

AB

MS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS

VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES

Porto Alegre: 12 a 16 de outubro, 1986

Anais

VOL. VIII
Pós-Congresso



VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES

P.Alegre: 12 a 16 de outubro de 1986.

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS MICROESTACAS TUBULARES INJETADAS

João Duarte Guimarães Filho

Engenheiro Civil, Este Engenharia Serviços Técnicos Especiais S.A.

Alberto Casati.; Zirlis

Engenheiro Civil, Este Engenharia Serviços Técnicos Especiais S.A.

Nelson dos Santos Gomes

Engenheiro Civil, IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

RESUMO

Este trabalho apresenta alguns dos resultados da análise teórica e experimental de 33 segmentos do fuste de microestacas tubulares (sem bainha e injeção), submetidos à compressão simples. Os segmentos são analisados no regime elástico e são estudadas a influência dos componentes na resistência das microestacas. São apresentadas expressões para determinação da carga de ruptura do fuste (P_R) determinadas a partir de estudos experimentais. Em decorrência dos resultados dos ensaios foi determinado o módulo de rigidez à compressão (AE) de dois tipos de microestacas e são feitas as comparações com os resultados teóricos.

Completa-se este estudo com uma análise de uma prova de carga pela qual verificou-se que em determinadas condições do conjunto microestaca-subsolo, a aplicação da teoria elástica forneceu resultados comparáveis aos valores admissíveis (P_{adm}) pela prova de carga.

INTRODUÇÃO

Considera-se microestacas tubulares injetadas, aqueles elementos de fundação em estacas, enquadrados no item 7.3.3.4, "Estacas injetadas de Pequeno Diâmetro" da NBR 6122/1984, "Projeto e Execução de Fundações" da ABNT. Resulta da execução de um pré-furo no subsolo com diâmetro entre 10,0 e 20,0 cm; instalação de tubo metálico com válvulas de injeção devidamente dispostas ao longo de seu comprimento, injeção de bainha preenchendo o espaço anelar entre a parede do furo e o tubo; injeção individual das válvulas em fases e preenchimento do interior do tubo com ferragem complementar e ligante.

Para seu dimensionamento, enquanto fundação, dois pontos devem ser verificados: capacidade estrutural do fuste e comprimento de embutimento necessário à transferência adequada da carga ao subsolo.

Em face do seu reduzido diâmetro estas microestacas trabalham predominantemente por atrito lateral, alcançando portanto a injeção de calda de cimento sob pressão importante papel. Os estudos realizados com microestacas nestas condições, se limitaram na sua maioria, ao campo geotécnico (1, 2, 3, 7, 8, 16, 17, 18). Noutros trabalhos para estacas de fundação convencionais, realizados em países europeus e Brasil, estudou-se o modo de transferência de carga ao solo e a interação estaca-solo mereceu atenção de estudos teóricos e experimentais (4,5). Os estudos geotécnicos também se dirigiram para tentar explicar a influência da injeção no aumento de carga das microestacas em diversos tipos de solos (6, 16, 17). Dos estudos realizados no Brasil merecem destaques os trabalhos efetuados pelo Agrupamento de Geotecnia do IPT (7, 8), na falta de valores dos parâmetros de injeção para utilização da formulação em nossos solos, tornando-se de difícil utilização. Resulta

que os comprimentos de embutimento são atualmente determinados com base nas experiências anteriores de consultores e executores, acumuladas da prática na confecção de tirantes injetados para contenções.

Do ponto de vista da resistência estrutural do fuste, as microestacas compostas por tubos metálicos se inserem no contexto dos pilares mistos aço-concreto. Estes componentes estruturais não tem normalização específica no Brasil, e no exterior somente nos últimos anos tem merecido tratamento mais detalhado, principalmente na Inglaterra. A Norma Brasileira NBR 6122/1984 aborda as estacas mistas apenas genericamente, limitando-se ao cálculo dos tubulões revestidos com camisa metálica onde ela é considerada apenas no estado limite último. No contexto acima apresentado, este trabalho apresenta uma análise de alguns ensaios do fuste de microestaca, sem bainha ou injeção. Mostra peculiaridades que poderão ser interessantes para o estudo pormenorizado destes elementos de fundação, permitindo avaliar o coeficiente de segurança à rutura para uma dada seção estrutural proposta.

Como veremos adiante o comportamento estrutural do fuste das microestacas tubulares, tendo seu espaço interno cheio com nata de cimento comum, ensaiadas a 7 dias, apresentou a contribuição limitada da nata face a seu baixo módulo de deformabilidade, na gama das deformações elásticas. Pesquisas utilizando areias bem graduadas e alguns aditivos como, por exemplo, microsíllica, estão sendo desenvolvidas para o material de enchimento do tubo-fuste. Com melhor compatibilidade entre os módulos da argamassa de enchimento e do aço teremos comportamento superior, nos limites da lei de Hooke. A presente pesquisa possibilita a evidência deste fenômeno e norteou sua solução, em andamento, com acréscimos de custos muito inferiores às vantagens adicionadas.

1 - A RESISTÊNCIA DO FUSTE DAS MICROESTACAS À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios tiveram por objetivo investigar a resistência dos segmentos de microestacas na compressão simples; neste contexto, examinou-se a influência, no regime elástico, dos três componentes das microestacas na sua resistência. Posteriormente, após o estudo dos gráficos tensões x deformações (σ x ϵ) destes componentes e da observação dos gráficos (σ x ϵ) de cada segmento de microestacas, foram deduzidas expressões para a determinação da carga de rutura (P_R) de alguns tipos de microestacas ensaiadas que são apresentados neste trabalho.

Serão fornecidos os resultados de 12(doze) corpos de prova do conjunto de 33 já ensaiados.

1.1 - Características geométricas e mecânicas das microestacas

As características geométricas e mecânicas dos corpos de prova encontram-se nas tabelas 1 e 2 e desenho 1. As resistências médias dos componentes das microestacas encontram-se na tabela 2. Os segmentos de microestacas foram moldados nas dependências da ESTE Engenharia com acompanhamento de técnicos do Grupamento de estruturas do IPT. Neste trabalho, as microestacas de 6 a 12 foram preenchidas com nata de cimento com traço de $a/c = 0,5$ (em peso). As microestacas 10 a 12 tinham armadura complementar de diâmetro 25.0 mm e tensão de escoamento média (f_y) igual a 557,3 Mpa (5687 kgf/cm²); a rutura destas barras ocorreu na carga de 866,3 Mpa (8840 kgf/cm²), o aço era do tipo CA-50A.

De cada corpo de prova foram moldadas 6 corpos de prova 5 x 10 cm para a determinação da resistência à compressão (f_{cn}) e o módulo de deformação (E_n). Durante o período de cura os corpos de prova da nata ficaram imersos na água (Tabela 2).

1.2 – Instrumentação e ensaios

1.2.1 – Camisa Metálicas

Nas camisas metálicas foram instaladas bases de extensômetros mecânicos (do tipo Tensotast), sobre a solda, na solda e abaixo da solda, em todos os segmentos de camisas metálicas ou de microestacas. Os extensômetros mecânicos tinham base de 100 mm e sensibilidade de 10×10^{-6} mm/mm (Desenho 2).

1.2.2 – Armadura complementar e nata de cimento

As bases da armadura complementar das microestacas 10, 11 e 12, foram instrumentadas com 2 (dois) extensômetros elétricos de resistência. Estes extensômetros eram do tipo KFC-5—C1-11 – cuja base de medida é de 5 mm. Nas microestacas 7,8 e 9, que não tinham armaduras complementares, foram instalados 2(dois) extensômetros elétricos na nata do tipo KM-120-A2-11 cuja base de medida nominal é de 120 mm. Sensibilidade do conjunto extensométrico é de 10×10^{-6} mm/mm (Desenho 2).

1.2.3 – Medidas dos encurtamentos

Antes de cada ensaio foram instalados 2(dois) defletômetros, de sensibilidade igual a 10^{-2} mm para as medidas dos encurtamentos totais de cada corpo de prova.

1.2.4 – Ensaaios

Todos os corpos de prova foram ensaiados segundo uma mesma sistemática. Após a centragem dos corpos de prova na prensa, estes foram carregados segundo incrementos de carga de 98 KN (10,0 tf) e foram efetuados alguns descarregamentos para se observar o comportamento elástico. Entre cada novo incremento de carga eram feitas as leituras de todos os aparelhos; o tempo gasto para a leitura de todos os aparelhos foi de cerca de 3 min. Os ensaios transcorrem sem anormalidade e visualmente todos os corpos de prova se comportaram de modo semelhante na rutura. Todos os ensaios dos segmentos de microestacas foram realizados quando a nata atingiu de 7 a 10 dias de cura.

2 – ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUEM NA RESISTÊNCIA DO FUSTE DAS MICROESTACAS

O modo de rutura das microestacas caracterizou-se pela plastificação localizada no terço central seguida de flexão, até que os deslocamentos tornavam-se visíveis a olho nu e era esgotada a capacidade resistente dos corpos de prova. Tal fato ocorreu do mesmo modo em todos os segmentos de microestacas e em uma carga inferior a carga crítica (P_{cr}) das camisas metálicas, aproximadamente 1470 KN (150,0 tf). As cargas de rutura (P_R) das microestacas encontram-se na tabela 2.

2.1 – Determinação das parcelas de carga nos componentes das microestacas.

A análise elástica demonstrou boa concordância entre os valores teóricos e experimentais. As parcelas de carga no regime elástico foram calculados pelas seguintes expressões para as microestacas com armadura complementar:

$$\frac{P_{cam}}{P_{adm}} = \frac{1}{1 + \{E_n (1 - \alpha_2) + E_s \cdot \alpha_2\} \frac{\alpha_1}{E_{cam}}} \quad (1)$$

$$\frac{P_n}{P_{adm}} = \frac{1}{1 + \{E_{cam} (\frac{1}{1 - \rho}) + E_s \cdot (\frac{\alpha_2}{1 - \rho})\} \frac{\alpha_1}{E_n}} \quad (2)$$

$$\frac{P_s}{P_{adm}} = \frac{1}{1 + \{E_n (\frac{1}{2} - 1) + \frac{E_{cam}}{\rho}\} \frac{1}{E_s}} \quad (3)$$

onde:

$$\rho = \frac{A_s}{A_{cam}} \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \frac{A_n}{A_{cam}} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \frac{A_s}{A_n} \quad (6)$$

- P_{cam} = carga na camisa metálica ao início da plastificação localizada do corpo de prova.
- P_n = Carga na nata ao início da plastificação localizada do corpo de prova.
- P_s = Carga na armadura complementar ao início da plastificação localizada do corpo de prova.
- P_{adm} = Carga de início de plastificação localizada do corpo de prova.
- A_s = Área total das armaduras complementares.
- A_n = Área da nata (ou argamassa).
- A_{cam} = Área da camisa metálica.
- E_n = Módulo de deformação da nata (ou argamassa).
- E_s = Módulo de deformação das armaduras.
- E_{cam} = Módulo de deformação da camisa.

As comparações teóricas e experimentais encontram-se na tabela 3.

2.2 – Influência da camisa metálica

As camisas metálicas são as armaduras principais das microestacas. A ruptura das microestacas é definida pelo esgotamento da capacidade resistente das camisas metálicas.

Os valores experimentais médios das relações P_{cam}/P_{adm} são:

- Microestacas sem armadura complementar : 87%
- Microestacas com armadura complementar : 78%

2.3 – Influência das armaduras complementares

Embora exista a possibilidade de serem executadas sem armadura complementar, as microestacas com armadura complementar tem aumentada a sua resistência à compressão flexão e sua rigidez. Os valores experimentais médios das relações P_s/P_{adm} são:

- Microestacas com armadura de aço CA-50A : 23%

As medidas das deformações específicas efetuadas nas armaduras complementares, nas microestacas constituídas de uma barra de 25,0 mm de CA-50 A, revelaram que próximo da carga de ruptura (P_r) as tensões nestas armaduras são da ordem de grandeza da tensão de escoamento do aço (f_{ys}).

2.4 – Influência da nata de cimento

A baixa parcela de carga absorvida pela nata ou argamassa deve ser creditada ao baixo módulo de deformação da nata (E_n). Valores mais altos dos módulos de deformação da nata (ou argamassa) farão com que se aumente a participação destes componentes na resistência do conjunto.

Os valores experimentais médios das relações P_n/P_{adm} são:

- Microestacas sem armadura complementar: 8%
- Microestacas com armadura complementar: 3%

Nota-se, portanto uma importante peculiaridade das microestacas metálicas tubulares reforçadas com armadura complementar; embora o módulo de deformação da nata (E_n) seja de apenas 4.500 Mpa (46.000 kgf/cm²), possibilita o esgotamento da capacidade resistente das armaduras complementares e isto se dá quando já ocorre o esgotamento da camisa metálica. Evidentemente os valores mais altos de E_n farão que o componente estrutural resista a cargas mais elevadas.

Embora o regime elástico se tenha uma pequena quantidade de carga na nata, os ensaios mostraram que nas proximidades da rutura aumenta a importância destes componentes, já que após a plastificação da camisa metálica e o escoamento das armaduras, nota-se uma reserva de resistência nos corpos de provas.

2.5 – Influência da solda nas camisas metálicas

Devido as características dos ensaios laboratoriais que trataram os segmentos de microestacas como pilares (foi mobilizada apenas a resistência de ponta, em condições mais rigorosas do que são encontradas usualmente na prática), as deformações específicas na solda são maiores do que as deformações específicas na camisa metálica (ϵ_{cam}). Este fato não afetou as resistências da camisas com solda intermediária, a diferença em relação às camisas sem solda é de 1%. Tabela 2.

Verifica-se portanto que os segmentos de microestacas apresentam resistência elevadas em relação ao seu pequeno diâmetro (de $\approx 9,0$ cm). Note-se que nas obras as próprias características construtivas aumentam consideravelmente a seção transversal e existe a ação confinante do solo aumentada substancialmente pelo processo de injeção.

3 – DETERMINAÇÃO DA CARGA DE RUTURA (P_R) DOS SEGMENTOS DAS MICROESTACAS

O valor da carga de rutura (P_R) dos segmentos das microestacas (fuste) encontram-se na tabela 2. Diversos autores já investigaram a resistência de tubos metálicos preenchidos com concreto ou argamassa como resultado destes estudos experimentais existem fórmulas na literatura técnica que possibilitam o cálculo da carga admissível (P_{adm}) ou a carga de rutura (P_R). Estas fórmulas semi-empíricas são apresentadas em algumas normas e o seu emprego é limitado pelas características particulares dos componentes, e em todas existem limitações quanto ao seu uso.

3.1 – Cargas de rutura (P_R) obtidas por meio de ensaio

Na tabela 2 encontram-se os valores da carga de rutura dos segmentos de microestacas (fuste) e das camisas metálicas. Cada corpo de prova é composto por dois segmentos soldados, desenho 1. O estudo das características mecânicas dos materiais constituintes permitiu que fosse determinada uma expressão para a carga de rutura (P_R) de alguns segmentos de microestacas ensaiados.

3.1.1 – Microestacas sem armadura complementar

Para as microestacas constituídas apenas de nata e camisa metálica têm-se:

$$P_R = 0,95 f_{y,cam} A_{cam} + 0,34 f_n A_n \quad (7)$$

3.1.2 – Microestacas com armadura complementar

Para as microestacas constituídas de camisa metálica, nata e armadura complementar, têm-se:

$$P_R = 0,95 f_{y,cam} \cdot A_{cam} + 0,54 f_n A_n + 0,82 f_{y,s} A_s \quad (8)$$

Os parâmetros usados nestas expressões tem os significados seguintes:

A_{cam}	-	Área da seção transversal da camisa metálica
A_n	-	Área da seção transversal da nata
A_s	-	Área da armadura complementar
$f_{y,cam}$	-	Tensão mínima de escoamento das camisas metálicas
f_n	-	Resistência da nata à compressão simples
$f_{y,s}$	-	Tensão mínima de escoamento das barras da armadura complementar

Os estudos revelaram que estas expressões não podem ser usadas caso a armadura complementar seja constituída de barra ou fios de alta resistência.

3.2 – Determinação da resistência da microestaca (fuste) segundo a NBR 6122 de Agosto de 1984

No subitem 7.3.3.4.3 do item que trata das estacas injetadas de pequeno diâmetro é dito que o fuste deverá ter um fator de segurança mínimo igual a 2 em relação à ruptura. Neste caso pela tabela 2 as cargas admissíveis (P_{adm}) para os segmentos de microestacas ensaiados são:

- Microestacas apenas com nata: $P_{adm} = 256,4$ kN
- Microestacas com armadura complementar: $P_{adm} = 310,3$ kN

Deve ser salientado que nas condições reais de utilização, e pensando-se apenas em termos de compressão simples, infere-se que esta recomendação segundo a qual o fator de segurança deva ser igual a 2,0 vale apenas no topo das microestacas; como estas funcionam predominantemente pelo atrito lateral desenvolvido na interface fuste-solo, a carga diminui consideravelmente abaixo do topo, conseqüentemente o fator de segurança para a maior parte da microestaca é maior de que 2,0.

4 – DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ NA COMPRESSÃO SIMPLES – (AE)

4.1 – Determinação do (AE) no laboratório

A determinação do (AE) no laboratório foi feita com base nas medidas das deformações específicas na camisa metálica (ϵ_{cam}). O cálculo teórico foi feito segundo a expressão abaixo:

$$AE = A_{cam} \cdot E_{cam} + A_n E_n + A_s E_s \quad (9)$$

Onde:

$A_{cam} =$	Área da seção transversal da camisa metálica
$A_n =$	Área da seção transversal da nata de cimento
$A_s =$	Área da seção transversal da armadura complementar
$E_{cam} =$	Módulo de deformação da camisa metálica
$E_n =$	Módulo de deformação da nata de cimento
$E_s =$	Módulo de deformação das barras da armadura complementar

Os valores calculados pela expressão (9) estão na tabela 4 e apresentam boa concordância com os valores obtidos pelas deformações específicas na camisa metálica (ϵ_{cam}). O procedimento exposto para o cálculo do valor de AE para as microestacas mistas é corroborado pelos ensaios de R.W. Furlong. Nos ensaios conduzidos por este pesquisador, com pilares mistos, o erro entre os valores teóricos e os experimentos foi de $\pm 12,5\%$. Este procedimento também é encontrado em trabalhos ingleses (14) (15).

4.2 – Determinação do AE “in situ”

Nos trabalhos desenvolvidos pelo Agrupamento de Geotecnia do IPT foram executadas provas de carga em 3 (três) microestacas tubulares injetadas. Com a finalidade de medir as deformações específicas (ϵ_s) ao longo das microestacas, dentro de cada camisa metálica foi instalada uma barra de 12,5 mm (1/2”) de diâmetro, convenientemente instrumentada. As microestacas E-1 e E-2 foram carregadas até a carga máxima de 735 kN (75 tf). (7)

Com os valores das medidas das deformações específicas (ϵ_s) e os carregamentos (P), na seção mais próxima do topo da microestaca E-1, os autores concluíram que o módulo de rigidez à compressão (AE), “in situ” é $1,3 \times 10^6$ kN ($1,33 \times 10^5$ tf). Note-se que a microestaca E-1 possuía 5,55 m de fuste e tinha 2,0 m, engastados em rocha a E-2, 9,92m de comprimento e a extremidade apoiada em rocha. (7)

Os ensaios realizados com segmentos de microestacas demonstraram que há uma boa concordância entre os valores teóricos e os experimentais de AE. Deste fato, sendo o valor teórico do AE das microestacas E-1 e E-2, igual a $0,44 \times 10^6$ kN ($0,45 \times 10^5$ tf), $0,44 \times 10^5$ kN ($0,45 \times 10^4$ tf),

conclui-se que a relação entre o AE obtido da prova de carga e o valor teórico é aproximadamente 3,0. Nesta avaliação considerou-se o módulo de nata (En) aos 7 dias como sendo 4.900 Mpa (50.000 kgf / cm²) e a resistência fn de 17,0 Mpa (173 kgf/cm²); estes valores foram obtidos experimentalmente em trabalhos posteriores. Deve ser acrescentado que estas determinações foram feitas para as condições de solo e microestacas mostradas no desenho 2; os segmentos de camisas metálicas usadas nas provas de carga citadas eram rosqueados.

5 – CÁLCULO DA MICROESTACA NO REGIME ELÁSTICO

Após constatar que a relação entre os valores teóricos e os experimentais de AE é 3,0, verificou-se pelo gráfico que relaciona $P_e \times \epsilon_s$ nas provas de carga, que na carga máxima igual a 735 kN (75,0 tf), ainda no regime elástico, a deformação específica no topo da microestaca é aproximadamente 500×10^{-6} mm/mm; valor este medido na microestaca E-1 (7).

Calculando-se as parcelas de carga nestas microestacas E-1 e E-2 com as expressões (1), (2) e (3) tem-se:

$$\begin{aligned} P_{cam} / P_{adm} &= 92 \% \\ P_s / P_{adm} &= 6 \% \\ P_n / P_{adm} &= 2 \% \end{aligned}$$

As resistências nominais dos materiais constituintes destas microestacas são:

$$\begin{aligned} f_{y,cam} &= 215,6 \text{ Mpa (2200 kgf/cm}^2\text{)} \\ f_{y,s} &= 490,0 \text{ Mpa (5000 kgf/cm}^2\text{)} \\ f_n &= 15,9 \text{ Mpa (173 kgf/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

Com os dados anteriores calculam-se as tensões em cada componente das microestacas, teoricamente desprezando a bainha, e nas provas de carga. As comparações entre as tensões atuantes nos componentes da microestaca E-1 encontra-se na tabela 5.

Note-se, portanto que as tensões no regime elástico que surgem nos ensaios em laboratório são cerca de 3 vezes maiores do que os valores que se manifestam nas cargas máximas nas provas “in situ”. Constata-se pela tabela 5 que as tensões nas camisas metálicas (ϵ_{cam}) no cálculo elástico, são superiores aos valores das tensões admissíveis 216,0 MPa (2.200 kgf / cm²).

Calculando-se a carga admissível (P_{adm}) e dividindo-se por 1,5 conclue-se que as cargas admissíveis das microestacas E-1 e E-2 são respectivamente, 441,0 kN (45,0 tf) e 392 kN (40,0 tf). Estes valores são ligeiramente inferiores aos valores obtidos na prova de carga, 490 kN (50,0 tf) e 441 kN (45 tf).

Note-se que as microestacas E-1 e E-2, na carga máxima dos ensaios, se encontravam ainda no regime quase-elástico. Pode-se inferir que em solos do mesmo tipo com a extremidade engastada ou apoiada em rocha os valores de (AE) calculados e medidos são parâmetros adequados para a avaliação da capacidade de carga das microestacas na fase de ante-projeto; nesta carga não haverá rutura do fuste. Embora as avaliações elásticas aqui descritas tenham validade para todas as seções das microestacas, é evidentemente que os cálculos serão de maior utilidade próximo do topo, já que estas microestacas funcionam por atrito lateral e nas seções inferiores as cargas no fuste são reduzidas sensivelmente. 3

A influência do comprimento e do tipo de vinculação da extremidade das microestacas tubulares no tipo de distribuição das cargas ao longo do fuste, foi estudada por Massad “et alli” (8).

8 - CONCLUSÕES

- A- Os ensaios revelaram que a camisa metálica é a armadura principal das microestacas. Embora a nata de cimento apresente baixo módulo de deformação (E_n), nos casos de microestacas com armadura complementar, esta absorve uma parcela significativa da carga atuante.
- B- Os resultados dos ensaios efetuados com segmentos das microestacas (fuste), possibilitaram o desenvolvimento das fórmulas que permitem o cálculo da carga de rutura P_R . Deste modo para fustes com características geométricas e mecânicas semelhantes, a resistência admissível do fuste (P_{adm}) pode ser determinada pelas expressões apresentadas neste trabalho, introduzindo-se o coeficiente de segurança igual a 2, conforme prescrito no ítem 7.3.3.4.3 da NBR 6122/1984 Projeto e Execução de Fundações da ABNT.
- C- As determinações laboratoriais de módulo de rigidez à compressão (AE) e as teóricas apresentaram uma diferença máxima de 5%. O estudo de provas de carga demonstraram que para determinadas condições geotécnicas do subsolo (7) a relação entre o valor do módulo de rigidez “in situ” do fuste e aquele determinado teoricamente é aproximadamente 3. Isto significa que as deformações específicas (tensões) calculadas “in situ” são três vezes menores do que as deformações específicas (tensões) determinadas no regime elástico.
- D- Embora as microestacas e o subsolo apresentem características peculiares, a aplicação a teoria elástica após o conhecimento da relação $(AE)_{exp} / (AE)_{teó}$, forneceu resultados comparáveis com os obtidos pelas provas de carga.

A continuidade dos estudos experimentais e teóricos ampliará o conhecimento da capacidade de carga das microestacas tubulares injetadas em cada tipo de subsolo e, em particular, possibilitará avaliar corretamente o aumento da resistência do fuste “in situ”.

TABELA 1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS SEGMENTOS DE MICROESTACAS								
Corpo de Prova nº	Altura h (cm)	Espessura da camisa metálica (cm)	Diâmetro externo de (cm)	Área da camisa metálica $A_{cam} (cm^2)$	Área do núcleo (nata Na $A_n (cm^2)$	Área das armaduras $A_s (cm^2)$	Área total $A_t (cm^2)$	Tipo da microestaca ensaiada
1	150	0,81	8,92	20,6			62,3	Camisa metálica sem solda
2	150	0,83	9,00	21,3			63,6	Camisa metálica sem solda
3	150	0,86	9,00	22,0			63,6	Camisa metálica sem solda
4	150	0,85	8,90	21,5			62,2	Camisa metálica sem solda
5	150	0,80	8,90	20,3			62,2	Camisa metálica sem solda
6	150	0,88	8,95	22,3			62,9	Microestaca com armadura complementar
7	150	0,78	8,95	20,0	42,9		62,9	Microestaca com armadura complementar
8	150	0,79	9,00	20,4	43,2		63,6	Microestaca com armadura complementar
9	150	0,75	8,93	19,3	43,3		62,6	Microestaca com armadura complementar
10	150	0,82	8,95	20,9	36,8	5,1	62,9	Microestaca com uma barra de armadura complementar
11	150	0,82	8,92	20,9	36,5	5,1	62,5	Microestaca com uma barra de armadura complementar
12	150	0,85	8,94	21,6	36,0	5,1	62,4	Microestaca com uma barra de armadura complementar

TABELA 2 CARACTERÍSTICAS MECANICAS DOS COMPONENTES DAS MICROESTACAS							
Corpo de Prova nº	f_n (MPa)	$f_{y,cam}$ (MPa)	$f_{y,s}$ (MPa)	$E_{cam} = E_s$ (MPa)	E_n (MPa)	P_R (kN)	Características particulares dos corpos de prova
1		216			205800	450,8	Camisa metálica sem solda
2		216			205800	421,4	Camisa metálica sem solda
3		216			205800	426,3	Camisa metálica sem solda
4		216			205800	367,5	Camisa metálica com solda
5		216			205800	372,4	Camisa metálica com solda
6		216			205800	548,8	Camisa metálica com solda
7	27,6	216		6900	205800	421,4	Microestaca sem armadura complementar
8	27,6	216		6900	205800	480,2	Microestaca sem armadura complementar
9	27,6	216		10000	205800	637	Microestaca sem armadura complementar
10	17,0	216	557	4500	205800	637	Microestaca com armadura complementar
11	17,0	216	557	4500	205800	568,4	Microestaca com armadura complementar
12	17,0	216	557	4500	205800	656,6	Microestaca com armadura complementar

NOTA: E_n – Módulo de deformação da nata de cimento

E_{cam} – Módulo de deformação da camisa metálica

E_s – Módulo de deformação da armadura complementar

f_n – Resistência a compressão simples aos 7 dias da nata de cimento

$f_{y,cam}$ – Tensão de escoamento do aço do tubo ASTM A53

$f_{y,s}$ – Tensão de escoamento da barra de aço CA-50A

TABELA 3 DETERMINAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DAS PARCELAS DE CARGAS AOS COMPONENTES DAS MICROESTACAS										
Corpo de Prova nº	P _{adm} (KN)	ε _{cam} ⁻⁶ (10 ⁻⁶)	ε _n ⁻⁶ (10 ⁻⁶)	ε _s ⁻⁶ (10 ⁻⁶)	P _{cam} / P _{adm} %		P _n / P _{adm} %		P _s / P _{adm} %	
					teórico	ensaio	teórico	ensaio	teórico	ensaio
1	392,0	900			100	97				
2	392,0	1000			100	112				
3	294,0	630			100	97				
Média	359,3	843			100	102				
4	294,0	710			100	107				
5	294,0	755			100	107				
6	392,0	900			100	105				
Média	326,7	788			100	106				
7	294,0	645	730		93	90	7	7		
8	294,0	565	700		93	81	7	7		
9	392,0	880	820		90	89	10	9		
Média	326,7	697	750		92	87	8	8		
10	392,0	665		920	82	73	3	3	16	25
11	392,0	755		890	83	83	3	3	16	24
12	392,0	675		950	83	77	3	3	16	20
Média	392,0	698		920	83	78	3	3	16	23

NOTA: a deformação específica média na solda (ε_{so}) é 80%, maior do que na camisa metálica

TABELA 4 DETERMINAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA RIGIDEZ (AE) DAS MICROESTACAS VALORES MÉDIOS					
Corpo de Prova nº	Determinação Teórica (AE) = A _{cam} · E _{cam} + A _n E _n + A _s E _s		Determinação experimental AE = P / cam		(AE) teó.
	(kN)	(tf)	(kN)	(tf)	(AE) exp.
1, 2, 3	438000	44700	430000	43400	1,02
4, 5, 6	439000	44800	414000	42300	1,06
7, 8, 9	443000	45200	468400	47800	0,95
10, 11, 12	556000	56700	561500	57300	0,99

NOTA: ϵ_{cam} = deformação específica média nas camisas metálicas, determinadas nos gráficos P x ε_{cam}

TABELA 5 RELAÇÕES ENTRE AS TENSÕES CALCULADAS E AS MEDIDAS (Microestacas E-1)						
Componente	Tensão atuante	Valores calculados (Regime elástico)		Valores medidos (Prova de carga)		Valores calculados / Valores medidos
		(MPa)	(tf/cm ²)	(MPa)	(tf/cm ²)	
Camisa metálica	cam	341,4	3484,0	103,0	1050,0	3,3
Armadura complementar	s	339,1	3460,0	103,0	1050,0	3,3
Nata	n	7,1	72,0	202,0	22,5	3,2

NOTA: P = 735,0 kN (75,0 tf) , no topo da microestaca

