

Comparação entre os resultados de recalque obtidos por prova de carga em placa e por estimativas via modelagens numéricas

Ana Cinthya Mariano de Sousa

Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. engcinthya@gmail.com

Ana Carolina Vasconcelos Silva

Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. eng.anacarolinasvasconcelos@gmail.com

Lucas Pereira Cavalcante

Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. lucaspengenharia@gmail.com

Rodolfo Moreira Cavalcante

Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. rodolfocavalcante@gmail.com

Alfran Sampaio Moura

Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. alfransampaio@ufc.br

RESUMO: Este trabalho objetiva realizar uma análise tensão-deformação, por meio de modelagem computacional, para previsão dos recalques de um ensaio de prova de carga. Para isso, foram utilizados os dados característicos disponíveis do subsolo do Campo Experimental de Geotecnia e Fundações da Universidade Federal do Ceará (CEGEF – UFC). O subsolo analisado consiste em um material granular do tipo areia-siltosa, com um peso específico de 17 kN/m^3 , ângulo de atrito de 33° e coesão nula. As amostras utilizadas em ensaios laboratoriais apresentaram menor módulo de deformabilidade, quando comparados aos ensaios de campo. Esta divergência nos parâmetros foi considerada na elaboração do modelo geotécnico. Os parâmetros de rigidez foram decorrentes de três tipos de ensaio: oedométrico, triaxial e sondagem à percussão. Este último utilizou quatro tipos de correlações a partir do N_{spt} . Quanto à modelagem, foram desenvolvidos, com uso do software GeoStudio, dois modelos constitutivos: elástico linear e elasto-plástico. Por fim, concluiu-se que o modelo elástico linear, que utilizou o módulo de deformabilidade obtido por meio correlações com o N_{spt} , apresentou resultados convergentes com os da prova de cargas, sendo plausível visto que os carregamentos decorrentes do ensaio de placa provocam pequenas deformações no solo, típico de comportamento elástico.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de carga, Recalque, Modelagem, Estimativa.

ABSTRACT: This work aims to perform a stress-strain analysis, through computational modelling, to predict the settlement of a load test. For this goal, subsoil characteristic data available of the Experimental Field of Geotechnics and Foundations of Federal University of Ceará (CEGEF – UFC). The analyzed subsoil consists of a granular material, silty sand more specifically, with a unit weight of 17 kN/m^3 , friction angle of 33° and cohesionless. The samples used in the laboratorial tests presented lower Young's modulus when compared to the field tests. This parameters divergence was considered in the geotechnical model creation. The stiffness parameters were obtained by three different tests: oedometric, triaxial and standard penetration test. The last one used four different N_{spt} correlations. As for the modelling, two constitutive models were developed, using the GeoStudio software, for the problem modelling: linear elastic and elastic-plastic models. Finally, it's concluded that the linear elastic model, which used the Young's modulus through N_{spt} correlations, presented more consistent results with those from the load test, which is plausible since the loads resulting from the load test cause small deformations in the soil, typical of elastic behavior.

KEYWORDS: Load test, Settlement, Modelling, Evaluation.

1 INTRODUÇÃO

O projeto de fundação é uma etapa fundamental no desenvolvimento de obras seguras, econômicas e eficientes. Os desafios crescentes na engenharia de fundação são decorrentes do crescimento acelerado dos centros urbanos e indústrias. Por isso, uma investigação geotécnica apropriada possibilita prever o comportamento da fundação, garantindo que não ocorram recalques inadmissíveis que causem danos estéticos e estruturais.

Ensaio geotécnicos realizados em campo conseguem preservar a estrutura original do solo não havendo uma mudança significativa no estado de tensão inicial, possibilitando uma previsão precisa do comportamento sob condições semelhantes ao que será submetido. Já na preparação da amostra utilizada em ensaios laboratoriais, há uma modificação das propriedades do material analisado devido ao seu desconfinamento, contudo, possibilita um estudo aprofundado do solo sob condições diversas e controladas.

O objetivo do presente trabalho é realizar um comparativo entre as curvas carga-recalque obtidas por prova de carga em placa circular e por análise tensão-deformação utilizando modelagem computacional. Para isso, foram realizados ensaios de campo e laboratoriais do subsolo do Campo Experimental de Geotecnia e Fundações da Universidade Federal do Ceará (CEGEF – UFC), a fim de obter os parâmetros característicos do material analisado. Os resultados obtidos nos ensaios foram utilizados para definir o modelo geotécnico no software Geostudio para realização da análise computacional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Prova de carga

Segundo Barata (1984), a prova de carga é o ensaio *in situ* de compressão mais antigo. Este ensaio consiste numa placa metálica rígida sobreposta na superfície do terreno ou na profundidade desejada. O objetivo é simular aplicações de carga proveniente da superestrutura e compreender o comportamento de deformações e recalques que o solo apresentará conforme o acréscimo da carga.

De acordo com Housel (1929 apud BARATA, 1966) é necessária a realização de três provas de carga divergindo o diâmetro das placas numa mesma profundidade, a fim de determinar a tensão admissível do solo, sendo possível constatar que existe uma relação de linearidade entre estes.

A ABNT (2019) propõe que no ensaio de placa seja aplicado o dobro da tensão admissível ou, ainda, um deslocamento máximo, que será determinado pelo projetista. Contudo, as dimensões da placa são significativamente inferiores as dimensões reais da fundação, sendo necessário uma correção dos resultados obtidos com o intuito de garantir que a capacidade de carga de projeto seja similar a carga efetiva de trabalho.

2.1.1 Curva carga-recalque

A partir do ensaio de placa se determina a capacidade de carga da fundação, por meio da análise da curva carga-recalque. É possível identificar três comportamentos distintos do solo na curva: o primeiro reflete o comportamento elástico, apresentando uma proporcionalidade entre as tensões e os recalques; o segundo apresenta um trecho visco-plástico, onde há deformações irreversíveis; e o terceiro corresponde a ruptura generalizada do solo. Normalmente, a prova de carga não atinge a ruptura generalizada, havendo uma necessidade de estipular o valor da carga admissível para a superestrutura.

2.2 Parâmetros de rigidez

É possível obter os parâmetros de deformabilidade do solo por meios de ensaios de campo e laboratoriais. Devido às diferenças da metodologia de cada ensaio, que buscam similar situações específicas, os resultados obtidos dos parâmetros do solo também possuirão divergências. A escolha do melhor ensaio dependerá das condições reais ao qual o solo será submetido. O ensaio de adensamento representa melhor situações no qual há tensões unilaterais, possibilitando que haja apenas deformações unidirecionais, devido ao confinamento do material. Já o ensaio triaxial representa circunstâncias em que há deformações em todas as direções.

Na precedência dos ensaios de campo existe a vantagem de não haver mudanças significativas no estado de tensão original do solo. Portanto, caso a instrumentação do ensaio seja realizada de forma apropriada, os resultados obtidos serão satisfatórios. Os parâmetros de deformabilidade podem ser obtidos diretamente no ensaio ou por meio de correlações. A Tabela 1 apresenta as correlações entre módulo de elasticidade do material e o N_{spt} , que variam de acordo com o grau de confinamento do material.

Tabela 1. Correlações entre módulo de Young e N_{spt} (Fonte: Bowles, 2001).

Tipo de Solo	SPT
Areia normalmente consolidada	$E = 500 \cdot (N_{SPT} + 15)$
	$E = 7000 \cdot \sqrt{N_{SPT}}$
	$E = 6000 \cdot N_{SPT}$
	$E = (15000 \text{ a } 22000) \cdot \ln N_{SPT}$
Areia Saturada	$E = 250 \cdot (N_{SPT} + 15)$
Areia sobreconsolidada	$E = 40000 + 1050 \cdot N_{SPT}$
	$E = 1200 \cdot (N_{SPT} + 6)$
Cascalho arenoso	$E = 600 \cdot (N_{SPT} + 6) \quad N_{SPT} \leq 15$
	$E = 600 \cdot (N_{SPT} + 6) + 2000 \quad N_{SPT} > 15$
Areia Argilosa	$E = 320 \cdot (N_{SPT} + 15)$
Areia siltosa	$E = 300 \cdot (N_{SPT} + 6)$

2.3 Modelagem numérica

Um modelo matemático busca representar uma réplica de algum objeto, ou sistema do mundo real, que permite facilitar o entendimento e traduzi-lo em termos matemáticos, (GEOSLOPE, 2012 apud COUNCIL et al., 1990). A análise numérica possibilita simular situações diversas ao que o solo será submetido, permitindo definir os parâmetros inerentes do material, bem como a mudança das condições iniciais com a variação do estado de tensão, que poderão causar deformações críticas.

3 METODOLOGIA

3.1 Ensaios realizados

3.1.1 Ensaios para obtenção de parâmetros do solo

Foram realizados previamente ensaios geotécnicos para caracterização do subsolo do CEGEF – UFC, publicados em Moura et. al. (2018). O solo superficial, que corresponde a porção de solo submetida as tensões provenientes da prova de carga direta utilizada nesse trabalho, foi classificado como SM – Areia Siltosa, de acordo com a classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Dentre os ensaios laboratoriais realizados: caracterização física, triaxiais, oedométricos e cisalhamento direto. Os ensaios de campo foram o de Sondagem a Percussão (SPT) e de prova de carga. A Tabela 2 apresenta um resumos dos parâmetros geotécnicos do material analisado.

Tabela 2. Resumo do principais parâmetros do solo para a profundidade de 1,10 m.

Características/Parâmetros	Resultado	Forma de Obtenção
Classificação do solo	SM	Granulometria
Umidade natural (%)	12,4	Estufa
G _s (g/cm ³)	2,58	Picnômetro
γ _d (kN/m ³)	22,5	Compactação
w _{ot} (%)	9,6	Compactação
φ	31,8°	Cisalhamento direto
c (kPa)	1,3	Cisalhamento direto
φ	33,5°	Triaxial
c (kPa)	0	Triaxial
E (MPa)	20	Triaxial

3.1.2 Ensaio de Prova de carga com placa

O resultado do ensaio de placa foram previamente realizados e publicados preliminarmente por meio do trabalho de Moura et. al. (2018), fornecidos para continuação das análises dos resultados. O ensaio de Prova de Carga Estática, com placa de 50 cm de diâmetro, foi realizado sobre a superfície do solo, onde as cargas foram aplicadas em estágios e resultou no gráfico da Figura 1.

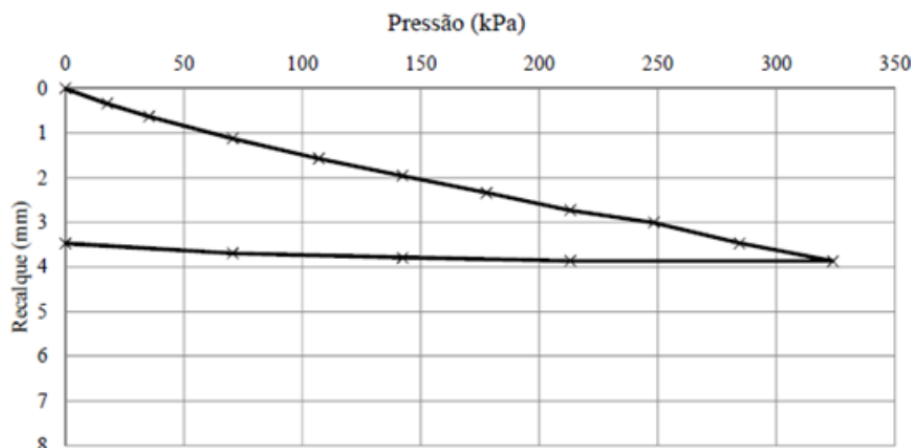


Figura 1. Perfil do índice de deformação específica. (Fonte: MOURA et. al., 2018).

Na curva carga x recalque é possível verificar o valor do recalque máximo de aproximadamente 3,87 mm, correspondente a tensão de 350 kPa. Já o recalque residual obtido foi de 3,5 mm.

Ao analisar a curva experimental de carga e recalque, observa-se uma relação linear durante a compressão entre a pressão aplicada e o recalque, o que indica um comportamento elástico. No entanto, durante o descarregamento, nota-se um recalque residual quase igual ao recalque máximo obtido no ensaio, o que é incomum. Moura et al. (2018) não mencionam essa inconsistência nos resultados. Os autores deste artigo acreditam que possa ter ocorrido problemas nas leituras dos extensômetros durante a fase de descarregamento. Portanto, para as análises desta pesquisa, serão considerados apenas os resultados experimentais da fase de compressão do referido ensaio.

3.1.3 Ensaio de Sondagem a Percussão (SPT)

Um ensaio de sondagem SPT (Standard Penetration Test) foi realizado a uma distância de 2,0 m do local onde foi realizada a prova de carga direta, sendo este também fornecido conforme o avanço das pesquisas segundo Moura et. al. (2018). O perfil de sondagem pode ser visto na Figura 2.

3.2 Correlações entre o parâmetro de rigidez e o N_{spt}

A partir dos ensaios laboratoriais constatou-se que o solo é constituído por um material granular que não apresenta histórico de tensões maior do que o atualmente submetido, característico de solos normalmente adensados. A partir da Tabela 1, apresentada anteriormente, foram utilizadas diferentes correlações – de acordo com as sugestões para areias normalmente consolidadas e areia siltosa – para obter o módulo de elasticidade, para cada profundidade, utilizando os resultados obtidos no ensaio SPT, sendo representados a seguir na Tabela 3.

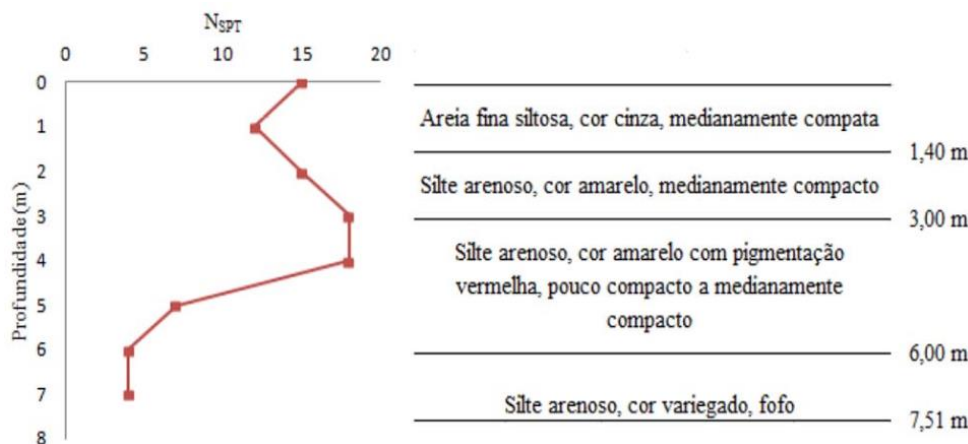


Figura 2. Resultado da sondagem à percussão realizada (Fonte: MOURA et. al., 2018).

Tabela 3. Correlações entre os resultados obtidos no ensaio SPT e o módulo de Young.

Profundidade (m)	Nspt	E				
		Areia normalmente consolidada (Bowles, 2001)				Areia siltosa (Bowles, 2001)
		1	2	3	4	5
		$500 \cdot (N_{spt} + 15)$	$7000 \cdot \sqrt{N_{spt}}$	$6000 \cdot N_{spt}$	$15000 \cdot \ln N_{spt}$	$300 \cdot (N_{spt} + 6)$
0	15	15000	27111	90000	17641	6300
1	11	13000	23216	66000	15621	5100
2	15	15000	27111	90000	17641	6300
3	18	16500	29698	108000	18829	7200
4	18	16500	29698	108000	18829	7200

3.3 Modelo geotécnico

A partir dos dados obtidos na investigação preliminar foi possível obter o modelo geotécnico do subsolo do campo experimental para realização da modelagem computacional, apresentada na Figura 3. Como o objetivo da modelagem é retratar o ensaio de prova de carga, a fim de obter resultados similares para realizar o comparativo, considerou-se um modelo axissimétrico, por se tratar de uma placa circular, com as mesmas dimensões.

O software utilizado foi o GeoStudio, onde se realizou uma análise tensão deformação por meio da função Sigma/W, no qual se considerou dois tipos de modelos constitutivos, o elástico isotrópico e o de Mohr-Coulomb. Para as análises foram simuladas três situações distintas, no qual foi modificado apenas o módulo de Young (E) de acordo com os resultados dos ensaios utilizados: oedométrico, com um E constante de 10,97 MPa; triaxial, com E constante igual a 20 MPa; e por meio de correlações com o Nspt, com E variável de acordo com a profundidade, apresentado na Tabela 3.

Para a modelagem, foi conduzida uma análise axissimétrica bidimensional de uma seção com 2 metros de altura e 2 metros de largura. O modelo numérico foi discretizado em uma malha composta por 400

elementos quadrangulares e 441 nós. Nas laterais da seção analisada, foram impostas condições de contorno que restringem os deslocamentos horizontais, enquanto na base da seção foi considerada também a ausência de deslocamentos verticais. Foram aplicados sete incrementos de carga, cada um com duração de 10 minutos, nos valores de 50, 100, 150, 200, 250, 300 e 330 kPa.

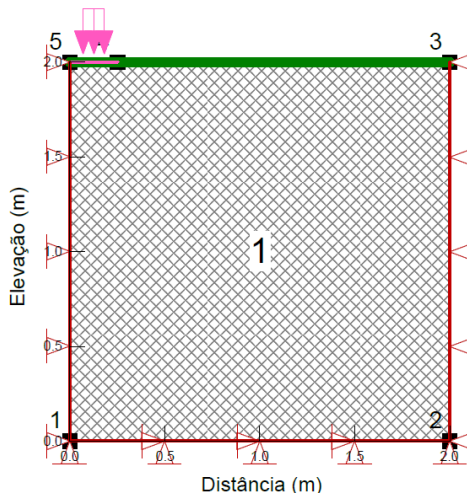


Figura 3. Modelo geotécnico utilizado na análise numérica.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaio oedométrico

O Gráfico 1 apresenta os resultados da modelagem computacional utilizando parâmetros de rigidez obtidos no ensaio oedométrico. É possível observar que o modelo elástico apresenta resultados mais satisfatórios, mas ainda há uma divergência significativa entre os valores obtidos. Isto se deve à metodologia característica do próprio ensaio, onde há apenas deformações unidirecionais, não representado adequadamente a situação real.

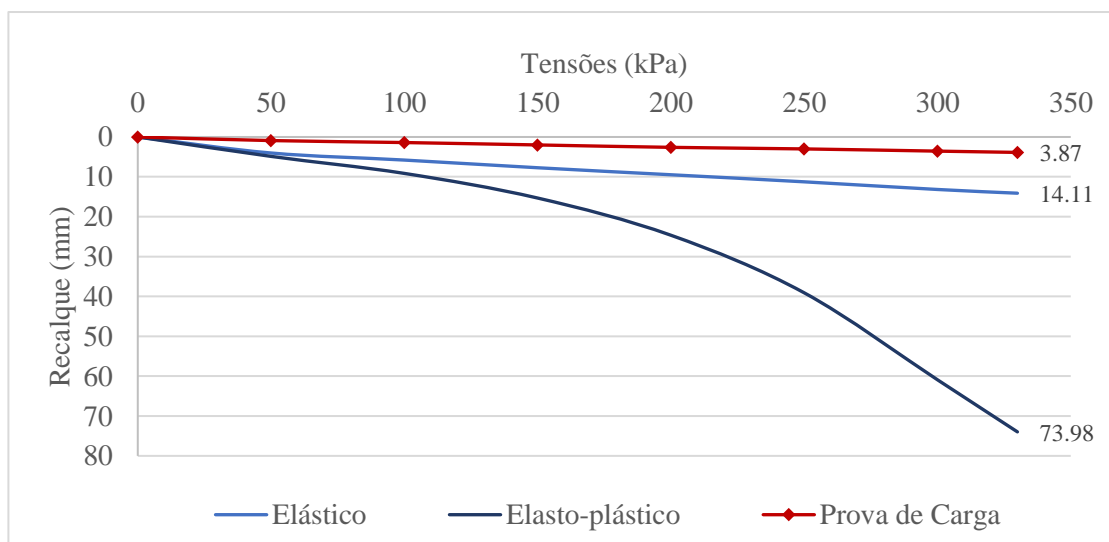


Gráfico 1. Comparativo entre as curvas tensão-recalque do ensaio oedométrico e do ensaio de placa.

4.2 Ensaio triaxial

O Gráfico 2 apresenta um comparativo entre os resultados da modelagem considerando os parâmetros de deformabilidade obtidos no ensaio triaxial. Assim como nas modelagens anteriores, o modelo elástico

apresentou melhores resultados. Como o ensaio triaxial retrata de maneira mais fiel o ensaio de prova de carga, os resultados foram mais coerentes do que o oedométrico.

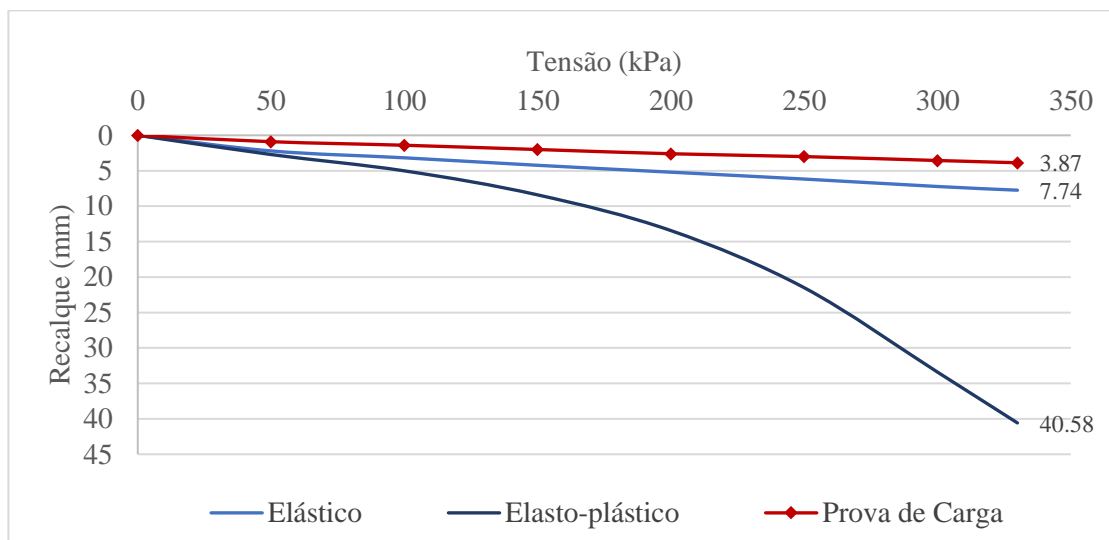


Gráfico 2. Comparativo entre as curvas tensão-recalque do ensaio triaxial e do ensaio de placa.

4.3 Correlações com o N_{spt}

Os Gráficos 3 e 4 apresentam os resultados das correlações com o N_{spt}. Observa-se que a correlação 2, de acordo com a Tabela 3, do modelo elástico obteve o melhor resultado dentre todos os analisados, com diferenças irrisórias. Isto se deve às divergências entre os ensaios de campo e laboratoriais, sendo o primeiro menos susceptível às mudanças no estado de tensões original do subsolo, por não apresentar amolgamento relevante que descaracterize o material analisado.

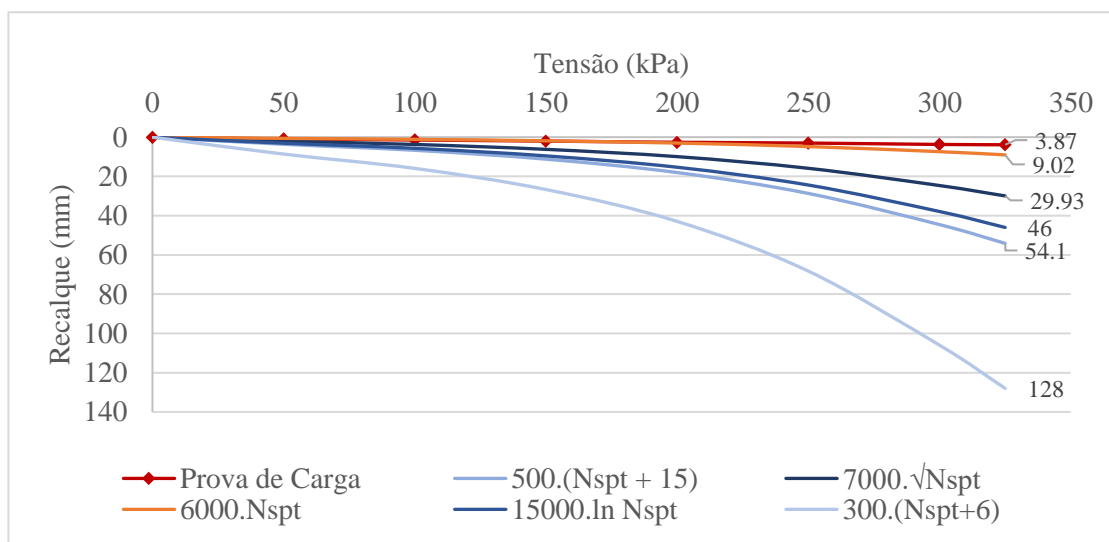


Gráfico 3. Comparativo entre as curvas tensão-recalque utilizando correlações com o N_{spt} para o modelo elastoplástico.

4.4 Comparativo entre os resultados dos ensaios

O Gráfico 5 apresenta o comparativo entre os ensaios. Como supracitado, os resultados referentes ao modelo elástico utilizando os parâmetros de rigidez obtidos por meio de correlações com o N_{spt} apresentaram valores equiparáveis aos obtidos no ensaio de prova de carga. Isto pode ser explicado devido às similaridades com o próprio ensaio, já que ambos são realizados em campo. Ainda, devido ao baixo nível de tensões ao qual

o subsolo está submetido, o modelo elástico é mais representativo, visto que não há deformações plásticas relevantes.

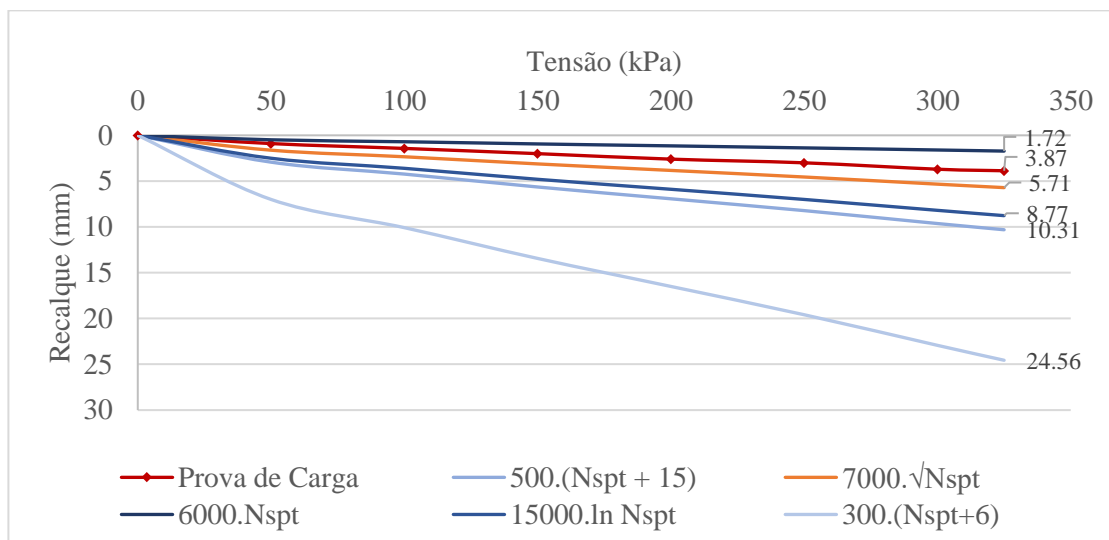


Gráfico 4. Comparativo entre as curvas tensão-recalque utilizando correlações com o Nspt para o modelo elástico.

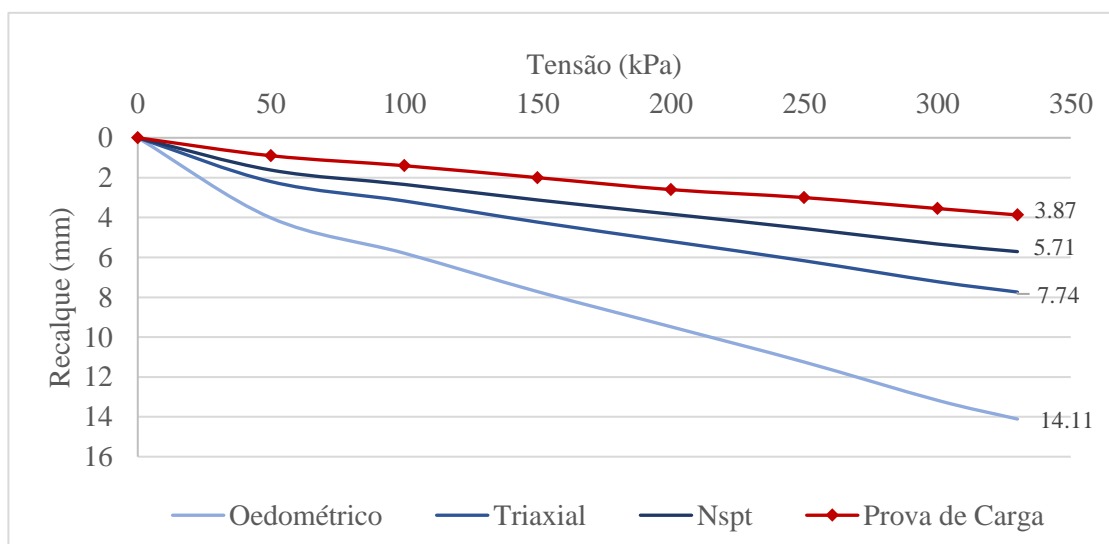


Gráfico 5. Comparativo entre os resultados obtidos para diferentes ensaios.

5 CONCLUSÕES

O comparativo entre a curva tensão-recalque obtidos por meio de ensaio de prova de carga e por modelagem computacional, utilizando diferentes parâmetros de rigidez, apresentaram uma análise necessária, a fim de definir o método mais representativo da situação estudada.

No caso em análise, o ensaio de prova de carga, por apresentar baixas tensões, é melhor representado na modelagem computacional pelo modelo elástico, por não possuir zonas de plastificação generalizada. Ainda, as correlações que utilizam o Nspt para obtenção do módulo de Young, por ser um ensaio de campo que não modifica as características inerentes do material analisado, apresentou resultados equivalentes com os obtidos no ensaio de placa. A conclusão é plausível com a literatura, visto que os carregamentos decorrentes do ensaio de placa provocam pequenas deformações no solo, característico de um comportamento elástico.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (DEHA – UFC), pelas oportunidades oferecidas e pelos dados fornecidos de seu campo experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2006). NBR 6489. *Estacas- Prova de carga estática em fundação direta*. Rio de Janeiro.
- Barata, F. E. (1966). *Ensaio de placa para fixação de taxa admissível de fundações diretas*. In: III Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. Vol. 1. Belo Horizonte.
- Barata, F. E. (1984). *Propriedades mecânicas dos solos – Uma introdução ao projeto de fundações*. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. 5th ed, McGraw-Hill.
- Cunha, D. J. S. (1920). *Experimentação dos terrenos para o estudo das fundações*. Revista Brasileira de Engenharia. V.1, n.1, Rio de Janeiro.
- GEOSLOPE (2012). *Seepage Modeling with SEEP/W*. [S.l.]: GEO-SLOPE International Ltd. Disponível em: <<https://ottegroupp.com/wp-content/uploads/2021/02/seep-modeling-June2015.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- Housel, W. S. (1929). *A practical method for the selection of foundations based on fundamental research in soil mechanics*. University of Michigan, Ann Harbor, USA. Dept. Eng. Research Bull. 117 p.
- Moura, A. S.; Ramos, M. R.; Cerqueira Júnior, E.; Bezerra de Menezes, P. H. L.; Lima Filho, F. P. (2018). *Caracterização preliminar geotécnica do subsolo do Campo Experimental de Geotecnia e de Fundações da Universidade Federal do Ceará (CEGEF – UFC)*. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador.