



Análise Numérica da Influência da Redução do Diâmetro de Placa em Prova de Carga Direta Sobre Terreno de Fundação

Pedro Henrique de Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, phenrique2395@gmail.com

Jean Rodrigo Garcia

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, jean.garcia@ufu.br

RESUMO: A prova de carga direta apresenta-se como um dos principais métodos para caracterização de um solo de fundação, esta é realizada por meio da aplicação de carga sobre uma placa rígida de aço. A norma brasileira preconiza placa com diâmetro mínimo de 80cm. Entretanto, em outros países se utilizam diâmetros inferiores ao utilizado no Brasil. Nesse sentido, este trabalho pretende analisar os efeitos da redução do diâmetro da placa nos parâmetros obtidos pela realização deste ensaio. Para tanto, foram ensaiadas placas com diâmetro de 80, 70, 60, 50, 40 e 30 cm por meio de um modelo numérico em elementos finitos utilizando-se do software RS2 da Rocscience. Constatou-se que para baixos níveis de tensões existe um comportamento linear do recalque aumentando-se o diâmetro de placa para um mesmo nível de tensão. A análise da tensão admissível variou com os critérios de ruptura adotados, sendo que alguns destes critérios não apresentaram um crescimento linear da tensão, como é previsto em modelos teóricos. O coeficiente de reação vertical do solo apresentou um comportamento não linear decrescente com o aumento do diâmetro de placa. Por fim foi observado que o efeito escala do ensaio não ocorre para baixos níveis de tensões.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de carga direta, fundações rasas, elementos finitos.

1 INTRODUÇÃO

Diversos projetos de engenharia de fundações são elaborados diariamente, sob os mais variados tipos de carregamento oriundos da superestrutura. Por outro lado, esses projetos são muitas vezes dimensionamentos para um elevado fator de segurança, muito acima do valor mínimo exigido por norma. As simplificações adotadas nos modelos analíticos de cálculo, assim como o prazo e o custo para realização de ensaios em campo, podem ser apontadas como uma das causas desse aumento no fator de segurança, que diminui o risco, porém onera drasticamente o custo da obra. A literatura ainda não apresenta uma vasta variedade de estudos sobre o ensaio de prova de carga em placa, sendo assim, é necessário compreender minuciosamente as peculiaridades

do ensaio visando compreender não só a sua importância e limitação, mas também otimizá-los sob o aspecto de eficiência técnica e econômica.

A pesquisa tem por objetivo analisar numericamente os efeitos da redução do diâmetro da placa nos parâmetros do solo obtidos pela realização do ensaio de carregamento, e do comportamento não linear da influência do diâmetro da placa no recalque do solo, partindo de dados já existentes na literatura, afim de se obter um modelo otimizado do ensaio geotécnico. Para tal fim foram verificados o efeito da tensão admissível do solo por meio dos critérios de B/30, Pré-adensamento, Leonards e Boston, a variação do coeficiente de reação vertical do solo a uma dada tensão, a proporcionalidade entre recalque e a variação do diâmetro de placa para um



mesmo nível de tensão e por fim a análise do efeito escala nos ensaios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Prova de Carga Direta

A prova de carga direta consiste de um ensaio realizado em campo, tendo como principal finalidade, compreender o comportamento de um elemento de fundação quando submetido à carregamentos de compressão, estimando assim parâmetros representativos de resistência e de recalque do solo, simulando o que ocorrerá com o solo quando submetido aos carregamentos da estrutura (Costa, 1999).

O ensaio consiste na instalação de um sistema de reação que aplicará por meio de uma placa circular rígida de aço, cargas em estágios crescentes. O ensaio é realizado até que ocorra ruptura abrupta do solo ou se obtenha deslocamento vertical total significativo e a partir deste seja possível estimar a carga de ruptura por meio de métodos de extrapolação da curva carga vs recalque. Entretanto, a carga de ruptura é tipicamente determinada por critérios de ruptura baseados no recalque limite para 10mm ou 25mm de deslocamento, uma vez que não se observa na grande maioria dos solos ensaiados o tipo de ruptura abrupta ou nítida.

Terzaghi (1943) em sua formulação da capacidade de carga dada pela Equação 1 em que percebe-se que com o aumento da dimensão (B) da sapata também resulta no aumento da tensão resistente (σ_r).

$$\sigma_r = cN_c + qN_q + \gamma \frac{B}{2} N_\gamma \quad (1)$$

A teoria indica que para um ensaio de prova de carga direta a relação entre o diâmetro da placa e a tensão resistente obtida deve ser verificada. Essa equação pode ser plotada graficamente, como realizado por Vianna (2005) representada na Figura 1.

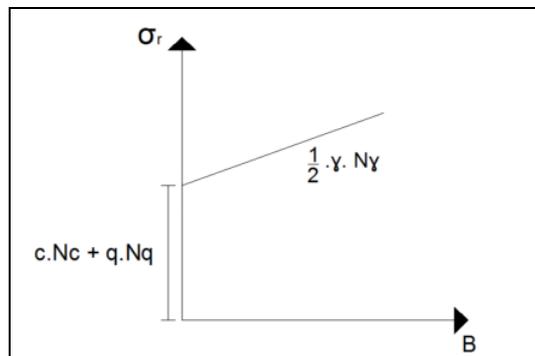


Figura 1. Capacidade de carga em função da largura B da sapata

Porém, para estudo do efeito da redução do diâmetro de placa no ensaio de prova de carga direta, Russi (2007) realizou 7 ensaios com placas de 15, 30 e 50 cm de diâmetro a uma profundidade de 0,7m escavado manualmente. A Figura 2 apresenta as curvas tensão x recalque obtidas, contradizendo a formulação teórica em que se esperaria que a placa de maior diâmetro apresentasse maior capacidade de carga a um critério de ruptura definido.

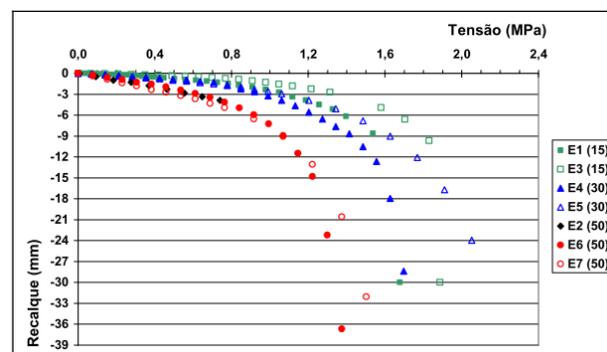


Figura 2. Curvas tensão x recalque de provas de carga com diferentes diâmetros

Araújo (2016) também realizou ensaios de prova de carga com placas com diâmetro de 30, 50 e 80 cm, foi observado resultados que corroboram com a pesquisa de Russi (2007), observando uma relação não linear entre o diâmetro de placa e capacidade de carga obtida para diferentes critérios de ruptura.

Décourt; Quaresma Filho (1996) ensaiaram provas de carga com mini placas de diâmetro 12,7 cm em comparação a um ensaio com



tamanho de placa convencional de 80 cm. Eles apontam que o efeito escala notado em outras pesquisas, o aumento do diâmetro da placa ocasiona menores tensões resistentes, inexistente uma vez que se normaliza os recalques pelo lado da placa carregada juntamente com as tensões normalizadas pela tensão de ruptura convencional

Vargas (1978) apresenta um gráfico ao qual relaciona o diâmetro da placa com o recalque medido. Este autor observou que para determinado intervalo de diâmetro há uma proporcionalidade entre o deslocamento da placa em contato com o solo e as dimensões desta (Figura 3). Nesta, verifica-se a existência de proporcionalidade na curva recalque vs diâmetro, variando linearmente entre os pontos “C” e “D”. Entretanto, mesmo para diâmetros menores que 80cm resta uma margem para redução do diâmetro, revelando a existência de uma placa de dimensão ótima que proporcione ensaios menos onerosos e mais rápidos em comparação ao padrão utilizado em território brasileiro.

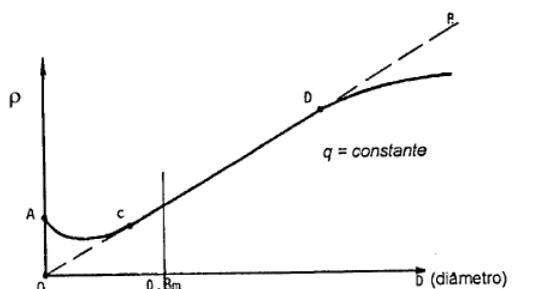


Figura 3. Curvas tensão x recalque de provas de carga com diferentes diâmetros

Araújo et al. (2017) realizou ensaios em placas de diâmetros 30, 50 e 80 cm em solo arenoso e observou que para o mesmo nível de tensão aplicado ao solo existe um acréscimo não linear dos recalques (Figura 4). Ainda segundo os autores, o aumento da placa implica em uma quantidade maior de solo se deformando, o que resulta em maiores deslocamentos. Porém o efeito contrário também é notado. O aumento das dimensões da

placa gera um bulbo de tensões mais profundo sob a superfície, o que ocasiona uma massa de solo mais rígida dentro do bulbo devido ao efeito de confinamento, produzindo assim menores deslocamentos. A combinação desses efeitos opostos, resultam em um comportamento não linear do deslocamento da placa com o aumento do diâmetro.

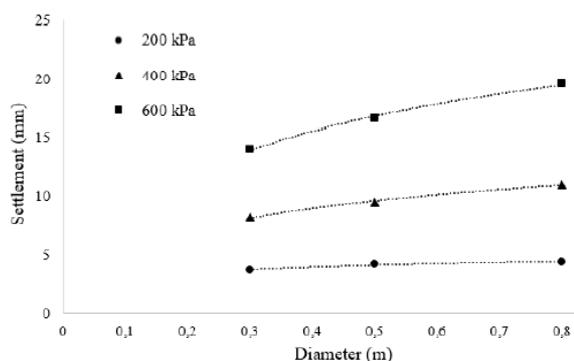


Figura 4. Deslocamentos vs dimensão de placa em vários níveis de tensões

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar a influência da redução do diâmetro de placa do ensaio de prova de carga no comportamento carga vs recalque, foi utilizado um modelo numérico em elementos finitos, por meio do software RS2 que permite simular o comportamento elastoplástico não-linear do solo.

Para calibração do modelo numérico foi utilizado os dados experimentais de um ensaio de prova de carga apresentado por Araújo (2016). Com a obtenção de todos os parâmetros necessários para o software, foi realizado simulações com diâmetros de 30, 40, 50, 60, 70 e 80 cm e as análises com os resultados obtidos.

A composição numérica do problema foi realizada partindo que o ensaio de prova de carga possui uma axissimetria em torno do eixo y, desenhando assim apenas metade da placa e posicionando-a no eixo vertical de $x=0$.

A geometria axissimétrica do problema a qual foi realizada as simulações de prova de carga e



o diâmetro D foram simuladas com diversos valores como já citado no começo dessa seção. (Figura 5).

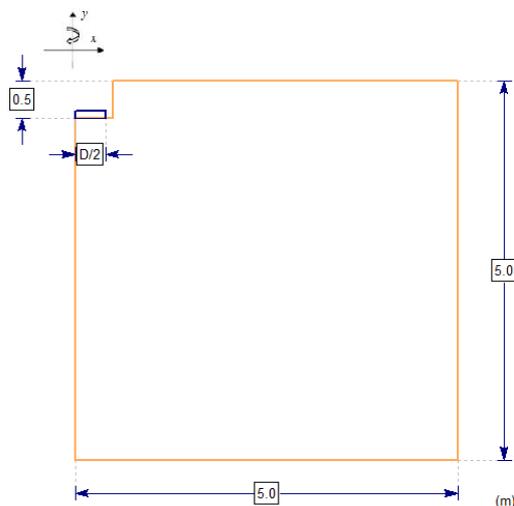


Figura 5. Geometria axissimétrica do modelo numérico

A malha de elementos finitos foi discretizada com elementos triangulares de 6 pontos e a malha ideal foi escolhida por meio de testes de convergência. As condições de contorno adotadas foram deslocamentos em x e y impedidos para a base da camada, deslocamentos em x impedidos para as laterais e deslocamentos em x e y livres para o topo. (Figura 6)

As condições de contorno adotadas, assim como a malha são apresentadas na Figura 6, a malha apresentada é utilizada para introdução dos testes de convergência.

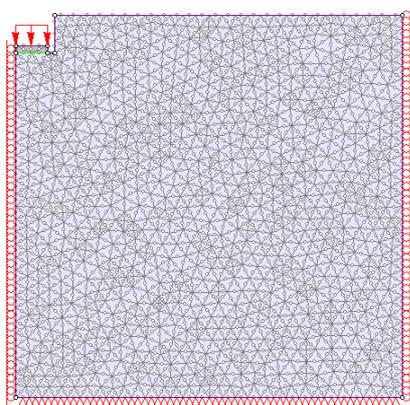


Figura 6. Malha inicial e condições de contorno do modelo numérico

O modelo constitutivo do solo utilizado nesse trabalho foi o de Mohr- Coulomb que possibilita a análise do comportamento elastoplástico e não linear do material. Para esse modelo é necessário determinar os valores de Módulo de Elasticidade (E), ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) e Coeficiente de Poisson (ν). Para a placa de aço foi atribuída um modelo Elástico-Linear, garantindo a sua rigidez com uma espessura de 10 cm.

Os parâmetros inicialmente adotados para as simulações partiram do trabalho de Araújo (2016). Estes são mostrados pelas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Parâmetros adotados para o modelo de Mohr-Coulomb

Parâmetro	Unidade	Valor
E	MPa	27
ϕ	°	32
c	kPa	1
ν	-	0,3

Tabela 2. Parâmetros adotados para a placa de aço

Parâmetro	Unidade	Valor
E	GPa	210
ν	-	0,3

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Escolha da Malha de Elementos Finitos

Para escolha da malha ideal que melhor representasse a solução real do problema, foram testadas 4 configurações diferentes, a Malha 01 com 4236 nós e 2055 elementos, a Malha 02 com 5163 nós e 2510 elementos, a Malha 03 com 7235 nós e 3546 elementos e a Malha 04 com 14163 nós e 7010 elementos (Figura 7).

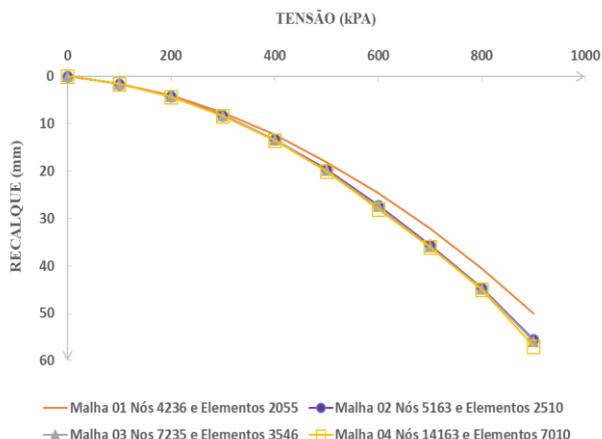


Figura 7. Resultados de convergência das malhas de elementos finitos

Os resultados das Malhas 02, 03 e 04 convergiram para resultados muito próximos, portanto para as análises deste trabalho foi usada uma configuração de malha conforme a mostrado na Malha 02 com 5263 nós e 2510 elementos. (Figura 8).

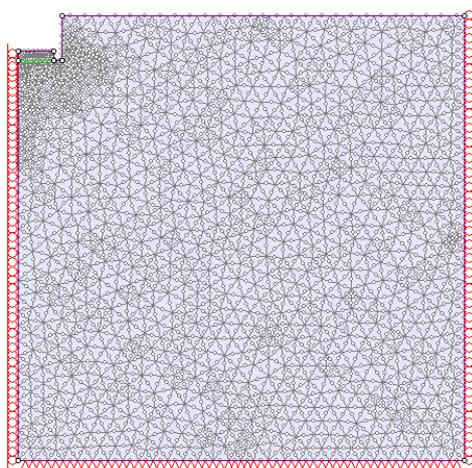


Figura 8. Configuração da Malha 02

4.2 Análise da Rigidez da Placa

A rigidez da placa de aço foi verificada para 3 espessuras diferentes, com 5, 10 e 15 cm. A proposta dessa verificação é garantir que placa se comporte como um elemento rígido durante os ensaios, respeitando assim as condições reais do problema de prova de carga.

Foi analisado os recalques produzidos conforme a variação da espessura da placa para

3 pontos distintos na superfície imediatamente inferior do material (Figura 9), mantendo-se constantes os carregamentos, diâmetro da placa e os parâmetros dos materiais. Os valores individuais de recalques para os pontos escolhidos a tensão de referência de 400 kPa são apresentados na Tabela 3.

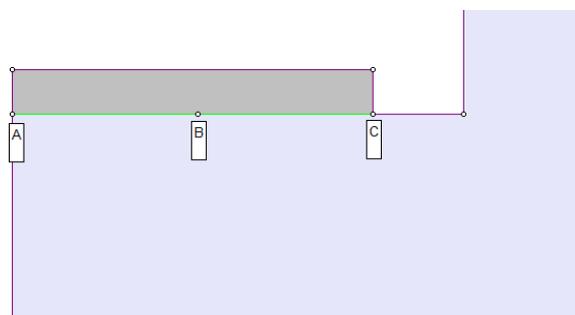


Figura 9. Pontos de medição dos recalques

Tabela 3. Recalques medidos nos pontos A, B e C

Espessura da placa (cm)	Recalque (mm)		
	Ponto A	Ponto B	Ponto C
5	13,2	13,2	13,2
10	13,2	13,2	13,2
15	13,9	13,9	13,9

A variação da espessura apresentou pequenas diferenças de deslocamentos verticais e todas apresentaram recalques uniformes na face de contato placa-solo, comportando-se como placas rígidas. Portanto foi adotado placas com espessura de 10 cm.

4.3 Resultado das Simulações Numéricas

Para simulação de calibração do modelo numérico foi utilizado os parâmetro já citados no capítulo anterior e nas seções 4.1 e 4.2.

Para todos os resultados apresentados foi adotado uma nomenclatura do tipo EX, em que “X” representa o diâmetro da placa utilizada no ensaio indicado e seguido de parênteses informando a natureza do resultado, podendo ser experimental ou numérico.

A Figura 10 apresenta o resultado numérico ensaiado para a placa de 80 cm. Como a curva não apresentou uma boa aproximação com os



resultados experimentais, foi realizado outros ensaios para melhor calibração dos parâmetros do solo. Alterando o Modulo de Elasticidade de 27 MPa para 35 MPa e a coesão de 1 MPa para 10 MPa chegou-se a curvas que melhor representassem o problema real, como é mostrado na Figura 11.

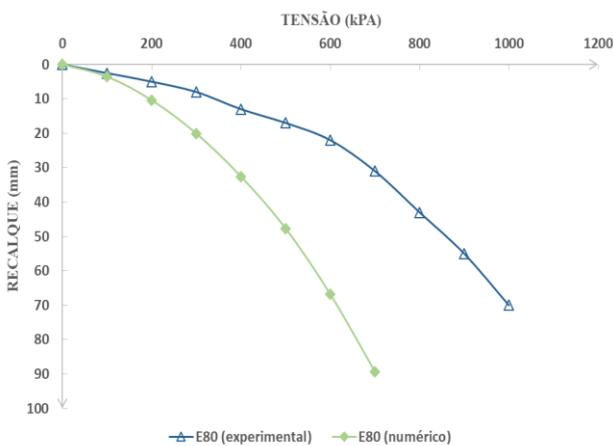


Figura 10. Resultado da calibração numérica com os parâmetros iniciais do solo

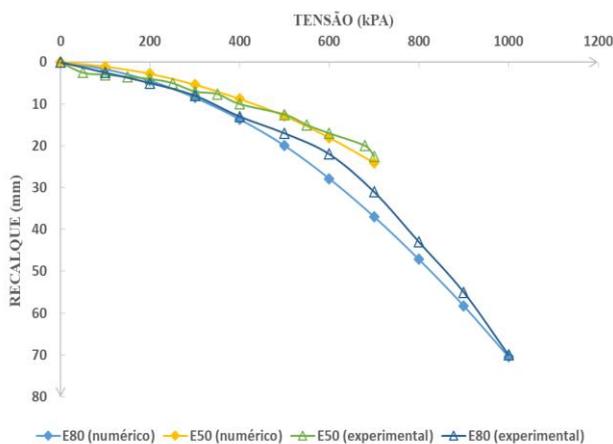


Figura 11. Resultados da calibração numérica com os parâmetros de solo ajustados

Uma vez com os parâmetros ajustados, foram realizados os ensaios com as demais dimensões de placas, como mostrado na Figura 12.

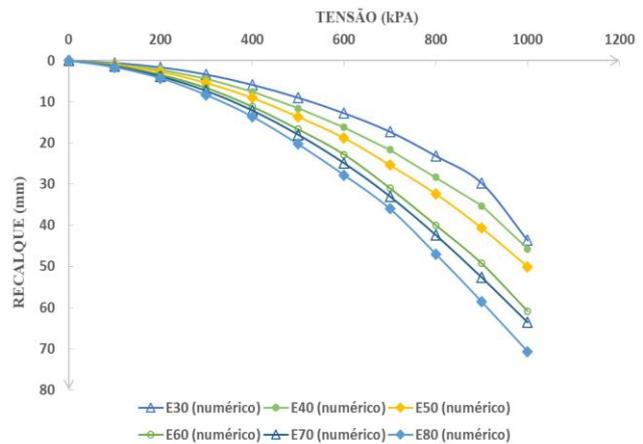


Figura 12. Resultado das simulações numéricas

4.4 Relação Entre o Diâmetro da Placa e Recalques

Para análise do efeito da variação do diâmetro da placa e o recalques, foi comparado os dados dos diversos ensaios a tensões fixas, como referenciado na Figura 4. Percebeu-se que para valores de tensões menores, se verifica uma linearidade entre os recalques, porém esta tende a não se comprovar para valores de tensões mais elevados (Figura 13).

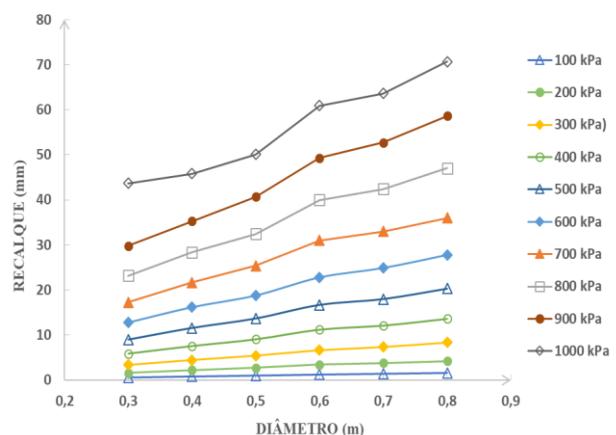


Figura 13. Diâmetro de placa vs Recalque

4.5 Coeficiente de Reação Vertical do Solo

O coeficiente de reação vertical do solo foi obtido pelo inverso do coeficiente angular de retas traçadas no começo de cada ensaio de



placa realizado (Figura 12). Observou-se uma relação decrescente e não linear entre o aumento do diâmetro e o coeficiente de reação vertical do solo, como já havia sido observado em resultados da bibliografia revisada.

O efeito decrescente se dá devido ao aumento do bulbo de tensões com o aumento do diâmetro da placa, alcançando maiores profundidades e conseqüentemente maiores volumes de solo, apresentando maiores recalques, como já foi observado com as curvas obtidas pelos ensaios (Figura 14).

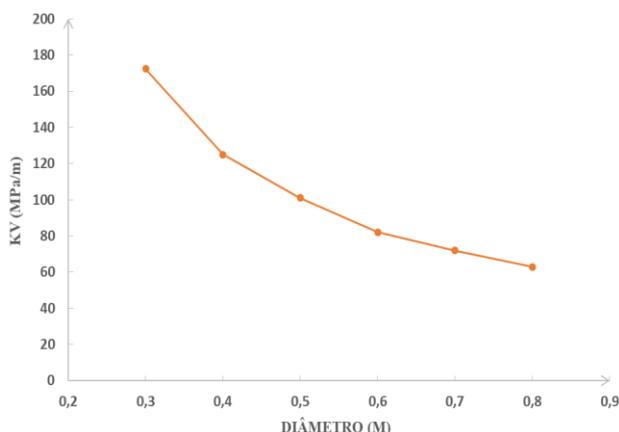


Figura 14. Relação entre coeficiente de reação vertical do solo em fundação do diâmetro de placa ensaiado

4.6 Tensão de Ruptura e Tensão Admissível

Nenhuma das curvas ensaiadas apresentou uma ruptura nítida, todas os ensaios mostraram uma crescente evolução dos valores de tensão com o aumento dos recalques. Como as normas referentes ao assunto (NBR 6489/84 e NBR 6122/2010) não apresentam nenhum critério para definir a tensão de ruptura em ensaios de prova de carga direta, foi adotado critérios já conhecidos pela bibliografia revisada.

Com base nos trabalhos de Russi (2007), Araújo (2016), Vianna (2005) foi considerado o critério de B/30 que faz analogia ao critério de ruptura convencional da NBR 6122/2010 para provas de carga em estaca, sendo que a capacidade de carga e a tensão correspondente a um recalque igual ao diâmetro da placa dividido

por 30, o critério do “Pré-adensamento” que faz referência ao método para determinação da tensão de pré-adensamento pelo método de Pacheco e Silva e o critério de Leonards, onde a tensão de ruptura é dada pela intersecção de duas tangentes, uma traçada na parte inicial da curva tensão x deformação e outra traçada na parte final da curva.

Para consideração da tensão admissível foi utilizado um fator de segurança igual a 2 aos critérios já mencionados. Estes foram comparados com o critério adotado pelo código de obras da cidade norte-americana de Boston. Os valores de tensão de ruptura e tensão admissível são mostrados pelas Tabelas 4 e 5, respectivamente

Tabela 4. Tensão de ruptura

Ensaio	Capacidade de carga (kPa)		
	B/30	Leonards	“Pré-adensamento”
E30	531	640	543
E40	529	570	556
E50	569	460	582
E60	564	430	587
E70	577	440	592
E80	590	340	603

Tabela 5. Tensão admissível

Ensaio	Capacidade de carga (kPa)			
	B/30	Leonards	“Pré-adensamento”	Boston
E30	266	320	272	415
E40	265	285	278	375
E50	284	230	291	350
E60	282	215	294	315
E70	284	220	296	300
E80	295	170	301	280

Observa-se que os critérios apresentam comportamentos distintos. Os critérios de B/30 e “Pré-adensamento” apresentam um aumento da capacidade de carga com o aumento do diâmetro, já os critérios de Leonards e Boston mostram o contrário. Estes dois últimos critérios se comportam de maneira contrária ao método teórico para determinação da capacidade de carga por Terzaghi (1943) (Figura 2.3), ao qual prevê um aumento da



resistência do solo com o diâmetro. Esse comportamento é esperado para o critério de Boston, uma vez que este fixa os recalques admissíveis e com o aumento do diâmetro da placa, maiores valores de recalques são alcançados para um mesmo nível de tensão, portanto resultando em menores tensões admissíveis. A variação da tensão admissível pelo diâmetro da placa ensaiada é mostrado pela Figura 15.

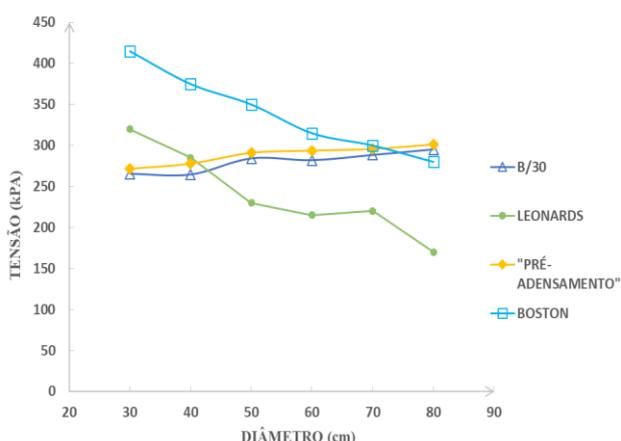


Figura 15. Tensão admissível vs Diâmetro de placa

4.7 Tensão de Ruptura e Tensão Admissível

Alguns autores para analisar o efeito escala com base nas curvas tensão-recalque, adimensionalizam o recalque obtido nos ensaios, dividindo-o pelo diâmetro da placa (recalque relativo). A partir da análise dos resultados obtidos pela plotagem dos dados tensão e recalque relativo, nota-se que houve uma convergência entre as curvas até tensões de 300 kPa, evidenciando que para valores de tensões baixas há baixa influência do efeito escala. (Figura 16).

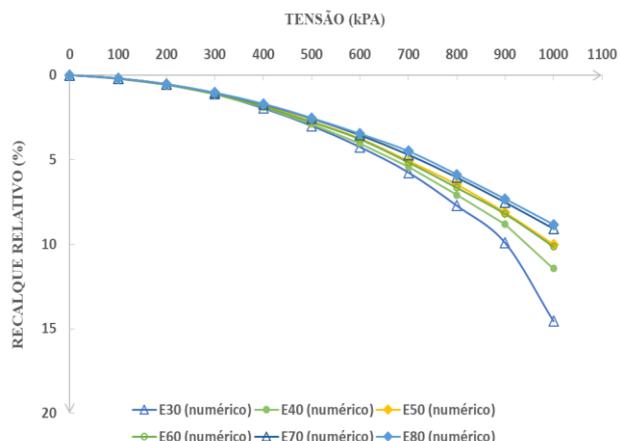


Figura 16. Curva tensão vs Recalque relativo

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas análises efetuadas e as considerações realizadas no decorrer do trabalho, é possível destacar as seguintes conclusões.

A modelagem numérica do ensaio de prova de carga apresenta boas aproximações em relação a ensaios realizados in-situ, uma vez que os parâmetros do modelo sejam previamente calibrados, comprovando os resultados encontrados na literatura técnica.

Para baixos valores de tensão é possível perceber um comportamento linear entre a variação do diâmetro de placa com os recalques, o que não ocorre para tensões elevadas. O comportamento linear encontrado neste trabalho evidencia a teoria de Vargas (1978), mostrando que existe uma margem para redução do diâmetro de placa no ensaio sem que haja perda de qualidade dos resultados obtidos por meio do ensaio em placa de terreno de fundação

O coeficiente de reação vertical do solo apresentou uma relação decrescente com o aumento do diâmetro de placa. Este comportamento já era esperado uma vez que quanto maior o diâmetro da placa maior será o bulbo de tensão criado, portanto a tensão alcança uma maior profundidade gerando efeito sobre um maior volume de solo, obtendo-se assim maiores recalques.

Os critérios utilizados para determinação da



capacidade de carga apresentam comportamentos divergentes entre si, que também é notado pelos trabalhos de Russi (2007), Araújo (2016), Vianna (2005). Os critérios de B/30 e “Pré-adensamento” mostraram comportamento similar, aumentando-se a capacidade de carga com o aumento do diâmetro. Este comportamento pode ser explicado para o critério B/30, uma vez que este não trabalha com valores fixos de recalques admissíveis, dependendo do diâmetro da placa ensaiada, portanto sempre aumentando o deslocamento limite e consequentemente o valor da tensão de ruptura e tensão admissível. Já critérios de Leonards e Boston apresentaram um comportamento decrescente com o aumento do diâmetro. Os resultados encontrados evidenciam que ainda é preciso se estudar mais afundo os critérios para capacidade de carga em ensaios de prova de carga direta quando estes não apresentam uma ruptura nítida, caso que é o mais comum na prática desse tipo.

A adimensionalização dos recalques nas curvas tensão-recalque mostrou que para baixos valores de tensões não há influência do efeito escala, porém este se mostra mais evidente para valores de tensões elevados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores e amigos que me apoiaram nessa caminhada pelo conhecimento científico. Um agradecimento especial para o suporte e infraestrutura da Universidade Federal de Uberlândia e a FAPEMIG, que tornaram a realização desta pesquisa e artigo viáveis.

REFERÊNCIAS

- Araújo, D. A. M.; Costa, C. M. L.; Costa, Y. D. J. *Dimension effect on plate load test results*. n. c, p. 1–6, 2017.
- Araújo, D. A. M. De. *Efeito da dimensão da placa em resultados de carga em areia*. [s.l.] Universidade federal do rio grande do norte, 2016.

- Costa, Y. D. J. *Estudo Do Comportamento De Solo Não Saturado Através De Provas De Carga Em Placa*, São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1999.
- Décourt, L.; Quaresma Filho, A. R. *Estabelecimento das curvas carga-recalque de fundações através de provas de carga em mini placa*. 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, p. 1–9, 1996.
- Russi, D. *Estudo do comportamento de solos através de ensaios de placa de diferentes diâmetros*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2007.
- Terzaghi, K. *Theoretical Soil Mechanics*. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1943.
- Vargas, M. *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: McGraw-Hill, 1978.
- Vianna, A. P. F. *Influência da dimensão e da sucção matricial no comportamento de fundações superficiais assentes em solo arenoso não-saturado*. [s.l.] São Carlos, 2005.