



Atrito em Fundações Profundas - Aplicação da Metodologia de Separação das Parcelas de Carga em Obra Comercial do Recife.

Gustavo Henrique Santos Souza
Engenheiro Civil, Recife, Brasil, gustavosouza.proj@gmail.com

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
Professor, Universidade de Pernambuco, pedro.soliveira@upe.br

Alexandre Duarte Gusmão
Professor, Universidade de Pernambuco, gusmao.alex@poli.br

Gilmar de Brito Maia
Engenheiro Civil, Gusmão engenheiros Associados, gilmar@gusmao.eng.br

RESUMO: Um dos desafios da engenharia de fundações consiste em separar as parcelas de atrito e ponta a partir de provas de carga estáticas (PCE). Com a finalidade de analisar os resultados de uma obra comercial, em Recife, de grande magnitude com mais de 4.000 estacas hélice contínua (400, 500 e 600 mm), e 40 PCEs, o presente artigo aplica a metodologia de OLIVEIRA ET AL, 2018, onde é possível se obter a parcela de atrito a partir do resultado do ensaio convencional de PCE com medições de deslocamentos do sistema de reação. Para tanto são encontrados os valores da relação carga da tração/carga da compressão (chamado de λ). Para o presente estudo de caso foi encontrado um λ médio de 0,579 (valor dentro da faixa esperada) com valores médios de atrito e ponta representados na carga total com 56,6 % e 43,4%, respectivamente. O recalque para o início da mobilização da parcela de ponta da amostra é de 3 mm (0,6% do diâmetro da estaca), próximo dos parâmetros da literatura que sugere que essa mobilização seja entre 1% e 2%, esse valor também representa 13% do recalque médio total.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas; Atrito; Capacidade de carga.

ABSTRACT: One of the challenges in foundation engineering is to separate the friction and tip components from static load tests (SLT). In order to analyze the results of a large-scale commercial project in Recife, which involved over 4,000 continuous helical piles (400, 500, and 600 mm), and 40 SLTs, this article applies the methodology by OLIVEIRA ET AL, 2018. This methodology allows obtaining the friction component from the conventional SLT with displacement measurements of the reaction system. For this purpose, the values of the tension load/compression load ratio (referred to as λ) are determined. For this specific case study, an average λ of 0.579 (within the expected range) was found, with average friction and tip values representing 56,6% and 43,4% of the total load, respectively. The settlement for the onset of tip mobilization in the sample is 3 mm (0.6% of the pile diameter), which falls near by the literature parameters suggesting mobilization between 1% and 2%. This value also represents 13% of the total average settlement.

KEYWORDS: Piles; Friction; Charge Capacity.



Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

Quando se fala em fundações profundas, é preciso entender que estes elementos da estrutura são projetados para descarregar os esforços vindos da estrutura no solo de duas maneiras diferentes. Através da resistência na superfície da ponta da estaca e pela resistência gerada pelo atrito lateral do fuste da estaca com o solo, que quando somadas representam sua resistência última.

Dentre os ensaios de campo para aferir a capacidade de carga suportada pela fundação, a Prova de Carga estática (PCE) é um dos muito utilizados na Engenharia de fundações, com fins de verificar e ter controle do desempenho da estaca. Durante a execução do ensaio, normalmente a peça não atinge o seu valor máximo de carga (carga última), uma vez que ainda será usado para compor o sistema de fundações. A partir disso, alguns métodos, como o de Van der Veen (1953), Chin (1970), Décourt (1996), foram desenvolvidos para estimar o valor limite de resistência do sistema e o recalque máximo correspondente a esta carga aplicada.

Outro dilema do estudo das fundações profundas é separar as parcelas de cargas de resistência de ponta e fuste, e entender seu comportamento individualmente, uma vez que a partir dos ensaios de PCE consegue-se ter apenas um panorama geral do comportamento do sistema quando carregado.

A partir disso, OLIVEIRA ET AL (2018) desenvolveu uma metodologia de separação dessas parcelas, utilizando os dados colhidos na PCE, e medindo os deslocamentos do sistemas de reação usados para realizar o ensaio. No presente artigo, será aplicada tal metodologia em dados colhidos de uma obra comercial do Recife, onde foi possível fazer a separação das parcelas de carga e identificar seus comportamentos.

2 Objetivos

O presente trabalho pretende estudar a metodologia desenvolvida por Oliveira et al (2018), com intuito de separar as parcelas de carga resistentes da estaca e correlacionar seus comportamentos e respectivos recalques. Como objetivos secundários, obtemos o coeficiente λ , definido como a carga no sistema de reação e no de compressão.

3 Características da obra

A edificação estudada foi construída para fins comerciais no bairro do Pina, em Recife. A obra foi concluída no ano de 2012, contando com 295.000 m² de área construída, tendo a estrutura executada em pré-moldados de concreto, e possui seis níveis de lajes. Conta ao total com 1.283 pilares com cargas variando entre 200 e 9000 kN.

O terreno no qual a edificação foi construída está localizado numa planície flúvio-marinha, dentro do terraço marinho diferenciado. Para a caracterização geotécnica foi realizado um conjunto de sondagens com determinação do Índice de Penetração a percussão (Nspt), ao total foram executados 68 furos de sondagem. Na figura 1 a seguir, pode-se ver a modelagem em 3D da edificação sobre o perfil simplificado do terreno.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





Figura 1. Modelagem 3D da edificação sobre perfil do terreno. (OLIVEIRA, 2013)

A solução de fundação escolhida foi a execução de estacas hélice contínua, com diâmetros de 400 mm, 500 mm e 600 mm, com cargas de trabalho máximas de 600, 1.150 e 1.500 kN. Ao total foram mais de 4000 estacas com comprimento definido a partir da métodos Antunes e Cabral (1996) e Alonso (1996), e variou de 18 a 28 metros.

Foi definida em projeto, a campanha de ensaios de provas de carga estática para as estacas, foram, no total, realizadas 40 PCEs, 02 de 400 mm, 11 de 600 mm e 27 de 500 mm, as quais vão ser analisadas mais a fundo neste artigo.

4 Metodologia

4.1 Método de Oliveira et al (2018)

O Método desenvolvido por Oliveira ET AL (2018) usa como base VAN DER VEEN (1953), tendo como proposta analisar duas curvas obtidas através dos resultados da Prova de Carga Estática, uma delas é a curva carga x recalque da estaca submetida a compressão, a outra é obtida medindo os deslocamentos das estacas que formam o sistema de reação. Nas figuras abaixo, podem ser vistos como funciona o sistema e as curvas obtidas no ensaio.



Figura 2. Esquema típico do ensaio. (ZHANG ET AL, 2013)

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



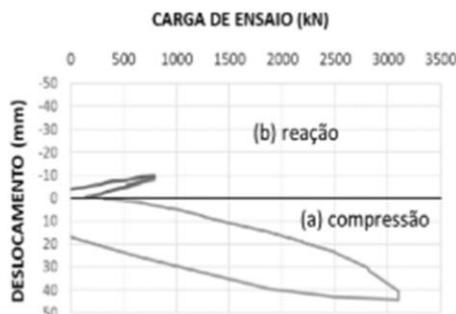


Figura 3. Curvas obtidas a partir dos ensaios (a) de compressão e (b) de reação. (OLIVEIRA ET AL, 2018)

O método se baseia na premissa simples, a carga última do sistema (Q_u) é dada pela soma das parcelas de atrito (Q_{al}) e ponta (Q_p).

$$Q_u = Q_{al} + Q_p$$

(1)

Considerando que no ensaio realizado nas estacas de reação (ensaio de tração) não existe a parcela de ponta, ou seja ($Q_p = 0$). Assim a carga última extrapolada nos ensaios de tração já é representada por a parcela de resistência ao atrito das estacas de reação.

$$Q_u, T = Q_{al, T}$$

(2)

OLIVEIRA ET AL (2018) definiu então o parâmetro λ , que corresponde a relação entre as cargas nos ensaios de tração e compressão, para um dado recalque. Obtém -se então a equação do λ , que considera que carga na tração é dada apenas pelo atrito lateral, enquanto a carga na compressão se dá pela soma das parcelas resistentes.

$$\lambda = Q_{al, T} / (Q_{al, C} + Q_{p, C})$$

(3)

Continuando a analisar o artigo de Oliveira (2018) pode-se observar que para pequenos deslocamentos, a parcela de ponta não é mobilizada, e é assumida com nula, sendo assim λ converge para equação xx como mostra a equação:

$$\lambda = Q_{al, T} / Q_{al, C} \quad \therefore Q_p = 0$$

(4)



Quando os deslocamentos aumentam e a parcela de ponta é solicitada, o valor de λ passa a diminuir. Para que se obtenha este parâmetro de forma contínua, Oliveira (2018) ajusta as curvas de tração e compressão a partir do Método de Van der Veen (1953), demonstrado na equação 05.

$$Q(s) = Qu \cdot (1 - e^{-a \cdot s - b})$$

(5)

Sendo adaptada para as estacas solicitadas à compressão, e também as estacas do sistema de reação (tração), como demonstrado nas equações a seguir:

$$Qc(s) = Qu,c \cdot (1 - e^{-\alpha,c \cdot s - \beta,c})$$

(5A)

$$Q_{AL,T}(s) = Q_{AL,T} \cdot (1 - e^{-\alpha,T \cdot s - \beta,T})$$

(5B)

Desta forma o atrito da compressão é determinado pela relação do atrito das estacas na tração e λ . A equação correspondente também é escrita em função dos parâmetros de Van der Veen.

$$\lambda(s) = \frac{Q_{al,T} \cdot (1 - e^{-\alpha,T \cdot s - \beta,T})}{Q_{u,C} \cdot (1 - e^{-\alpha,C \cdot s - \beta,C})}$$

(6)

Onde $Q_{al,T}$ é a carga do atrito lateral na tração (tf), $Q_{u,C}$ = carga ultima na compressão (tf), a e b são parâmetros definidos através de Van der Veen (1953) e s = recalque (mm).

O resultado esperado nesse método é o gráfico da curva λ x recalque, que como pode ser visto na figura 23, demonstra os momentos em que as parcelas de atrito lateral e ponta são mais solicitadas, bem como o valor de λ usado para fins de cálculo, que é representado pelo valor mais alto da curva.

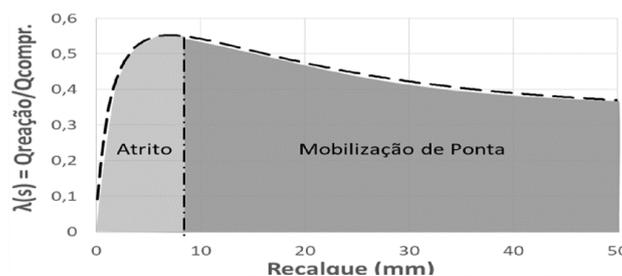


Figura 4. Gráfico modelo de λ em função do recalque. (OLIVEIRA ET AL, 2018)

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



O valor de parâmetro λ é muito discutido na literatura, a seguir na tabela, pode se observar alguns valores já usados:

Tabela 1. Valores sugeridos para λ . (PASCOALIN FILHO, 2008)

Autor	Cenário	Qal,T/Qal,c
Carneiro et al (1994)- USP	Estacas escavada	0,85
Berigen et al (1979)	Estacas cravadas	Entre 0,65 e 0,76
Brinch Hansen (1968)	Teoria da elasticidade	Entre 0,53 e 0,57
Poulos e Davis (1980)	Valor sugerido	0,67 (2/3)
Nicola e Randolph (1993)	Argilas saturadas	1,00
McClelland (1972)	Valor sugerido	0,70

A partir daí, pode-se definir os valores de Qal,C e Qp,C obtidos a partir das premissas:

$$Q_{al,C} = Q_{al,T}/\lambda$$

(7)

$$Q_{p,C} = Q_{u,C} - Q_{al,C}$$

(8)

Onde :

Qal,c = Carga da parcela de atrito lateral na compressão (tf)

Qp,c = Carga da parcela de ponta na compressão (tf)

Sendo assim, é possível identificar os valores que compõem a capacidade de carga da estaca separadamente.

A fim de automatizar o método de Oliveira et al. (2018), foram desenvolvidas duas planilhas eletrônicas que funcionam de forma simples e direta. Para aplicação do método, são usadas inicialmente as informações Qu, a e b, para as situações de compressão e reação das estacas, colhidas na aplicação de Van der Veen (1953), seguindo a equação 5, adaptada para as estacas de compressão e tração (equações 5A e 5B).

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Seguindo a aplicação do método, obtém-se o parâmetro λ , o gráfico da curva LAMBDA X RECALQUE. Vale ressaltar também, que a planilha indica o valor de λ máximo (ponto onde se inicia a mobilização da ponta), e seu recalque equivalente para efeito de cálculo.

Os resultados colhidos são inseridos em uma planilha geral das PCEs, onde tem-se o $\lambda_{\text{máx}}$ do gráfico plotado usado para efeitos de cálculo, e a carga última de ruptura das estacas de reação ($Q_{u,T}$), considerada igual a carga responsável pela resistência do atrito lateral na reação ($Q_{al,T}$), devido a ausência da parcela de ponta na reação

Com esses dados, o $\lambda_{\text{máx}}$ e a $Q_{u,T}$ ($Q_{al,T}$) são inseridos na equação 7, para obter-se a $Q_{al,C}$. Consequentemente, encontra-se a $Q_{p,C}$, pela equação 8, uma vez que temos a $Q_{al,C}$ e a $Q_{u,C}$ calculada no método de Van der VEEN (1953).

5 Resultados

De início, é importante apresentar os resultados colhidos nas PCEs, cargas máximas e recalques máximos para tração e compressão, e também os resultados ao aplicar o método de Van der Veen (1953). Sefundo Oliveira (2013) que estudou essa obra do ponto de vista das extrapolações de carga de ruptura, os métodos não convergem quando o recalque máximo de ensaio é inferior a 1% do diâmetro. Dessa forma, foram analisadas as provas de carga com recalques superiores a esse valor. Os resultados estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 2. Valores obtidos no ensaio de PCE e valores do ajuste de Van der Veen.
(AUTOR,2023)

PCE	$Q_{\text{máx},c}$ (tf)	$\Delta_{\text{máx}}$ (mm)	$Q_{\text{máx},t}$ (tf)	$\Delta_{\text{máx}}$ (mm)	$Q_{u,c}$ (tf)	α,c	β,c	$Q_{u,t}$ (tf)	α,t	β,t
2	231,4	13,3	60,7	5,2	269	0,14	0,06	86	0,24	-0,03
4	231,4	11,9	61,6	1,9	286	0,13	0,11	84	0,65	0,08
11	231,4	20,6	60,9	5,8	271	0,08	0,13	80	0,26	-0,06
15	231,4	28,3	61,6	6,3	277	0,06	0,05	113	0,12	0,03
16	231,4	11,7	61,6	4,8	256	0,19	0,06	77	0,34	0,00
18	191,6	85,9	61,6	6,5	192	0,06	0,29	78	0,23	0,05
19	231,4	15,3	61,6	5,9	270	0,12	0,04	71	0,32	0,07
21	231,4	27,9	61,6	6,3	267	0,07	0,06	75	0,27	0,02
22	231,4	21,6	61,6	7,1	257	0,10	0,08	71	0,30	-0,06
23	231,4	15,0	61,6	6,8	267	0,13	0,10	80	0,22	-0,05
24	231,4	21,1	61,6	6,0	267	0,09	0,02	79	0,25	0,00
25	231,4	17,4	61,6	6,7	265	0,12	-0,04	72	0,30	-0,09
26	231,4	27,3	61,6	6,3	253	0,09	0,05	73	0,28	0,07
27	231,4	13,6	61,6	6,9	289	0,14	0,06	79	0,22	0,01

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Onde: **PAG**



Avenida Rebouças, 353, Sala 74 A
Cerqueira César, São Paulo/SP, 05401-900
Telefone: (11) 3052-1284
E-mail: abef@abef.org.br

Organização:



Avenida T-9, 2310 - Ed. Inove Intelligent Place
Sala B701, Jardim América, Goiânia/GO, 74255-220
E-mail: secretaria@qeeventos.com.br
Site: www.qeeventos.com.br

$Q_{máx,c}$ = Carga máxima na compressão (tf);

$\Delta_{máx}$ = recalque máximo equivalente (mm);

$Q_{máx,t}$ = Carga máxima na tração (tf);

α e β = coeficientes estabelecidos por Van der Veen (1953), na tração e compressão.

Após a apresentação dos resultados da primeira etapa, temos os valores obtidos ao aplicar Oliveira et al (2018), onde podemos observar os valores obtidos para λ , o recalque onde a parcela de resistência pela ponta começa a ser mobilizada, a carga última, já vista em Van der Veen (1953), e as dimensões das parcelas de ponta e atrito lateral dentro do total.

Tabela 3. Valores obtidos na aplicação da metodologia OLIVEIRA ET AL(2018). (AUTOR, 2020)

PCE	$\lambda(s)$	$\Delta s(Q_{p,c})$ (mm)	$\Delta s(Q_{p,c})$ (%)	$Q_{u,c}$ (tf)	$Q_{al,c}$ (tf)	$Q_{al,c}$ (%)	$Q_{p,c}$ (tf)	$Q_{p,c}$ (%)
2	0,416	3,6	0,72	269	206,84	76,89	62,16	23,11
4	0,737	1,4	0,28	286	113,91	39,83	172,09	60,17
11	0,491	4,6	0,92	271	162,93	60,12	108,07	39,88
15	0,628	4,4	0,88	277	179,94	64,96	97,06	35,04
16	0,412	2,2	0,44	256	187,05	73,07	68,95	26,93
18	0,651	6,5	1,3	192	119,77	62,38	72,23	37,62
19	0,596	0,5	0,1	270	119,06	44,1	150,94	55,9
21	0,676	2,5	0,5	267	110,9	41,54	156,1	58,46
22	0,487	3,3	0,66	257	145,84	56,75	111,16	43,25
23	0,382	4,9	0,98	267	209,65	78,52	57,35	21,48
24	0,627	1,7	0,34	267	126,1	47,23	140,9	52,77
25	0,97	0,4	0,08	265	74,19	28	190,81	72
26	0,677	1,5	0,3	253	107,84	42,62	145,16	57,38
27	0,356	3,1	0,62	289	221,77	76,74	67,23	23,26

Onde:

$\lambda(s)$ = Coeficiente Lambda resultante;

$\Delta s(Q_{p,c})$ = Recalque equivalente para mobilização da ponta, em mm e %;

$Q_{u,c}$ = Carga última resistente da estaca, em tf;

$Q_{al,c}$ = Carga da parcela de atrito lateral, em tf e %;

$Q_{p,c}$ = Carga da parcela de ponta, em tf e %.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



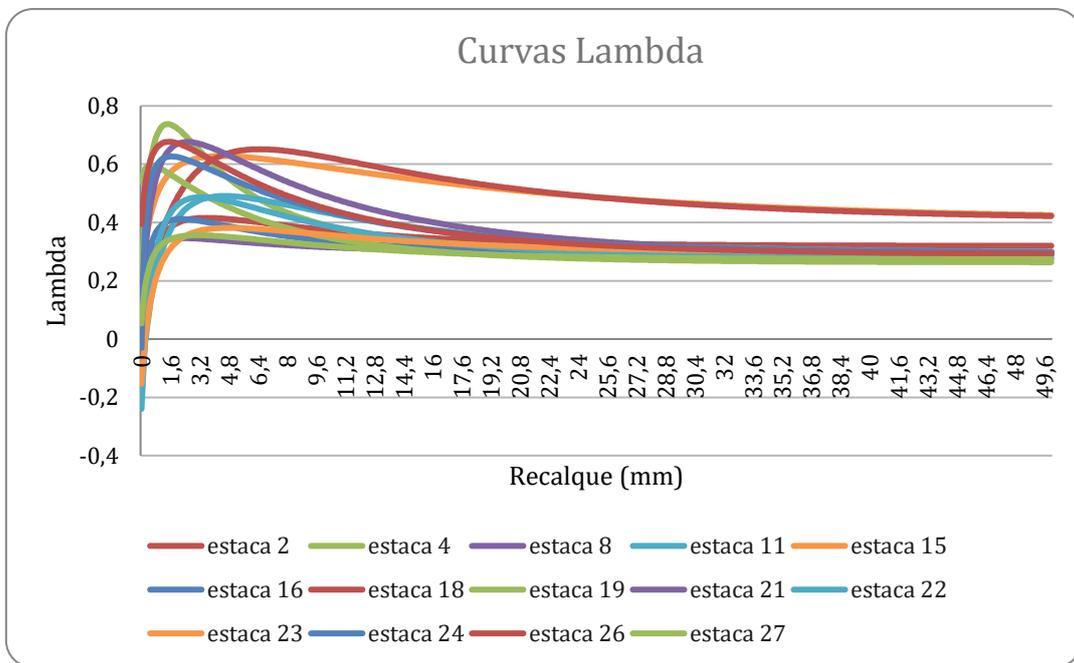


Figura 5. Gráfico representando as curvas LAMBDA x recalque. (AUTOR, 2023).

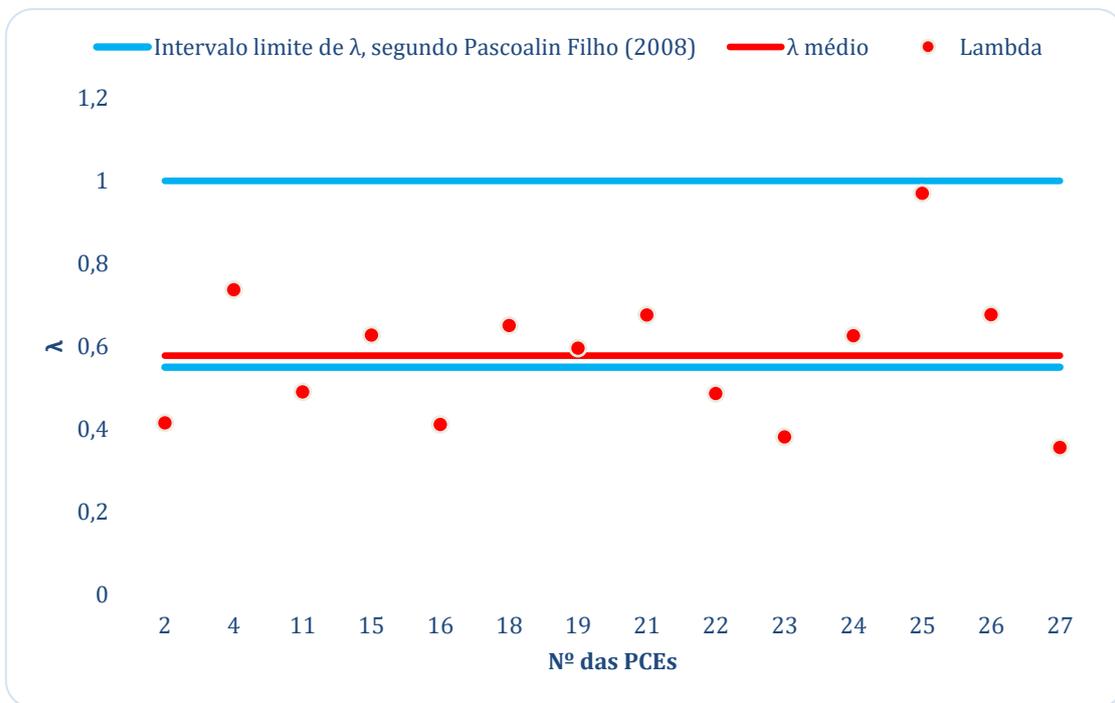


Figura 6. Gráfico de dispersão dos λ encontrados e valores na literatura. (AUTOR, 2023)

Foi encontrado um valor médio para o λ de 0,579, e recalque médio para a ponta ser mobilizada a partir de 3 mm (0,60% do diâmetro da estaca). Esses valores estão coerentes aos

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





estabelecidos por Oliveira et al (2018) e Brinch Hansen (1968) (Teoria da elasticidade), e dentro do intervalo que é levantado por Pascoal Filho (2008).

Outro dado interessante de se observar também, é a porcentagem das parcelas dentro do total. A parcela de resistência dada pelo atrito lateral representou 56,6% da carga última suportada pela estaca, enquanto a resistência dada pela ponta, representou 43,4 %.

6 Conclusão

A partir dos resultados obtidos, é possível afirmar que a metodologia de Oliveira et al (2018) tem uma boa aplicabilidade, uma vez que os números encontrados estão coerentes com as referências já testadas na literatura e a Teoria da elasticidade, para estacas com recalques acima de 1% do diâmetro. Vale ressaltar também que analisando os gráficos da curva $\lambda \times$ recalque pode-se identificar o comportamento geral da estaca, ou seja, é possível verificar a partir de que ponto no recalque as parcelas de atrito lateral e ponta são mobilizadas, e quais suas proporções dentro da capacidade de carga da estaca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 12131. Estacas - Prova de carga estática – Método de ensaio, 2006.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6122. Projeto e execução de fundações, 2019.

OLIVEIRA P.E.S (2018) Projeto e execução de fundações em shopping center no Recife. Palestra Sessão técnica de fundações - Cobramseg 2018

OLIVEIRA, P. E. S. ET AL (2018). Metodologia para obtenção da parcela do atrito a partir do sistema de reação em provas de carga estáticas. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, XIX COBRAMSEG, Salvador.

Orlando, C., & Maffei, C. E. M. (2000). Comparação entre a resistência de atrito lateral na tração e na compressão de estacas em areias, através de modelos físicos. In SEFE IV: anais. São Paulo: ABEF/ABMS.

Pascoal Filho, J.A. (2013). Estudo do comportamento à tração axial de diferentes tipos de estacas em solo de diabásio da região de Campinas /SP In: Campinas, SP, 2008.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

