

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise Numérica e Experimental do Comportamento Tensão-Recalque de solos da Formação Barreiras

Bruno Leite Ramires Saldanha

Discente, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, brunorsaldanha@gmail.com

Juliane Andréia Figueiredo Marques

Docente, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, julianemarques@hotmail.com

RESUMO: O presente trabalho objetiva avaliar o comportamento tensão-recalque de solos representativos da Formação Barreiras por meio de simulações numéricas baseadas no método dos elementos finitos. Para isso, utilizou-se o *software* Plaxis 2D para a realização de quatro simulações de provas de carga sobre placa baseadas nos ensaios experimentais executados por Moraes (2011), Falcão (2014) e Barreto (2015) no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas (CEG/UFAL). Avaliaram-se os resultados por meio de um estudo comparativo quanto à similaridade das curvas tensão-recalque e das tensões e recalques admissíveis resultantes das simulações com as obtidas pelos ensaios de prova de carga sobre placa realizadas por Falcão (2014) e Barreto (2015). As simulações 1, 3 e 4 apresentaram comportamentos condizentes aos experimentais, resultando em curvas semelhantes e em pequenas diferenças percentuais quanto às tensões e recalques admissíveis; já a simulação 2 expressou resultados divergentes do experimental, distinguindo-se nos excessivos valores de recalque. Sendo assim, a consistência nos resultados de três das quatro simulações apresenta o *software* Plaxis 2D como uma boa alternativa para simulação do comportamento tensão-recalque dos solos da formação barreiras.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de carga sobre placa, Plaxis 2D, Tensão admissível do solo, Formação Barreiras.

ABSTRACT: The objective of the present study is to evaluate the stress-settlement behavior of Barreiras Formation soil through numerical simulations based on the Finite Elements Method. It was performed four plate test simulations based on the studies of Moraes (2011), Falcão (2014) and Barreto (2015) on the Federal University of Alagoas Experimental Geotechnics Camp. The results were evaluated by comparing the similarities between the stress-settlement curves and the allowable bearing capacity and the maximum allowable settlement obtained through simulations and the plate load tests executed by Falcão (2014) and Barreto (2015). The soil behavior presented by the simulations 1, 3 and 4 were similar by the ones obtained experimentally, resulting in similar curves and small percentual differences of the maximum allowable settlement and allowable bearing capacity. The second simulation presented great divergences between the two curves, resulting in higher settlement values. Therefore, it was concluded that the consistency between three of the four simulations presented by the *software* Plaxis 2D expressed a great alternative to simulate the stress-settlement behavior of the Barreiras Formations soil.

KEYWORDS: Plate load test. Plaxis 2D. Allowable bearing capacity. Barreiras Formation.

1 Introdução

O estudo do comportamento tensão-recalque dos solos é regido pela avaliação da sua tensão admissível, representada como aquela que não causará a ruptura do solo nem ocasionará em recalques excessivos.

Atualmente no Brasil, preferem-se os métodos teóricos e semiempíricos para a determinação dessa tensão, visto que apresentam resultados satisfatórios por um custo razoável. Apesar disso, ainda se considera as provas de carga como um dos métodos mais confiáveis, tendo em vista que se definem as condições do ensaio de acordo com as necessidades do projeto, sendo o principal viés para sua realização o alto custo, tempo de execução e necessidade de mão de obra qualificada (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011).

Nesse cenário, a utilização do Métodos dos Elementos Finitos (MEF) por meio de *softwares* consiste em um método alternativo e economicamente viável para previsão da tensão admissível a ruptura e a recalques



do solo, sendo apresentado por Freitas (2010) como uma das ferramentas mais utilizadas na atualidade devido à sua versatilidade e flexibilidade na simulação de problemas, permitindo a incorporação de diversas condições de contorno nos modelos construídos.

Os trabalhos desenvolvidos por: Costa (1999), Menegotto (2004), Moraes (2005), Duarte (2006), Russi (2007), Almeida (2009) tiveram grande enfoque no estudo das provas de carga sobre placa. Em Maceió, Falcão (2014) e Barreto (2015) deram início aos estudos no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas (CEG/UFAL). Apesar disso, nenhuma análise numérica desses resultados foi realizada.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho consiste em avaliar o comportamento tensão-recalque de solos da Formação Barreira por meio de simulações numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos, servindo como subsídio para o início dos estudos sobre o tema no Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas.

2 Metodologia

Realizaram-se 4 simulações numéricas utilizando o Software de Elementos Finitos Geotécnico Plaxis 2D.

As simulações foram baseadas nos ensaios de prova de carga realizados por Moraes (2011), Falcão (2014) e Barreto (2015) no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas. A área de estudo está inserida na Universidade Federal de Alagoas, localizada na parte alta da cidade de Maceió, no bairro Cidade Universitária, disposto sobre a Formação Geológica Barreiras. Segundo Moraes (2011), o local está inserido nas imediações do Centro de Tecnologia (CTEC), e possui uma área de 3.240 m² (72 x 45 metros), com a superfície do terreno compreendida entre as cotas de 77 a 78 metros, podendo então ser considerada uma área plana.

Na Figura 1 apresenta-se a disposição dos ensaios que os autores realizaram em relação ao Centro de Tecnologia, sendo estes quatro provas de carga (PC1, PC2, PC3 e PC4) em conjunto com quatro ensaios de sondagem à percussão (SPT1, SPT2, SPT3 e SPT4).

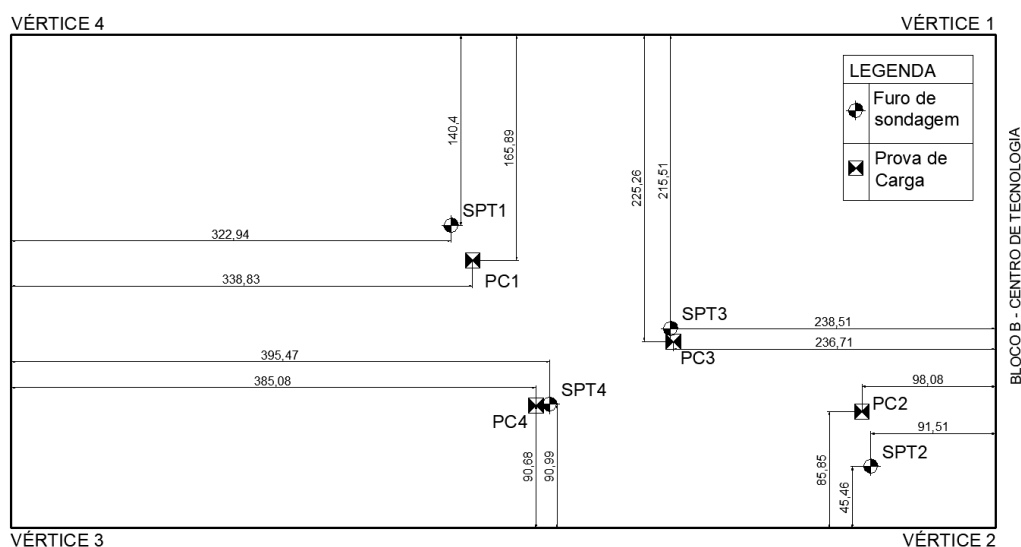


Figura 1 – Disposição dos furos de sondagem (SPT) e ensaios de prova de carga (PC) em relação ao Centro de Tecnologia

Para cada simulação, foram utilizados modelos axissimétricos sendo a malha de elementos triangulares de 15 nós. O critério de ruptura utilizado foi o de Mohr-Coulomb, tornando necessário informar como dado de entrada os valores da coesão, ângulo de atrito, peso específico natural, módulo de Young e coeficiente de Poisson.

Para a estimativa da coesão, ângulo de atrito e peso específico, Marques *et. al.* (2015) apresentam a Tabela 1 que relaciona esses parâmetros com o índice N_{spt}.



Tabela 1 - Estimativa da coesão, ângulo de atrito e peso específico pela correlação com o índice N_{spt}

Solos	N_{spt}	Peso específico (tf/m ³)	Coesão c (tf/m ²)
Argila e silte argiloso			
Muito mole	≤ 2	-	$< 1,25$
Mole	3 a 5	1,5	1,25 – 2,5
Média (o)	6 a 10	1,6	2,5 – 5,0
Rija (o)	11 a 19	1,6	5,0 a 10,0
Dura (o)	> 19	1,7	> 10
Areia e Silte Arenoso			Ângulo de Atrito (ϕ)
Fofa (o)	≤ 4	$< 1,5$	$< 26^\circ$
Pouco Compacta (o)	5 a 8	1,5	$28^\circ - 32^\circ$
Medianamente Compacta (o)	9 a 18	1,6	$32^\circ - 36^\circ$
Compacta (o)	19 a 40	1,7	$36^\circ - 40^\circ$
Muito compacta (o)	> 40	1,8	$> 40^\circ$

Fonte: Marques *et. al.* (2015)

Para a estimativa do Módulo de Young (E), Teixeira e Godoy (1996 *apud* CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011) apresentam a Equação 1.

$$E = a * K * N_{spt} \quad (11)$$

Onde, a e K são coeficientes empíricos dados pela Tabela 2 e pela Tabela 3, respectivamente, em função do tipo de solo.

Tabela 2 - Coeficiente a

Solo	a
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)

Tabela 3 - Coeficiente K

Solo	K (MPa)
Areia com pedregulho	1,10
Areia	0,90
Areia siltosa	0,70
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,30
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,20

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)

Já para a estimativa do Coeficiente de Poisson (ν) Teixeira e Godoy (1996 *apud* CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011) apresentam a Tabela 4 com valores típicos para o coeficiente de acordo com o tipo de solo.

Tabela 4 - Coeficiente de Poisson

Solo	ν
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,3 – 0,5
Argila saturada	0,4 – 0,5
Argila não saturada	0,1 – 0,3

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2011)



Por fim, os resultados foram avaliados quanto a similaridade das curvas tensão-recalque e dos valores de tensões e recalques admissíveis obtidos pelas simulações, com as obtidas em estudos anteriores no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas (CEG/UFAL).

4 Resultados e Análises

4.1 Simulação 1

O modelo geométrico utilizado na simulação 1 foi composto por seis camadas, resultando em um perfil de 11m. Calculou-se para cada camada o N_{spt} médio para utilização nos equacionamentos propostos na metodologia.

Na Tabela 5 apresenta-se um resumo de todos os dados de entrada utilizados na simulação.

Tabela 5 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 1, onde N_{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, ϕ o ângulo de atrito, E o módulo de elasticidade do solo e ν o coeficiente de Poisson

Camada	Espessura – h (m)	N_{spt}	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	E (kN/m ²)	ν
1	1	6,5	16	16,7	18,67	13650	0,1
2	4	7	16	16,7	18,67	14700	0,1
3	1	9	16	33,3	21,33	18900	0,1
4	3	13,5	16	50	22,67	28350	0,1
5	1	17,5	16	100	24	36750	0,1
6	1	18	16	100	24	37800	0,1

Seguiu-se para a realização da análise de tensão-recalque definindo-se a carga máxima como a atingida pelo último estágio da prova de carga 1; no caso 280 kPa. Apresenta-se na Figura 2 a curva tensão-recalque, caracterizada pelo alcance de tensões próximas a 280 kPa, e recalque máximo na ordem de 160 mm.

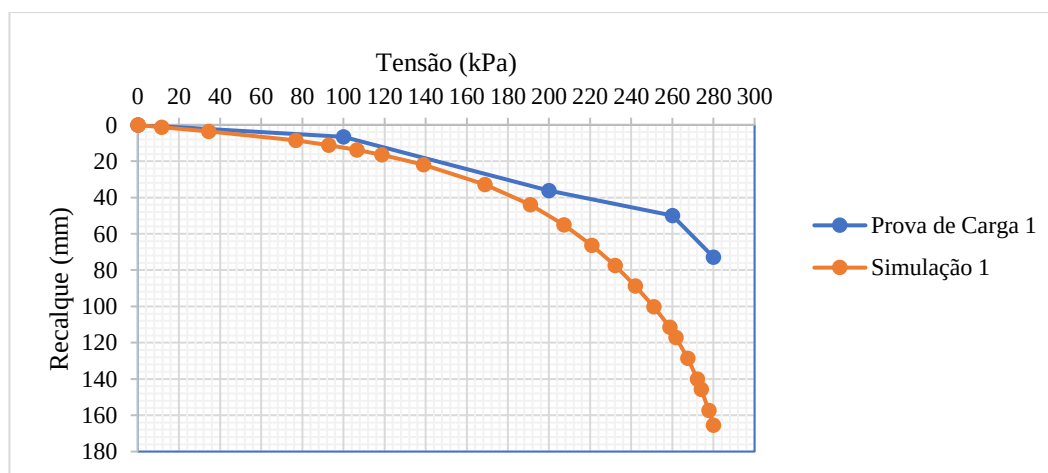


Figura 2 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 1 com a da simulação 1

Observa-se na comparação entre a curva experimental e a curva simulada um comportamento tensão-recalque bastante semelhante até valores próximos da tensão de 200 kPa, quando ocorre uma acentuação nos valores de recalque por parte da curva simulada.

Como no ensaio de prova de carga não foi possível observar uma ruptura nítida do maciço, foi necessário realizar o método de extrapolação de Van Der Veen resultando em uma tensão admissível de 153 kPa e um recalque admissível de 21 mm. Já para a simulação, observa-se uma tensão admissível de 145 kPa e recalque de 25 mm.



4.2 Simulação 2

O modelo geométrico da simulação 2 é composto por três camadas, resultando em um perfil de 11 m. Na Tabela 6 apresenta-se um resumo de todos os parâmetros utilizados.

Tabela 6 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 2 onde N_{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, ϕ o ângulo de atrito, E o módulo de elasticidade do solo e ν o coeficiente de Poisson

Camada	Espessura – h (m)	N_{spt}	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	E (kN/m ²)	ν
1	2	9,33	16	13,3	21,33	19593	0,1
2	7	16,12	16	75	22,67	33852	0,1
3	2	23	16	100	24	48300	0,1

Observa-se pela Figura 3 que a simulação atingiu tensões próximas a 900 kPa, caracterizado como o ponto de recalque máximo, apresentando valores na ordem de 300 mm.

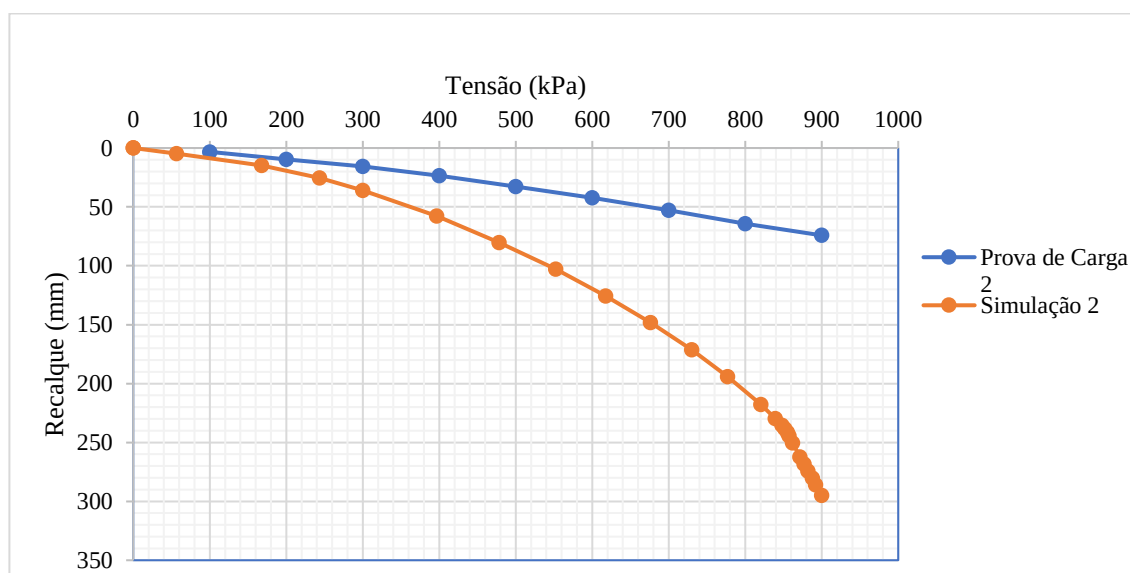


Figura 3 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 2 com a da simulação 2

Em relação a comparação entre a curva experimental e a curva simulada, na Figura 39 observa-se que os valores de recalque estiveram sempre abaixo da curva experimental, apresentando também valores de recalque excessivo para tensões maiores que 300 kPa.

Assim como na primeira prova de carga, foi necessário realizar um método de extrapolação, resultando em uma tensão admissível de 745 kPa e recalques admissíveis de 57 mm. Na simulação 2 os valores apresentados foram de 480 kPa para a tensão e 80 mm para o recalque.

Percebe-se com isso que pela avaliação das tensões admissíveis da primeira simulação que os resultados não se apresentaram de forma representativa com o solo da região. Como exposto por Falcão (2014), a curva tensão-recalque obtida pela prova de carga 2 se apresentou distinta da prova de carga 1 e das provas de carga 3 e 4 obtidas por Barreto (2015), caracterizando-se por uma resistência elevada.

Apresentam-se como possíveis causas da diferença entre as curvas a ocorrência de problemas durante a execução do ensaio de prova de carga, erros nos dados de entrada previstos e a má qualidade da malha gerada. Como forma de avaliar a precisão dos dados de entrada, realizou-se uma simulação extra com os parâmetros do solo obtidos experimentalmente pelos trabalhos de Moraes (2011) e Falcão (2014), mas, apesar disso, não houveram mudanças significativas nos resultados, indicando que os problemas foram decorrentes ou da execução do ensaio ou da qualidade da malha gerada.



4.3 Simulação 3

O modelo geométrico da simulação 3 é composto por quatro camadas, resultando em um perfil de 11m. Apresenta-se na Tabela 7 um resumo de todos os parâmetros utilizados.

Tabela 7 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 3 onde N_{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, ϕ o ângulo de atrito, E o módulo de elasticidade do solo e ν o coeficiente de Poisson

Camada	Espessura – h (m)	N_{spt}	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	E (kN/m ²)	ν
1	2	6,33	16	16,7	18,67	8862	0,1
2	3	8,5	16	25	21,33	11900	0,1
3	5	15,83	16	75	22,67	25480	0,1
4	1	24	17	100	24	46200	0,1

Observa-se na Figura 4 que a simulação atingiu tensões próximas a 300 kPa, caracterizado como o ponto de recalque máximo, apresentando valores na ordem de 100 mm.

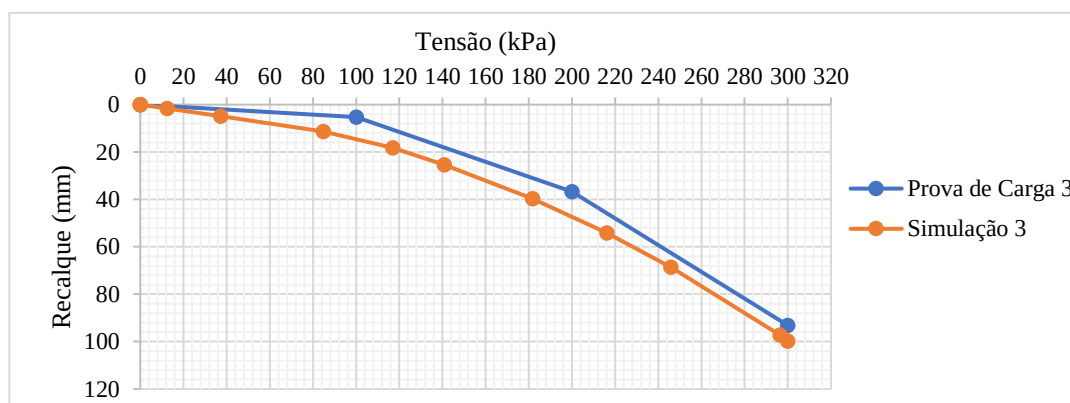


Figura 4 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 3 com a da simulação 3

Como pode-se observar, nenhuma das curvas apresentou ruptura nítida do maciço, sendo assim, foi necessário realizar a extrapolação em ambas as curvas. Em relação à prova de carga, obteve-se uma tensão admissível de 159 kPa e recalque admissível de 28 mm, e para a simulação, 170 kPa e 35 mm.

Observa-se uma grande semelhança na forma de ambas as curvas, obtendo-se pela curva simulada valores mais elevados de recalque do que os obtidos experimentalmente. Ressalta-se também que diferentemente das outras duas simulações, esta não apresentou diferenças significativas nos valores de recalque, sendo a maior diferença na ordem de 10 mm.

4.4 Simulação 4

O modelo geométrico da simulação 4 é composto por seis camadas, resultando em um perfil de 11m. Apresenta-se. Na Tabela 8 tem-se um resumo de todos os parâmetros utilizados.



Tabela 8 - Apresentação dos parâmetros de entrada estimados para a simulação 4 onde N_{spt} é o índice SPT, γ o peso específico natural, c a coesão, ϕ o ângulo de atrito, E o módulo de elasticidade do solo e ν o coeficiente de Poisson

Camada	Espessura – h (m)	N_{spt}	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	E (kN/m ²)	ν
1	1	5	15	16,7	18,67	10500	0,1
2	5	7,33	16	16,7	21,33	15393	0,1
3	1	19,5	17	100	24	40950	0,1
4	1	29	17	100	24	60900	0,1
5	1	28	17	100	24	58800	0,1
6	2	19	16	100	24	39900	0,1

Observa-se na Figura 5 que a simulação atingiu tensões próximas a 300 kPa, caracterizado como o ponto de recalque máximo, apresentando valores na ordem de 110 mm..

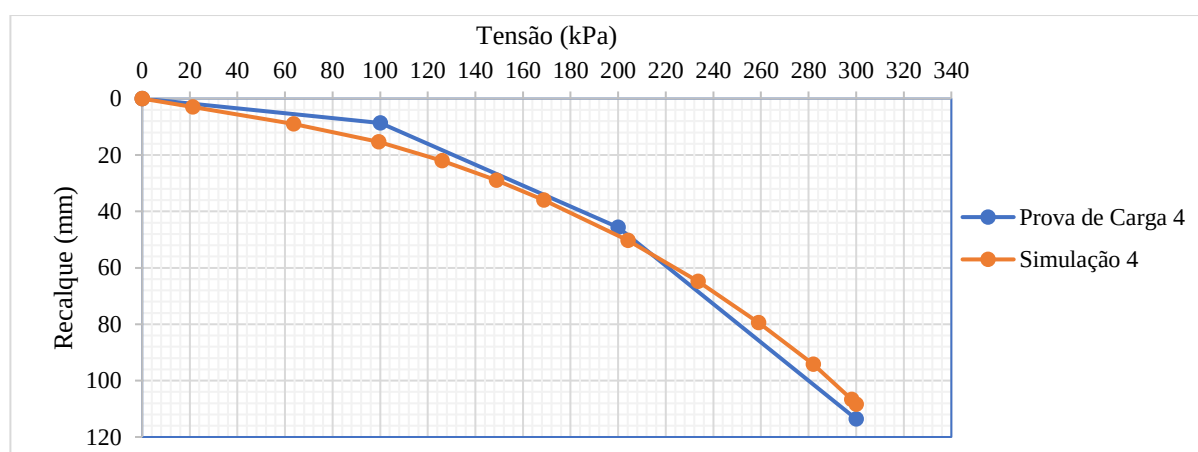


Figura 5 - Comparação entre as curvas tensão-recalque da prova de carga 4 com a da simulação 4

Como pode-se observar, nenhuma das curvas apresentou ruptura nítida do maciço, sendo assim, foi necessário realizar a extrapolação em ambas as curvas. Em relação à prova de carga, obteve-se uma tensão admissível de 159 kPa e recalque admissível de 28 mm, e para a simulação, 165 kPa e 35 mm.

5 Conclusão

Considera-se a utilização do *software* Plaxis 2D para determinação do comportamento tensão-recalque de um solo da Formação Barreiras como uma boa alternativa, apresentando resultados bastante próximos aos de provas de carga sobre placas utilizando como dados de entrada valores de fácil previsão por equacionamentos que se utilizam do índice N_{spt} .

Apesar disso, o *software* é regido pela sua simplicidade, que apesar de possibilitar a obtenção dos resultados de forma bastante rápida e prática, restringe o usuário as opções disponíveis. Sendo assim, constata-se que a limitação quanto a forma dos elementos em triangulares de 6 ou 15 nós pode ocasionar no aumento do custo computacional de forma excessiva em problemas mais complexos. Além disso, ressalta-se que a inexistência de uma função para edição das malhas impossibilita o processo de estruturação das malhas, dificultando na avaliação da qualidade das simulações.

Em relação ao comportamento geral entre as curvas tensão-recalque, as obtidas pelas simulações 1, 3 e 4 apresentaram comportamento bastante similares aos das experimentais, ocorrendo pequenas variações nos valores de recalque que não impactariam no dimensionamento geotécnico. Já a obtida pela simulação 2 apresentou-se bastante discrepante da realidade, indiciando a existência de problemas quanto a execução do ensaio, aos dados de entrada e/ou na qualidade da malha gerada.



AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas e à AGM Geotécnica LTDA por todo o apoio na realização do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. P. B. *Prova de carga rápida com recalque estabilizado*. 2009. 79p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- Barreto, V. J. M. *Estudo do Comportamento do Solo através de Provas de Carga sobre Placa no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.
- Cintra, J. C. A.; Aoki, N.; Albiero, J. H. *Fundações Diretas: Projeto Geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- Costa, Y. D. J. *Estudo do comportamento de solo não saturado através de provas de carga em placa*. 1999. 138p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- Duarte, L. N. *Análise de prova de carga instrumentada em uma sapata rígida*. 2006. 118p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.
- Falcão, V. B. *Execução e análise de prova de carga sobre placa no campo experimental da Universidade Federal de Alagoas*. 2014. 82p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.
- Freitas, A. C. *Contribuição ao estudo do efeito tridimensional de instalação e de grupo em estacas em areias*. 2010. 231p. Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2010.
- Marques, A. G. et. al. *Métodos de investigação do subsolo*. 3. ed. Maceió: EDUFAL, 2015.
- Menegotto, M. L. *Previsão da curva tensão-recalque de ensaios de placa em solo não saturado*. 2004. 224p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- Moraes, L. S. *Prova de carga dinâmica em placa*. 2005. 144p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- Morais, T. S. O. *Implantação do Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Federal de Alagoas*. Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.
- Russi, D. *Estudo do comportamento de solos através de ensaios de placa de diferentes diâmetros*. 2007. 147p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- Teixeira, A. H.; Godoy, N. S. *Análise, projeto e execução de fundações rasas*, in: HACHICH, W. et. al. (ed.) *Fundações: Teoria e prática*. São Paulo: Pini, Cap. 7, p. 227-264, 1996.