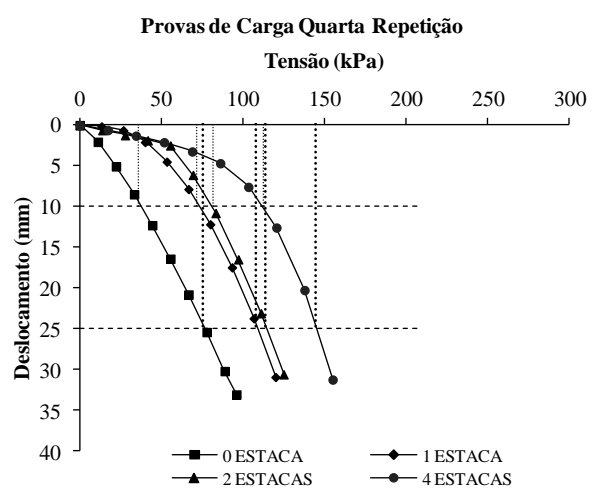


Figura 12. Experimento i) quarta repetição.

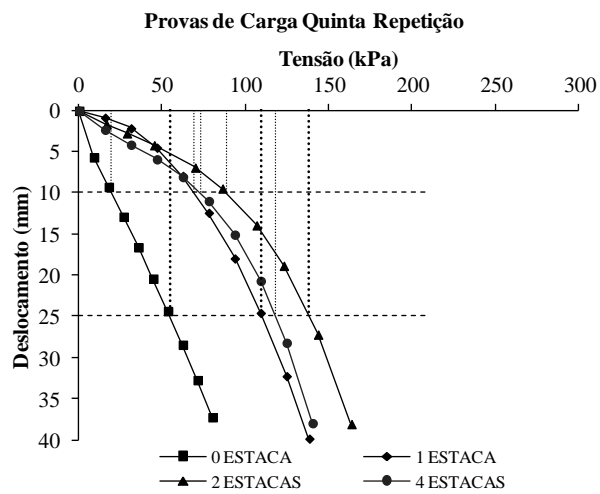


Figura 13. Experimento i) quinta repetição.

Os resultados referentes ao ensaio em modelo reduzido para o segundo experimento (variação no comprimento de estacas) é apresentado nas figuras 14, 15, 16 e 17.

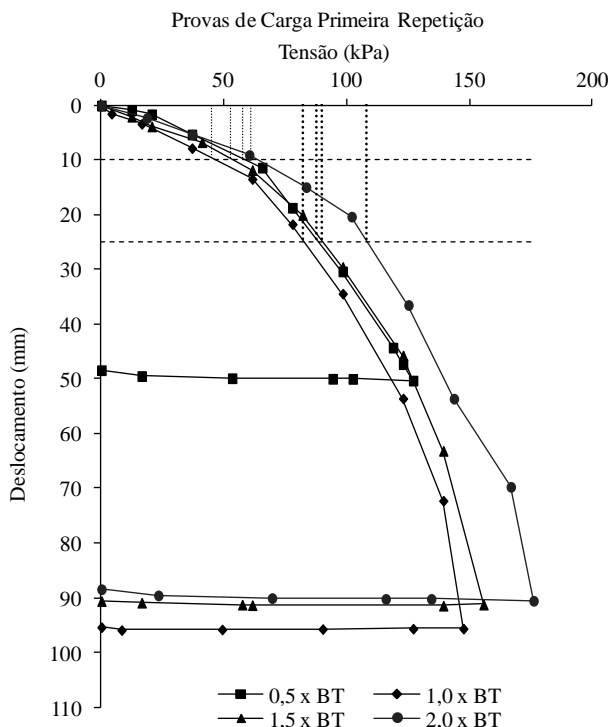


Figura 14. Experimento ii) primeira repetição.

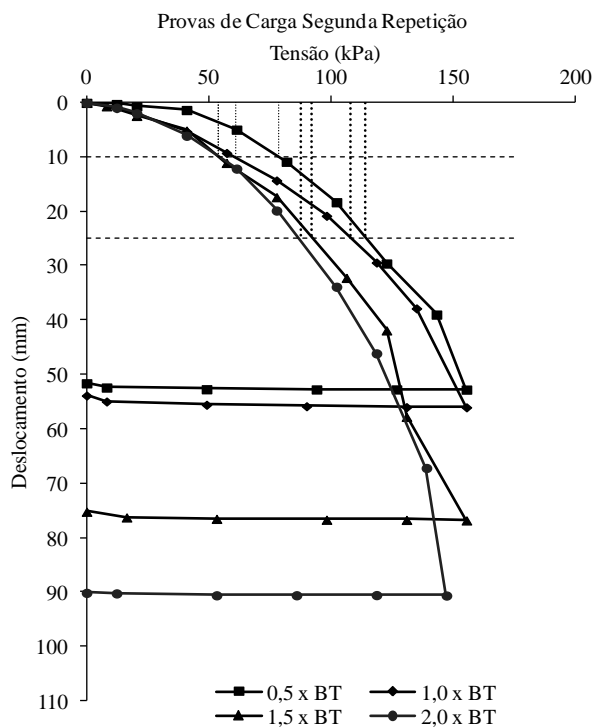


Figura 15. Experimento ii) segunda repetição.

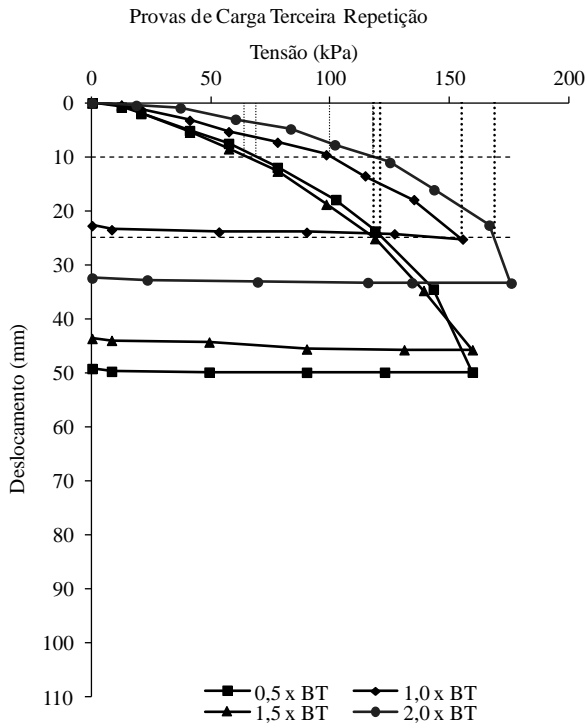


Figura 16. Experimento ii) terceira repetição.

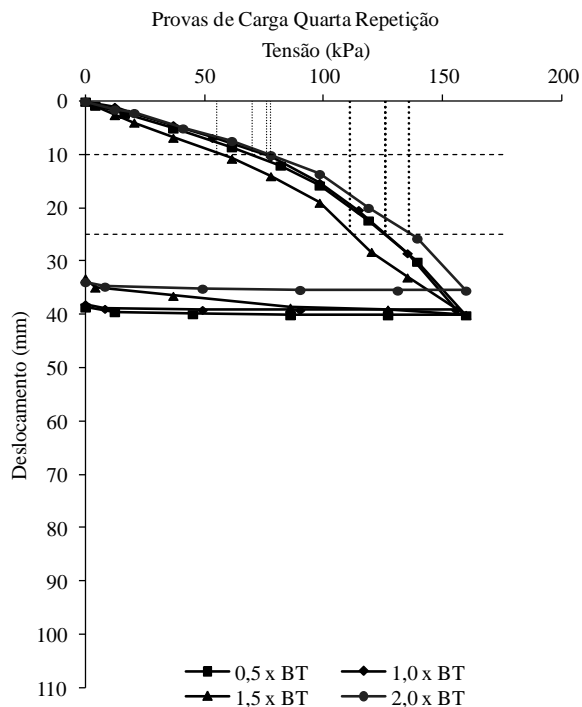


Figura 17. Experimento ii) quarta repetição.

4 DISCUSÃO

Percebe-se pela avaliação das sondagens a trado que o campo experimental encontra-se em uma área com características similares pelo ponto de vista de origem, conformado de solos silto areno argiloso. No que tange o comportamento geotécnico do perfil de estudo em termos de homogeneidade, encontra-se um coeficiente de variação entre 15 e 30% tomando-se por base os valores de N_{SPT} obtidos para as diferentes camadas. Para o PMT, tem-se um coeficiente de variação de 19% no primeiro metro, sendo este valor reduzido com o aumento da profundidade, em relação as diferentes repetições de ensaios, atingindo um coeficiente de variação de 5,92% aos 4 m. Portanto, é válido dizer que o campo experimental se apresenta de forma razoavelmente homogênea, permitindo que as diferentes Mini-RAPs executadas possam ser comparadas.

A partir da figura 8, mostrada acima, é possível verificar um comportamento crescente quanto a capacidade suporte do solo ao se adicionar estacas Mini-RAP sobre uma fundação superficial. Há um ganho significativo em termos da diminuição do recalque. As cargas admissíveis determinadas foram de 8,0 tf, 12,5 tf e 33,0 tf, respectivamente para o ensaio no solo, ensaio diretamente na estaca e ensaio no conjunto sapata assente sobre 2 estacas Mini-RAP.

Em relação a curva PC S 1E2,40 (A*), que diz respeito ao ensaio do conjunto sapata assente sobre 1 estacas Mini-RAP, é visível o fato de que a curva não representou o estágio de plastificação. A opção da escolha do método de Van der Veen para análise desta curva, fez-se justamente para tentar extrapolar a curva e obter-se a carga de ruptura. Entretanto, percebeu-se um valor demasiadamente elevado, que não representaria a realidade. Vale ressaltar que este ensaio foi interrompido neste nível de tensão e recalque devido ao limite de capacidade de carga dos mecanismos de reação, impossibilitando incrementos de carga capaz de se levar a ruptura do solo de fundação.

Abordando-se os ensaios em modelo reduzido é possível que se possa realizar uma avaliação qualitativa das informações. Por meio do experimento i, onde ocorre a variação na quantidade das estacas, percebe-se uma confirmação das respostas obtidas em campo, onde se observa um significativo ganho na redução dos recalques com incremento das estacas Mini-RAP, bem como da carga de ruptura. Observa-se que o modelo N5 apresenta um *outlier* em relação aos demais. Pode-se levantar hipóteses, sendo estas, a falha no sistema de instrumentação, erro na execução do ensaio ou preparação do mesmo.

Para o experimento ii, em que se estuda a variação do comprimento das estacas, percebe-se que não há um ganho significativo ao se variar o comprimento do elemento. Apenas para fins de comparativo entre os resultados do próprio modelo, tem-se que os valores das cargas de ruptura para as estacas com comprimento de $0,5xB$ (12 cm), $1xB$ (24 cm), $1,5xB$ (36 cm) e $2xB$ (48 cm) são respectivamente de 2,26 kgf, 2,30 kgf, 2,03 kgf e 2,43 kgf. Em termos de tensões tem-se 56,12 kPa, 58,0 kPa, 51,0 kPa e 62,0 kPa. Portanto, é visível a baixa influencia da variação do comprimento no desempenho da Mini-RAP, mas percebe-se que comprimento $2xB$ é o mais eficiente, concordando com os estudos de CASTRO (2014).

5 CONCLUSÃO

Dado o exposto pode-se dizer que a nova metodologia avaliada, denominada Mini-RAP, apresenta boa resposta como técnica de melhoramento de solo tipo estaca granular compactada. Observa-se sua funcionalidade na minimização dos recalques para sistemas de fundação superficial.

Em relação ao viés de sua metodologia simplificadora, pode-se observar um potencial para aplicação em obras de pequeno e médio porte, devido a facilidade para execução do processo construtivo e obtenção dos equipamentos necessários.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6489**: Prova de carga direta sobre terreno de fundação. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12131**: Estacas Prova de carga estática – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

AMORIM, M. D. et al. **Análise de provas de carga em placa sobre terreno melhorado com estacas de compactação**. In: SEFE7 - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 2012, São Paulo.

BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. V. **Introdução à Engenharia: Conceitos, Ferramentas e comportamentos**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006.

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

CONSTANCIO, L. A. **Capacidade de carga de um modelo de fundação superficial em solo arenoso fofo com reforço de geotêxtil**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

CORRÊA, L. R. **Sustentabilidade na construção civil**. 2009. Monografia: Especialização em Construção Civil – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2009.

COSTA, Y. et al. Estaca Análise do comportamento geotécnico de estacas tipo mini-rap, sob a ótica de modelos reduzidos (não centrifugado) 1g. In: SIMPÓSIO DA PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE, IV, 2017, Goiânia, **Anais eletrônicos**, Goiânia: GEOCENTRO, 2017. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1TTrBkgVIieH1-tBb3I5sNCpc_Nxpi6ID/view>. Acesso em: 20 março de 2018.

FARRELL, T.; TAYLOR, A.; Rammed Aggregate Pier Design and Construction in California – Performance, Constructability, and Economics. In: SEAOC, 2004, Placerville. Proceedings. p. 147-154.

HACHICH, W. et al. **Fundação Teoria e Prática**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1998.

IONESCU, B. BECK, A. Soil improvement by Geopier Aggregate Piers. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, V, 2010, Brasov, **Anais eletrônicos**, Brasov: CIBv, 2010. Disponível em: <http://aspectt.unitbv.ro/jspui/bitstream/123456789/272/1/%40017_IONESCU_BECK.pdf> Acesso em 02 fevereiro de 2018.

IOWA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Highway Applications for Rammed Aggregate Piers in Iowa Soils. Ames: IOWA, 2003.

JANUZZI, R. V.; MOREIRA, M. L. Estudo do comportamento mecânico de sapatas estaqueadas comparativamente às sapatas isoladas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA, XVIII, 2016, Belo Horizonte, **Anais eletrônicos**, Belo Horizonte: COBRAMSEG, 2016. Disponível em: <<https://ssl4799.websiteseguro.com/swge5/PROCEEDINGS/>>. Acesso em: 22 março de 2018.

LOPES, P. J. G. **Colunas de brita no melhoramento de solos moles**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Universidade de Aveiro, Portugal, 2011.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MORAES, M. L.; BICALHO, K. V.; CASTELLO, R. R. Melhoramento de solos arenosos fofos por estacas de compactação. **Geotecnia**, Portugal, n.º 123, pp. 46-61, 2011.

MORAES, M. L. **Estacas de compactação para melhoramento de solos arenosos fofos e uso de penetrômetro dinâmico pesado na avaliação dos resultados**. 2008. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

OLIVEIRA, C. R.; MORENO, A. L.; Considerações sobre prova de carga em estruturas de concreto. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, 2007.

OLIVEIRA, T. et al. Estaca RAP Modificada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA, XVIII, 2016, Belo Horizonte, **Anais eletrônicos**, Belo Horizonte: COBRAMSEG, 2016a. Disponível em: <<https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/>>. Acesso em: 03 abril de 2018.

OLIVEIRA, T. et al. Viabilidade Técnico Econômica da Estaca RAP Modificada. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA, XVIII, 2016b, Belo Horizonte, **Anais eletrônicos**, Belo Horizonte: COBRAMSEG, 2016. Disponível em: <<https://ssl4799.website-seguro.com/swge5/PROCEEDINGS/>>. Acesso em: 22 março de 2018.

RIBEIRO, A. L. S. **Técnica de tratamento de solos – Jet Grouting**. 2010. Dissertação de mestrado – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

RUVER, C. A. **Estudo do arrancamento de fundações em solos tratados com cimento**. 2011. Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011

SALES, M. M. **Análise do comportamento de sapatas estaqueadas**. 2000. Tese de Doutorado em Geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

SANTOS, W. M. et al. Estacas de Compactação de Material Granular em Solos Moles. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA, XVII, 2014, Goiania, **Anais eletrônicos**, Goias. COBRAMSEG, 2014.

SOARES, W. C. **Estacas de compactação para melhoria de solo**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SOUSA, L. C. M. **Estudo experimental do comportamento de sapatas assentes em solo poroso reforçado**. 2003. Dissertação de mestrado em geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

YEMAL, J. A; TEIXEIRA, N. O. V; NAAS, I. A. Sustentabilidade na Construção Civil. In INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 2011, São Paulo. **Anais**. São Paulo, 2011.