

Verificação do aumento da capacidade de carga em estaca tipo raiz, através da aplicação de ar comprimido

Rodrigo Rogério Cerqueira da Silva¹, Geise Aparecida Pereira²

¹Mestrado em Construção Civil, Universidade Nove de Julho, rodrigorogeriomestrado@yahoo.com.br,

²Especialista em Estruturas, Universidade Santa Rita, eng.geisepereira@gmail.com

Resumo – Apresenta-se neste trabalho o comportamento de estacas tipos raiz, através de ensaio a compressão, avaliando a importância da aplicação de ar comprimido após a conclusão da injeção com argamassa, visando demonstrar a importância deste evento através da capacidade de cargas nas estacas. O objetivo é demonstrar que a verdadeira metodologia da execução da estaca tipo raiz, vem perdendo a sua essência desde sua criação por Fernando Lizzi, fator esse ligado a preocupação somente com a produção, prejudicando o desempenho das estacas injetadas. Esta técnica tem sido utilizada no Brasil quando tempo é fator mais importante, sendo utilizada como reforço de fundação ou estaca em qualquer condição como elemento estrutural, porém gerando dúvidas na sua capacidade de carga em relação a sua metodologia de execução. A preocupação da verificação da capacidade de carga deste tipo de estaca está relacionada à variação de metodologia, que obra após obra vem sendo deixada de lado em relação a original. Assim o trabalho analisará o comportamento a compressão de quatro estacas tipo raiz, sendo duas executadas com aplicação de golpe de ar, e outras duas utilizando injeção de argamassa simples. Para verificação de sua capacidade de carga, foram executadas provas de carga à compressão, realizando comparações entre os valores de capacidade de carga, observando que o fator da injeção com aplicação de golpe de ar mostra-se decisivo no que diz respeito ao aumento da seção da estaca, quanto na modificação do estado de tensões do solo adjacente variando para cada tipo de solo.

Palavras-chave: Estaca raiz, golpe de ar, ensaio de compressão, injeção de argamassa.

Abstract – Displays of this work the behavior types root cuttings through the compression test, assessing the importance of compressed air application after completion of the injection with grout intended to demonstrate the importance of the event through the ability to load on the cuttings. The goal is to demonstrate that the true methodology of the stake root type execution, is losing its essence since its creation by Fernando Lizzi, a factor that bound to concern only with production, hurting the performance of injected cuttings. This technique has been used in Brazil when time is most important factor being used as foundation reinforcement or stake in any condition as a structural element, but casting doubt on their carrying capacity in

relation to their implementation methodology. The concern of this type of pile load capacity check is related to its methodology change, which work after the work has been put aside in relation to the original. Thus the work will examine the behavior of compression type four root cuttings, two performed with air blow application, and two mortar using simple injection. To check its load capacity, compressive load tests were executest, making comparisons between load capacity values, noting that the injection factor with air blow application proves decisive as regards the increase of the section stake, as in the state of modification of soil adjacent tensions varying for each type of soil.

Keywords: Root pile, air blow, compression test, argmassa injection.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente observamos em empresas a função da produção ser colocada num papel reativo e principal, em relação à técnica e qualidade. Com o acirramento competitivo do mercado de fundações especiais, a definição de que preços cobrar, que prazos prometer e com qual qualidade executar, foge ao controle puro e simples de qualquer área técnica de uma empresa, tornando-se a produção um fator externo à empresa determinado pelo mercado.

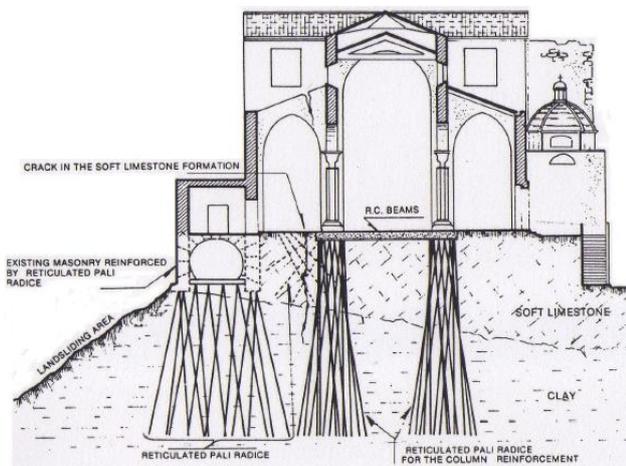
Exemplo disto na área de fundações especiais é a execução e aplicabilidade da técnica da estaca tipo raiz, que vêm tornando-se distante da criada pelo professor Fernando Lizzi, [1]. De acordo com [1] o conceito inicial era produzir um sistema de fundação que consistia na formação de uma massa de solo reforçado, como o sistema de raízes de uma árvore, de modo a induzir a consolidação do solo e transformá-lo em um solo armado (Figura 1).

A busca pela produção deste tipo de estaca vem modificando a sua metodologia de execução, desde a perfuração em solo por meio da descida de tubo tipo revestimento, sendo o fuste realizado somente pelo encamisamento nos primeiros metros em razão da ocorrência de solos tipo superficial com presença de entulhos, matéria orgânica ou solos rijos e plásticos. A perfuração tem sido realizada através de brocas tricônicas até a profundidade prevista em projeto, o revestimento total da estaca diminui a produtividade devido à retirada dos tubos, gerando dúvidas em sua

SILVA, R. R. C; PEREIRA, G. A.

integridade devido ao estrangulamento do fuste da estaca.

Figura 1 – Catedral Agrigento (Itália), reforçada com estaca raiz.



Fonte: (LIZZI, 1985), [1].

Atualmente a injeção de estaca raiz vem sendo realizada através da rápida extração dos poucos revestimentos, complementando o volume de argamassa por gravidade após o seu abatimento. A falta da metodologia através da aplicação de golpes de ar comprimido durante a extração do tubo revestimento vem sendo substituída pela necessidade da produção *in loco*, tornado o conceito da execução de estaca raiz em uma simples estaca escavada.

A metodologia da aplicação de golpes de ar contribui para que a estaca tenha uma resistência estrutural adequada, e uma excelente aderência ao solo garantindo uma capacidade de carga elevada, deixando de existir nas obras atuais.

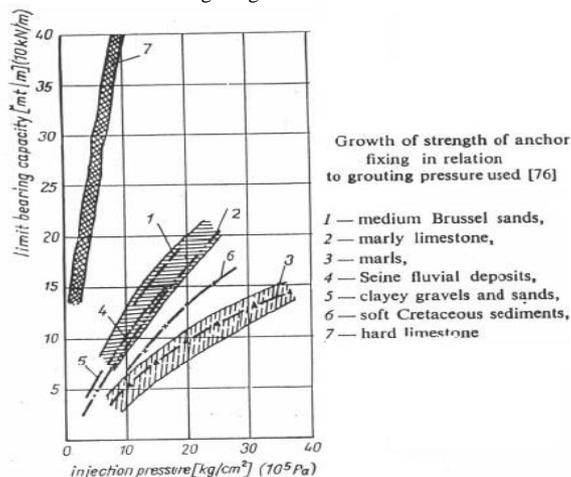
As estacas tipo raiz caracterizam-se pela formação de fustes irregulares de argamassa, fortemente armados, no qual a injeção é realizada sobre pressão. Esta pressão resulta na estaca, a característica de terreno armado contribuindo para aumento de sua capacidade de carga que se obtém através da injeção sem retorno da argamassa à superfície.

Os diversos fatores que influenciam na transferência de carga deste tipo de estaca estão relacionados à influência da pressão de injeção e o método de instalação, que se constitui na principal diferença entre as estacas injetadas convencionais. A utilização da aplicação de injeções constantes através de pressões médias da ordem de (5 a 10 kg/cm²) a pouca possibilidade de refluxo de argamassa, é um fator de destaque no aumento de sua capacidade de carga.

Pesquisas realizadas em estacas injetadas por [2], demonstra a elevada compactação do solo realizada pela pressão de injeção, favorece o aumento do ângulo de atrito interno. Usando como base a ideia central de [3], este fator está relacionado ao aumento da pressão de confinamento no fuste da estaca e/ou ao aumento do ângulo de atrito do terreno, estimando

experimentalmente em 30 % o aumento do valor N_{SPT} como demonstra a Figura 2, o crescimento do atrito lateral com a pressão de injeção em diversas formações aluvionares, sedimentares e metamórficas.

Figura 2 – Pressão de injeção x atrito lateral em formações geológicas.



Fonte: (CAMBEFORT, 1975), [3].

Estudos realizados por [4] a [6] verificaram que o alargamento do fuste ocasionado pelo aumento das pressões em estacas injetadas, provocam alterações das características físicas e mecânicas na área do maciço do solo próximo das estacas devido a compactação radial do solo, aumentando a densidade em torno de 25 %, módulo de deformação em 64 % e diminuindo em cerca de 38 % o teor de umidade, os pesquisadores verificaram que a mudança desses parâmetros do solo contribuíram para aumentar a capacidade de carga das estacas em 20% em relação a verificação de estacas injetadas sem pressão.

O efeito de melhoria da capacidade de carga realizado pela pressão de injeção de acordo com [7] é um fenômeno geral que ocorre nos solos de alto módulo de deformação, os quais são também de alta resistência a compressão e ao cisalhamento, sejam eles predominantemente arenosos ou argilosos.

Para as estacas tipo raiz o aumento do atrito lateral ocorrerá através da compactação do terreno, devido o aumento do diâmetro da perfuração ocasionado pela pressão da argamassa, aumentando consequentemente a capacidade de carga da estaca [2]. Desta maneira seu fuste apresentará protuberâncias e irregularidades que aumentaram sua rugosidade contribuindo com o atrito lateral.

Em solos de característica coesiva com baixa permeabilidade pode ocorrer o refluxo de argamassa, ao contrário dos solos não coesivos. Para evitar uma diminuição da capacidade de carga devido o refluxo de argamassa os projetos deverão prever a utilização de armadura complementar nas estacas injetadas.

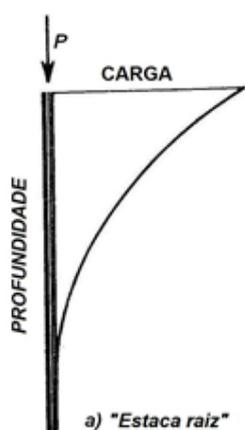
De acordo com [7] durante a injeção de estacas, o baixo refluxo de argamassa, fator este relacionado ao tipo de solo, poderá contribuir com alta capacidade de

carga e pequenos recalques em comparação às estacas convencionais ou até mesmo escavada de mesmo diâmetro.

O aumento da capacidade de carga através da injeção na base das estacas foi analisado por [8] e [9] através de tubos com válvulas manchetes colocadas na base das armaduras, após a concretagem o volume de calda injetado aumentou a capacidade de carga em 49% em relação as estacas sem injeção, devido a melhoria do contato entre solo e ponta da estaca provocado pela alta pressão de injeção de calda, garantindo uma maior parcela da resistência de ponta.

A maior transferência de carga da estaca tipo raiz para o solo está através do atrito lateral (estaca-solo do corpo de argamassa), garantindo uma interação radial entre fuste e solo, criando um conglomerado com o solo e uma resistência à ruptura na seção do fuste (Figura 3).

Figura 3 – Esquema típico da curva de transferência de carga em solo da estaca raiz.



Fonte: (COSTA NUNES, 1985), [7].

Estudos realizados por [10] em estacas injetadas, avaliaram que a relação entre (comprimento/diâmetro) elevados, sofrem deslocamentos maiores próximos a seu topo e mobilizam progressivamente o máximo atrito lateral do topo para a ponta. Além deste fator a relação entre a área lateral e a área de ponta verificada por [10] é bastante elevada, o que reforça a hipótese de transferência de carga principalmente por atrito.

O aumento confinante do fuste da estaca, denominado por [7] de protensão do terreno, é imposta pela pressão residual de injeção que aumenta o atrito na interface estaca-solo, sendo esta explicação a mais abrangente considerando os diversos tipos de solo. Assim consideramos que a resistência de uma estaca raiz é essencialmente por atrito lateral, que mesmo num terreno de baixa resistência possa proporcionar capacidade de carga, podendo não contar com a contribuição da ponta para a característica de carga total, podendo ressaltar que devido à pressão de injeção qualquer terreno é adequado para as estacas tipo raiz.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

As estacas testes foram ensaiadas a prova de carga estática a compressão de acordo com a norma [11] e [12], realizadas em um campo experimental de um empreendimento habitacional situado na região de Osasco em São Paulo.

A. Caracterização geológica geotécnica

De acordo com a característica geológica a região do campo experimental é formada por solos residuais típicos da ação do intemperismo em migmatitos, oriundos de rochas metamórficas. A área da execução das estacas foi previamente selecionada após inspeção de fatores geológicos do terreno, favoráveis a execução de quatro estacas testes tipo raiz, comprovados a partir de sondagens a percussão.

O substrato geológico é formado por uma camada de 10 metros de silte arenoso, pouco argiloso, com mica e fragmentos finos e médio de rocha, pouco a medianamente compacta de cor cinza (solo residual) com N_{SPT} variando de 6 a 12 nas camadas iniciais e 20 a 28 nos últimos 6 metros. Sotoposto por uma camada de 7 metros de rocha alterada de magmatito de paleossoma xistoso, alterado pouco coerente, cinza e róseo. Durante os ensaios foram detectados presença de nível d' água a 6 metros de profundidade.

B. Estacas testes

Para esse trabalho foram executadas quatro estacas de testes. A diferença entre tais estacas consiste na metodologia para a aplicação de ar comprimido, sendo duas estacas executadas com golpes de ar e outras duas executadas com injeção de argamassa sem pressão.

As estacas atendem às seguintes especificações: diâmetro nominal de 410 mm, comprimento de 18 metros, ferragem composta por 6 Ø 16 mm CA 50 e estribos de Ø 6,3 mm a cada 20 cm. Tais estacas foram revestidas até a profundidade de 16 metros, sendo os dois últimos metros livres de tubos devido à estaca ser engastada em rocha.

Para injeção de argamassa foram considerados a carta traço equivalente: (1 saco de cimento, 65 litros de areia e 25 litros de água), considerando 23 e 25 traços para a injeção das estacas E01 e E02, consumo este aumentado devido a aplicação de golpe de ar em 10 kgf/cm² aplicado a cada retirada de 2 metros de revestimento. Para as estacas E03 e E04, foram utilizados 19 e 17 traços para deixar o fuste completo sem aplicação de golpe de ar, metodologia essa aplicada atualmente em obras de estaca raiz.

As Figuras de 4 a 6 ilustram a prática para a instalação da estaca raiz.

Figura 4 – Perfuração estacas testes.



Fonte: Autores.

Figura 5 – Colocação da armadura estaca raiz.



Fonte: Autores.

Figura 6 – Injeção de argamassa das estacas testes.



Fonte: Autores.

C. Procedimento do ensaio

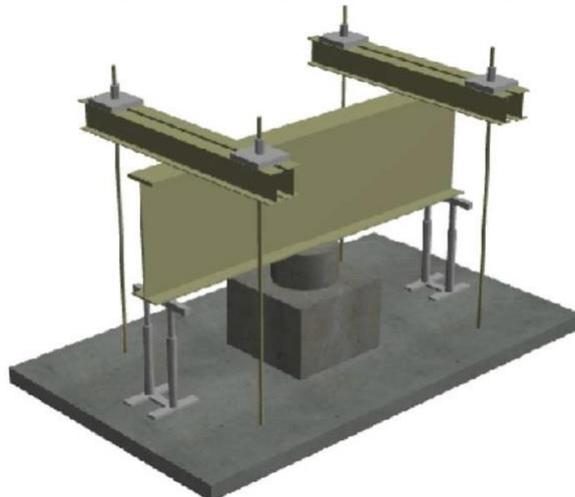
Para aplicação do carregamento foram executadas quatro estacas de reação, sendo que para cada estaca de reação foram ancorados tirantes. As cargas dos ensaios foram aplicadas simetricamente com a utilização de macaco hidráulico com capacidade para 500 tf, considerando o centro de gravidade dos perfis metálicos com o eixo longitudinal do bloco de coroamento, tornando o sistema de reação estável. Na execução dos ensaios foram obedecidas as instruções preconizadas pela norma [11], que trata da execução de prova de carga estática em estacas.

O sistema de medição foi obtido através da instalação de duas vigas metálicas de referência, com os

apoios localizados a uma distância média aproximada de 3,00 metros do eixo da estaca ensaiada.

Diante das vigas de referência por intermédio de bases magnéticas foram fixados quatro deflectômetros digitais com curso 50 mm e sensibilidade 0,01 mm diametralmente opostos, apoiados em pequenas lâminas de vidro, fixadas na superfície do bloco de concreto executado na cabeça da estaca.

Figura 7 – Croqui esquemático da prova de carga.



Fonte: Autores.

D. Plano de carga ensaio

De acordo com [12] apresentamos abaixo os estágios de carregamento e descarregamento das provas de cargas, calculadas em função da carga de trabalho determinada em projeto de 130 tf. As estacas foram submetidas a carregamento tipo lento durante a realização dos ensaios, sendo este método o que mais se aproxima do carregamento em que a estaca estará submetida na maioria dos casos. Este método é considerado vantajoso em relação à exatidão dos resultados, sendo que para cada incremento da carga em cada estágio aguarda-se a estabilização dos recalques.

Para os cálculos dos estágios de cargas foram considerados fator de segurança igual a 2,0. Os resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Estágios de carregamento.

Estágio	Carga (tf)	Pressão (Kgf/cm ²)
1	26	27
2	52	54
3	78	81
4	104	108
5	130	135
6	156	162
7	182	189
8	208	216
9	234	243

Tabela 2 – Estágios de descarregamento.

Estágio	Carga (tf)	Pressão (Kgf/cm ²)
1	195	202,6
2	130	135,1
3	65	67,5
4	0	0

Na Figura 8 é apresentada a vista geral do sistema com as estacas instaladas.

Figura 8 – Vista geral sistema de reação.



Fonte: Autores.

Na Figura 9 destaca-se a utilização do macaco hidráulico e dos extensômetros, para melhor entendimento da proposta.

Figura 9 – Detalhe macaco hidráulico e posição dos extensômetros.



Fonte: Autores.

E. Análise dos resultados a partir dos ensaios N_{SPT}

Os resultados das previsões de carga de ruptura foram calculados a partir do diâmetro nominal determinado em projeto e a partir de valores de N_{SPT} mais próximos das estacas. Respeitando os limites fixados na revisão bibliográfica para previsão de carga das estacas foram aplicados os métodos de Décourt & Quaresma (1996) [13] e David Cabral (1986) [14], utilizados especificamente para estacas tipo raiz.

O método de Décourt & Quaresma (1996), introduz na previsão de capacidade de carga coeficientes de majoração ou minoração α e β , para a reação de ponta e para o atrito lateral. De acordo com [13], os coeficientes permitem estender os cálculos efetuados para estaca de deslocamento e para outros tipos de estacas como estacas injetadas tipo raiz. A expressão para determinar a capacidade de carga é dada pela Equação 1.

$$P_R = \alpha \cdot K_p \cdot N_p \cdot A_p + \beta \left(\frac{N}{3} + 1 \right) \cdot U \cdot \Delta L \quad (1)$$

Onde:

P_R : Carga de ruptura da estaca raiz.

N_p : valor médio do N_{SPT} na ponta da estaca, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior.

K_p : coeficiente para resistência de ponta em função do tipo e solo (Tabela 3), de acordo com [13].

A_p : área da ponta da estaca.

U : perímetro da estaca.

N : valor médio do N_{SPT} para cada ΔL .

ΔL : Espessura de cada camada (metros).

α e β : coeficientes em função da estaca raiz (Tabela 4), de acordo com [13].

Tabela 3 – Valores de K_p em função do tipo de solo N_{SPT} .

Tipo de solo	K_p (tf/m ²)
1	12
2	20
3	25
4	40

Tabela 4 – Valores de α e β em função do tipo de estaca e do tipo de solo.

Tipo de Solo	Estaca Raiz	
	α	β
Argilas	0,85	1,5
Solos intermediários	0,60	1,5
Areia	0,50	1,5

O método proposto por David Cabral (1986) [14] leva em consideração a pressão de injeção da argamassa de cimento durante o processo de execução, além da variação das camadas de solo transpassadas pela estaca. De acordo com [14] o método limita a capacidade de carga da estaca raiz em um diâmetro final ($D \leq 45$ cm) e

com uma pressão de injeção de ($p \leq 4 \text{ kgf/cm}^2$). A capacidade de carga é obtida pela Equação 2.

$$P_R = U \cdot [\beta_0 \beta_1 N_{SPT} \Delta L + \beta_0 \beta_2 Np Ab] \quad (2)$$

Onde:

P_R : Carga de ruptura da estaca raiz.

U : Perímetro da estaca.

$\beta_0 = 1 + 0,10p - 0,01D$ (kgf/cm^2), em que ($p \leq 4 \text{ kgf/cm}^2$) pressão de injeção da estaca em kgf/cm^2 e (D) é o diâmetro da estaca em cm.

β_1 e β_2 : parâmetros que dependem do tipo de solo obtidos em kgf/cm^2 de acordo com a Tabela 5, [14].

N_{SPT} : corresponde ao número de golpes em ΔL .

ΔL : espessura de cada camada.

Np : valor de N_{SPT} na ponta da estaca.

Ab : área da base da estaca.

Tabela 5 – Coeficientes β_1 e β_2 .

Tipo de solo	β_1 (%)	β_2 (kgf/cm^2)
Areia	7,0	3,0
Areia siltosa	8,0	2,8
Areia argilosa	8,0	2,3
Silte	5,0	1,8
Silte arenoso	6,0	2,0
Silte argiloso	3,5	1,0
Argila	5,0	1,0
Argila arenosa	5,0	1,5
Argila siltosa	4,0	1,0

Tendo como base as informações e modelos apresentados, relata-se na próxima seção os resultados obtidos no projeto.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Estacas executadas com aplicação e ar comprimido

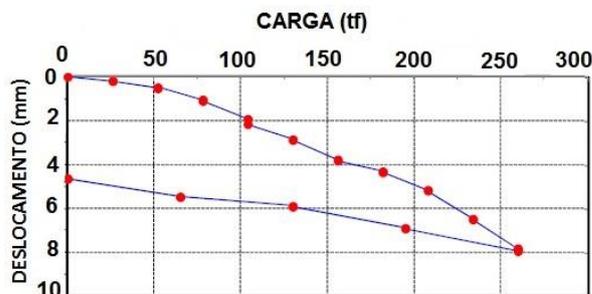
A carga máxima de ensaio 260 tf foi alcançada com êxito no último estágio de carregamento estabilizada por aproximadamente 17 horas, verificando um deslocamento acumulado de 7,96 mm para estaca E01 e para estaca E02 de 6,51 mm.

Os descarregamentos foram realizados normalmente em quatro estágios, obtendo-se no final um recalque residual para estaca E01 de 4,63 mm e 1,62 mm para E02, não observando qualquer anormalidade no sistema de reação (tirantes) durante a execução do ensaio.

As estacas de reação dos ensaios E01 e E02 foram monitoradas durante o ensaio e apresentaram um deslocamento máximo de 2,66 mm e 2,46 mm.

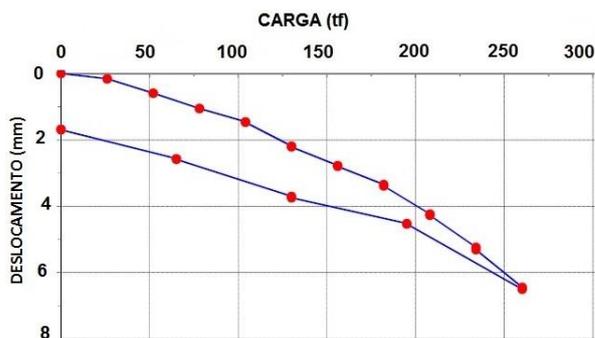
Apresenta-se na Figura 10 o gráfico da carga (tf) versus deslocamento (mm) obtido para a estaca ensaiada com aplicação e golpes de ar para E02 e, na Figura 11, análise similar para E01.

Figura 10 – Gráfico de Carga x Deslocamento estaca E01.



Fonte: Autores.

Figura 11 – Gráfico de Carga x Deslocamento estaca E02.



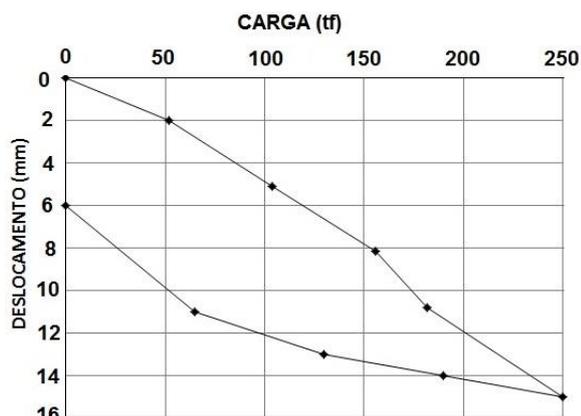
Fonte: autores.

B. Estacas executadas sem aplicação de golpe de ar

Para as estacas executadas com injeção simples sem aplicação de golpe de ar, a carga máxima de ensaio de 260 tf não alcançaram com êxito o último estágio de carregamento, obtendo cargas máximas para as estacas E03 de 240 tf e 220 tf para E04, estabilizando as cargas em aproximadamente 18 horas de ensaio, com deslocamento acumulado de 15,20 mm para estaca E03 e para estaca E04 de 13,00 mm.

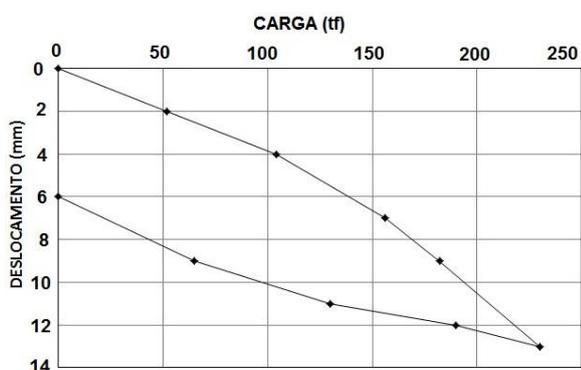
Os descarregamentos foram realizados normalmente em quatro estágios, obtendo-se no final um recalque residual para estaca E03 de 6,50 mm e 6,00 mm para E04. Não foram observadas anormalidades no sistema de reação realizados com tirantes durante a execução do ensaio, as estacas de reação das estacas E03 e E04, apresentaram um deslocamento máximo próximos de 2,90 mm e 2,88 mm. Estes resultados são ilustrados nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Gráfico de Carga x Deslocamento estaca E03.



Fonte: Autores.

Figura 13 – Gráfico de Carga x Deslocamento estaca E04.



Fonte: Autores.

Podemos considerar que as estacas ensaiadas E03 e E04, não atingiram o desempenho satisfatório conforme indicado em [12]. Isso deve-se ao aspecto do seu fuste ser íntegro como de uma simples estaca escavada. Nota-se a contribuição do golpe de ar ao aumentar o diâmetro da estaca e a irregularidade do seu fuste, modificando a resistência lateral, conforme a apresentação dos ensaios das estacas E01 e E02.

C. Avaliação da capacidade de carga Método Décourt & Quaresma (1996) e David Cabral (1986)

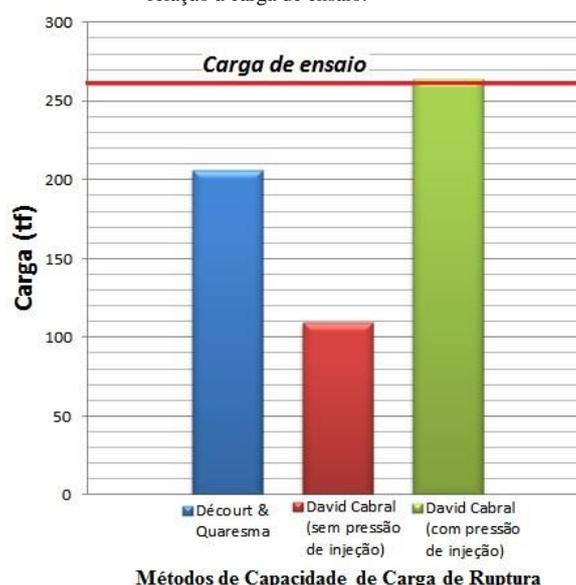
Apresenta-se na Tabela 6 os valores das previsões de capacidade de carga obtidos a partir da aplicação dos métodos propostos para resistência lateral (RL), resistência de ponta (RP) e resistência total (RT). As estacas tipo raiz distribuem sua resistência ao longo do fuste principalmente por atrito lateral, considerando favoráveis os valores preconizados pelos métodos de Decourt & Quaresma, [13] e David Cabral, [14]. A previsão do método de David Cabral (1996) considerou as duas situações realizadas *in loco*, sem pressão de injeção e com pressões de golpes de ar da ordem de 10 kgf/cm².

Tabela 6 – Resultados dos métodos semi empíricos para estaca raiz.

Método	RL (tf)	RP (tf)	RT (tf)
Décourt & Quaresma	180	26	206
David Cabral (sem pressão de injeção)	90	19	109
David Cabral (com pressão de injeção)	228	36	264

Para avaliar a eficiência das previsões adotou-se como parâmetro a carga de ensaio de 260 tf. O melhor método de previsão é determinado como o que melhor aproximar a carga de ensaio em relação aos modelos, de forma a caracterizar a capacidade de carga da estaca raiz. Segue a comparação na Figura 14 entre os métodos mencionados na Tabela 6.

Figura 14 – Desempenho dos métodos semi empíricos em relação a carga de ensaio.



Fonte: Autores.

Dos métodos de previsão de cargas semi empíricos apresentados, considerando a pressão de injeção de 10 kgf/cm², tem-se que o de David Cabral (1986), [14] obteve melhor desempenho em comparação às provas de carga estática à compressão executadas em solos de características silto arenosa e silto argilosa. A precisão do resultado está relacionada à pressão da argamassa de cimento utilizada no método, aumento a capacidade de carga devido ao aumento da resistência lateral.

D.Avaliação da execução de estaca tipo raiz

Os resultados apresentados pela baixa pressão de injeção em estacas raiz demonstram que durante a execução, a ausência da aplicação de ar comprimido implica na redução de capacidade de carga das estacas. O resultado é comprovado através de ensaios de prova de carga não atendendo as premissas de projeto, permitindo, através do controle de execução, uma intervenção dos serviços de fundação.

De acordo com [15], a intervenção é o fato de analisar se o valor medido corresponde ao atendimento previsto na carga de projeto e, imediatamente, decidir pelo prosseguimento ou não das operações de execução ou instalação da estaca.

Pode-se considerar que a adoção de um controle de execução com simultânea intervenção, conduz à redução da dispersão dos valores de capacidade de carga *in situ* em relação ao determinado em projeto.

Considerando que a existência de qualquer intervenção no processo da estaca tipo raiz através da aplicação de golpe de ar permite alcançar de forma satisfatória a carga admissível determinada em projeto.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram realizadas comparações entre os valores de capacidade de carga medidas *in loco*. Observou-se que o fator da injeção com aplicação de golpe de ar mostra-se decisivo tanto no que diz respeito ao aumento da seção da estaca, quanto na modificação do estado de tensões do solo adjacente.

A capacidade de carga das estacas é influenciada pelo volume de argamassa injetado e pela pressão de injeção, podendo admitir que para cada tipo de solo exista uma pressão limite de injeção. Há implicações de aumento da capacidade de carga em virtude da ocorrência do fraturamento ou cisalhamento do terreno, uma vez que o fuste das estacas injetadas apresentará protuberâncias e irregularidades que aumentam a rugosidade e contribui com o atrito lateral.

O método proposto por David Cabral (1986) para estaca raiz foi o que apresentou melhor desempenho entre todos os métodos baseados no N_{SPT} . A medida do desempenho considera os valores mais próximos dos observados para as cargas de ensaios submetidos à compressão axial, sendo a aplicação da pressão de injeção avaliada durante a estimativa da capacidade de carga.

A carga admissível para estaca raiz compreende o aspecto estrutural (verificação da segurança e ruína) e o geotécnico (verificação da segurança à ruptura do maciço de solo e aos recalques excessivos).

REFERÊNCIAS

[1] LIZZI, F., *The pali radice (root piles) a state-of-the-art report*. In: Symposium on recent developments in ground improvement techniques, Bangkok, p.417- 450, 1985.

- [2] SILVA, R. R. C. **Estacas injetadas autoperfurantes: metodologia de execução e determinação da sua capacidade de carga através de métodos semi empíricos**. 216p. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2011.
- [3] CAMBEFORT, H. **Geotechnique de l' Ingenieur. et reconnaissance de sols**. Paris: Editions Eyrolles, 424p., 1975.
- [4] PACHLA, H. *Conditions of proper interaction of low-pressure injection piles (LIP) with structure and soil, carrying capacity of pile anchorage in foundation*. Studia Geotechnica et Mechanica, v. 38, n. 4, p. 33-49, 2016.
- [5] SAMOKHVAL, M., ZAULYA, J., MELNIKOV, R., MIRONOV, V. *Design Calculation of Drill-Injection Piles with Controlled Broadening and Silty-Clayed Soil Foundation Basic Interaction Parameters*. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, p. 01009, 2016.
- [6] GRABE, J., PUCKER, T. *Improvement of bearing capacity of vibratory driven open-ended tubular piles*. Frontiers in Offshore Geotechnics III, 2015.
- [7] COSTA NUNES, A.J. *Estacas injetadas - Relato geral*. In: Seminário de Engenharia e Fundações Especiais, SEFE-1., 1985, São Paulo. Anais. São Paulo, ABMS. v.1, p.103- 118, 1985.
- [8] AUBRAM, D., RACKWITZ, F., SAVIDIS, S. A. *Vibro-Injection Pile Installation in Sand: 1. Interpretation as Multi-Material Flow*. In: Proc Workshops DFG Research Unit FOR, 2015.
- [9] MORAES, L.S. **Estacas escavadas com base injetada**. Tese de Doutorado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.
- [10] CORRÊA, R.S. **Previsão da carga de ruptura de estacas raiz a partir de sondagens de simples reconhecimento**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.
- [11] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12131. **Estacas: prova de carga estática**. Rio de Janeiro, 2006.
- [12] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6122/2010. **Projeto e execução de fundações**: Rio de Janeiro, 2010.
- [13] DÈCOURT, L., ALBIERO, J. H., CINTRA, J.C.A. **Análise e Projeto de Fundações Profundas. Fundações Teoria e Prática**. Editora PINI, São Paulo-SP, pp.265-327, 1996.
- [14] CABRAL, D. A. *O uso de estacas raiz como fundação de obras normais*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Porto Alegre/RS. v.6, p.71-82, 1986.
- [15] AOKI, N., CINTRA, J. C. A. *Carga admissível e carga característica de fundações por estacas*. Revista Solos e Rochas, São Paulo, v. 23, n. 2, p. 137-142, Agosto de 2000.