XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
Geotecnia e Desenvolvimento Urbano
COBRAMSEG 2018 – 28 de Agosto a 01 de Setembro, Salvador, Bahia, Brasil
©ABMS, 2018

Estacas de Reforço em Solo-Cimento como Forma de Viabilizar o Uso de Sapatas em Solo Residual Mole

Thays Car Feliciano de Oliveira
Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Foz do Iguaçu, Brasil, thayscarf@gmail.com

Bianca Gabriel dos Santos Dezen
UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil, biancadezen@gmail.com

Isabela de Oliveira Antonio
UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil, isabelaoliveira10@gmail.com

Renata Rauber Dahmer
UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil, renata.dahmer@gmail.com

Julio César Bizarreta Ortega
UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil, julio.ortega@unila.edu.br

RESUMO: A utilização de fundações rasas em solos residuais moles muitas vezes torna-se inviável, no entanto a opção por fundações profundas (*e.g.* estacas) encarece a obra e não é viável para pequenas construções. Assim, propôs-se no presente trabalho uma alternativa de reforço para solos residuais moles, o emprego de estacas de solo-cimento compactadas na base de sapatas, para viabilizar sua aplicação. O objetivo do trabalho foi estudar a viabilidade técnica e econômica de tal proposta. Para isso foram realizados ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico em corpos de prova de solo-cimento nos teores de adição de 0%, 3%, 6% e 9%. Subsequentemente, obteve-se a carga de catálogo das estacas de reforço, para realização de cálculos de projeto. Adotou-se sobrado residencial e comparou-se o sistema de fundações convencional com a aplicação do sistema proposto. Os resultados apontam para a viabilidade técnica e econômica da alternativa estudada. Observou-se que quanto maior o teor de cimento, maior a resistência das estacas o que refletiu também nas análises de viabilidade, uma vez que da aplicação de estacas solo-cimento de reforço com 9% de adição, estas propiciaram uma redução de até 60% na área das sapatas, e economia de até 30% dos custos totais, sendo estes os melhores resultados obtidos, entre os demais teores estudados.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-cimento, reforço, sapatas, fundações.

1 INTRODUÇÃO

Solos residuais, são solos derivados dos processos de decomposição e intemperismo de rochas, ou fragmentos de rochas que não foram transportados e, portanto, permanecem em seu local de origem (BLIGHT & LEONG, 2012). Os solos residuais, muitas vezes, apresentam valores de SPT menor que 5, o que seria classificado como mole, segundo a NBR 6484 (ABNT, 2001). Neste artigo, estes solos serão denominados residuais moles. No contexto brasileiro, muitos autores apresentam resultados

©ABMS, 2018

de SPT baixo para diversas regiões, por exemplo Conciani et al. (2015) para a cidade de Pederneiras (SP), e Boszczowski e Ligocki (2012) para a Cidade de Curitiba (PR). Na região compreendida pelo estudo, Foz do Iguaçu, no oeste do Paraná, a presença deste tipo de solo é marcada por este se encontrar no estado não saturado. Um exemplo disto, é o relatório de sondagens do tipo SPT apresentado por DSOARES (2015), na área compreendida pela nova moradia estudantil da Universidade Federal da Integração Latino Americana (UNILA) que reporta a presenta de solos residuais moles na região.

No entanto, quando se trata de fundações em solos moles, algumas soluções são admitidas, como por exemplo: a adoção de fundações profundas, a retirada e substituição do substrato mole por outro de melhor capacidade, ou então tratamentos físico-químicos das propriedades geotécnicas do solo existente. No caso da moradia da UNILA, trata-se de uma obra de médio porte, com carga de pilar máxima da ordem de 79 toneladas, e a solução adotada para as fundações foi a adoção de profundas do tipo estacas pré-moldadas de concreto armado, até atingirem camadas de maior capacidade. No entanto, quando se trata de obras de pequeno porte, nem sempre fundações profundas são viáveis técnica e econômicamente (VENDRUSCOLO, 1996); assim como a retirada do substrato por completo, uma vez que tais camadas podem atingir grandes profundidades. Portanto, uma das melhores alternativas para fundações de pequenas construções acaba se tornando o tratamento do solo afim de adequá-lo para o uso de fundações rasas.

Atualmente, alguns tratamentos são utilizados, como por exemplo: compactação, consolidação por pré-carregamento ou drenos verticais, injeção de materiais estabilizantes (processos físico-químicos) ou reforço com inclusão de elementos como geotêxteis, fibras, grelhas, etc. (CASAGRANDE, 2001). Neste trabalho, a técnica abordada trata-se da mistura entre as soluções de compactação e de estabilização do solo por meio de agentes cimentantes, no caso, o cimento, as quais serão detalhadas a seguir.

A combinação de solo com cimento é considerada uma forma de estabilização que trabalha de forma similar ao concreto, no entanto, diferencia-se pela forma com que as partículas de cimento se aglomeram, *i.e.*, estas são envolvidas pelos grãos de solos finos resultando em ligações menos resistentes quando comparadas aos do concreto (VENDRUSCULO, 1996). De acordo com a NBR 12253 (ABNT, 2012), o solo-cimento é definido, como o produto endurecido resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através da dosagem.

Neste contexto, a presente pesquisa visa avaliar o melhoramento do solo residual mole de origem basáltica da região de Foz do Iguaçu (Brasil) por meio de estacas de solo cimento compactado (SCC), aplicado na base de sapatas, a fim de viabilizar o emprego de tais fundações e/ou reduzir a dimensão das mesmas, em obras de baixo porte (menores a 24 toneladas).

Cabe ainda ressaltar, que alternativas semelhantes de fundações mistas já foram adotadas na literatura brasileira. Velloso e Lopes (1998) e Décourt (1998), por exemplo, apresentam estacas T (estacas ligadas a sapatas), estapatas (estacas abaixo de sapatas), radier sobre estacas, etc. Já Suwidan (2012) propõe reforços de solos moles com colunas de areia e Félix (2012) comenta que, desde 2007, diversas obras brasileiras se utilizam de reforços de solo por meio de colunas de brita. Portanto, a alternativa proposta pelo presente trabalho também se trata de uma nova alternativa para a melhoria de fundações em solos problemáticos.

2 METODOLOGIA

Para o estudo do sistema proposto, reforço de estacas de solo-cimento compactado, a ideia principal foi determinar o alívio proporcionado por tal sistema às sapatas, refletindo assim na redução de sua área de contato, *i.e.*, em suas

©ABMS, 2018

dimensões, possibilitando sua aplicação em locais de solo residual mole.

Para tanto, inicialmente caracterizou-se o solo do local de estudo (Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu, LTCI, em Foz do Iguaçu, PR) para verificar se o solo encaixar-se-ia no escopo da pesquisa (seção 2.1). Com a confirmação de compatibilidade, posteriormente, foram moldados corpos de prova de solo puro compactado e solo-cimento compactado nos teores de 3%, 6% e 9% de adição para determinação da capacidade de carga e, consequentemente, da carga de catálogo das estacas propostas (seção 2.3). Com tais resultados determinou-se o alívio proporcionado às sapatas e sua consequente redução de área.

Por fim, também se realizou uma análise simplificada da viabilidade econômica do sistema (seção 2.4).

2.1 Caracterização do solo e misturas solo-cimento

Para este trabalho utilizou-se o solo das proximidades do Laboratório de Tecnologia de Concreto de Itaipu (LTCI), em Foz do Iguaçu (PR). Todo o procedimento de coleta e caracterização, foi realizado conforme preconizado pelas normativas brasileiras. Para sua extração removeu-se capa vegetal, em seguida, após a obtenção de todo o material necessário, este foi disposto em lonas para secagem ao ar até umidade higroscópica e posterior destorroamento, conforme indicado pela NBR 6457 (ABNT, 2016). Também se determinou, a umidade natural do material para controles experimentais (etapa de moldagem dos corpos de prova (CPs) de solo-cimento a ser descrita na seção 2.2).

Procedeu-se então com os ensaios de caracterização do solo, conforme segue: limite de liquidez, NBR 6459 (ABNT, 2016); limite de plasticidade, NBR 7180 (ABNT, 2016); e, ensaio de compactação, para determinação do teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima do solo, NBR 7182 (ABNT, 2016). O ensaio granulométrico foi realizado apenas por peneiramento, com caráter de caracterização preliminar, no qual 76% da amostra passou pela peneira #200 (0,075 mm). Os dados obtidos são apresentados na Tabela 1 e indicam que a amostra se trata de um CL, argila de baixa plasticidade, segundo a classificação do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Tabela 1. Dados de caracterização do solo utilizado.

LL	LP	IP	W_{ot} (%)	γ_d (kg/m³)
46,0	20, 3	25,7	23,0	1610,0

Ademais, dados de boletim de sondagem SPT próximo ao LTCI e disponibilizados para a pesquisa indicaram que se trata de um solo do tipo argila siltosa avermelhada mole no estado não saturado. Ou seja, os dados de caracterização indicam que o material realmente se enquadra no escopo do trabalho.

As misturas de solo-cimento, por sua vez, foram apenas caracterizadas quanto à sua umidade ótima, parâmetro este de interesse para montagem do sistema no ato da compactação. Para isto, optou-se pela utilização de um método empírico de determinação de umidade, devido a dificuldades práticas do ensaio teórico.

Este método consiste, basicamente, em ir adicionando pouco a pouco água à mistura e testando a resistência do solo à compressão manual do operador, até que o mesmo ganhe resistência máxima, observada entre uma adição e outra de água. O ponto ótimo de umidade é obtido, portanto, a partir da amostra anterior ao amolecimento do solo depois de se adicionar mais água à mistura, ou seja, observado após a perda de resistência do material ao ser elevada a umidade da mesma. A partir da amostra de resistência máxima reservada, o material é levado à estufa e então determina-se sua umidade de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016) e o valor obtido é, portanto, considerado como a umidade ótima daquela mistura.

Os dados obtidos são apresentados a seguir (Tabela 2).

©ABMS, 2018

Tabela 2. Teor de umidade ótimo, para as misturas de solo-cimento.

	Teor de cimento		
	3%	6%	9%
w_{ot} (%)	24,0	25,0	26,0

2.2 Ensaios realizados

Para determinação da capacidade de carga e carga de catálogo das estacas (solo puro e solo cimento 3%, 6% e 9%), a abordagem adotada foi a moldagem de corpos de prova cilíndricos 10x20 cm das referidas misturas para ensaio de resistência mecânica em prensa hidráulica, bem como de módulo de elasticidade dinâmico, por técnica não destrutiva, com o equipamento Sonelastic IED, que opera de acordo com a ASTM E1876 (ASTM, 2015).

Para a moldagem dos CPs realizou-se mistura do solo, água (até que solo atingisse sua umidade ótima) e cimento CPV-ARI (nos teores 0%, 3%, 6% e 9%) em betoneira e o processo de compactação dos CPs foi realizada manualmente, em três camadas com 26 golpes cada, com auxílio de haste metálica de base alargada (Figura 1A). Após moldagem, os CPs foram envolvidos por película plástica, para conservar a umidade (Figura 1B).

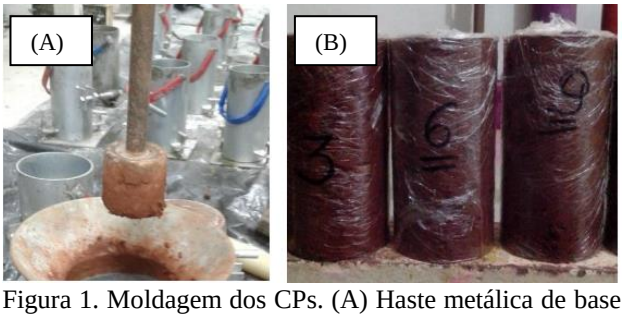

Figura 1. Moldagem dos CPs. (A) Haste metálica de base alargada utilizada para compactação. (B) CPs envolvidos por película plástica.

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados aos 7, 14 e 21 dias, devido ao comportamento intrínseco do cimento, do aumento de resistência ao longo do tempo (até estabilizar-se, aproximadamente, aos 28 dias). Para ruptura, os CPs foram capeados com neoprene.

2.3 Cálculo da capacidade de carga das estacas e do alívio para as sapatas

Para determinação da capacidade de carga com os dados de resistência à compressão das estacas e módulo de elasticidade, adotou-se o método de Aoki-Velloso (CINTRA & AOKI, 2010). Para os cálculos, considerou-se os fatores requeridos para a aplicação da fórmula, os mesmos de uma estacada escavada e, para posterior determinação da carga de catálogo, adotou-se um fator de segurança (FS) que, de acordo com Cintra e Aoki (2010) variam com o material, com o tipo de estrutura a ser considerado, com os estados limites de serviço e último da fundação, além da metodologia de cálculo, isto é, se é empírica, analítica ou semi empírica. Esses fatores, quando se tratam de projetos geotécnicos superficiais, variam, de acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2010), entre 1,4 e 3,0. E, por questões de possíveis erros experimentais implicados na metodologia, adotou-se FS de 3.

Por fim, para verificação do alívio provido às sapatas, diante da aplicação de tal sistema, adotou-se um projeto estrutural de pequena residência, em que as cargas dos pilares descarregados nas fundações variavam de 41 kN a 236 kN. Para desenvolvimento do estudo, aplicaram-se quatro estacas na base de cada sapata, sendo o alívio de carga considerado, simplesmente pela subtração da carga do pilar pelo valor de carga de catálogo de cada uma das estacas. Nos cálculos, variou-se a profundidade da ponta da estaca, de 1,0 ou 2,0 metros, e seu diâmetro, cujos valores comparados foram 10 cm e 20 cm.

2.4 Viabilidade econômica

Como a técnica estudada trata-se de uma proposta de novo sistema, não foram encontrados valores tabelados de execução da obra. Por isso, para análise da viabilidade econômica, foram realizadas algumas considerações, tais como:

- Para escavação e compactação das estacas foram utilizados os mesmos

©ABMS, 2018

valores que os tabelados para sapatas.

- Tomou-se como base os preços apresentados por Cunda (2009), onde foram encontrados todos os valores necessários (escavação, compactação, concreto, armadura e formas para sapatas). Assim evitou-se discrepância devido à diferentes fontes de consulta de preços.
- Apesar da fonte de consulta ser antiga, o que realmente buscou-se conhecer foi a diferença percentual nos preços entre a técnica convencional para fundações, comparativamente ao reforço com estacas solo-cimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise do cimento como reforço do solo

Os resultados iniciais obtidos, de resistência à compressão e módulo de elasticidade indicam que a adição de cimento ao solo aumenta a resistência do material, pois maiores tensões são requeridas para sua ruptura, e também o torna mais rígido, uma vez que o módulo de elasticidade diminui. Tais observações estão de acordo com Kolling *et al*. (2012).

Na Figura 2 observa-se gráfico com as tensões de ruptura dos diferentes teores de solo-cimento estudados. Aos 14 dias, por exemplo, os CPs com 3% de cimento apresentaram resistência 3 vezes maiores que os CPs sem adição de cimento. A aplicação dos teores de 6% e 9%, por sua vez, acarretaram em aumento de 10 e 16 vezes, respectivamente, na resistência, comparando ao solo apenas compactado.

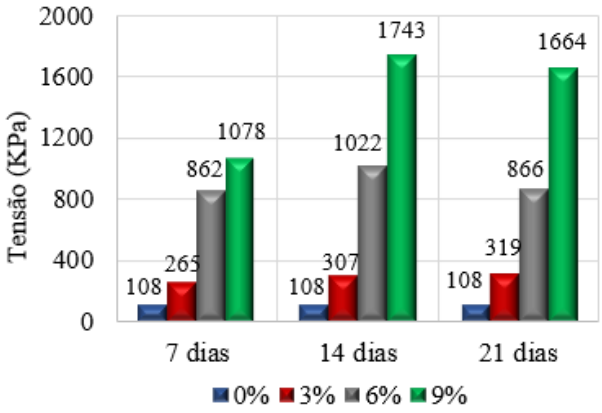

Figura 2. Resistência à compressão dos CPs aos 7, 14 e 21 dias, para os diferentes teores de solo-cimento.

Ademais, conforme esperado, também se observou o aumento da resistência no decorrer do tempo, para as misturas com adição de cimento (KOLLING *et al*, 2012).

Em relação ao módulo de elasticidade (Ed), os resultados podem ser observados na Tabela 3. Tais resultados são apresentados em conjunto com a resistência à compressão aos 21 dias (σ_{21}), de forma a evidenciar relação entre os resultados.

Durante as medições de Ed, o equipamento também forneceu valores para massa específica natural (ρ). Conhecendo-se os valores de teor de umidade (w) e da massa especifica dos grãos (Gs), foi possível obter a massa específica seca (ρd), índice de vazios (e) e grau de saturação (S) para as amostras estudadas, também constantes na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de caracterização das misturas estudadas.

	Teor de cimento			
	0%	3%	6%	9%
Ed (GPa)	0,13	0,64	3,14	4,20
σ_{21} (MPa)	108	319	866	1664
ρ (kg/m³)	1940,0	1990,0	1920,0	1900,0
Gs	2,80	2,81	2,82	2,83
w (%)	24,22	23,00	24,70	23,64
ρd (kg/m³)	1560,0	1620,0	1540,0	1540,0
e	0,79	0,74	0,83	0,84
S (%)	85,53	87,70	83,75	79,49

Da Tabela 3 nota-se uma pequena diminuição na massa específica das amostras,

©ABMS, 2018

bem como um aumento do índice de vazios. De acordo com Faro (2014) isto ocorre devido ao fenômeno de floculação proporcionado pela adição do cimento ao solo.

Em relação ao módulo e à resistência à compressão das misturas, nota-se que possuem uma relação diretamente proporcional (Figura 3), à medida que a resistência aumenta, também aumenta Ed, o que corrobora com o que é apresentado por Silva e Campitelli (2008) em seu trabalho.

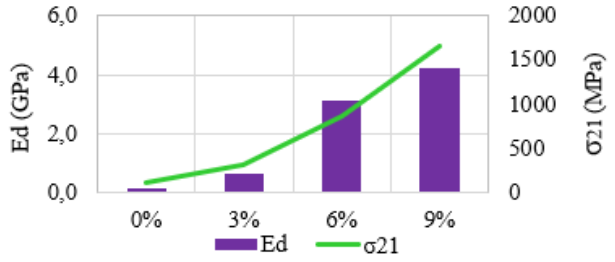

Figura 3. Relação linear entre o módulo de elasticidade e resistência à compressão.

3.2 Carga de catálogo

Inicialmente, para determinação da carga de catálogo de estacas compactadas, foram calculadas as cargas de ruptura, por meio das tensões apresentadas na Figura 1 e supondo diferentes diâmetros para as estacas, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Cargas de ruptura* (em kN) considerando diferentes diâmetros para as estacas compactadas.

Teor de cimento	**Diâmetro (kN)**				
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
0%	0,85	3,38	761	13,52	21,13
3%	2,41	9,64	21,69	38,57	60,26
6%	8,03	32,12	72,27	128,48	200,75
9%	13,69	54,76	123,21	219,04	342,25

*Para estes cálculos consideraram-se as tensões de ruptura aos 14 dias, uma vez que a resistência não variou significativamente para os 21 dias.

A partir dos resultados da Tabela 4 e adotando-se um fator de segurança de 3,0 também foram calculadas as cargas de catálogo para cada um dos casos (Tabela 5).

Tabela 5. Cargas de catálogo (em kN) considerando diferentes diâmetros para as estacas compactadas.

Teor de cimento	**Diâmetro (kN)**				
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
0%	0,28	1,13	2,54	4,51	7,04
3%	0,80	3,21	7,23	12,86	20,09
6%	2,68	10,71	24,09	42,83	66,92
9%	4,56	18,25	41,07	73,01	114,08

Observa-se que os valores obtidos são menores que valores tabelados para estacas tradicionalmente adotadas, onde teríamos para uma estaca de concreto pré-moldada de 22 cm de diâmetro, por exemplo, uma carga de catálogo de 400 kN. Porém ressalta-se que a alternativa estudada se trata de um sistema de reforço de fundações rasas.

Agora, analisando os resultados de carga de catálogo observa-se uma tendência linear em função do teor de cimento (Figura 4).

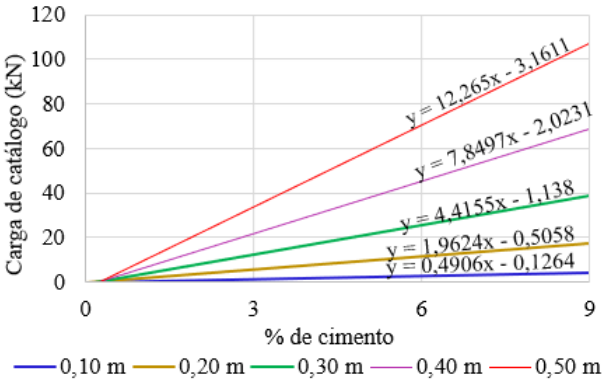

Figura 4. Carga de catálogo em função da porcentagem de cimento, para diferentes diâmetros de estacas.

Tais resultados estão de acordo com a literatura, em que Sales (1998) afirma que a resistência de misturas solo-cimento varia linearmente no intervalo de teores de 4% a 13%. Neste caso, por exemplo, com os resultados da pesquisa se poderia estimar as cargas de catálogo para estacas solo-cimento com teor de 12% (Tabela 6).

Tabela 6. Estimativa das cargas de catálogo (em kN) para estacas solo-cimento compactadas com teor de 12%.

Teor de cimento	**Diâmetro (kN)**				
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
12%	6,44	25,76	57,97	105,03	161,03

©ABMS, 2018

Outros trabalhos encontrados (FOPPA, 2005) também indicam que a resistência à compressão do solo-cimento aumenta linearmente com o teor de cimento. Este autor, em específico, estudou solos constituídos por areia fina siltosa.

Por fim, após essas análises, os resultados obtidos foram aplicados num dimensionamento de sapatas para um sobrado residencial, considerando características do solo do local de construção análogas ao local de extração do solo utilizado neste estudo.

A seguir, apenas apresentam-se detalhes para alguns pilares selecionados estrategicamente, i.e., os de maior e de menor carga e um de valor intermediário. Na Tabela 7 mostram-se os resultados de área requerida para sapatas sem nenhum tratamento no solo e, qual seria a área caso a mesma sapata fosse combinada com quatro estacas de reforço em sua base. Foram simuladas as possibilidades de estacas de 1,0 m e de 2,0 m de profundidade, para cálculo da capacidade de carga das estacas, adotando-se o menor valor entre capacidade de carga e carga de catálogo. O diâmetro adotado para este projeto em específico foi de 20 cm para as sapatas de maior dimensão e 10 cm para as de menor dimensão.

Tabela 7. Área das sapatas (em m²) em solo sem e com sistema de estacas de reforço de solo-cimento compactadas.

Profundidade das estacas 1,0 m					
Carga do pilar (kN)	Sem estacas	0%	3%	6%	9%
41	0,45	0,45	0,45	0,42	0,36
166	1,81	1,74	1,68	1,43	1,09
236	2,55	2,55	2,39	2,24	1,81
Profundidade das estacas 2,0 m					
41	0,45	0,45	0,45	0,42	0,36
166	1,81	1,74	1,68	1,31	0,71
236	2,55	2,55	2,39	2,09	1,37

Obs.: A profundidade de fundação das sapatas foi considerada 1 metro.

Da Tabela 7 observa-se que para adições de cimento de 3%, apenas houve redução na área da sapata no caso dos pilares com maior carga, e tal redução não foi representativa (chegou no máximo a 7,3%). Os resultados passam a ser mais notáveis diante da adição de 6% de cimento, em que se atingiu redução na área da sapata de cerca de 27% para o caso da estaca de 2,0 m no pilar de 166 kN. No entanto os melhores resultados foram obtidos para o maior teor aplicado (9%), conforme de fato esperava-se, devido à sua maior resistência. Para este último caso, a redução na área das sapatas variou de 20 a 40% para estacas de 1,0 m, chegando a 60% nas estacas de 2,0 m.

Tais observações sugerem a viabilidade técnica da aplicação deste sistema, uma vez que para diversos dos pilares (incluindo resultados não evidenciados na Tabela 7), atingiu-se dimensões mínimas permissíveis para aplicação em sapatas, de 0,60 m. Tal feito, melhora o procedimento de execução das sapatas e evita problemáticas de sapatas sendo executadas muito próximas, o que não é desejável, por exemplo.

3.3 Viabilidade econômica

Para confirmar se realmente seria viável aplicar tal solução em projetos de fundações em solos residuais moles, foram estimados os custos de fundações sem o sistema de reforço, e com o reforço nos diferentes teores de cimento estudados. Aplicando as premissas apresentadas na metodologia, obteve-se como custo total da fundação do sobrado residencial analisado, o valor de R$ 8701,50, para caso convencional, sem tratamento do solo e com profundidade de fundação de um metro.

Na Tabela 8 são apresentados os custos para execução da fundação com as estacas compactadas, nos diferentes teores de cimento estudados. Assim, nota-se que apenas para teores de adição de cimento acima de 6%, o sistema é viável do ponto de vista econômico. Para estacas solo-cimento de teores de até 3% a economia máxima foi de 4%. Os melhores resultados de economia foram obtidos também para o teor de 9% de cimento, sendo a redução nos custos de 30%, o que aponta para a

©ABMS, 2018

viabilidade econômica do sistema, associada à viabilidade técnica.

Tabela 8. Custos (materiais mais execução) da fundação com emprego das estacas compactadas de solo-cimento.

Profundidade das estacas 1,0 m			
0%	3%	6%	9%
R$ 8548,01	R$ 8422,64	R$ 7829,36	R$ 6209,42
Profundidade das estacas 2,0 m			
R$ 8530,42	R$ 8404,64	R$ 7811,74	R$ 6191,78

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o desenvolvimento deste trabalho, propôs-se uma alternativa de tratamento para solos residuais moles que possibilita a utilização de fundações rasas (sapatas), pela execução de estacas de solo-cimento compactadas na base das sapatas. Tal alternativa apresentou viabilidade técnica e econômica. A partir dos resultados obtidos, foi possível levantar as seguintes observações:

- O teor de cimento é diretamente proporcional ao ganho de resistência no solo, sendo que foi possível obter um aumento de até dezesseis vezes em relação ao solo sem cimento (apenas compactado).
- O acréscimo de cimento, verificado em esta pesquisa até 9%, torna os solos mais rígidos (maior módulo de elasticidade para os CPs com maiores teores de cimento), o que corrobora com os resultados de resistência.
- Os resultados de caracterização, como teor de umidade ótimo, índice de vazios e massa específica (natural e seca) estão em conformidade com a literatura, em que devido, possivelmente, ao fenômeno de floculação diante da adição de cimento ao solo, a umidade ótima e o índice de vazios aumentam, enquanto a massa específica diminui.
- Na análise de viabilidade técnica observou-se que a utilização de estacas de solo compactado sem cimento e também com teor de 3% de cimento não seriam apreciáveis, pois resultaram em redução máxima de 6% nas dimensões das sapatas. Por outro lado, estacas de solo cimento com teor de 6% proporcionariam uma redução de até 27% na área das sapatas, enquanto que as de teor 9% de cimento podem diminuir a área das sapatas em até 54%.
- Em relação à análise de viabilidade econômica, a diminuição nos custos com as sapatas torna-se significativa utilizando teores de cimento a partir de 6% (economia de 10%), sendo que é possível chegar à 30% de economia nos projetos de fundações em sapatas adotando estacas de solo-cimento com teor de 9%.

Ressalta-se que este trabalho apresenta um panorama geral do sistema proposto e, para sua real aplicação, seriam necessárias análises mais aprofundadas, como por exemplo, ensaios de prova de carga, recalques, influência do nível freático, entre outros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à colaboração do Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu (LTCI), pelo espaço cedido para realização dos experimentos.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2012). 12253: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento. Rio de Janeiro.

—. (2010). 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro.

—. (2016). 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

—. (2016). 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

—. (2001). 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro.

—. (2016). 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro : s.n., 2016.

—. 2016. 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2015). E1876-15: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear

©ABMS, 2018

Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration . Pensilvânia.

BLIGHT, G. E. e LEONG, E. C. (2012). *Mechanics of Residual Soils.* Londres : CRC Press - Taylor & Francis Group.

BOSZCZOWSKI, R. B. e LIGOCKI, L. P. (2012). Características Geotécnicas dos Solos Residuais de Curitiba e RMC. *Twin Cities: Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba.* São Paulo : NRSP - ABMS.

CASAGRANDE, M.D.T. (2001). Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficias. Porto Alegre : UFRGS.

CINTRA, J. C. A. e AOKI, N. (2010). Fundações por estacas: projeto geotécnico. São Paulo : Oficina de textos.

CONCIANI, W., BURGOS, P. C. e BEZERRA, R. L. (2015). Origem e formação dos solos, perfis de intemperismo. In: J. C. CARVALHO , et al. *Solos não saturados no contexto geotécnico.* São Paulo : Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS).

CUNDA, A.V. (2009) Otimização de custos em projetos de fundações do tipo sapata em função das propriedades dos solos. UFRGS.

DÉCOURT, L. (1998). Análise e Projeto de Fundações Profundas: Estacas. [A. do livro] W. HACHICH, et al. *Fundações: Teoria e Prática.* São Paulo : PINI.

DSOARES (2015). Relatório Tecnico de Sondagens – UNILA. 20-11-2015. Controle SO-07815. Foz do Iguaçu.

FARO, V.P. (2014) Carregamento Lateral em Fundações Profundas Associadas a Solos Tratado: Concepção, Provas de Carga e Diretrizes de Projeto. UFRGS.

FÉLIX, M. (2012). Melhoramento do solo com colunas de brita. [Online] 2012. [Citado em: 7 de Maio de 2018.] http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/187/melhoramento-do-solo-com-colunas-de-brita-286953-1.aspx.

FOPPA, D. (2005). *Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144 p.

KOLLING, E. M.; TROGELLO, E.; MODOLO, A. J. (2012). Avaliação da resistência mecânica de diferentes traços de solo-cimento estabilizados com areia. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, vol. 7, n. 3, p. 185-191. ISSN 1809-8797.

SALES, L.F.P. (1998). Estudo do Comportamento de Fundações Superficiais Assentes em Solos Tratados. Porto Alegre : UFRGS.

SILVA, N. G. e CAMPITELI, V. C. (2008). Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. Porto Alegre : *Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. vol. 8, n. 4, p. 21-35. ISSN 1678-8621.

SUWIDAN, R. (2012). Determinação dos parâmetros de compressibilidade em amostras de solo mole reforçadas com a incorporação de colunas de areia. Curitiba : UTFPR.

VELLOSO, D. e LOPES, F. R. (1998). Concepção de Obras de Fundações. In: W. HACHICH, et al. *Fundações: Teoria e Prática.* São Paulo : PINI.

VENDRUSCOLO, M.A. (1996). *Análise Numérica e Experimental do Comportamento de Fundações Superficiais em Solo Melhorado.* Porto Alegre : (Dissertação de Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.