

Avaliação da capacidade de carga de terreno de fundação formado por camadas de blocos de rocha compactados

Assessment of the load-bearing capacity of foundation soil composed of layers of compacted rock blocks

Bruna Letícia da Silva Lemos¹; Silvrano Adonias Dantas Neto²; Geraldo Magela Francisco³

¹ Universidade Federal do Ceará, Campus Pici/Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza/CE, Brasil. Email: engbrunaleticia21@alu.ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9639-7107>

² Universidade Federal do Ceará, Campus Pici/Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza/CE, Brasil. Email: silvrano@ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9951-4938>

³ Associação de Poupança e Empréstimo, Gerência de Engenharia, Fortaleza/CE, Brasil. Email: geraldo.francisco@poupex.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0601-3482>

Resumo: No presente artigo é apresentada a avaliação da capacidade de carga de uma camada de blocos de rocha compactados, cujos parâmetros de resistência ao cisalhamento foram obtidos a partir do emprego do sistema de classificação geomecânica GSI, permitindo a estimativa da capacidade de carga do sistema solo-fundação pelo uso de métodos teóricos consagrados. A avaliação do comportamento do material rochoso foi feita a partir da realização de ensaio de placa. Os resultados obtidos indicaram que a hipótese da consideração da camada de blocos rochosos compactados como um maciço rochoso levou a uma capacidade de carga compatível com aquela obtida no ensaio de placa realizado. Além disto, os parâmetros geotécnicos do material resultantes da retroanálise dos resultados do ensaio de campo foram compatíveis com aqueles obtidos na aplicação do sistema GSI. Portanto, o emprego dos sistemas de classificação geomecânica apresenta-se como uma metodologia viável a ser empregada no projeto de fundações rasas assentes sobre camadas de blocos rochosos.

Palavras-chave: Capacidade de Carga; Classificação Geomecânica; Ensaio de Placa.

Abstract: This article presents an evaluation of the load-bearing capacity of a layer of compacted rock blocks, using shear strength parameters obtained through the GSI geomechanical classification system. This approach allows for estimating the load-bearing capacity of the soil-foundation system by applying established theoretical methods. The behavior of the rock material was assessed through a plate load test, and the results indicated that the assumption of treating the compacted rock block layer as a rock mass yielded a load-bearing capacity consistent with that determined from the plate load test. Furthermore, the geotechnical parameters derived from the back-analysis of field test results aligned well with those obtained via the application of the GSI system. Therefore, utilizing geomechanical classification systems is shown to be a viable methodology for designing shallow foundations on layers of rock blocks.

Keywords: Load-Bearing Capacity; Geomechanical Classification; Plate Load Test.

1. Introdução

A escolha entre fundações superficiais e profundas está diretamente relacionada à capacidade de suporte do solo em diferentes profundidades. Quando os solos em baixas profundidades apresentam uma boa capacidade de suporte, as fundações diretas tornam-se a solução mais indicada (TEIXEIRA E GODOY, 1998; SILVA, 2023). Caso contrário, faz-se necessário recorrer a fundações profundas ou à realização de melhoria nas propriedades geotécnicas dos solos constituintes das camadas mais superficiais (FREITAS, 2016; PEREIRA, 2018). No que se refere ao melhoramento dos solos, várias técnicas podem ser adotadas, podendo-se citar, a substituição do material existente por solo-cimento, solo compactado, ou outro material, de forma que o material empregado apresente melhores características mecânicas.

O solo-cimento, por exemplo, pode ser um método eficiente, pois a adição de um ligante ao solo tende a aumentar significativamente o intercepto coesivo da resistência ao cisalhamento do material. Esse efeito decorre da mistura de solo com cimento, seguida de compactação, resultando em um aumento das propriedades mecânicas (OLIVEIRA, 2011; OLIVEIRA, 2018; RICARTE, 2021). Segundo Carneiro *et al.* (2019), a compactação aprimora as propriedades geotécnicas do solo mediante a aplicação de uma energia mecânica, aumentando, consequentemente, a resistência ao cisalhamento, reduzindo as suas permeabilidade e compressibilidade. Todavia, ambos os métodos citados exigem estudos preliminares detalhados, incluindo a escolha adequada do material de jazida, ensaios de compactação e, no caso do solo-cimento, a dosagem correta da mistura, o que evidencia a dificuldade na aplicação dessas técnicas.

Uma alternativa às técnicas mencionadas anteriormente em projetos de fundação superficial consiste na substituição dos solos de menor resistência e maior deformabilidade por um material formado por camadas de blocos de rocha devidamente intertravados e compactados. Assim, acredita-se que esse método possa fornecer uma camada com elevada resistência ao cisalhamento e baixa deformabilidade, características adequadas para o assentamento de fundações rasas.

Para avaliar a capacidade de carga de solos compactados ou cimentados, podem ser realizados ensaios laboratoriais para a definição do intercepto coesivo e da parcela de atrito da sua resistência ao cisalhamento, ou a partir de resultados de ensaios de campo, podendo-se citar os ensaios SPT (Standard Penetration Test) e CPT (Cone Penetration Test) (CINTRA, AOKI E ALBIERO, 2011; VELLOSO E LOPES, 2011). Entretanto, em função da natureza e dimensões dos blocos de rocha, a determinação dos seus parâmetros de resistência ao cisalhamento por meio de ensaios de campo ou laboratório é desafiadora, pois alternativas como os ensaios SPT e CPT são inviáveis em materiais rochosos, pela condição de impenetrabilidade imposta pelo material, e os equipamentos de laboratório necessários à realização de ensaios em grande escala, são de difícil disponibilidade e muito dispendiosos. Devido à ausência de métodos estabelecidos para determinar a capacidade de carga de terrenos formados por camadas de blocos de rocha compactados, pode-se assumir que tal material, sendo formado por uma combinação de blocos de rocha e concreto ciclópico, assemelha-se a um maciço rochoso altamente fraturado. Segundo Hoek e Marinos (2000), um maciço desse tipo apresenta um grande número de famílias de descontinuidades aleatoriamente distribuídas, com presença de preenchimento compacto e com fragmentos angulares. Nestas condições, os parâmetros de resistência ao cisalhamento e as propriedades de deformabilidade dos materiais podem ser estimadas a partir da aplicação dos conceitos dos sistemas de classificação geomecânica existentes na área de Mecânica das Rochas, podendo-se citar, por exemplo o Sistema GSI (Geologic Strength Index) proposto por Hoek *et al.* (2002), e do conhecimento das propriedades da rocha intacta constituinte do material.

Assim sendo, no presente trabalho é apresentada a avaliação da capacidade de carga de uma camada de blocos de rocha compactados, cujos parâmetros de resistência ao cisalhamento foram obtidos a partir do emprego do sistema de classificação geomecânica GSI, permitindo a estimativa da capacidade de carga do sistema solo-fundação pelo uso de métodos teóricos consagrados. A avaliação do comportamento do material rochoso foi feita a partir da realização de ensaio de placa e de uma retroanálise numérica dos seus resultados, visando à validação da metodologia empregada para estimativa da capacidade de carga do sistema solo-fundação do terreno formado por blocos de rocha compactados.

2. Materiais e métodos

2.1 Descrição do terreno

O estudo foi conduzido no Residencial Brisas do Parque, na Rua Professor Jacinto Botelho, Quadra 15, Lotes 1 a 12, no Bairro Guararapes, em Fortaleza – Ceará. A caracterização do terreno foi feita a partir da realização de duas sondagens (SM) entre outubro e novembro de 2023. Os procedimentos foram realizados de acordo com as recomendações da norma NBR 6484 (ABNT, 2020).

Os resultados estão apresentados em perfis geológicos-geotécnicos, evidenciando a estratificação do terreno, conforme as sondagens SM-01 e SM-03. A Figura 1 mostra a estratigrafia do terreno obtida a partir dos resultados das sondagens realizadas, destacando as três camadas identificadas: argila silto-arenosa com consistência mole, argila silto-arenosa com consistência dura, e arenito conglomerático.

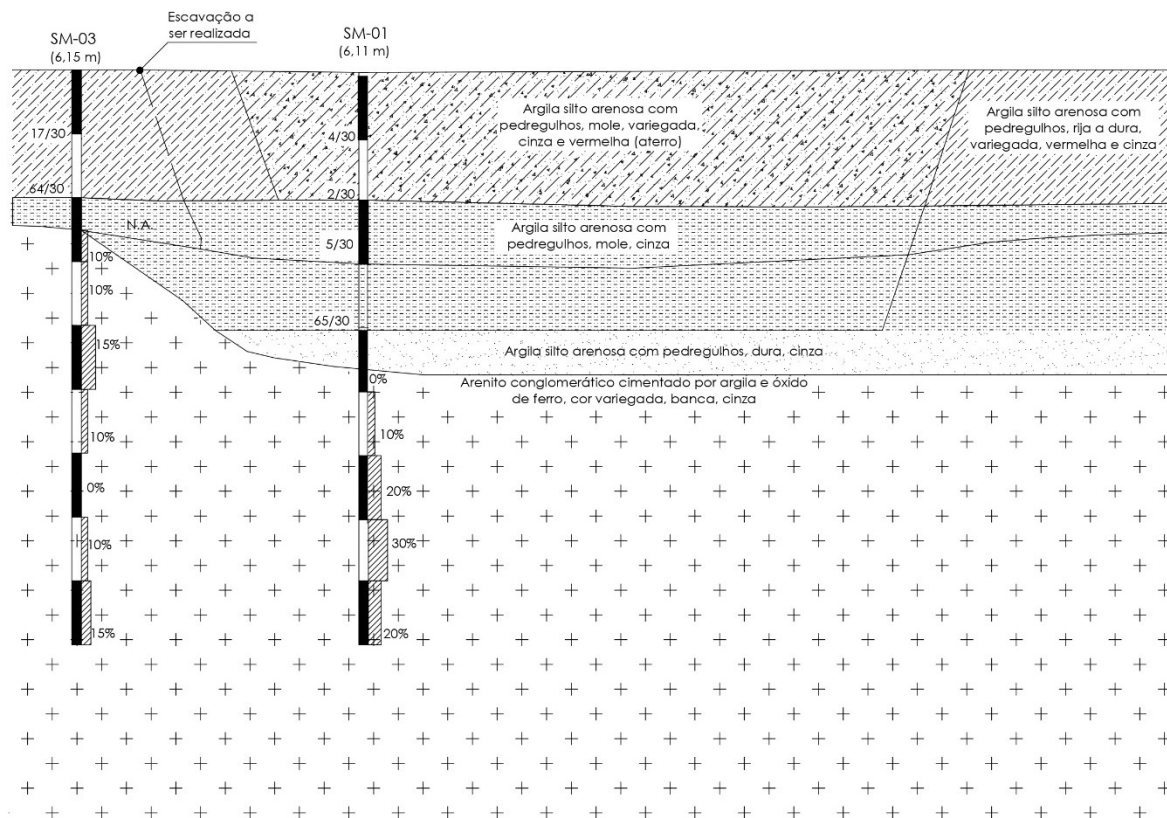


Figura 1 – Perfil do terreno na área de desenvolvimento do estudo.

Fonte: Autores (2024).

Com base nos resultados das sondagens, verificou-se que a tensão admissível de 500 kPa, prevista em projeto, não foi alcançada na cota de assentamento de 4,04 m. A tensão admissível obtida, de acordo com Décourt (1992), foi de apenas 50 kPa, em razão da presença de uma camada de argila silto-arenosa com pedregulhos, de consistência mole, localizada entre as cotas de 4,11 m e 2,11 m.

Assim sendo, foi considerada a possibilidade da melhoria do terreno de fundação, pela remoção da camada de argila silto-arenosa e posterior recomposição com uma mistura compactada formada por aproximadamente 75 % de pedra rachão – com dimensões entre 76 mm e 250 mm – 25% de concreto ciclópico. Pretende-se, com esta mistura, a obtenção de um material com grande parcela de resistência ao atrito pelo intertravamento dos blocos de rocha granítica, e elevada coesão, dada pela presença do cimento Portland constituinte do concreto. Com isso, espera-se um material que garanta a tensão admissível esperada para o terreno de fundação.

2.2 Previsão das propriedades da camada rochosa

Devido à impossibilidade da realização de ensaios de laboratório e de campo para mistura de blocos de rocha e concreto, as suas propriedades de resistência ao cisalhamento foram estimadas por meio da aplicação dos conceitos dos sistemas de classificação geomecânica oriundos da área de Mecânica das Rochas, considerando-se a mistura formada como sendo representativa de um maciço rochoso muito faturado. Neste caso, a presença das partículas de pedra rachão representa a analogia a um padrão de fraturamento formado por um grande número de descontinuidades aleatoriamente

distribuídas, e a presença do concreto, confere ao material a coesão análoga àquela existente nos maciços rochosos conferida pelas forças de atração entre os minerais da rocha.

No presente estudo, foi utilizado o sistema de classificação geomecânica proposto por Hoek *et al.* (2002), conhecido como sistema GSI. A partir desta metodologia, foram previstos os valores para o Índice de Resistência Geológica (GSI), em função do padrão de fraturamento do material e da qualidade das descontinuidades entre os blocos de rocha, a resistência à compressão simples (σ_c) e a constante da rocha intacta (m_i) constituinte das partículas de pedra rachão, e o fator de perturbação (D). Com a definição desses parâmetros para a mistura compactada, realiza-se a estimativa dos parâmetros coesivos e de atrito da resistência ao cisalhamento do material, os quais são utilizados para se determinar a capacidade de carga de fundações em maciços rochosos, utilizando-se de abordagens teóricas, como as de Brinch-Hansen (1961), Meyerhof (1963) e Vésic (1975).

A NBR 6122 (ABNT, 2020) permite estimar a capacidade de carga de fundações com métodos teóricos proporcionando uma análise fundamentada das condições do solo e nas características da fundação, como geometria e cota de assentamento. Para este estudo foi feita a estimativa da capacidade de carga do sistema solo-fundação, considerado a partir do assentamento da placa circular de 45 cm sobre a camada de blocos de rocha compactados.

2.3 A Prova de carga direta

O ensaio de carga sobre placa, realizado conforme a NBR 6489 (ABNT, 2019), permite a definição da curva pressão-recalque do terreno, simulando as ações transmitidas pelos elementos de fundações diretas, como as sapatas isoladas. Emprega-se uma placa circular de aço, com diâmetro mínimo de 30 cm, instalada no nível da base da sapata. O ensaio prossegue até que a pressão aplicada atinja o dobro da tensão admissível para o terreno ou até que o deslocamento máximo especificado. O tipo de carregamento pode variar conforme a finalidade e o projeto de fundação, podendo ser rápido, lento, cíclico ou misto (MONTEIRO *et al.*, 2017; ALBURQUERQUE E SILVA, 2023).

No presente estudo, a avaliação do comportamento da camada de blocos de rocha compactados *in situ* foi feita por meio da realização de um ensaio de carga sobre placa com carregamento lento, seguindo as especificações da NBR 6489 (ABNT, 2019). os recalques foram obtidos com a média dos valores medidos por extensômetro acoplados a uma placa de 1.590,43 cm² (diâmetro de 45 cm). A Figura 2 mostra placa utilizada no ensaio com a disposição dos deflectômetros utilizados para a medição dos recalques.



Figura 2 – A placa circular metálica usada no ensaio de carga.

Fonte: Autores (2024).

As cargas foram aplicadas por meio de um macaco hidráulico com capacidade de 50 tf, utilizando uma retroescavadeira Doosan DX225LCA, com massa de aproximada de 21500 kg, como sistema de reação.

A prova de carga foi realizada sobre uma camada rochosa compactada com espessura de aproximadamente 0,89 m. Tal espessura é inferior à profundidade do bulbo de pressões gerado pela aplicação das cargas na placa durante o ensaio. De acordo com Cintra, Aoki e Albiero (2011), para sapatas retangulares, a profundidade do bulbo de tensões pode ser estimada em 3B (três vezes a dimensão da base da fundação), onde a tensão atinge 10% de seu valor inicial.

O ensaio de placa foi feito em 10 estágios, com incrementos de tensão de 100 kPa, até a pressão máxima de 1000 kPa. O processo de descarregamento foi realizado em 4 estágios, com reduções de 250 kPa por etapa. Em todas as fases, as cargas foram mantidas até a estabilização dos deslocamentos (ensaio lento).

Durante o carregamento, as medições foram realizadas nos intervalos de 0 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min e 30 min, para observar a estabilização dos recalques. O estágio final de carregamento durou pelo menos 12 horas, desde que não houvesse ruptura no terreno. No descarregamento, as medições foram feitas nos mesmos intervalos de tempo, com uma medição adicional de 30 minutos após a remoção total da carga para detectar possíveis recalques residuais.

2.4 Retroanálise do ensaio de placa

A retroanálise do ensaio de placa foi realizada visando à determinação dos parâmetros geológicos-geotécnicos da camada de blocos de rocha compactados e sua comparação com os valores obtidos pela aplicação do sistema de classificação geomecânica GSI proposto por Hoek *et al.*, (2002). Esta metodologia permite avaliar o comportamento de um determinado material a partir do conhecimento de sua resposta à ação de um carregamento aplicado em um ensaio de campo.

Os resultados obtidos no ensaio de placa foram retroanalizados utilizando-se o *software* RS2 (da Rocscience), com a aplicação do método dos elementos finitos (MEF) para a resolução das equações governantes. Na retroanálise numérica, os materiais foram considerados como apresentando um comportamento elástico perfeitamente plástico de Mohr-Coulomb. Nesse tipo de material, a deformação total é decomposta em duas parcelas: a deformação elástica, que é recuperável, e a deformação plástica, que é permanente.

Quanto à modelagem e à discretização da malha de elementos finitos (Figura 3), o RS2 oferece uma opção padrão para a geração automática da malha. As condições de contorno foram definidas impondo que as extremidades laterais permaneçam sem deslocamento na direção horizontal (eixo x). Adicionalmente, todos os pontos na base da camada de solo foram considerados como fixos, impossibilitando qualquer deslocamento.

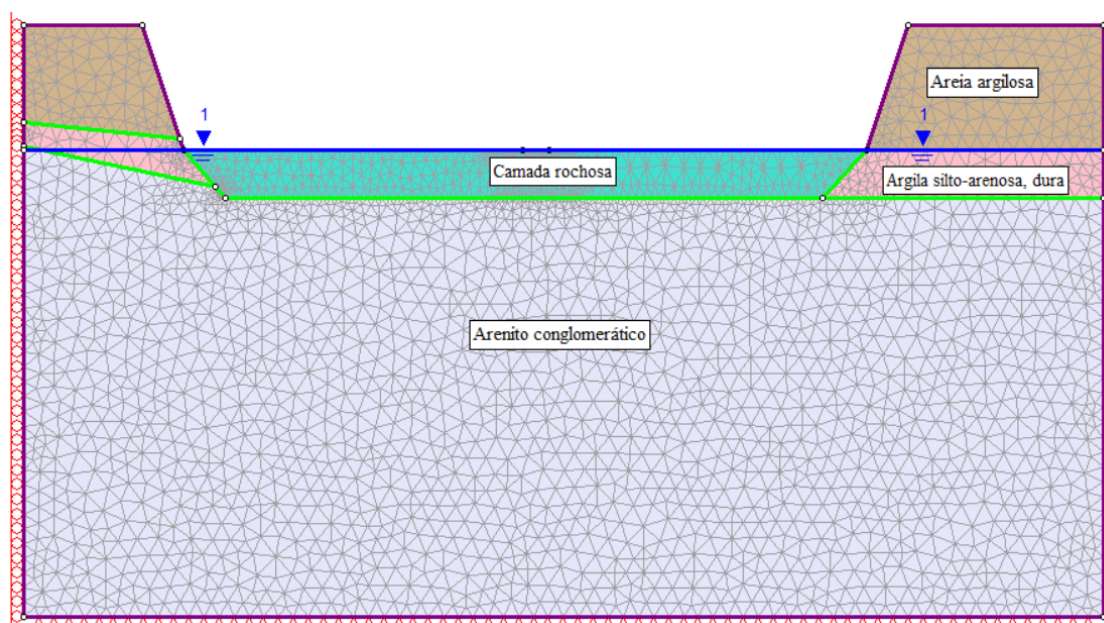


Figura 3 – Malha de elementos finitos e condições de contorno empregadas na modelagem numérica com o *software* RS2.

Fonte: Autores (2024).

3. Resultados e discussão

3.1 Previsão dos parâmetros de resistência via classificação geomecânica

Para a análise da capacidade de carga, considerou-se inicialmente o material de fundação formado pela mistura de blocos de rocha compactados como um maciço rochoso muito fraturado, com GSI estimado em 15%, refletindo a presença de um grande número de descontinuidades aleatoriamente distribuídas entre as partículas de pedra rachão. Vale destacar, que diferente de outros sistemas de classificação, Hoek *et al.* (2002) não estabelecem classes de qualidade do maciço com base no valor obtido para o GSI. A resistência à compressão simples foi estimada 50 MPa, com base nas condições observadas após o uso do martelo geológico, pois nas partículas rochosas presentes exigiram mais de um golpe para fraturar o material, justificando o valor atribuído, de acordo com os critérios da norma ABGE 109/2024 (ABGE, 2024), essa resistência corresponde à categoria R4. O parâmetro m_i , que representa a resistência ao cisalhamento da rocha foi estimado em 15, caracterizando-a como um arenito, quartzito (HOEK; BROWN, 1980). Tal valor corresponde ao valor obtido no programa RocLab da empresa Rocscience a partir da coleta de dados em obras em todo o mundo. O fator de perturbação D, necessário para a estimativa dos valores da coesão e ângulo de atrito pela proposta de Hoek *et al.* (2002), foi definido como 0, considerando que o padrão de fraturamento da camada rochosa permanece inalterado após a sua compactação, o que seria uma analogia ao fato de, caso as escavações tivessem ocorrido em maciço rochoso sem o uso de explosivos, resultariam em mínima perturbação.

Os valores de coesão e ângulo de atrito, obtidos pela proposta de Hoek *et al.* (2002), de acordo com os critérios apresentados anteriormente, foram de 1390 kPa e 23° , respectivamente. Contudo, devido à incerteza na coesão estimada, aplicou-se um fator de segurança de 10, ajustando a coesão para 139 kPa. O coeficiente de segurança foi definido em função das incertezas associadas às propriedades do material rochoso, e o seu uso mostrou-se adequado quando analisados os resultados apresentados a seguir. O peso específico obtido para o material, levando-se em conta materiais compostos por rochas fragmentadas, foi estimado na ordem de 20 kN/m³.

3.2 Ensaio de carga sobre placa *in situ*

Os resultados dos ensaios de placa (Tabela 1) mostraram o comportamento de recalque do terreno sob diferentes níveis de pressão aplicada. Inicialmente, com a pressão de 95 kPa, o recalque foi de -0,12 mm. À medida que a pressão foi incrementada até 984 kPa, o recalque máximo atingiu -2,68 mm. Após o descarregamento, observou-se um recalque residual de -1,85 mm, indicando que grande parcela dos recalques se deu pelas deformações plásticas e que a consideração do material com comportamento elástico-perfeitamente plástico na retroanálise realizada apresentou-se como adequada.

De um modo geral, os resultados mostraram que para a tensão máxima aplicada no ensaio de placa, o recalque observado encontra-se dentro do limite aceitável, pois de acordo com Terzaghi *et al.* (1996), edifícios residenciais podem tolerar recalques absolutos máximos de até 25 mm.

A Figura 4 apresenta inicialmente a curva pressão x recalque obtida no ensaio de carga sob placa. Observando-se os resultados do ensaio *in situ* apresentados na Figura 4, verifica-se que a relação entre a pressão aplicada e o recalque resultante foi aproximadamente linear até o carregamento máximo aplicado, não havendo, portanto, indícios de ruptura sob condições drenadas.

A capacidade de carga obtida a partir da extrapolação dos resultados do ensaio de placa empregando-se o método de Van der Veen (1953) foi de 2000 kPa, cuja aplicação permitiu um ajuste satisfatório dos dados experimentais obtidos no ensaio de placa, como pode ser observado na Figura 4.

Tabela 1 – Resultados do ensaio de placa in situ (carregamento lento).

Pressão (kPa)	Recalque (mm)
0	0
95	-0,12
194	-0,32
293	-0,59
391	-0,87
490	-1,20
588	-1,48
687	-1,63
786	-1,91
885	-2,23
984	-2,68
736	-2,48
490	-2,37
243	-2,20
4	-1,85

Fonte: Autores (2024).

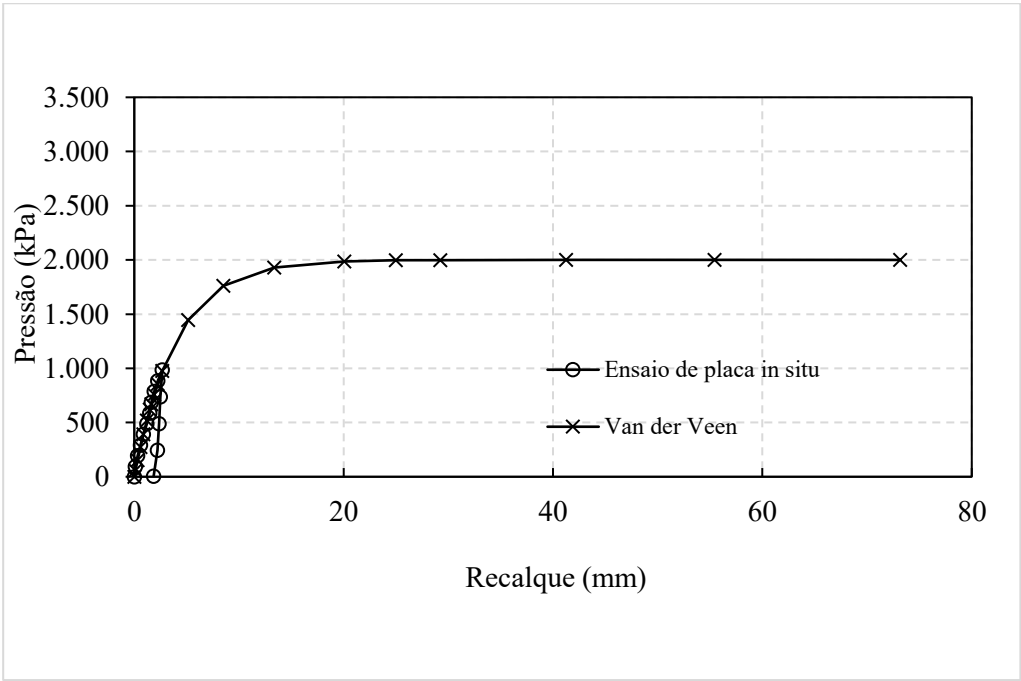


Figura 4 – Curva pressão x recalque do ensaio e extrapolação de Van der Veen (1953).

Fonte: Autores (2024).

3.3 Retroanálise do ensaio de placa

A Figura 5 mostra a comparação entre as curvas pressão x recalque obtidas no ensaio de placa realizada e na retroanálise realizada, na qual foram obtidas as propriedades geológicas-geotécnicas apresentadas na Tabela 2. Inicialmente, os resultados mostram que houve um ajuste satisfatório dos resultados obtidos na retroanálise aos dados provenientes do ensaio de carga sobre placa. Comparando os valores de pressão máxima, verifica-se que a diferença entre os dois métodos é mínima, é de apenas 1,63%. O recalque obtido na retroanálise foi 0,06 mm maior do que o observado experimentalmente, o que do ponto de vista experimental, é considerado irrisório. A diferença no recalque residual foi superior, com a retroanálise mostrando um valor 0,27 mm inferior ao do ensaio. Essas discrepâncias são consideradas aceitáveis, dado que a análise numérica pode não captar todas as características reais do terreno, além das próprias variações dos resultados em procedimentos experimentais.

Neste cenário, consideram-se os critérios de pico de resistência ao cisalhamento – coesão e ângulo de atrito – que refletem as condições iniciais do solo, conforme observado na Tabela 2. Estes critérios são comparados com os valores da camada rochosa obtidos pela classificação geomecânica. Os resultados obtidos indicaram que houve uma concordância satisfatória entre os parâmetros da resistência ao cisalhamento estimados para a camada de blocos rochosos compactados a partir da aplicação dos conceitos do sistema de classificação geomecânica GSI e os valores obtidos na retroanálise dos resultados do ensaio de placa. Isto indica, que a aplicação da metodologia empregada no presente trabalho para a estimativa das propriedades de resistência ao cisalhamento de camadas de blocos rochosos compactados para assentamento de fundações diretas mostrou-se satisfatória.

No presente caso, é importante se mencionar que foi aplicado um coeficiente de segurança igual a 10 ao parâmetro coesivo obtido na classificação geomecânica. Tal redução no valor obtido apresentou-se adequada e leva em consideração que o esqueleto mineral formado pelos blocos de rocha compactados não apresenta as mesmas forças coesivas entre os minerais naturais presentes num maciço rochoso. Por outro lado, o valor significativo obtido para a coesão na retroanálise pode ser atribuído à presença do agente cimentante, qual seja, o cimento Portland utilizado na confecção do concreto adicionado à mistura dos blocos de rocha.

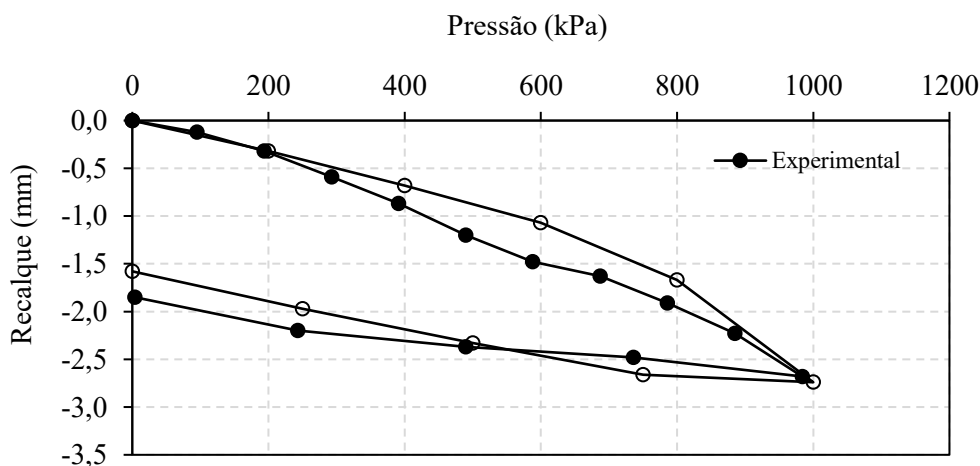


Figura 5 – Comparação das curvas pressão x recalque obtidas no ensaio de placa e na retroanálise.
Fonte: Autores (2024).

Tabela 2 – Parâmetros de resistência e deformabilidade obtidos na retroanálise do ensaio de carga em placa.

Material	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (kPa)	Coefficiente de Poisson	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
Areia argilosa	19	20000	0,35	12,4	79,7
Argila silto-arenosa	21	20000	0,35	12,4	79,7
Camada rochosa	19	468000	0,49	23,0	110,0
Arenito conglomerático	22	468000	0,49	20,0	40,0

Fonte: Autores (2024).

3.4 Avaliação da capacidade de carga da camada rochosa

Na Figura 6 são mostradas as curvas pressão x recalque obtidas no ensaio de placa realizado, o resultado obtido com a sua extrapolação pelo método de Van der Veen (1953), para a qual foi obtida uma capacidade de carga de 2000 kPa, e a obtida na modelagem numérica do ensaio *in situ* realizado (retroanálise). Vale salientar que uma vez obtidos os parâmetros geológicos-geotécnicos dos materiais constituintes do terreno de fundação a partir da retroanálise dos resultados do ensaio de placa, é possível a definição de uma curva pressão x recalque para vários níveis de carregamento, como ilustrado na Figura 6.

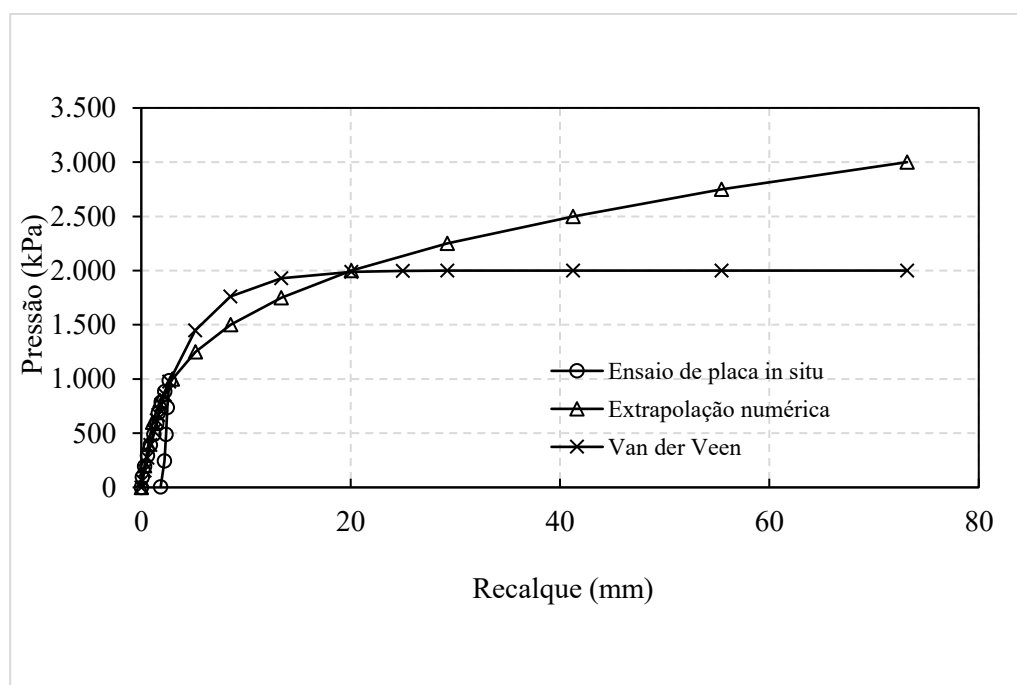


Figura 6 – Comparação das curvas da prova de carga, extrapolação de Van der Veen (1953) e numérica, mostrando a tensão de ruptura em função do recalque.

Fonte: Autores (2024).

A Figura 7 mostra os resultados da capacidade de carga obtida pela utilização dos métodos teóricos, pela extrapolação do ensaio de carga em placa pelo método de Van der Veen (1953) e no modelo numérico. Inicialmente, observa-se que houve uma grande concordância entre os resultados obtidos para a capacidade de carga no modelo numérico elaborado e na extrapolação do ensaio de carga em placa. Por outro lado, os valores obtidos pela aplicação dos métodos teóricos apresentaram-se bem superiores àqueles resultantes da metodologia experimental (ensaio de carga em placa), mas comparáveis aos valores obtidos a partir do modelo numérico para níveis de recalques iguais a 40 mm,

indicando, portanto, que a aplicação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos na classificação geomecânica para a previsão da capacidade de carga do sistema solo-fundação se mostrou adequada.

A capacidade de carga obtida pelo modelo numérico foi inicialmente determinada com base no critério de recalque máximo de 40 mm, resultando em um valor de 2500 kPa (Figura 6). No entanto, ao adotar um critério mais rigoroso de recalque máximo de 25 mm, essa capacidade de carga é reduzida para aproximadamente 2150 kPa. Já o método de Van der Veen (1953) apresenta valores mais próximos aos obtidos pela extrapolação numérica com recalque limitado a 25 mm, conforme recomendado para os autores clássicos com Terzaghi *et al.* (1996). Contudo, esses valores ainda são inferiores aos estimados pelos métodos teóricos, conforme mostrado na Figura 7. Essa comparação destaca a importância de considerar critérios de recalque na interpretação dos resultados apresentados.

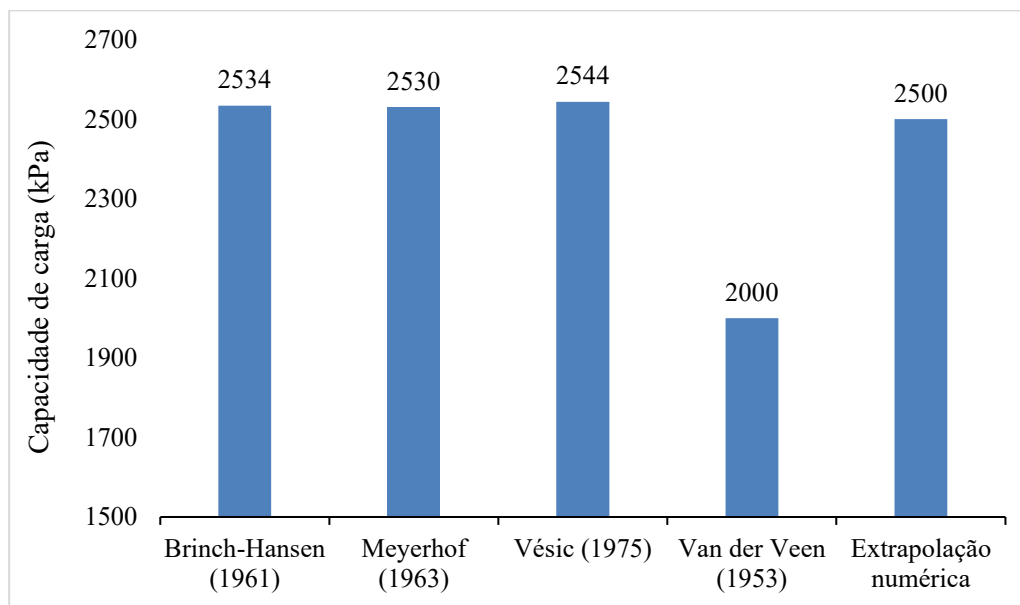


Figura 7 – Comparação os valores obtidos para a capacidade de carga dos sistema solo-fundação.
Fonte: Autores (2024).

4. Conclusões

Este estudo abordou a implantação de uma camada de blocos de rocha como técnica de melhoria do terreno para assentamento de fundações superficiais. A partir dos resultados obtidos, comprovou-se que essa técnica permitiu a obtenção de um material para assentamento de fundações superficiais com elevada capacidade de carga, em relação aos solos naturais de menor resistência, com recalques dentro dos limites aceitáveis para construções residenciais.

A simulação numérica em ambiente bidimensional possibilitou a obtenção de uma curva pressão-recalque próxima à obtida experimentalmente, validando metodologia empregada para a estimativa da capacidade de carga do material de assentamento. Isto mostra que a modelagem numérica foi fundamental para prever o comportamento do sistema solo-fundação, reproduzindo as condições de carregamento impostas no ensaio de campo realizado e permitindo a obtenção dos parâmetros geotécnicos, especialmente os da camada rochosa.

A aplicação do método de Van der Veen (1953) permitiu um ajuste satisfatório da curva pressão x recalque obtida no ensaio de placa, e consequentemente, a determinação da capacidade de carga do sistema solo-fundação. A curva obtida na extrapolação dos resultados do ensaio de campo apresentou-se bastante semelhante àquela obtida no modelo numérico, mostrando que ambos os processos foram realizados de forma a representar satisfatoriamente o comportamento do material estudado.

Por fim, a previsão das propriedades de resistência ao cisalhamento da camada de blocos de rocha compactados utilizando-se os conceitos do sistema de classificação geomecânica (Sistema GSI) para a estimativa da capacidade de carga do material quando utilizado como camada de assentamento de fundações superficiais mostrou-se satisfatória. Entretanto, recomenda-se que o parâmetro coesivo obtido na aplicação dos conceitos do sistema de classificação

geomecânica seja dividido por um coeficiente de segurança igual a dez. Observou-se que a adoção do coeficiente de segurança para o parâmetro coesivo mostrou-se coerente garantindo uma estimativa segura da capacidade de carga do material.

Embora tenha sido realizado um ensaio de placa para avaliação da capacidade de carga, não foram conduzidos ensaios de cisalhamento direto para a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento da camada de blocos de rocha compactados. Recomenda-se, portanto, a realização deste tipo de ensaio para obtenção direta dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, garantindo maior confiabilidade no cálculo da capacidade de carga.

Agradecimentos

A Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal do Ceará, pela concessão das licenças dos *softwares* RS2 e RS3, da Rocscience.

Referências

- ABNT (2019). NBR 6489 – *Solo – Prova de carga estática em fundação direta*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT (2020). NBR 6122 – *Projeto e execução de fundações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT (2020). NBR 6484 – *Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. Norma ABGE – 109/2024: *descrição e classificação de sondagens*. 1. ed. São Paulo: ABGE, 2024.
- ALBUQUERQUE, P. J. R. de; SILVA, G. S. da. Análise das alterações e avanços das normas de provas de carga em fundação profunda (ABNT NBR 16.903: 2020) e fundação direta (ABNT NBR 6489: 2019). In: 10º SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 4 a 7 dez, 2023, São Paulo. *Anais...* São Paulo, 2023. p. 1-9.
- BRINCH HANSEN, J., (1961). A General Formula for Bearing Capacity, *Boletim Número 11*, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, pp. 38-46.
- CARNEIRO, A. D. A.; CHAGAS, G. D. S.; MOURA, A. S. Avaliação da compactação como melhoramento de um solo silto, argiloso, colapsível, um partidor de realização de ensaios oedométricos e provas de cargas diretas. *Revista de Engenharia Civil IMED*, Passo Fundo, v. 6, n.º 1, p. 3-19, jan – jun/2019. Disponível em: <https://seer.atitus.edu.br/index.php/revistaec/article/view/2287/2249>. Acesso em: 08 jun. 2024.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. *Tensão admissível em fundações diretas*. São Carlos: RiMa, 2011.
- DÉCOURT, L. (1992). SPT in non-classical material. ‘*Applicability of Classical Soil Mechanics Principles in Structured Soils*’, Proc. US/Brazil. Workshop, Belo Horizonte, Univ. Fed. Viçosa, MG, Brazil, pp. 67-100.
- FREITAS, M. C. de. *Avaliação de técnica de melhoria de solos colapsíveis por meio de colunas de solo laterítico compactado*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2016. 201 f.
- HOEK, E. & BROWN, E. T. (1980). *Underground Excavations in Rock*. Institute of Mining and Metallurgy, London, UK, 527 p.
- HOEK, E.; MARINOS, P.; GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: GEOENG2000 CONFERENCE, Melbourne, 2000. *Proceedings* [...]. Melbourne, 2000.
- HOEK, E.; CARRANZA-Torres. C. & CORKUM, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. *Proc. NARMS-TAC*. Conference, Toronto, Canada, Vol. 1, 267-273.

-
- MEYERHOF, G. G. Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 1, p, 16-26, 1963.
- MONTEIRO, T. M.; ARAÚJO, C. B. C. de; AGUIAR, M. F. P. de. Análise de métodos semi-empíricos nacionais e internacionais para determinação da capacidade de carga axial em estacas tipo raiz. *Revista Tecnologia*, Fortaleza, v. 38, n. 2, dez. 2017, p. 1-16. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324020741>. Acesso em: 07 jul. 2024.
- OLIVEIRA, K. E. B. B. de. *Solo cimento: avaliação econômica da utilização de camada cimentada para reforço de fundações superficiais*. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2018. 58 f.
- OLIVEIRA, R. F. V. de. *Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica), Núcleo de Geotécnica da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2011. 186 f.
- PEREIRA, V. B. S. *Análise comparativa entre o recalque de fundações rasas e profundas em edifício assentado sobre solo mole*. 2018, 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2018.
- RICARTE, A. V. D. *Avaliação do melhor método disponível para o cálculo da capacidade de carga de sapatas sobre solo melhorado com cimento*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, Paraíba, 2021. 70 f.
- ROCSCIENCE, RS2 – *Rocscience Software*. Disponível em: <https://www.rocscience.com/software/rs2>. Acesso em: 18 jun. 2024
- SILVA, J. S. da. *Estudo sobre tipos de fundações a empregar em solos da formação geotécnica Santa Maria no bairro Renascença da cidade de Santa Cruz do Sul/RS*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz, Rio Grande do Sul, 2023. 83 f.
- TERZAGHI, K., PECK, R. B., & MESRI, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3 ed. New York: John Wiley and Sons Co. 546 f.
- TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. D. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: *Fundações: teoria e prática*. 2 ed. São Paulo: PINI, 1998, p. 227-264.
- VAN DER VEEN, C. A capacidade de suporte de uma estaca. In: TERCEIRA CONFERÊNCIA INTERNACIONAL FUNDAÇÃO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA, 1953, Zurique. Anais... Zurique: [s.n], 1953. v. II
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F, R. *Fundações: volume completo*. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2011.
- VESIC, A. S., 1975. "Bearing capacity of shallow foundations". In: *Foundation Engineering Handbook*, New York, McGraw-Hill, pp. 121-147.