

# Aferição do Aumento da Capacidade de Carga em Estacas Mega Metálicas por Injeção de Calda de Cimento Através de Provas de Carga

## **Diego Gazolli Yañez**

Professor substituto, UNESP, Rio Claro, Brasil, diego.gazolli@unesp.br

## **Renato Araújo**

Consultor Sênior, Autônomo, São Paulo, Brasil, raraujo1@hotmail.com

## **Armando de Oliveira**

Diretor, Reforça Engenharia, São Paulo, Brasil, armando@reforca.com.br

**RESUMO:** Apresenta-se a experiência adquirida com injeção adicional de calda de cimento em estacas tipo Mega Metálicas monitoradas, visando aferir seu incremento de capacidade de carga. Este estudo se basou na obra de execução do reforço das fundações tipo Hélice Contínua de um Shopping Center de grande monta em São Paulo, para a viabilidade de sua ampliação, em 4 andares adicionais. O carregamento máximo por pilar passou de 358 t para 602 t. Para isso, foram projetadas 120 estacas Mega Metálicas injetadas inclinadas, para carga de trabalho de até 91 t cada. Nesta obra, 10 estacas Mega Metálicas Injetadas foram submetidas a prova de carga estática, conforme a norma ABNT NBR 12131:2006. Foi então analisado o comportamento destas estacas, combinando estes dados com metodologias de extrapolação das curvas carga-recalque das provas de carga propostos por Chin (1970) e Décourt (1996) para a estimativa da carga de ruptura. Com a análise destes dados foi possível verificar o potencial de ganho real na capacidade de carga destas estacas tipo Mega Metálicas com injeção controlada de calda de cimento, da ordem de 15% de sua capacidade de carga teórica de projeto, para a mesma cota de cravação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estaca Mega Metálica, Injeção de Calda de Cimento, Ensaio de Capacidade de Carga.

**ABSTRACT:** It is shown the experience obtained with posterior injection of cement grout in monitored Steel Mega piles, in order to measure their load capacity increase. This study is based on the execution of the reinforcement of Continuous Flight Auger (CFA) piled foundations of a large Shopping Center in São Paulo, for its expansion in 4 additional floors. The maximum load per pillar increased from 358 tons to 602 tons. For this purpose, 120 inclined Steel Mega piles were designed to a work load of up to 91 tons each. In this work, 10 grout injected Steel Mega pile were submitted to static load test, according to the ABNT NBR 12131:2006 Brazilian standard. The behavior of those piles was then assessed by extrapolation method of the load-settlement curves of the load tests as proposed by Chin (1970) and Décourt (1996) for the estimation of the ultimate load. With the analysis of these data it was possible to verify the actual gain potential in the ultimate load capacity of these controlled grout injected Steel Mega piles, by the order of 15% of their theoretical design load capacity, for the same installation elevation.

**KEYWORDS:** Steel Mega Pile, Cement Grout Injection, Pile Load Capacity Test.

## 1 Introdução

Técnicas de reforço de fundações são necessárias quando ocorrem alguns tipos de patologias, tais como recalques excessivos acima dos previstos inicialmente no projeto. Estes problemas podem ocorrer porque os solos são materiais naturais heterogêneos em função de sua gênese e condições naturais ao longo de sua formação. Seja para ampliação de edificações ou risco de ruptura estrutural, a necessidade de incremento da capacidade de carga das fundações tem sido sempre utilizada.

Neste âmbito, a estaca Mega Metálica Injetada tem sido utilizada por projetistas, devido a suas características como a de ser instalada em locais de difícil acesso, em inclinações variadas, entre outras, além da percepção de seu maior ganho na capacidade de carga quando injetadas.

Este trabalho apresenta um caso de obra instrumentada e controlada, sendo possível ratificar, através de dados de ensaios de campo, a real ordem de grandeza dos incrementos de capacidade de carga destas estacas.

## 2 Referencial teórico para a execução de estacas mega metálicas injetadas

Os equipamentos utilizados para o emprego destas estacas são de pequeno porte, para trabalhar em espaços muito confinados e de difícil acesso. Normalmente são cilindros hidráulicos, ligados a unidades elétricas/hidráulicas de pequeno porte que necessitam de potência da ordem de 7 c.v. em 220 V. A execução destas estacas não faz barulho, não utiliza água e nem refrigeração. Para a transferência de carga à estrutura, utiliza-se: cabeçotes de concreto armado, blocos e cunhas de concreto armado com fibras metálicas e/ou polietileno.

Devido à pequena dimensão destes elementos, é contraindicado o uso de armadura tradicional. Outra grande vantagem da armadura com fibras metálicas é evitar uma ruptura frágil da peça, com consequências perigosas e imprevisíveis.

Esta estaca é constituída de segmentos de 75 cm de tubos metálicos, com espessura de parede compatível com sua carga estrutural, interligados com roscas e luvas feitas em tornos mecânicos de alta precisão. Na prática, encontram-se no mercado para uso imediato os tubos de aproximadamente 4,5” para carga de cravação de até 45 t e os de aproximadamente 6,5”, para carga de cravação de até 75 t.

Após a cravação, antes do encunhamento, estas estacas são preenchidas com concreto armado com fibras, aumentando substancialmente o coeficiente de segurança estrutural desse reforço de fundação. Como todas as estacas Mega, elas são encunhadas e têm sua cabeça concretada preenchendo os vazios existentes entre cunha e blocos.

Esta estaca penetra no solo por cisalhamento. Algumas de suas características são:

Penetram bem mais fundo que uma estaca Mega de concreto ou uma pré-moldada de concreto antiga e adjacente, colocando-se em novo horizonte de apoio e permitindo somar a carga das fundações antigas com a carga da Mega Metálica, algo que não ocorre nas estacas Mega de concreto;

Com frequência, esta estaca pode penetrar 30% mais do que uma pré-moldada de concreto adjacente.

Estas estacas apresentam ganho na capacidade de carga com o tempo. O oposto ao relaxamento potencial nas estacas Mega de concreto.

O gráfico de cravação, metro a metro, desde seu início é um excelente refinamento local à sondagem, indicando, por meio da resistência à cravação, o tipo de subsolo teórico em cada estaca, permitindo corrigir e ajustar o projeto original, incrementando fortemente sua segurança.

O diferencial da estaca Mega Metálica Injetada está no seu método executivo, que se caracteriza pela limpeza por lavagem interna do solo de embuchamento após a cravação dos tubos metálicos das estacas e na posterior injeção de calda de cimento no interior do tubo, com pressão de até 30 kg/cm<sup>2</sup>, formando um novo bulbo na ponta da estaca e aumentando a adesão entre a estaca e o solo no fuste.

Para a limpeza do solo no interior da estaca Mega Metálica, utiliza-se lavagem d’água em circuito fechado e/ou equipamentos específicos desenvolvidos para este fim. Esta lavagem propicia à estaca avançar em comprimentos além da capacidade de reação normal da estrutura para a cravação de estacas Mega tradicionais.

É importante observar que não há incremento de carga de cravação, somente para trabalho e ruptura. Por conta do exposto acima, em obras emergenciais, com riscos severos, as estacas Mega Metálicas Injetadas, podem ser a alternativa mais eficiente.

### 3 Método de extrapolação de provas de carga estáticas

#### 3.1 Chin (1970)

A partir dos resultados de uma prova de carga estática lenta ou rápida, o método proposto por Chin (1970) fornece uma estimativa da carga última de ruptura e parâmetros de ajuste hiperbólico para uma equação idealizada da curva carga-recalques. Para aplicar o método, divide-se cada deslocamento medido pela sua respectiva carga e o resultado é plotado nas ordenadas enquanto o eixo das ordenadas apresenta o deslocamento (Figura 1). Após uma variabilidade inicial, os valores tendem a se alinhar em uma reta. O inverso da inclinação dessa linha equivale à carga de ruptura estimada pelo método – Equação (1).

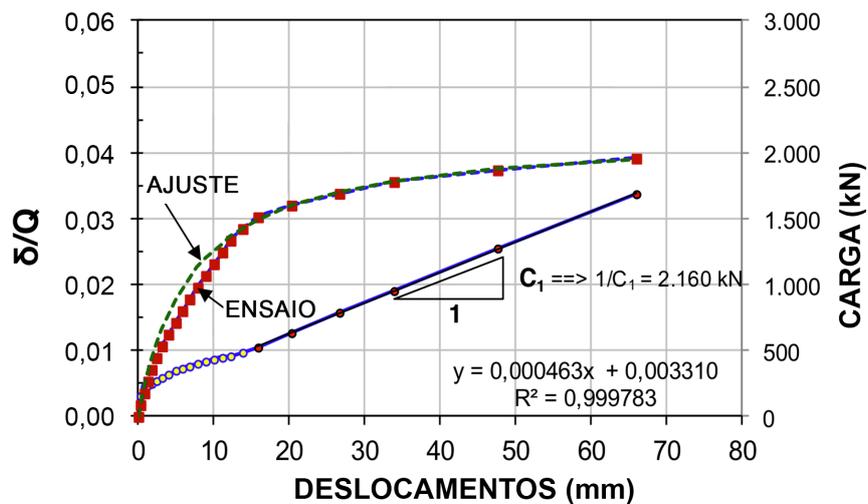


Figura 1. Método de extrapolação da curva carga-recalques de Chin (1970). Fonte: Fellenius (2018)

$$Q_u = \frac{1}{C_1} \quad (1)$$

Na qual:

$Q_u$  carga de ruptura da estaca (i.e., carga quando o deslocamento seria infinito  $\delta \rightarrow \infty$ )  
 $C_1$  inclinação da linha reta no gráfico de  $\delta/Q$  versus deslocamento  $\delta$

A curva idealizada de ajuste é indicada na Figura 1 como uma linha tracejada e sua respectiva equação é indicada na Equação (2).

$$Q = \frac{\delta}{C_1 \cdot \delta + C_2} \quad (2)$$

Na qual:

$Q$  carga aplicada  
 $\delta$  deslocamento  
 $C_2$  intercepção da linha reta de regressão no gráfico de  $\delta/Q$  versus deslocamento  $\delta$

#### 3.2 Décourt (1996)

Décourt (1996) apresentou o método de extrapolação da curva carga-recalques conhecido como “Método da Rigidez”. Define-se a rigidez de uma fundação como a razão entre a carga aplicada na prova de carga estática e o deslocamento resultante. Para qualquer tipo de fundação, a tendência geral é que a rigidez

diminua conforme os recalques aumentam. Assim, a ruptura é caracterizada na carga correspondente em que a rigidez tende a zero.

A aplicação do método de Décourt (1996) é parecida com o método de Chin (1970) exposto acima: plota-se a carga aplicada na prova de carga dividida pelo respectivo deslocamento nas ordenadas e a carga nas abscissas. Uma regressão linear dos últimos pontos do gráfico é aplicada para extrapolar o ponto no qual a rigidez tende a zero – correspondente à carga de ruptura da estaca. Evidentemente, quanto menor a rigidez atingida no ensaio, mais precisa será a estimativa da carga de ruptura. Na Figura 2 é indicada a aplicação do Método da Rigidez de Décourt. As Equações (3) e (4) indicam a carga última estimada pelo método e a equação da curva carga-recalques, respectivamente.

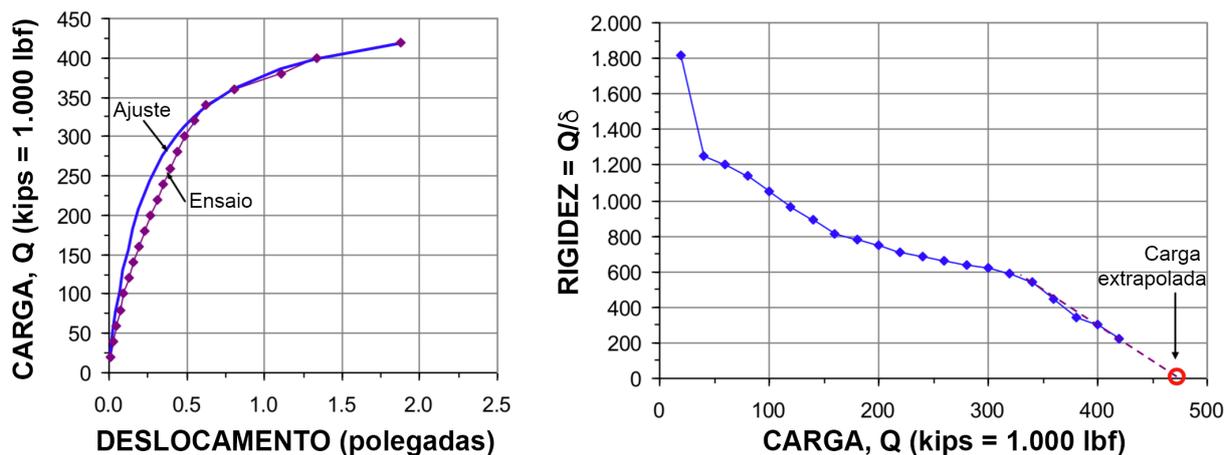


Figura 2. Método de extrapolação da curva carga-recalques de Décourt (1996). Fonte: Fellenius (2018)

$$Q_u = \frac{C_2}{C_1} \quad (3)$$

$$Q = \frac{C_2 \cdot \delta}{1 - C_1 \cdot \delta} \quad (4)$$

Nas quais:

- $Q_u$  carga de ruptura da estaca (i.e., carga quando a rigidez seria nula)
- $Q$  carga aplicada
- $\delta$  deslocamento
- $C_1$  inclinação da linha reta no gráfico de  $Q/\delta$  versus carga  $Q$
- $C_2$  intercepção da linha reta de regressão no gráfico de  $Q/\delta$  versus carga  $Q$

## 4 Descrição da obra de reforço de fundação em análise

### 4.1 Generalidades

Os dados utilizados neste trabalho se referem a execução de 120 estacas Mega Metálicas Injetadas, instaladas em pares, para a ampliação de 4 pavimentos adicionais em um shopping center na zona sul da cidade de São Paulo.

As fundações originais são em estaca Hélice Contínua monitorada, de diâmetro 70 cm, para até 195 t por estaca. O projeto original de reforço foi elaborado em estacas Raíz, entretanto, por conta da necessidade de finalização da obra em 150 dias, presença de interferências e necessidade de melhor eficiência global, optou-se pela alternativa de reforço em estacas Mega Metálicas Injetadas.

## 4.2 Resumo do projeto de reforço das fundações

O projeto de reforço elaborado pela projetista estrutural indicava que as cargas iniciais (antes da reforma) dos pilares variavam entre 61 e 358 t. As cargas finais (pós reforma) deveriam passar a variar entre 77 e 602 t por pilar.

O projeto estrutural de reforço especificou estacas cravadas à reação tipo Mega Metálica Injetada com as seguintes características:

Ø 14,13 cm (426 kg/m, VBM 350 e  $f_{yk} = 350$  MPa)

- Carga de trabalho de 55 tf (sem vento) e 72 tf (com vento).
- Carga de teste de 82 tf.
- Carga de incorporação de 66 tf.

Ø 16,86 cm (426 kg/m, VBM 350 e  $f_{yk} = 350$  MPa)

- Carga de trabalho de 70 tf (sem vento) e 91 tf (com vento).
- Carga de teste de 100 tf.
- Carga de incorporação de 84 tf.

Das estacas Ø 16,86 cm, para carga de trabalho de 70 tf, foram realizadas provas de carga estática em 10 unidades.

O projeto indicou o método executivo com a cravação de par ou pares, de estacas Mega Metálicas Injetadas, com inclinação a 1 H: 10 V. Esta angulação é definida para que os bulbos de tensões nas pontas não se sobreponham, de modo também a não haver transferência da nova sobrecarga para as estacas originais, assegurando uma somatória eficiente de capacidade de carga.

## 4.3 Condições geológico-geotécnicas

Foram executadas 9 sondagens com tubo de revestimento de 2 ½” de diâmetro externo, conforme a norma ABNT NBR 6484:2001, totalizando 193,00 metros de perfuração. A descrição das amostras coletadas seguiu o padrão estabelecido na norma da ABNT NBR 6502:1995.

Por conta da heterogeneidade do solo local, são apresentadas na Figura 3 duas sondagens típicas que ilustram os principais aspectos de interesse para este trabalho.

O nível d'água medido nas sondagens oscilou em torno de 1 m a 6,08 m de profundidade.

O solo local se apresenta inicialmente com uma camada de aterro feito com argila silto arenosa e eventual entulho, em cerca de 0,5 m a 1,1 m de profundidade. Este aterro se estende variando, entre 0,51 m a 3,75 m de profundidade, alternando-se camadas de solo entre esta argila e areia pouco siltosa. Em algumas sondagens, a partir de 2,4 m de profundidade, já inicia a ocorrência de solo residual, cuja profundidade máxima sondada obtida foi de 25,45 m.

As camadas intermediárias do solo local se alternam como apresentado nas sondagens SP-02 e SP-09, respectivamente apresentadas abaixo, entre variações de areia pouco siltosa, argila siltosa pouco arenosa, silte arenoso e suas derivações. As sondagens também indicam a presença de mica e pedregulhos.

O valor do índice  $N_{SPT}$  ao longo das 9 sondagens analisadas varia entre 0/30 e 56. As camadas de solo muito mole identificadas ( $N_{SPT}$  até 3 golpes) foram observadas com espessura máxima de 3 m, nas primeiras camadas, até uma profundidade máxima de 6,90 m, apresentando camada de argila siltosa pouco arenosa. A Figura 3 ilustra o exposto acima.

## 5 Provas de carga estática – Resultados e análises

Um dos objetivos possíveis de uma Prova de Carga Estática (PCE) é determinar a capacidade de carga do elemento de fundação por meio da interpretação da curva carga-recalques, obtida através de instrumentação em campo.

Ao longo das 120 estacas Mega Metálicas Injetadas executadas, foram executadas 10 PCE a compressão, sendo caracterizada curva carga-recalques, atendendo as normas técnicas brasileiras (ABNT NBR 6122:2010 e 12131:2006).

As provas de carga foram divididas em 2 fases, sendo a primeira realizada em 8 estágios e a segunda em 5 estágios.

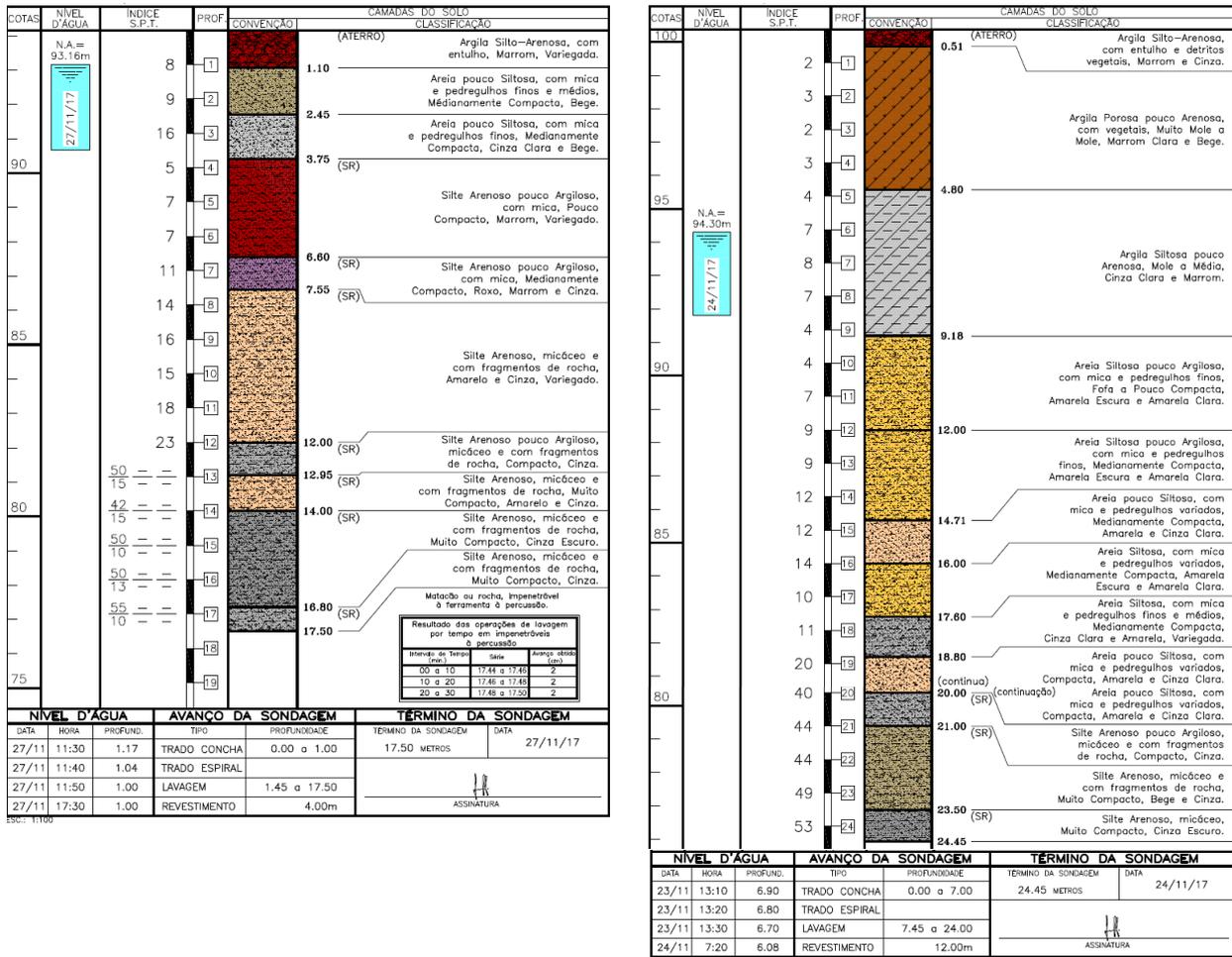


Figura 3. Sondagens SP02 e SP09, respectivamente. Exemplos do perfil geológico local.

Na 1ª fase foi aplicada um incremento de carga de 17,5 tf a cada estágio até se atingir uma vez e meia a carga de trabalho (cerca de 105 t), no 6º estágio; em seguida, foi descarregada a estaca até a carga de trabalho (70 tf); e, por fim, retirou-se a carga aplicada na estaca por completo.

Após isso, se iniciou a 2ª fase, na qual foi novamente aplicado o incremento de carga de 17,5 tf a cada estágio, até atingir a carga de trabalho da estaca (70 tf), no 4º estágio; em seguida, foi realizado o descarregamento por completo da carga aplicada pelo macaco hidráulico.

Duas provas de carga estáticas foram descartadas por problemas executivos durante o ensaio.

Aos demais resultados apresentados, procurou-se definir a carga de ruptura das estacas por meio dos métodos de Chin (1970) e Décourt (1996).

Entretanto, Urbano (2011) enfatiza que estes métodos só devem ser aplicados se a curva carga-recalque atingir valores próximos a carga de ruptura, de tal forma que os valores obtidos pelos diversos métodos não sejam muito discrepantes. Por conta disso, algumas provas de carga não serão tomadas em conta para a análise final, embora sejam apresentados os resultados e extrapolações realizadas.

A seguir, as Figuras 4 a 7 apresentam os gráficos carga-recalque indicando também os métodos citados para a obtenção dos valores das cargas de ruptura teóricos de cada estaca.

Por conta do critério mencionado acima, da necessidade de proximidade do final do gráfico com a região da carga de ruptura mais nítida, apenas os gráficos correspondentes as provas de carga estáticas das estacas 10-K-A, 11-I e 13-K são representativos para as análises necessárias quanto a determinação teórica da carga de ruptura das estacas.

A Tabela 1 indica o resumo dos valores calculados.

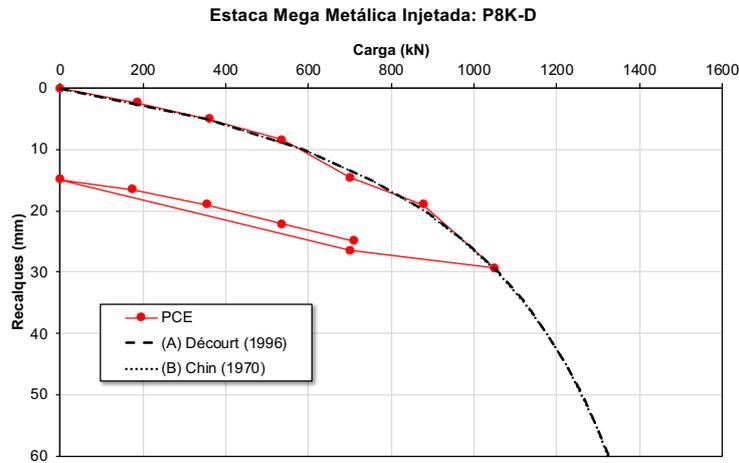


Figura 4. Resultado e extrapolação da PCE da estaca P8K-D.

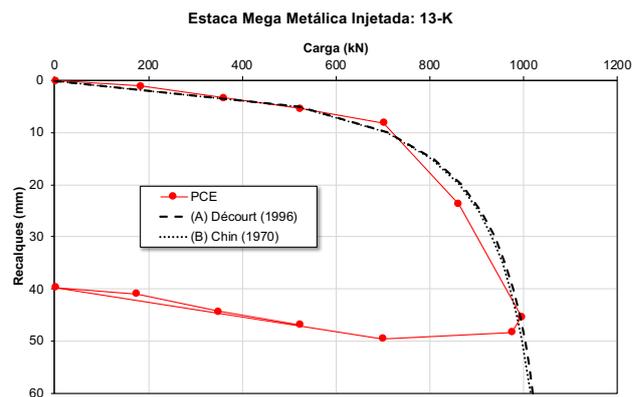
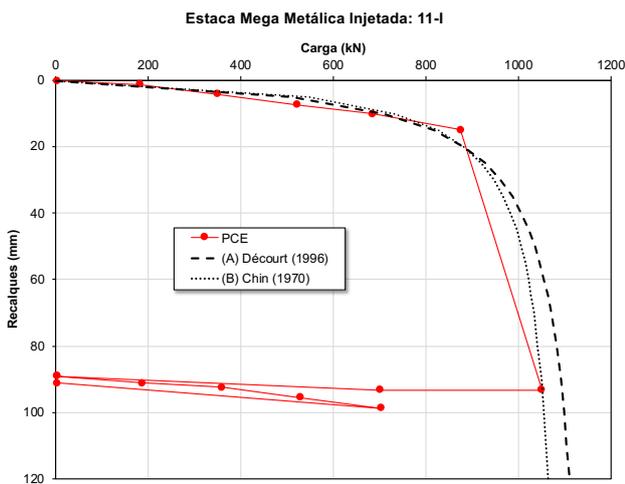


Figura 5. Resultado e extrapolação da PCE das estacas 11-I e 13-K.

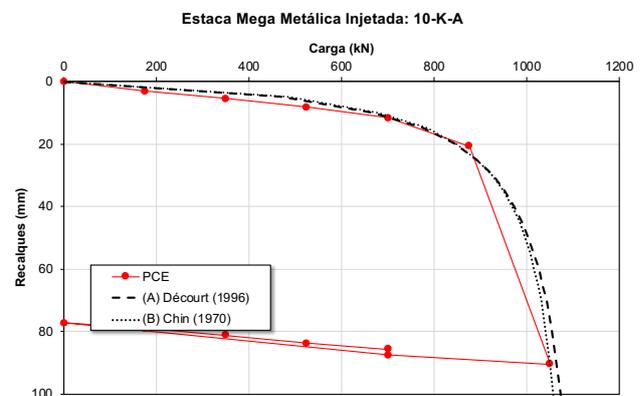
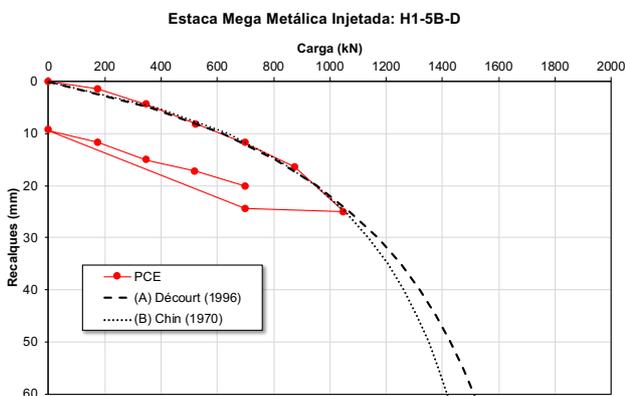


Figura 6. Resultado e extrapolação da PCE das estacas H1-5B-D e 10-K-A.

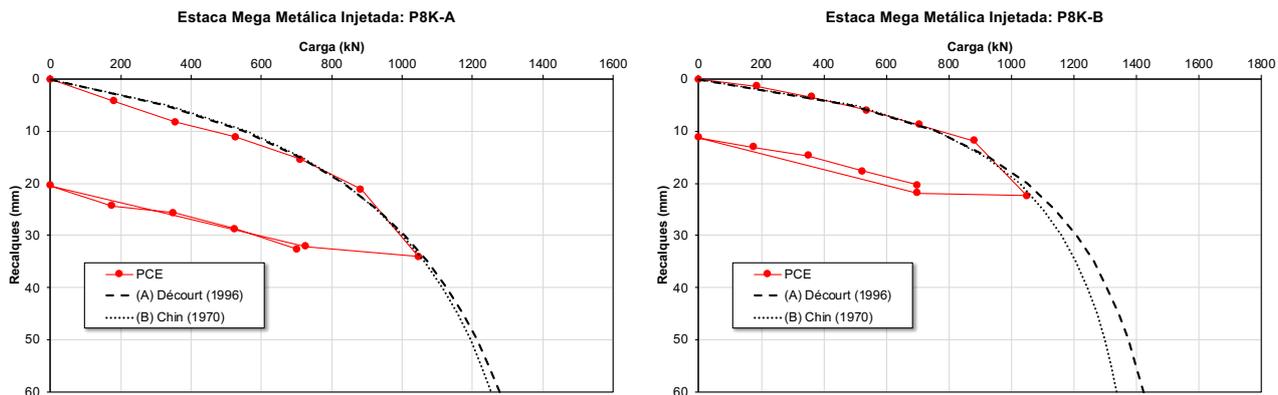


Figura 7. Resultado e interpretação da prova de carga estática da estaca, bem como do desenvolvimento do método supracitado de Décourt e Chin, respectivamente para as estacas P8K-A e P8K-B.

Tabela 1. Resultados dos valores médios de carga em relação a carga de ruptura das estacas com injeção.

Estaca	L (m)	$Q_{projeto}$ (kN)	$Q_{cravação}$ (kN)	$Q_{ult}$ (kN) Décourt (1996)	$Q_{ult}$ (kN) Chin (1970)	Limite (%) médio da carga ( $Q_{ult}$ ) em relação a carga de cravação	Limite (%) médio da carga ( $Q_{ult}$ ) em relação a carga de projeto	Fator de segurança entre a média de $Q_{ult}$ e $Q_{projeto}$ (F.S.)	Aumento sugerido para novos valores de $Q_{potencial}$ de projeto (kN) para um F.S.=1,4 (NBR 6122:2010)	% de incremento da capacidade de carga para um novo $Q_{potencial}$ de projeto (kN) para F.S. = 1,4
11-I	17,2	700	820	1.169	1.108	38,84%	62,64%	1,63	813,2	16%
13-K	17,8	700	980	1.117	1.112	13,72%	59,21%	1,59	796,1	14%
H1-5BD	12,7	700	778	2.138	1.879	158,16%	186,93%	2,87	1.435	105%
10-K-A	16,5	700	879	1.149	1.127	29,47%	62,57%	1,63	812,9	16%
P8K-A	15,0	700	906	1.735	1.669	87,86%	143,14%	2,43	1.216	74%
P8K-B	14,2	700	892	1.723	1.577	84,98%	135,71%	2,36	1.179	68%
P8K-D	15,0	700	1012	1.773	1.769	75,00%	153,00%	2,53	1.265	81%

A Tabela 1 apresenta o comprimento de cada estaca, sua carga de projeto, carga de cravação, valores da carga de ruptura para cada método utilizado, a distância limite percentual de cada carregamento em relação ao carregamento de ruptura teórica da estaca, o fator de segurança atual de cada estaca, com relação a sua carga de ruptura, valores sugeridos para um incremento da carga de projeto factível, em função da análise dos dados apresentados, de modo a se manter um fator de segurança 1,4 (esta ação é factível, segundo a Norma NBR 6122:2010, em função de se cumprirem todos os requisitos para os ensaios de prova de carga estática, e aplicação dos fatores de minoração recomendados a cada caso). A tabela indica também o ganho percentual de incremento de carga buscando atingir um fator de segurança de 1,4.

A sugestão para se buscar atingir um fator de segurança de 1,4 para obras deste porte, com incrementos reais nas cargas de trabalho para cerca de 14% a 16% acima dos valores tradicionais obtidos em projetos é factível, segundo os dados estudados acima, e representam potencialmente um ganho relevante à eficiência dos novos projetos de reforço com este tipo de estaca.

Observa-se que esta obra em específico, em função principalmente das características do subsolo local, onde se indica praticamente em todas as sondagens que as estacas atingem praticamente o impenetrável à percussão tradicional do ensaio SPT, garantindo-se sempre que a ponta da estaca esteja apoiada/embutida em solo bastante competente. Desta forma é possível extrapolar o fator de segurança utilizado pelos ensaios de prova de carga estática para os previstos em norma.

Durante as provas de carga houve um caso específico de amassamento do sistema de apoio “capacete”

para a cravação dos tubos metálicos e também outra estaca com limite de arrancamento de tirante de reação. Ambos os casos não foram apresentados nesse trabalho. Estas ocorrências mostram que as estacas foram cravadas até o limite da estrutura de reação/cravação, conseguindo o sucesso no ganho de capacidade de suporte necessário para a transferência integral do carregamento adicional devido a ampliação do Shopping Center.

## 6 Conclusões

O presente trabalho traduz uma das primeiras medições técnico-científicas apuradas, para este ganho de capacidade de carga em estacas Mega Metálicas injetadas.

É importante observar que a geologia do país (mesmo regional) é bastante heterogênea, e não se recomenda a transposição simples dos valores apresentados neste trabalho para outros horizontes geológicos distintos. Recomenda-se seguir a norma adequada, ter cautela e promover análises adequadas para tal feito.

Entretanto, observa-se que a realização de provas de carga estáticas pode abrir um grande leque de opções para se incrementar a capacidade de suporte das estacas Mega Metálicas Injetadas, conforme pode ser verificado ao longo deste artigo.

Este trabalho indica claramente a viabilidade do uso deste tipo de estaca em obras das mais diversas. Trata-se de uma estaca de reforço de fundação versátil e os dados apresentados indicam que sua capacidade de suporte pode ir além do verificado aqui, uma vez que alguns dos ensaios foram prematuramente paralisados, podendo ter sido levados a fatores de segurança maiores, e com isso também indicar a possibilidade de se recomendar incrementos maiores às cargas definidas em projetos tradicionais de reforço com estacas Mega Metálica Injetadas.

Devido às características de execução deste tipo de estaca, na qual é possível assegurar seu carregamento em função da estrutura de reação local, e a condição particular do terreno, foi possível verificar a clara capacidade de suporte destas estacas verificado com o auxílio das provas de carga estáticas. Nota-se que a execução da cravação das estacas funcionou também como um ensaio, de modo a poder assegurar sua integridade e também sua segurança ao colapso. Portanto, foi possível recomendar para este caso, a possibilidade de incremento da capacidade de carga de trabalho destas estacas em cerca de 14% a 16%, em função das provas de carga estáticas realizadas. Desta forma se garante um fator de segurança global de 1,4.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Reforça Engenharia e à Clóvis Maia Engenharia de Fundações S/S Ltda, pela disponibilização dos dados necessários para o estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). NBR 6484. *Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131. *Estacas - Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Alonso, U.R. (1991) *Previsão e controle de fundações*, 2ª ed., Edgard Bluecher, São Paulo, 156 p.
- Cintra, J.C.A., Aoki, N. (1999) *Carga admissível em fundações profundas*, EESC-USP, São Carlos, 61 p.
- Chin, F. K. (1970). Estimation of the ultimate load of piles not carried to failure. In: SOUTHEAST ASIAN CONFERENCE ON SOIL ENGINEERING, 2, Singapore. *Proceedings...* Southeast Asian Society of Soil Engineering. p. 81–90.



- Décourt, L. (1996). A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. In SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA - SEFE, 3, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABMS. CD-ROM. 10 p.
- Fellenius, B. H. (2018) *Basics of Foundation Design*. Electronic version January 2018. 466 p.