

Análise Comparativa de Resultados de Provas de Carga Estática e Dinâmica em Estacas Escavadas Raiz com Pressão de Injeção Zero Executadas em Camada de Solo Mole da Cidade de Maceió-AL

André da Costa Colatino

Instituto Brasileiro de Educação Continuada, Maceió, Brasil, andrecolatino@tecnosenge.com.br

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosfpa@hotmail.com

Lucas Menezes Marques

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, lucasmarques034@gmail.com

Francisco Heber Lacerda de Oliveira

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, heberoliveiracivil@gmail.com

RESUMO: O presente artigo tem como objetivo comparar os resultados obtidos pelos métodos CASE e CAPWAP, provenientes de ensaios de carregamento dinâmico, com as curvas carga x recalque de provas de carga estáticas extrapoladas pelo método de Van der Veen (1953) e ABNT (2010), realizadas em doze estacas raiz com pressão de injeção zero, executadas sem a utilização de ar comprimido, assentes em solo mole da cidade de Maceió-AL. Percebeu-se que, para esse caso de estudo, apenas um dos dois ensaios realizados de carga estática apresentou fator de segurança superior a 2, e para as 12 cargas dinâmicas realizadas, oito estacas apresentaram resultados insatisfatórios, com fatores de segurança abaixo de 2, e quatro estacas apresentaram falhas de integridade estrutural, impossibilitando a avaliação de capacidade de carga última. Supõe-se que a estaca raiz com pressão de injeção zero, devido ao seu método construtivo e ao tipo de solo onde a mesma foi executada, pode ter sofrido grandes variações ao longo do seu fuste, acarretando baixos coeficientes de segurança. Conclui-se que esse tipo de solução não apresentou resultados satisfatórios para esse caso de estudo, salientando, assim, a importância dos métodos de controle de qualidade na execução, a fim de garantir a segurança da obra.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de Carga Estática, Prova de Carga Dinâmica, Solo Mole, Estacas Escavadas Raiz

1 INTRODUÇÃO

Toda obra de engenharia deve ser construída sobre uma estrutura de sustentação que transfira as cargas da edificação para o solo, a essa estrutura, dá-se o nome de fundação.

O projeto de fundação inicia-se com a caracterização do subsolo por meio de

investigações geotécnicas. O método mais utilizado no Brasil, nesse sentido, é a sondagem SPT, que, conforme cita a ABNT (2001), fornece dados como nível do lençol freático, índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e tipo de solo por camada.

Por meio da sondagem SPT, é possível realizar previsões de capacidade de carga,

através dos métodos semi-empíricos, que levam em consideração os resultados de índice de resistência à penetração.

Nesse sentido, vale salientar que o território brasileiro possui solos com as mais variadas características dos mais diversos tipos de solo, dentre eles o solo mole, seja siltoso ou argiloso, com consistências que corroboram baixa resistência. Nesse contexto, o dimensionamento de fundações profundas constitui-se um desafio para projetistas geotécnicos e executores, devendo ser realizado de maneira criteriosa, devido as dificuldades encontradas relacionadas à forma que as estacas tomam após escavação e preenchimento.

Como as fundações não podem sofrer inspeções visuais para detectar possíveis anomalias, por estarem enterradas, surgiu-se a necessidade da criação de métodos de avaliação da capacidade de carga, que é o caso das provas de carga estáticas e dinâmicas.

Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo verificar e comparar resultados de provas de carga estáticas e dinâmicas realizadas em estacas escavadas análogas à estaca raiz, diferenciada apenas pela não utilização de ar comprimido em sua execução, que ocorreu em solos moles de baixa consistências, na cidade de Maceió-AL.

2 ESTACAS DO TIPO RAIZ

Conforme cita Maia *et al.* (1998), a estaca do tipo raiz foi desenvolvida inicialmente por Fernando Lizzi, na Itália, na década de 1950, com o objetivo de executar reforços de fundações e melhoramento de solos. Originalmente executada com pequenos diâmetros, em torno de 20 cm, foi-se aprimorando o método até chegar a diâmetros maiores e usuais dos tempos atuais.

Basicamente, pode-se dividir seu processo de execução em quatro fases, sendo elas: perfuração auxiliada por circulação de água, instalação da armadura, preenchimento com argamassa e remoção do revestimento e aplicação de golpes de ar comprimido. Na

estaca analisada neste artigo, não se utilizou-se de ar comprimido na sua execução, tendo, dessa forma, sido denominada de estaca escavada raiz com pressão de injeção zero.

A fase de perfuração é realizada pela rotação de tubos com o auxílio de circulação de água, sendo a mesma injetada através do interior deles, retornando a superfície pela face externa. A medida que há avanço na profundidade, e sempre que se fizer necessário, os tubos vão sendo acoplados uns aos outros, sendo, também, inserido o tubo de revestimento, que preferencialmente deve ser colocado em toda a extensão da perfuração.

Atingida a profundidade projetada, a escavação é finalizada e, em seguida, é inserida a ferragem, podendo dar início ao processo de preenchimento, onde a argamassa é injetada de baixo para cima com pressão, ocorrendo a expulsão da água ou lama existente. A pressão exercida durante o preenchimento fará com que a estaca tenha uma elevada resistência por atrito lateral e também elevada resistência à tração.

É válido ressaltar que as estacas do tipo raiz possuem uma grande vantagem devido à inexistência de vibrações e às reduzidas dimensões do equipamento, tornando-a competitiva no que diz respeito a casos especiais de fundações, onde, por exemplo, as edificações vizinhas são sensíveis à vibração ou ruído, ou até mesmo, em casos que há pouco espaço disponível para a execução.

3 PROVA DE CARGA ESTÁTICA

A ABNT (2006) é a norma regulamentadora da prova de carga estática. Ela define o princípio de prova de carga estática como sendo a aplicação de esforços estáticos à estaca, que podem ser axiais ou transversais, e o registro dos deslocamentos correspondentes. Já Cintra *et al.* (2013), cita que a prova de carga estática é realizada a partir da aplicação de uma carga conhecida no topo da estaca, em incrementos sucessivos e iguais com a simultânea monitoração dos deslocamentos verticais da cabeça da estaca até que seja atingida a ruptura

ou alcançada sua carga máxima pretendida.

Conforme Albuquerque (1996), a utilização deste ensaio, justifica-se em função da dificuldade em conhecer as propriedades do solo, o efeito do conjunto solo/estaca e suas alterações. Vale ressaltar que os principais motivos para realização de prova de carga são: verificar o comportamento na carga de trabalho, determinar a carga de ruptura, avaliar a integridade estrutural do elemento de fundação, determinação das parcelas de resistência lateral e de ponta, bem como redução de custos e confiança para o projetista.

Cintra *et al.* (2013) também tratam da importância da realização da prova de carga estática em estacas de fundação, dando destaque às incertezas e variáveis inerentes dos processos de investigação do subsolo, dimensionamento e execução das estacas, dentre as quais estão o comprimento (L) e a capacidade de carga (R) do sistema solo-estaca para cada estaca e o fator de segurança global (Fs) da fundação.

Tanto Cintra *et al.* (2013) quanto a ABNT (2006) citam que a transferência de carga à estaca deve ser feita por meio de macaco hidráulico reagindo contra um sistema de reação, que pode ser composto por cargueira ou estruturas fixadas ao terreno (estacas de reação ou tirantes), como mostrado na Figura 1, mas a ABNT (2006) ainda inclui um terceiro sistema que seria a própria estrutura da construção, contanto que devidamente verificada para todas as solicitações do ensaio.

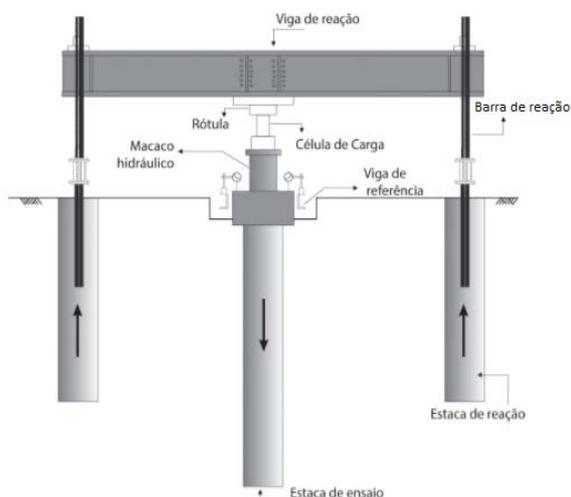


Figura 1 - Esquema de funcionamento da prova de carga estática. (CINTRA *et al.* 2013)

É válido destacar que a execução de provas de carga estática pode ser do tipo carregamento rápido (Quick Mantained Load - QML) ou lento (Slow Mantained Load - SML). Para os carregamentos lentos, os estágios de aplicação da carga, não superiores a 20% da carga de trabalho, devem ser mantidos pelo tempo mínimo de 30 minutos ou até estabilização do recalque. Já para os carregamentos do tipo rápido, os acréscimos não devem ser superiores a 10% e o tempo em que são mantidos é de 5 minutos, independente da estabilização dos recalques da estaca que está sendo analisada.

4 PROVA DE CARGA DINÂMICA

Segundo a ABNT (2007), o ensaio de carregamento dinâmico visa à avaliação de cargas mobilizadas na interface solo-estaca, eficiência do sistema de impacto, tensões de compressão e de tração ao longo da estaca, integridade estrutural e características dinâmicas do sistema solo-estaca.

Cintra *et al.* (2013) salienta que o ensaio é realizado por meio de impactos sucessivos de um peso de massa conhecida, em queda livre, de altura determinada, posicionado centrado e axialmente à estaca com a finalidade de obter os valores de força e deslocamento sofridos pelo topo da estaca em cada impacto. Para tanto são instalados acelerômetros e transdutores de deformação específica, posicionados na mesma seção, aos pares, diametralmente opostos em relação ao eixo da estaca, como observa-se na Figura 2.

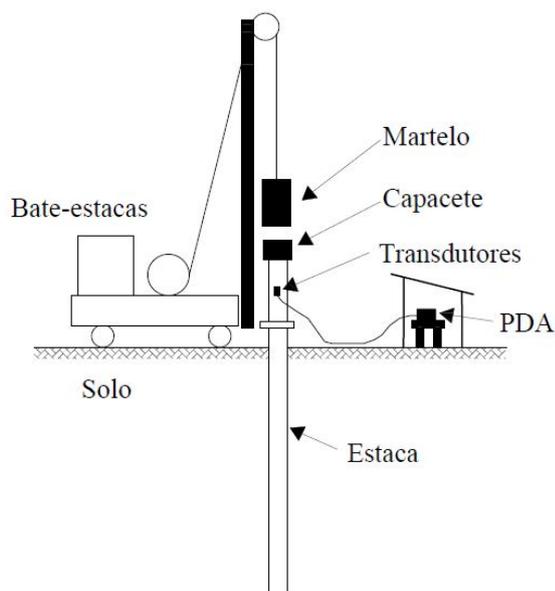


Figura 2. Esquema do ensaio de prova de carga dinâmica (CINTRA *et al.*, 2013).

A ABNT (2007) ressalta a importância de garantir a integridade estrutural da estaca, onde, visando assegurar a suavização dos impactos de martelos automáticos ou martelos de queda livre, podem ser utilizados dispositivos de amortecimento no topo da estaca analisada.

A interpretação dos dados dos registros de campo, é feita através de dois métodos distintos, o CASE (desenvolvido no Case Institute of Technology) e o CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program), conforme Cintra *et al.* (2013) e regulamentado pela ABNT (2007).

O método CASE baseia-se em uma solução simplificada que possibilita a estimativa imediata da resistência estática de uma estaca submetida ao impacto dinâmico, por meio da interpretação das medidas de força e velocidade em seu topo, conforme destacado por Cintra *et al.* (2013). Para Gonçalves *et al.* (2000) esse método é baseado em hipóteses simplificadas para a solução matemática como comportamento plástico ideal do solo, estaca idealmente elástica e uniforme e atrito lateral mobilizado igual para ondas descendentes e ascendentes.

Já no método CAPWAP, Gonçalves *et al.* (2000) cita que o sistema estaca-solo é modelado computacionalmente como um conjunto de elementos massa-mola e a

resistência do solo é considerada como de reação passiva, ou seja, são função apenas do movimento da estaca.

Após realizado o ensaio, as medidas de força e velocidade são comparadas com o modelo computacional, que tem seus parâmetros ajustados interativamente para coincidir com as respostas medidas e o resultado desse ajuste é assumido como sendo a resistência real. Esse procedimento é realizado computacionalmente com o software CAPWAP, conforme destacado por Cintra *et al.* (2013).

5 MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE:

5.1 Método ABNT (2010):

A ABNT (2010) estabelece um critério de ruptura convencional para qualquer prova de carga em que não ocorrer ruptura nítida, segundo Cintra *et al.* (2013). Conforme a Figura 3, a carga de ruptura pode ser convencionalizada como aquela correspondente à interseção da curva x recalque (extrapolada, se necessário) com a reta de equação:

$$\rho = \frac{D}{30} + \frac{(P.L)}{(A.E)} \quad (1)$$

Onde: ρ é o recalque para uma dada carga aplicada, D é o diâmetro da ponta da estaca, L é o comprimento da estaca, A é a área da seção transversal do fuste, E é o módulo de elasticidade e P é a carga de ruptura convencional.

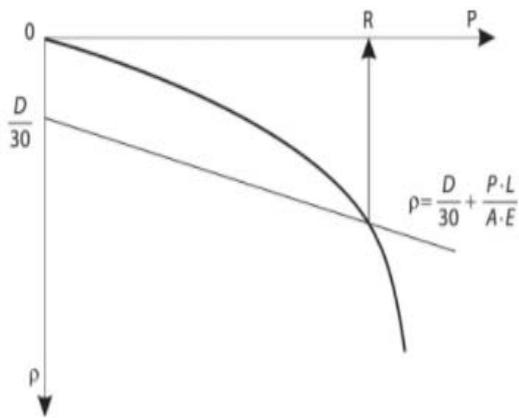


Figura 3 – Método ABNT 2010 (Cintra et al., 2013).

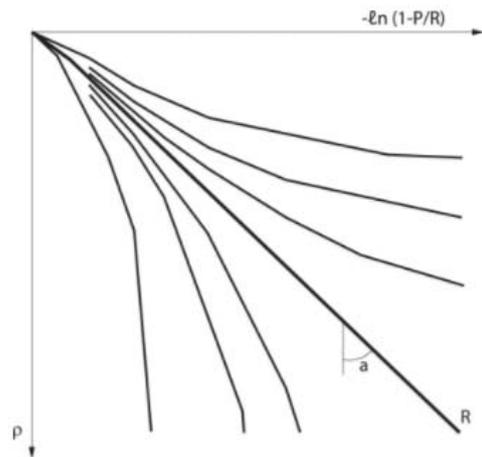


Figura 4 - Método de Van der Veen (Cintra et al., 2013).

5.2 Método de Van der Veen (1953):

Segundo Cintra et al (2013), o método de Van der Veen é feito a partir da associação da curva carga x recalque à função exponencial:

$$P = R \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot \rho}) \quad (2)$$

Em que α é o coeficiente que define a forma da curva, ρ é o recalque e R é a interseção da assíntota vertical com a curva ajustada.

A equação 2 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\alpha \cdot \rho = -\ln\left(1 - \frac{P}{R}\right) \quad (3)$$

Cujos coeficientes α e R são determinados por sucessão de tentativas, adotando-se valores de R e plotados os gráficos da equação contra os valores de recalque do ensaio. O valor de R que mais aproximar a curva de uma reta é considerado como sendo a carga de ruptura, como observado na figura 4.

6 METODOLOGIA

Para se alcançar os objetivos inicialmente propostos, foram executadas sondagens à percussão SPT para caracterização do subsolo, a partir das quais foi possível determinar a consistência das diversas camadas. Com isso, a partir dos valores obtidos do SPT (médios), como mostrado na Figura 5, e do tipo de solo, foi possível estabelecer a consistência/compacidade das camadas, observado na Tabela 1.

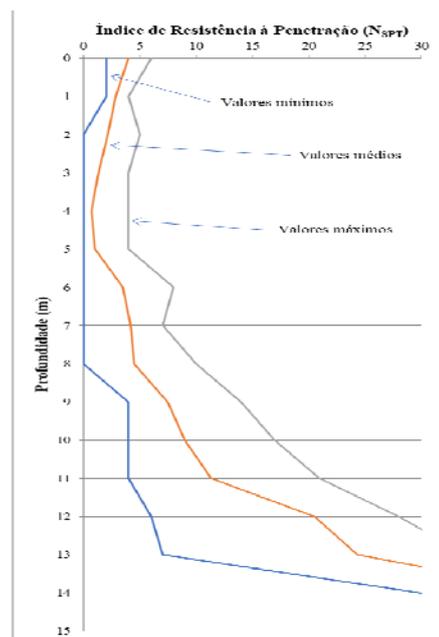


Figura 5. Índices de resistência à penetração obtidos com o SPT.

Tabela 1. Classificação quanto à Consistência e Compacidade.

Profundidade (m)	Material Predominante	Consistência/Compacidade
1		Mole
2		Mole
3	Argila	Muito mole
4		Muito mole
5		Muito mole
6		Muito mole
7	Argila	Mole
8	Arenosa	Mole
9		Mole
10	Argila	Média
11	Areia Argilosa	Medianamente compacta
12		Medianamente compacta
13	Areia	Compacta
14		Compacta
15		Muito compacta

É possível observar que o subsolo possui características de argila com presença de matéria orgânica e de consistência muito mole a mole até aproximadamente 9 m de profundidade. Após essa profundidade é observado um material ainda argiloso mas de consistência mais dura.

Posteriormente, foram realizadas provas de carga estática em duas das estacas raiz com pressão de injeção zero, diferenciadas pela não aplicação de ar comprimido em sua execução. Os resultados foram analisados e pôde-se elaborar gráficos de “carga versus recalque”. Além disso, também foram realizadas doze provas de carga dinâmicas, das quais os resultados foram analisados pelos métodos CASE e CAPWAP, Cintra *et al.* (2013). Com a obtenção destes resultados, foi possível a realização de um comparativo entre as capacidades de carga determinadas a partir dos dois tipos de ensaio.

As estacas do tipo raiz com pressão de injeção zero foram executadas com diâmetro de 480 mm e com comprimentos em torno de 16

m, tendo sido dimensionadas para uma capacidade de carga de 55 tf.

A Tabela 2 a seguir, apresenta os dados obtidos a partir dos ensaios estáticos.

7 RESULTADOS

7.1 Prova de Carga Estática

Para a obtenção dos resultados, realizou-se ensaios de carregamento estático do tipo lento nas duas estacas raiz com pressão de injeção zero (E1 e E2). As curvas “carga versus recalque” são apresentadas nas Figuras 6 e 7.

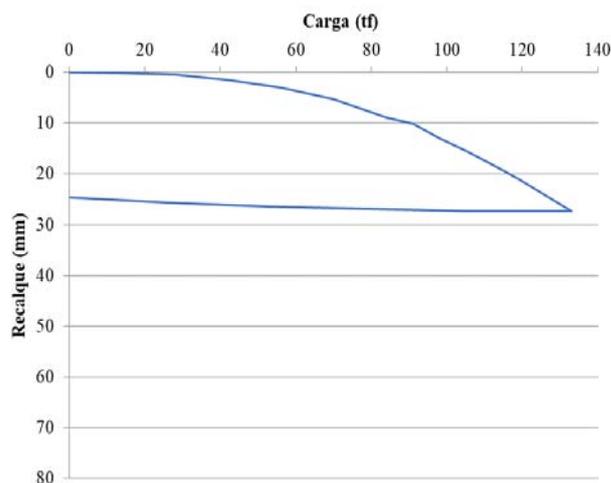


Figura 6. Gráfico Carga x Recalque - Estaca E1.

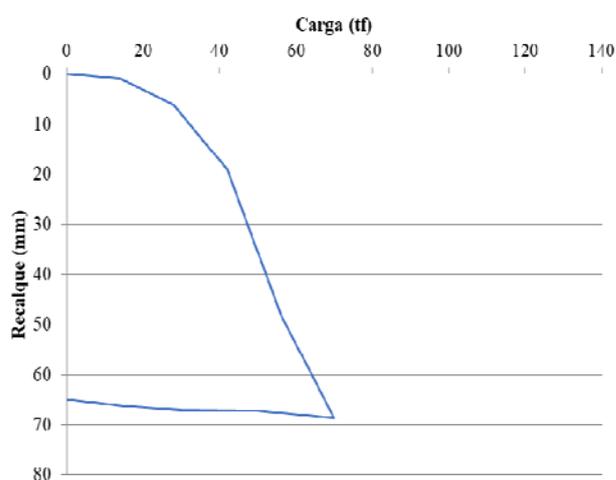


Figura 7. Gráfico Carga x Recalque - Estaca E2.

A Tabela 2 a seguir, apresenta os dados obtidos a partir dos ensaios estáticos.

Tabela 2. Resumo dos dados das provas de carga estática.

		Estaca E1	Estaca E2
Carga de trabalho (tf)		55	55
Carga máxima (tf)		133	70
Recalque (mm)	Máximo	27,28	68,54
	Permanente	24,66	65,01
Relação Recalque/D (%)		5,13	13,54
Carga de ruptura (tf)	Van der Veen (1953)	155	95
	ABNT (2010)	120	42

Já a Tabela 3 apresentada os resultados de fatores de segurança por meio das extrapolações de Van der Veen (1953) e ABNT (2010).

Tabela 3. Fatores de segurança de acordo com os critérios de extrapolação da curva “carga versus recalque”.

		Estaca E1	Estaca E2
Fator de Segurança	Van der Veen (1953)	2,8	1,7
	ABNT (2010)	2,2	0,8

De acordo com os dados apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, pôde-se perceber que a estaca E1 demonstrou resultados satisfatórios, apresentando fatores de segurança superiores a 2, conforme recomendado na norma ABNT (2006).

Já a estaca E2 não demonstrou resultados satisfatórios, por não apresentar fatores de segurança superiores a 2, estando ainda, para o critério de extrapolação da ABNT (2010), inferior a 1. Observa-se também que essa estaca mostrou um comportamento de recalques considerado elevado, sendo superior a 10% do diâmetro da seção. Nota-se que os valores extrapolados pela ABNT (2010) e pelo método de Van der Veen (1953) não se enquadram otimamente, visto que as estacas sofreram ruptura nítida.

Para a determinação da carga admissível foi considerado o resultado do método mais conservador e, portanto, mais favorável a segurança, que nesse caso, foi o método ABNT (2010).

7.2 Prova de Carga Dinâmica

Para os dados das provas de carga dinâmicas executadas na obra foram incluídas as análises CASE e CAPWAP. Os pontos de interesse na análise dos ensaios dinâmicos são dependentes do método escolhido, sendo eles o CASE (RMX - Resistência máxima mobilizada e DMX - Deslocamento máximo) e CAPWAP (R_L - Resistência lateral, R_P - Resistência de ponta e R_U - Resistência última).

A Tabela 4 apresenta o resumo dos dados obtidos através das análises CASE para as estacas do tipo raiz com pressão de injeção zero ensaiadas cujo diâmetro era de 480 mm.

Tabela 4. Resultados da análise pelo método CASE.

Estaca	Carga Trabalho (tf)	RMX (tf)	DMX (mm)	FS	Relação DMX/D (%)
E3	55	74	10	1,3	2,08
E4	55	93	10	1,7	2,08
E5	55	75	10	1,4	2,08
E6	55	85	9	1,5	1,88
E7	55	78	11	1,4	2,29
E8	55	*	13	-	2,71
E9	55	76	11	1,4	2,29
E10	55	*	9	-	1,88
E11	55	82	13	1,5	2,71
E12	55	*	13	-	2,71
E13	55	*	17	-	3,54
E14	55	85	12	1,5	2,50

As estacas E8, E10, E12 e E13 apresentaram problemas de integridade com danos estruturais que impossibilitaram a avaliação da resistência máxima enquanto que os fatores de segurança calculados para as estacas E3, E4, E5, E6, E7, E9, E11 e E14 tiveram resultados insatisfatórios (abaixo de 2).

A análise através do método CAPWAP rigoroso permite observar as parcelas de resistência decorrentes do suporte da ponta da estaca e também do atrito lateral, separadamente. Os resultados das análises das provas de carga dinâmica, nas estacas da obra

em estudo, através desse método encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5. Quadro resumo da análise CAPWAP.

Estaca	Carga Trabalho (tf)	R _U (tf)	R _L (tf)	R _P (tf)	Fator de segurança (FS)
E3	55	88,9	62	26,9	1,6
E4	55	93,3	60,1	33,3	1,7
E5	55	104,5	90,6	13,9	1,9
E6	55	101,1	75,8	25,3	1,8
E7	55	85	71,2	24,5	1,5
E8	55	*	*	*	*
E9	55	78	45,9	32,1	1,4
E10	55	*	*	*	*
E11	55	81,5	70,6	10,9	1,5
E12	55	*	*	*	*
E13	55	*	*	*	*
E14	55	91,3	65,5	25,8	1,7

Assim como no caso da análise CASE as estacas E8, E10, E12 e E13, que apresentaram problemas de integridade, não puderam ser avaliadas numericamente por meio do método CAPWAP. Além disso é possível observar que as estacas E3, E4, E5, E6, E7, E9, E11 e E14, tiveram cargas admissíveis abaixo da carga de trabalho para um fator de segurança 2.

Em relação à distribuição das resistências ao longo das estacas, foi possível analisar por meio da análise CAPWAP que nas estacas ensaiadas, a parcela referente ao atrito lateral é sempre a maior contribuição à capacidade de carga das estacas.

A Figura 8 apresenta comparação gráfica entre RP (resistência de ponta), RL (resistência lateral) para as estacas analisadas e RU (resistência última).

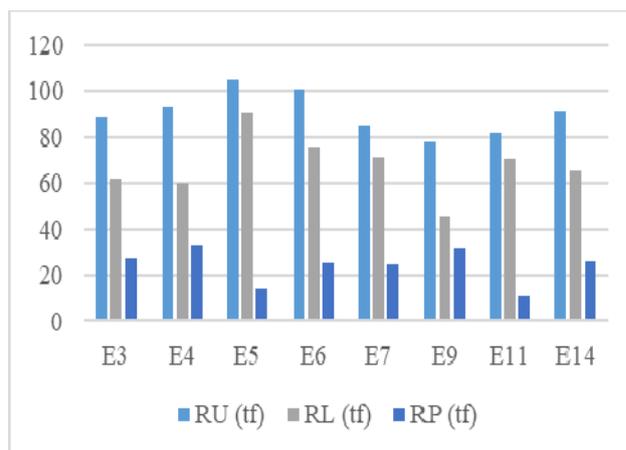


Figura 8 – Comparação gráfica entre RP, RL e RU para as estacas analisadas.

8 CONCLUSÃO

Dessa forma, com as análises referente à ensaios de carregamento estático e dinâmicos em estacas escavadas e assentes em solos argilosos de consistência mole, pode-se comparar a prova de carga dinâmica com a prova de carga estática.

Apesar de poucos ensaios, é possível perceber um alto índice de insucesso nas estacas executadas do tipo raiz com pressão de injeção zero mesmo estando armadas, as quais podem ter sofrido com o método executivo e o baixo nível de controle. Este resultado negativo pode ser observado tanto nos resultados das provas de carga estáticas quanto nos ensaios dinâmicos.

Vale ressaltar as sondagens mostraram que o solo em que as estacas foram executadas é predominantemente composto por argila, com índices de penetração muito baixos nas camadas intermediárias após os 2 m e com aumento das resistências após os 12 m, além da presença de matéria orgânica, o que diminui substancialmente a resistência do subsolo.

Dessa forma, nota-se por meio dos dados apresentados que a prova de carga dinâmica se mostra uma excelente ferramenta de avaliação e controle de execução de fundações, independentemente do tipo de solo, principalmente pela possibilidade de se checar o modelo de estaca projetado e suas parcelas de resistência calculadas com a realidade

executada já que, através da análise numérica CAPWAP, é possível obter a contribuição do atrito lateral, metro a metro, à resistência total encontrada pelo ensaio, bem como a parcela de contribuição referente à ponta da estaca.

Por conseguinte, conclui-se que os métodos dinâmicos e estáticos são adequados e equivalentes para avaliação e controle de elementos de fundação executados in situ em solos moles, com ênfase às provas de carga dinâmicas que apresentam dados para além da determinação da carga última da estaca.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), campus Fortaleza, pela bolsa do autor³.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, P. J. R. (1996). Análise do Comportamento de Estaca Pré-Moldada de Pequeno Diâmetro, Instrumentada, em Solo Residual de Diabásio da Região de Campinas. Dissertação de Mestrado. FEAGRI. Unicamp. 170 p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2001). NBR 6484 - Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro: [s.n.].
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2006). NBR 12131 - Estacas - Prova de carga estática - Método de ensaio. Rio de Janeiro: [s.n.].
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2007). NBR 13208 - Estacas - Ensaio de carregamento dinâmico. Rio de Janeiro: [s.n.].
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2010). NBR 6122 - Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: [s.n.].
- Cintra, J. C. A. *et al* (2013). Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de textos.
- Gonçalves, C. *et al*. (2000). Controle de fundações profundas através de métodos dinâmicos. São Paulo: [s.n.].
- Maia, C. M. M. *et al*. (1998). Execução De Fundações Profundas. In: HACHICH, W., *et al*. Fundações: teoria e prática. 2ª Edição. ed. São Paulo: PINI. Cap. 9, p. 329-407.
- Van Der Veen (1953). The Bearing Capacity of a Pile. in: Conference On Soil Mechanics Foundation Engineering, 3, Zurich, Proceedings, Zurich, v. 2, p.84- 90.