

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/348

Provas de Carga em Placa com e sem Reforço de Geogrelha em Solo com Formação Barreiras em Macaé/R.J.

Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Professor, Instituto Politécnico/UFRJ, Macaé, Brasil, guimaraes@macae.ufrj.br

Lucas Marques Pires da Silva

Engenheiro, Benthic, Rio de Janeiro, Brasil, lucas.silva@coc.ufrj.br

Douglas Magno de Mendonça

Engenheiro, Consultor, Macaé, Brasil, douglasmagnom@gmail.com

RESUMO: A pesquisa avalia o ganho de capacidade de carga de uma fundação superficial assentada em solo da formação Barreiras. Através de três provas de carga em placa realizadas em Macaé/Rio de Janeiro, avaliou-se a capacidade de carga do solo natural sem reforço, do solo sem reforço com uma pequena camada de solo compactado e do solo reforçado com geogrelha de polietileno sob uma pequena camada de solo compactado. A curva carga vertical de compressão versus recalque foi analisada nas provas de carga e parâmetros tradicionais para avaliar o ganho de capacidade de carga com reforço também foram analisados. Os resultados mostraram que foi possível melhorar o comportamento da curva carga vs recalque, além de atenuar os recalques com a inclusão do reforço com geogrelha.

PALAVRAS-CHAVE: Provas de Carga, Placas, Reforço, Geogrelha, Formação Barreiras.

ABSTRACT: The research evaluates the load capacity of a shallow foundation in tropical soils. Three Plate load tests were carried out in Macaé/Rio de Janeiro: (i) load test in an unreinforced natural soil; (ii) load test in an unreinforced soil with a small layer of compacted soil; and (iii) load test in a soil reinforced with a polyethylene geogrid under a small layer of compacted soil. The vertical compression load curve versus settlement was analyzed in the load tests. The results showed that it was possible to gain load capacity and reduce settlements with the geogrid reinforcement.

KEYWORDS: Load Tests, Plates, Reinforcement, Geogrid, Tropical Soils.

1 INTRODUÇÃO

Entre as inovadoras soluções geotécnicas utilizadas para contornar limitações do solo, se encontra o uso de geossintéticos. A utilização deste material propicia soluções rápidas, leves, esbeltas, confiáveis e econômicas. Mesmo se mostrando uma alternativa viável, o uso de geossintéticos como reforço de fundações diretas não é prática comum no Brasil. Isto ocorre, provavelmente, pela falta de experiência prática e de casos históricos na região. Visando ampliar este conceito, o objetivo principal deste trabalho é avaliar o ganho de capacidade de carga de uma fundação superficial executada em solo de formação barreira, na umidade natural, na cidade de Macaé, no estado do Rio de Janeiro. Assim, no total, foram realizadas três provas de carga: uma em solo natural; uma em solo compactado e uma em solo compactado com reforço de geogrelha.

2 EFICIÊNCIA DA APLICAÇÃO DO REFORÇO

Segundo Fabrin (1999), os precursores na pesquisa de ganho de capacidade de carga do solo pelo uso de reforço foram Binquet e Lee (1975a, 1975b), seguidos por Akinmusuru e Akinbolade (1981). Em ambos os trabalhos, os autores analisaram a influência de diferentes variáveis, tais como: número de camadas de reforço; espaçamento entre as camadas de reforço e a rigidez do solo.

A proporção de melhora da capacidade de carga de solos com a aplicação de reforço pode ser expressa de forma não dimensional como uma taxa de capacidade de carga, que é por definição a razão da capacidade

de carga de um solo reforçado para o mesmo solo sem ser reforçado. Essa taxa de capacidade de carga é denominada em inglês de “Bearing Capacity Ratio – BCR”.

O valor de BCR é específico para cada conjunto de fundação, tipo de solo e geossintético utilizado como reforço. A magnitude do valor BCR depende de parâmetros que levam em consideração o comprimento da camada de reforço, a distância entre as camadas de reforço, a distância da cota de assentamento e a primeira camada de reforço, a distância até a última camada de reforço e o menor lado da fundação retangular.

A figura 1 mostra uma fundação rígida de lado transversal B com carregamento distribuído e os parâmetros considerados nas análises.

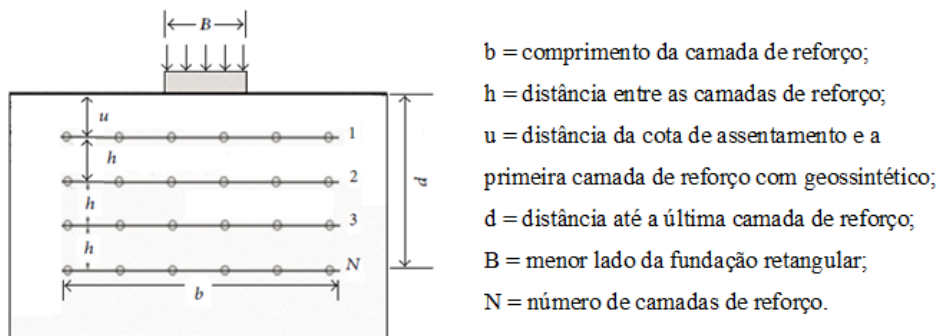


Figura 1. Fundação retangular assente em solo reforçado com geossintético.

Para ajudar a expressar e comparar resultados do ganho de capacidade de carga do solo, utiliza-se de outros parâmetros além do BCR.

A taxa de redução de recalque (Settlement reduction ratio – SRR) por definição é a porcentagem de redução do recalque do solo reforçado em relação ao solo não reforçado para uma determinada carga aplicada e é calculado pela equação 1.

$$SRR = \frac{s_0 - s_r}{s_0} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

S_0 = recalque do solo não reforçado;

S_r = recalque do solo reforçado.

O fator de melhora (Improvement Factor – IF) é definido como a razão da tensão aplicada a um solo reforçado em relação a tensão aplicada a um solo não reforçado. Por definição os IF's são calculados para os valores de recalques normalizados (s/B) pré-determinados: 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Vale destacar que os recalques são normalizados em relação ao menor lado da fundação (B).

De uma forma geral os estudos conduzidos por Binquet e Lee (1975a, 1975b) e Akinmusuru e Akinbolade (1981) demonstraram um aumento da capacidade de carga última do solo reforçado de duas a quatro vezes a capacidade de carga do solo sem reforço.

3 CAMPO EXPERIMENTAL

O campo experimental está localizado no terreno da cidade universitária em Macaé, no estado do Rio de Janeiro. O solo do local foi classificado por como formação Barreiras por Brêda (2012).

Diversos ensaios de caracterização e sondagens a percussão já foram realizadas no local. Silva (2019) apresenta resultados de ensaios de adensamento, cisalhamento direto, sondagens a percussão e peso específico natural (Hilf). A umidade natural do solo para os ensaios realizados era de 20%. A tabela 1 apresenta um resumo dos resultados destes ensaios realizados na superfície, perto do local de realização das provas de carga.

Tabela 1. Características do solo no local das provas de carga (adaptado de Silva, 2019).

| N_{SPT} | Classe do solo | c_v (cm/s ²) | c (kPa) | ϕ | γ_{nat} (kN/m ³) |
|-----------|----------------|----------------------------|---------|--------|-------------------------------------|
| 19 golpes | Silte-Argiloso | $7,352 \times 10^4$ | 78 | 27° | 18 |

A figura 2 mostra o mapa da distribuição de Formação Barreiras na zona de estudo, além de uma das amostras indeformadas do solo no local de realização das provas de carga.

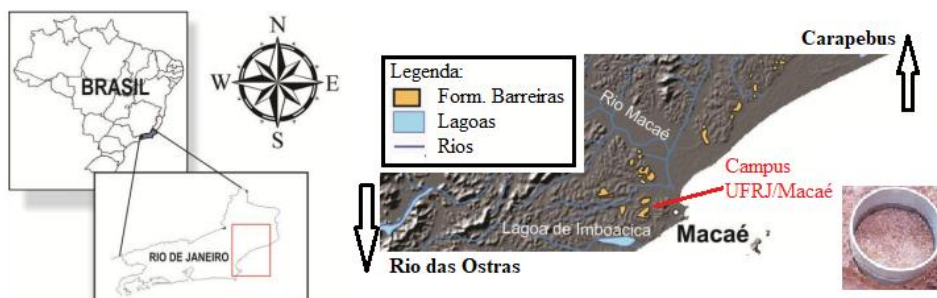


Figura 2. Localização das Formações Barreira identificadas por Brêda (2012) na região de Macaé.

O valor da sucção é muito importante em solos tropicais não saturados para a obtenção da resistência ao cisalhamento. Leitão et al (2020) obteve a curva característica para o solo de Formação Barreiras daquela região através da técnica do papel filtro. Para a umidade do solo em questão, de acordo com a curva característica, pode-se aferir que a sucção na superfície estaria em torno de 100 kPa.

4 PROVAS DE CARGA

4.1 Placa, Geogrelha e Sistema de Reação

Para alcançar grandes tensões durante o ensaio, optou-se por utilizar uma placa retangular de pequenas dimensões, com 15 cm por 8 cm. A placa de aço utilizada possuía 2 cm de espessura, conferindo rigidez suficiente para que funcione como um corpo rígido. Já a geogrelha utilizada foi de polietileno, sendo suas dimensões de 60 cm (4B) por 40 cm (5B) e a malha com abertura de 4 cm por 2,5 cm. Algumas pesquisas (e.g.: Guido et al., 1986; Omar et al., 1993b; Latha and Somwanshi, 2009a) relatam que o comprimento efetivo da geogrelha, utilizada como reforço em uma fundação direta, pode variar de 2B a 8B. Destaca-se que, de acordo com Abu-Farsakh et al. (2013), as dimensões da geogrelha utilizada como reforço em uma fundação direta, para alcançar a capacidade máxima de carga, deve estar entre a faixa de 3B a 6B.

O sistema de reação foi um caminhão bate-estacas que estava disponível na região. Cabe destacar que o mesmo caminhão já havia sido utilizado em outras provas de carga (Silva, 2019) e a carga máxima atingida, na ocasião, foi de 35 kN. A figura 3 apresenta um detalhe da placa, geogrelha e do caminhão utilizado como reação às provas de carga.



Figura 3. Placa metálica rígida, geogrelha e sistema de reação utilizados nas provas de carga.

4.2 Montagem e Execução das Provas de Carga

As provas de carga foram realizadas praticamente na superfície do terreno. Uma retroescavadeira foi utilizada para remover uma pequena espessura de solo ao longo do comprimento do caminhão para que as provas de carga fossem realizadas em solo natural. Posteriormente, com auxílio de ferramentas manuais, as

cavas para instalação da placa a ser ensaiada foram realizadas. A figura 4 apresenta a sequência e equipamentos para a execução das cavas para realização das provas de carga.



Figura 4. Sequência de execução das cavas para assentamento da placa nas provas de carga.

Em ambas as provas de carga foram utilizados um macaco hidráulico com carga máxima de 98 kN e curso de 16,3 cm. O anel dinamométrico possuía capacidade máxima de 49 kN. Já o sistema de medida de deslocamentos foi constituído de dois extensômetros mecânicos (curso de 30 mm e precisão de 0,01 mm), bases magnéticas e um sistema isolado de referência (viga em madeira).

Devido ao comportamento drenado e ao elevado valor do coeficiente de compressão uniaxial (c_v) do solo optou-se por realizar o avanço dos estágios de carregamento das provas de carga com os seguintes critérios: (i) término da leitura dos dois extensômetros e da célula de carga; (ii) tempo mínimo para avanço entre estágios de 2 minutos. Desta forma, foram realizados 15 estágios de carregamento da ordem de 1,48 kN cada. Ao final do último estágio foram realizadas 5 medidas de deslocamentos com intervalos de 2 minutos entre elas. A medida que havia algum descarregamento no sistema, a carga era repostada acionando a alavanca do macaco hidráulico. O descarregamento das provas de carga tiveram entre 6 e 10 estágios com cargas variando entre 0,5 kN e 4 kN.

Alguns detalhes importantes merecem destaques durante a preparação das provas de carga que não foram realizadas diretamente no solo natural, ou seja, na prova de carga com uma camada de solo compactado e na prova de carga com o reforço de geogrelha. Nestas duas provas de carga foi necessário preparar uma camada de solo compactado, sobre o solo natural, para fins de comparação entre os resultados das três provas de carga desta pesquisa.

A camada de solo compactado foi executada com 3 subcamadas de igual espessura, cerca de 1,7 cm, em uma região de 60 cm vs 40 cm e compactadas com um cilindro de concreto (20 x 10 cm) de massa igual a 3,51 kg. Este cilindro foi passado, somente com seu peso próprio, 10 vezes em cada ponto na região. Destaca-se que o solo utilizado na camada compactada foi o mesmo solo escavado inicialmente pela retroescavadeira. Assim, o “grau de reconstituição¹ do solo” foi da ordem de 95%.

A figura 5 apresenta o cilindro de concreto utilizado para compactar as subcamadas de solo, a geogrelha utilizada e a montagem final de uma das provas de carga, com a placa, macaco hidráulico, anel dinamométrico e extensômetros.



Figura 5. Detalhes da montagem das provas de carga.

¹ O “grau de reconstituição do solo” representa a razão entre o peso específico natural compactado teórico e o peso específico natural medido (Hilf).

A figura 6 apresenta o aspecto dos locais onde as três provas de carga foram realizadas. É possível observar claramente a marca deixada pela placa metálica ao final de cada uma das provas de carga. Naturalmente, esta cavidade está associada aos deslocamentos (recalques) sofridos pela placa. Destaque importante para a geogrelha instalada em uma das provas de carga.



Figura 6. Cavidades (recalques) finais após realização das três provas de carga.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Desempenho

A primeira comparação a ser apresentada na figura 7 é a curva carga versus recalque de cada uma das três provas de carga: (i) solo natural – prova de carga 1; (ii) solo compactado – prova de carga 2; e (iii) solo compactado com geogrelha – prova de carga 3.

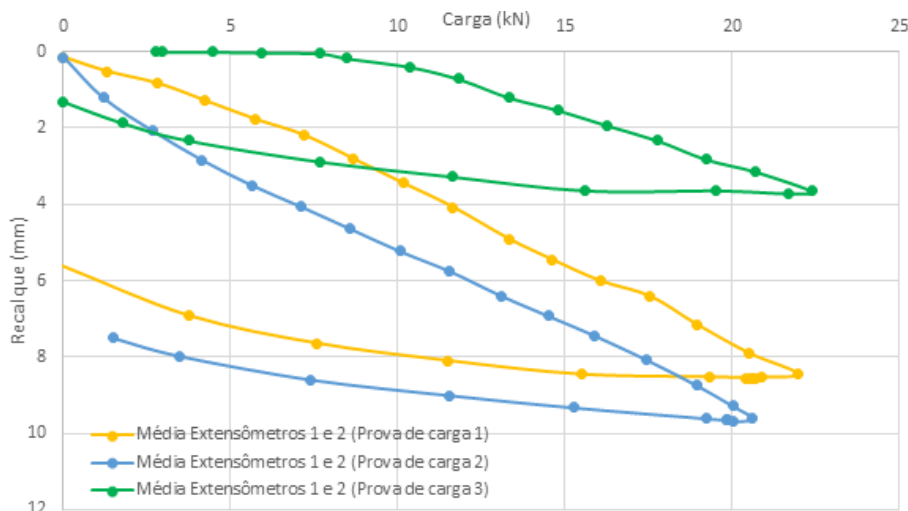


Figura 7. Comparação entre as três provas de carga.

Observa-se, ao longo das fases de carregamento dos ensaios, que as curvas das provas de carga sem geogrelha (1 e 2) não apresentam uma mudança brusca de comportamento, já a curva da prova de carga 3, a única com geogrelha, apresenta uma mudança brusca de comportamento quando a carga é da ordem de 7,7 kN.

As cargas máximas atingidas nas três provas de carga foram semelhantes, pois em todos os casos a capacidade de carga do sistema de reação (caminhão) foi esgotada e as provas de carga tiveram que ser descarregadas. Importante ressaltar que ao final das três provas de carga as tensões na placa foram superiores a 1700 kPa.

Os deslocamentos máximos das provas de carga sem geogrelha foram bem maiores que o deslocamento máximo da prova de carga com geogrelha. O deslocamento máximo da prova de carga com geogrelha (prova de carga 3) foi 2,3 vezes menor que o deslocamento máximo da prova de carga realizada no solo natural (prova de carga 1). Já em comparação com a prova de carga realizada somente com a compactação do solo (prova de carga 2), a prova de carga com a geogrelha teve um deslocamento máximo de cerca de 2,6 vezes menor.

Os deslocamentos residuais seguiram a mesma tendência anterior. Assim, o deslocamento residual da prova de carga com geogrelha foi cerca de 4,3 vezes menor que o da prova de carga com solo natural. Já para a prova de carga com solo compactado, infelizmente, não foi possível medir o deslocamento residual ao término de descarregamento. Porém como o comportamento anterior ao final do descarregamento está muito bem definido, através de um ajuste polinomial é possível estimar que o deslocamento residual seria da ordem de 7 mm. Assim, o deslocamento da prova de carga com geogrelha seria cerca de 5,4 vezes menor que o da prova de carga com solo compactado.

5.2 Fatores de Ganho de Capacidade de Carga

5.2.1 Índice de Capacidade de Carga (BCR)

Por definição, a capacidade de carga está associada a uma carga de ruptura. Assim para a utilização do BCR seria necessário saber as cargas de ruptura das provas de carga. No presente trabalho, não foi possível identificar as capacidades de carga referentes as rupturas nas curvas carga vs recalque. Assim uma adaptação foi necessária. Para a aplicação do conceito de BCR, foram estipulados recalques de referência e, logo, as cargas associadas a estes recalques foram comparadas para as provas de carga realizadas. Chamou-se esse procedimento de “BCR adaptado”. Aleatoriamente, os valores de recalques de referência para as comparações do “BCR adaptado” foram: 0,5 mm; 1 mm; 2 mm; 2,82 mm e 3 mm.

A figura 8 apresenta, para os recalques de referência, as comparações entre os seguintes “BCR’s adaptados”: solo reforçado com geogrelha e solo natural; solo reforçado com geogrelha e solo compactado; solo compactado e solo natural.

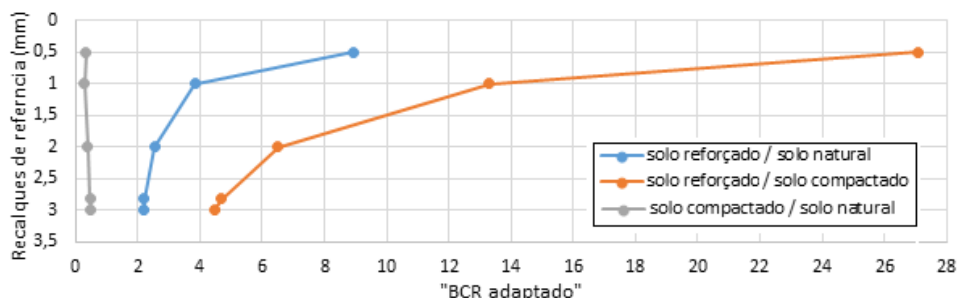


Figura 8. “BCR adaptado” para os recalques de referência nas três provas de carga.

É possível afirmar que nas comparações do “BCR adaptado” entre o solo reforçado com geogrelha e o solo natural e entre o solo reforçado com geogrelha e o solo compactado houve um aumento da carga suportada pela placa com a geogrelha para todos os recalques de referência verificados. Ressalta-se que a comparação para os casos da placa em solo reforçado com geogrelha e o solo compactado forneceram “BCR’s adaptados” superiores aos encontrados para os casos da placa em solo reforçado com geogrelha e o solo natural. Já por outro lado na comparação realizada entre o solo compactado e o solo natural esse comportamento foi o oposto, ou seja, todos os “BCR’s adaptados” menores que 1, mostrando que o solo compactado possui uma maior deformabilidade que o solo natural.

Os valores dos “BCR’s adaptados”, para os casos onde foram instaladas a geogrelha, são maiores quanto menores são os recalques de referência. Nota-se também, que nestes dois casos, os valores de “BCR’s adaptados” tendem para valores fixos a medida que os recalques de referência vão aumentando. Para o solo reforçado e o solo natural o “BCR adaptado” tende para 2 e para o solo reforçado e o solo compactado o “BCR adaptado” tende para 4.

5.2.2 Índice de Redução de Recalque (SSR)

Para utilizar o parâmetro SSR para avaliar a eficiência da utilização da geogrelha basta estipular valores de cargas de referência e comparar os valores dos recalques associados as situações diversas.

No presente trabalho, as hipóteses possíveis foram: solo reforçado com geogrelha e solo natural; solo reforçado com geogrelha e solo compactado; solo natural e solo compactado.

Assim, para a aplicação do conceito de SRR, foram estipuladas, aleatoriamente, cargas de referência entre 2 kN e 18 kN (intervalos de 2 kN) e, logo, os recalques associados a estes carregamentos foram comparados para as provas de carga realizadas. Chamou-se esse procedimento de “SRR adaptado”. A figura 9 apresenta as comparações entre as hipóteses dos possíveis “SRR’s adaptados”.

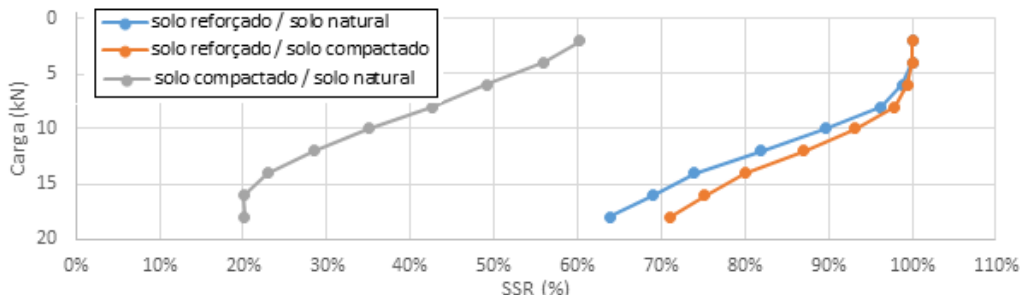


Figura 9. “SRR adaptado” para as cargas de referência nas três provas de carga.

Para os casos do solo reforçado com geogrelha e o solo compactado e entre o solo reforçado com geogrelha e o solo natural a redução dos recalques foi mais eficiente, principalmente, devido ao bom desempenho da utilização da geogrelha.

Para todas as hipóteses a redução dos recalques foi maior para as menores cargas. No caso das hipóteses com a utilização da geogrelha, para cargas de referência de até 4 kN, a redução de recalque teve sua eficiência máxima. Para cargas entre 4 kN e 10 kN a eficiência da redução de recalques variou entre 100% e 90%.

5.2.3 S Fator de Melhora do Solo (IF)

Devido aos baixos valores de recalques atingidos nas três provas de carga, não foi possível calcular os IF’s para os recalques normalizados de referência (s/B): 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Assim, para a comparação foram estipulados outros valores de recalques normalizados de referência adaptados: 1%, 2%, 3% e 4%. Chamou-se esse procedimento de “IF adaptado”. A figura 10 apresenta as comparações entre os “IF’s adaptados” para três hipóteses possíveis.

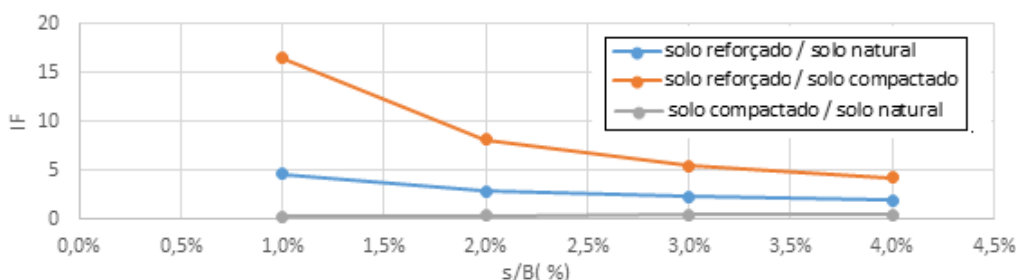


Figura 10. “IF adaptado” para os recalques normalizados de referência adaptados nas três provas de carga.

É possível afirmar que nas comparações do “IF adaptado” entre o solo reforçado e o solo natural e entre o solo reforçado e o solo compactado houve um aumento da carga suportada pela placa com a geogrelha para todos os recalques normalizados verificados, sendo na comparação para os casos da placa em solo reforçado e o solo compactado superiores aos encontrados para os casos do solo reforçado com geogrelha e o solo natural. Já por outro lado na comparação realizada entre o solo compactado e o solo natural o comportamento foi oposto, reforçando que o solo compactado possui uma maior deformabilidade que o solo natural.

Os valores dos “IF’s adaptados”, para os casos onde foram instaladas as geogrelhas, são maiores quanto menores são os recalques normalizados de referência. Nota-se também, que nestes dois casos, os valores de “IF’s adaptados” tendem para valores fixos a medida que os recalques normalizados de referência adaptados vão aumentando. Para o solo reforçado e o solo natural o “IF adaptado” tende para 2 e para o solo reforçado e o solo compactado o “IF adaptado” tende para 4.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Três provas de carga em placa metálica em um campo experimental de solo da formação Barreiras, na cidade de Macaé/R.J, foram executadas e analisadas. A placa ensaiada, considerada como um corpo rígido, possuía 8 cm de base, 15 cm de comprimento e 2 cm de espessura. Em uma das provas de carga utilizou-se um reforço com geogrelha de 40cm vs 60cm.

O N_{SPT} na região influenciada pela placa durante as provas de carga foi de 19 golpes. O intercepto de coesão e ângulo de atrito do solo, na umidade natural (20%), foram da ordem de 78 kPa e 27° , respectivamente. Para aquela umidade a sucção é de 100 kPa. O peso específico natural medido (Hilf) de 18 kN/m^3 .

As provas de carga foram executadas em locais próximos uns aos outros e com as seguintes configurações simplificadas: (i) solo natural - Prova de Carga 1; (ii) solo compactado - Prova de Carga 2 e (iii) solo compactado com reforço de geogrelha - Prova de Carga 3. Destaca-se que o “grau de reconstituição do solo” na compactação alcançou 95% do peso específico natural medido.

Devido a limitação da capacidade de suporte do sistema de reação, não foi possível observar a formação de um patamar típico de ruptura do solo a partir das curvas carga versus recalque, nas três provas de carga.

A prova de carga 2, solo compactado, apresentou o pior desempenho em termos de recalque, seguida pela prova de carga 1, em solo natural. A prova de carga 3, com reforço de geogrelha e solo compactado mostrou um comportamento diferenciado, com uma rigidez muito elevada ao princípio do carregamento. Tal efeito pode ser explicado pela interação solo-reforço, onde as deformações no solo acontecem apenas quando a resistência ao cisalhamento dessa interface já fora toda mobilizada.

Além disso destaca-se que a inserção da geogrelha melhorou o comportamento da curva carga vs recalque (aumentando a rigidez) e reduziu seus recalques finais.

Através do BCR, SSR e IF (adaptados) foi possível observar que o desempenho da inserção da geogrelha em uma das provas de carga foi altamente positivo nos dois requisitos que todas as fundações devem atender: (i) segurança adequada com relação a ruptura e (ii) recalques compatíveis com a estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Farsakh M, Chen Q, Sharma R (2013) An experimental evaluation of the behavior of footings on geosynthetic-reinforced sand. *Soils Found* 53:335–348
- Akinmusuru, J. O.; Akinbolade, J. A. (1981) Stability of loaded footings on reinforced soil. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, vol. 107, n° 6, pp. 819-827.
- Binquet, J.; Lee, K. L. (1975a) Bearing capacity tests on reinforced earth slabs. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, vol. 101, n° 12, pp. 1241-1255.
- Binquet, J.; Lee, K. L. (1975b) Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, vol. 101, n° 12, pp. 1257-1276.
- Brêda, T. C. (2012) *Análise multiescalar da formação barreiras na área emrsa da bacia de Campos, entre Buzios e Campos dos Goytacazes (RJ)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências de Geotecnia, Universidade Federal do Rio de Janeiro / UFRJ, 144 p.
- Fabrin, T. W. (1999) O uso de geossintéticos no reforço de fundações – aplicação ao caso de tubulações enterradas. Tese de mestrado, ITA - São José dos Campos, 219 pág.
- Guido, V.A., Chang, D.K., Sweeny, M.A., 1986. Comparison of geogrid and geotextile reinforced slabs. *Canadian Geotechnical Journal* 20, 435–440
- Latha, G.M., Somwanshi, A., 2009a. Bearing Capacity of square footings on geosynthetics reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes* 27 (4), 281–294
- Leitão et al (2022) Estudo de caso do solo não saturado Campus UFRJ/Macaé, vol 1, 115673, XX COBRAMSEG
- Silva, L. M. P. (2019) Análise da interação solo-estrutura de um radier. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Politécnico, Engenharia Civil – UFRJ / Macaé, 183p.
- Omar, M.T., Das, B.M., Puri, V.K., Yen, S.C., 1993b. Ultimate bearing capacity of shallow foundations on sand with geogrid reinforcement. *Canadian Geotechnical Journal* 20 (3), 435–440