

# PROVA DE CARGA ESTÁTICA INSTRUMENTADA EM ESTACA METÁLICA DE SEÇÃO VARIÁVEL NA BAIXADA SANTISTA – ANÁLISE DE DESEMPENHO E CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

**Wanderley Perez Junior**

Zaclis, Falconi Engenheiros Associados

[wanderley@zaclisfalconi.com.br](mailto:wanderley@zaclisfalconi.com.br)

**Frederico Fernando Falconi.**

Zaclis, Falconi Engenheiros Associados

[fred@zaclisfalconi.com.br](mailto:fred@zaclisfalconi.com.br)

**Resumo.** *O presente trabalho apresentará um caso da construção de um edifício de 17 pavimentos localizado na cidade de Santos, S.P., cujas fundações foram projetadas e executadas com estacas metálicas profundas, constituídas por elementos de seção variável. Serão apresentados as características geotécnicas locais, os principais critérios de dimensionamento e os resultados da prova de carga estática instrumentada em profundidade, realizada em dezembro de 2006, em uma estaca de 49,0 m de comprimento.*

*Será apresentado também um método semi-empírico de previsão de capacidade de carga para estacas metálicas na Baixada Santista.*

*Será abordado ainda a utilização dos controles tradicionais de cravação tais como negas e repiques para este tipo de estaca.*

**Palavras-chave:** *Prova de carga estática, Strain gages, Estacas metálicas de seção variável, estacas metálicas, fundação.*

## 1. INTRODUÇÃO

Visando a otimização da solução em estacas metálicas e face a nova gama de perfis metálicos disponíveis no mercado da construção civil, surgiu a possibilidade de utilização de perfis laminados com

seção decrescente como elemento de fundação. A solução está crescendo dentro da Engenharia de Fundações, principalmente em locais em que as características da obra e do subsolo indicam a necessidade de estacas profundas, como na cidade de Santos. Nestes casos a economia de aço varia de 10 a 15%, quando comparada a solução de estacas de seção constante, tornando deste modo a solução em estacas metálicas competitiva quando comparada as outras alternativas. Nos anos de 2005 e 2006 a solução foi amplamente utilizada na cidade de Santos-SP, tendo sua eficiência comprovada através da realização de Provas de carga estáticas. Há registros de que a solução foi utilizada também com sucesso nas cidades de Jaboatão dos Guararapes e Recife-PE por Rocha (2006) e Gusmão (2006).

Este trabalho tem por objetivo não só divulgar mais um caso de utilização de estacas metálicas de seção variável, mas principalmente analisar o desempenho de uma estaca instalada nos Sedimentos Quaternários da Baixada Santista, à luz dos resultados da prova de carga estática realizada com instrumentação em profundidade. Nesta, além das tradicionais medidas de deformação no topo da estaca, foram instalados extensômetros elétricos (“strain gages”) em 3 profundidades para leitura de

deformações da estaca quando submetida ao carregamento estático, fato extremamente raro para uma estaca metálica cravada, constituída por perfis metálicos laminados e de abas paralelas.

A seguir apresenta-se as características da obra, os resultados de cravação, descrição da instrumentação e os resultados da prova de carga. No final serão apresentadas as conclusões e considerações gerais sobre a solução.

## **2. CARACTERÍSTICAS DA OBRA**

### **2.1. Perfil Geotécnico**

Localizada próximo ao Canal 3 da cidade de Santos, o subsolo local (figura 1) é constituído por camadas de areia fina siltosa pouco a medianamente compacta, cinza, intercaladas com camadas de argila marinha siltosa, muito mole a mole, cinza escura.

As duas primeiras camadas de argila marinha mole, apresentam SPT da ordem de 3 golpes. A terceira camada, encontrada entre 36,3 a 46,9m, apresenta SPT médio 6, sendo considerada sobreadensada, do tipo AT-Argilas Transicionais de acordo com os estudos de Massad (1990).

O Solo Residual é encontrado a partir de 53,0m, sendo nos metros iniciais (limite das sondagens) constituído por silte arenoso micáceo compacto a muito compacto.

### **2.2. Projeto das fundações**

O prédio a ser construído é composto por 2 blocos em estrutura convencional de concreto armado com 17 lajes. As cargas na fundação dos pilares do corpo do prédio variam de 2000 a 9700 kN (200 a 970 tf).

Entre as soluções tecnicamente viáveis, a solução em estacas metálicas com seção decrescente com a

profundidade apresentou a melhor relação custo x benefício para obra.

Para o cálculo da capacidade de carga das estas foram utilizados os métodos semi-empíricos de Aoki-Veloso, Décourt-Quaresma e Pedro P. Velloso, considerando-se o perímetro colado, conforme já indicado por Schenk (1966). A parcela de carga devido a ponta é muito pequena para estacas longas apoiadas sobre solos pouco competentes, conforme indicaram estudos anteriores como o citado por Falconi e Perez (2007). No entanto, isto não é válido quando a ponta das estacas atinge solos competentes ou o indeslocável.

As estacas utilizadas são constituídas por perfis metálicos laminados, padrão ASTM A572 grau 50 e tensão de escoamento de 345 Mpa.

No dimensionamento estrutural foi previsto o desconto de 1,5mm na espessura dos perfis, devido a corrosão, conforme previsto a Norma NBR 6122.

A variação da seção da estaca foi determinada em função da carga estrutural máxima dos perfis e da dissipação das cargas atuantes por atrito lateral x profundidade.

Desta forma, a estaca citada neste trabalho resultou na composição de 4 elementos conforme apresentado nas figuras 1 e 2, com comprimento previsto de 49,0m para carga de trabalho de 205 tf.

O coeficiente de segurança de projeto foi de 1,6.

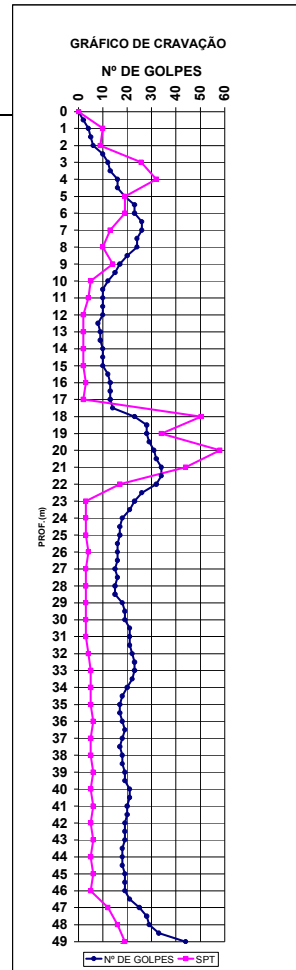
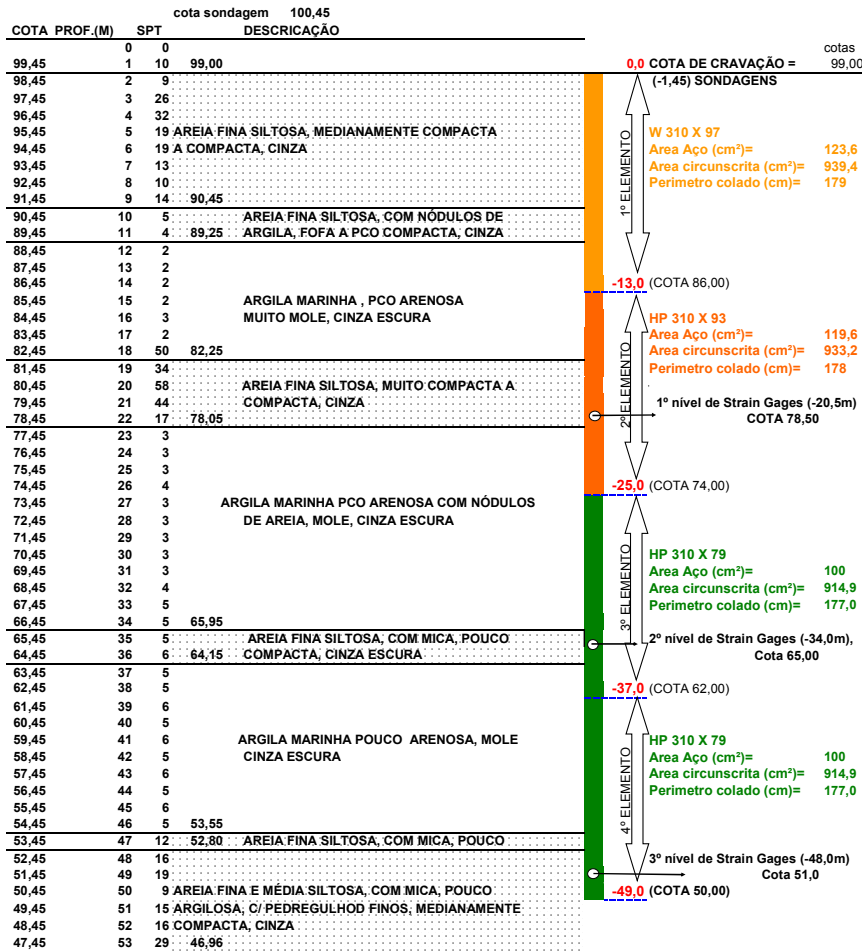
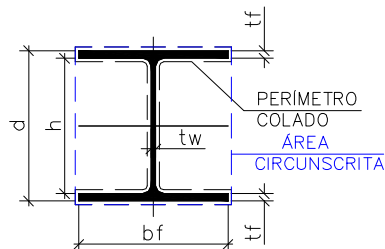


Figura 1 – Perfil geotécnico e gráfico de cravação da estaca.

CARACTERÍSTICAS DA ESTACA METÁLICA



PERFIL	MASSA LINEAR (kg/m)	COMP. (m)	d (mm)	h (mm)	bf (mm)	ESPESSURA		ÁREA DE AÇO (cm <sup>2</sup> )	PERÍMETRO COLADO (cm)	ÁREA CIRCUNSCRITA (cm <sup>2</sup> )
						tw (mm)	tf (mm)			
W 310x97	97,0	24,0	308	277	305	9,9	15,4	124,0	179	939,5
HP 310x93	93,0	12,0	303	277	308	13,1	13,1	120,0	177	933,2
HP 310x79	79,0	13,0	299	277	306	11,0	11,0	100,0	177	915,0

Figura 2 – Características da estaca ensaiada

### 3. INSTRUMENTAÇÃO

Visando-se obter maiores informações sobre a transferência de carga ao terreno local, foi desenvolvido um projeto de instrumentação, constituído por 3 pares extensômetros elétricos (“strain gages”).

O strain gage é um instrumento de alta precisão utilizado na Engenharia Civil para medir deformações em elementos estruturais tais como vigas, pilares e estacas, quando submetidas a carregamentos.

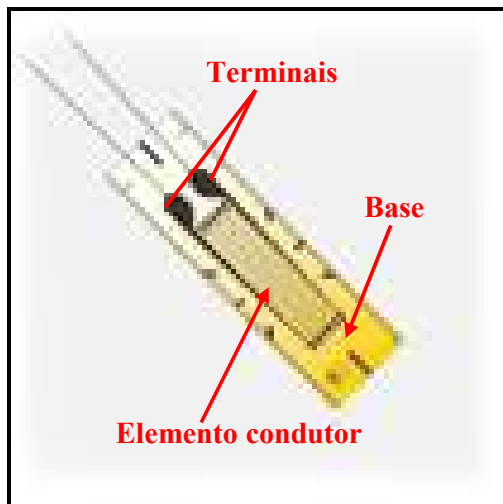


Figura 3 – Exemplo de strain gage

Trata-se de um resistor composto por uma fina camada (figura 3) e material condutor depositado sobre um composto isolante. Todo o conjunto é colado na estrutura a ser monitorada.

Pequenas variações nas dimensões da estrutura são transmitidas mecanicamente aos strain gages, os quais as transformam em variações equivalentes de sua resistência

elétrica e enviam para uma caixa leitora (figuras 19 e 20)

Instalados aos pares na alma dos perfis e na configuração de  $\frac{1}{2}$  ponte de “Wheastone” os strains gages forneceram as deformações específicas das estacas durante a realização da prova de carga. Uma vez conhecidos o módulo de elasticidade do aço e as características geométricas e da estaca pode-se calcular a tensão e a carga atuante em cada nível durante a aplicação dos carregamentos.

Os strains gages utilizados são da marca Kyowa, modelo KFG-5-120-D16-11 (figura 04) e foram instalados nas profundidades de 20,5, 34,0 e 48,0m, a partir da cota de cravação (ver figura 2). Tais profundidades foram definidas, visando-se posicionar os instrumentos nas respectivas camadas de areia.



Figura 04 – Modelo dos strain gages utilizados

Além dos extensômetros elétricos foram instalados no topo da estaca 6 extensômetros mecânicos, sendo 4 para medidas de deslocamentos verticais e 2 para deslocamentos horizontais (figura 17).

Cuidados especiais foram tomados

para que os instrumentos não fossem danificados no decorrer da cravação. Após o devido preparo da superfície (figura 05), os instrumentos foram colados na alma dos perfis (figura 06) e receberam a proteção de uma resina especial contra umidade e choques (figura 07).



Figura 05 – Preparo da superfície para instalação dos “strain gages”.



Figura 06 – Strain Gages instalados na alma do perfil



Figura 07 – Strain Gages protegidos com uma resina

Ao longo da estaca foram soldadas de forma simétrica 2 talas metálicas para proteção dos extensômetros e cabos, mantendo-os totalmente isolados do terreno (figuras 8 a 10 e 14).

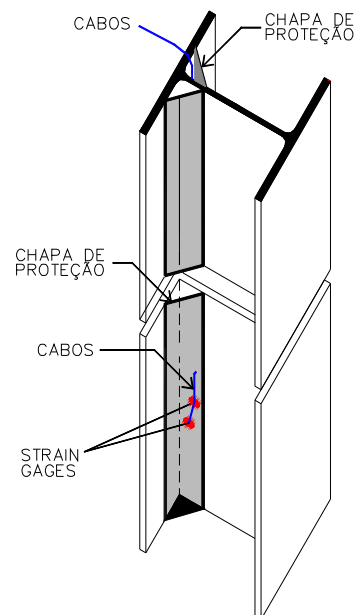


Figura 8 – Detalhe das chapas de proteção.





Figura 09 – Vista da chapa de proteção



Figura 10 – Detalhe da chapa de proteção



Figura 11 – Vista do Bate-estacas



Figura 12 – Posicionamento do 1º elemento

#### 4. CRAVAÇÃO DA ESTACA:

Com os instrumentos previamente instalados, a cravação ocorreu no dia 24/11/2006. Utilizou-se um bate-estacas de esteiras, equipado com martelo hidráulico de 5500 kg (figuras 11 a 13), o que garantiu um rígido controle da altura de queda do martelo durante toda a cravação.

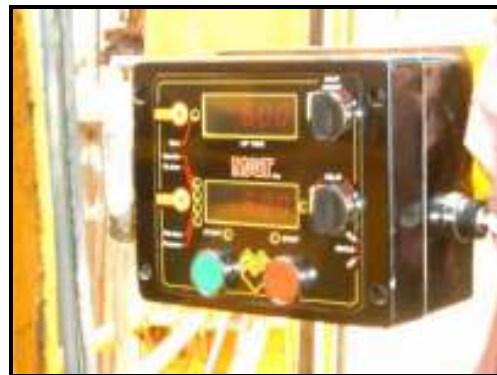


Figura 13 – Painel do bate-estacas para controle da altura de queda do martelo.

Atenção especial foi dada para a execução da emenda dos perfis. Visando-se evitar danos nesta região devido ao aumento de temperatura provocado pela solda, os cabos receberam uma proteção com mangueira (tipo “espaguete”) térmica de amianto (figura 10). Além disto executou-se um resfriamento com água durante todo o processo de solda.



Figura 14 – Solda das chapas de proteção na região da emenda dos perfis

A estaca atingiu a profundidade prevista de 49,0m, parando com negas de 69 mm e repique elástico médio de 18 mm (figura 15), para uma altura de queda do martelo de 60cm. O diagrama de cravação (figura 16), apresentou coerência com a sondagem mais próxima.

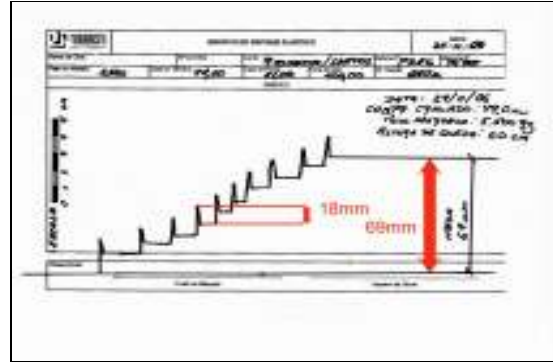


Figura 15 – Repique da estaca ao final da cravação

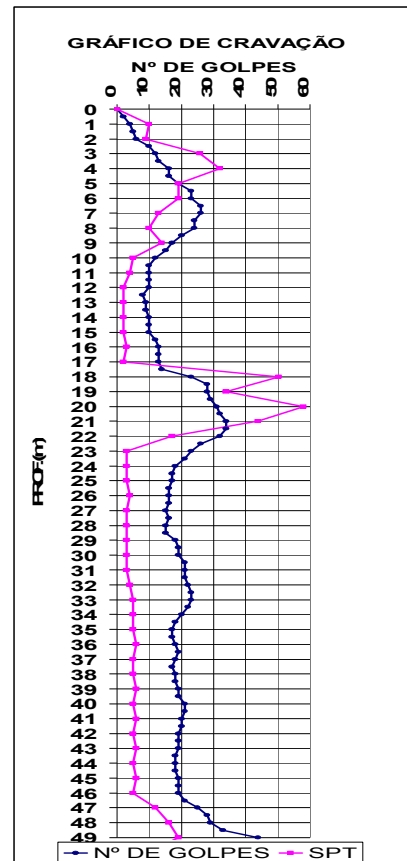


Figura 16 – Gráfico de cravação da estaca

## 5- PROVA DE CARGA ESTÁTICA

A prova de carga foi realizada no dia 08/12/2006, 14 dias após a cravação.

O sistema de reação foi dimensionado de acordo com a NBR 12131, utilizando-se como

estacas de reação, as outras 4 estacas do respectivo bloco de fundação (figura 18).

A aplicação da carga durante o ensaio, foi realizada através de um conjunto macaco-bomba-manômetro previamente calibrado.



Figura 17 - Defletômetros instalados no topo da estaca.

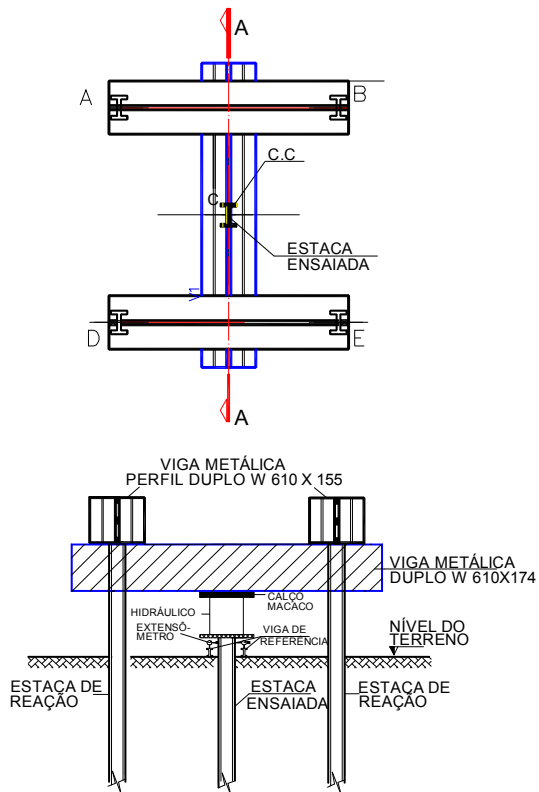


Figura 18 – Esquema do sistema de reação.

O ensaio foi realizado com carregamento rápido em estágios com incrementos equivalentes a 10% da carga de trabalho da estaca (205 tf). Em cada estágio manteve-se a carga aplicada por 10 minutos com leituras de deslocamentos e deformações imediatamente após a aplicação da carga e transcorridos os 10 minutos.

As leituras das deformações específicas foram efetuadas através de uma caixa seletora e um indicador digital (figuras 19 e 20).

As estacas de reação B e D foram monitoradas com nível topográfico com precisão de 0,01 mm.



Figura 19 –Caixa seletora para leituras dos “Strain Gages”.



Figura 20 – Detalhe do painel digital



A prova de carga foi interrompida no 16º estágio. Ao se aplicar a carga de 349 tf observou-se grandes deslocamentos na estaca, indicando a ruptura geotécnica. Procedeu-se então ao descarregamento, efetuado em 7 etapas.

Na figura 21 está apresentada a curva carga x recalque no topo da estaca. Com as deformações obtidas pelos strain gages foi possível traçar as curvas cargas aplicadas x tensão atuante no aço (fig. 22) e o diagrama de transferência de carga atuantes nos vários estágios de carregamentos (fig.23).

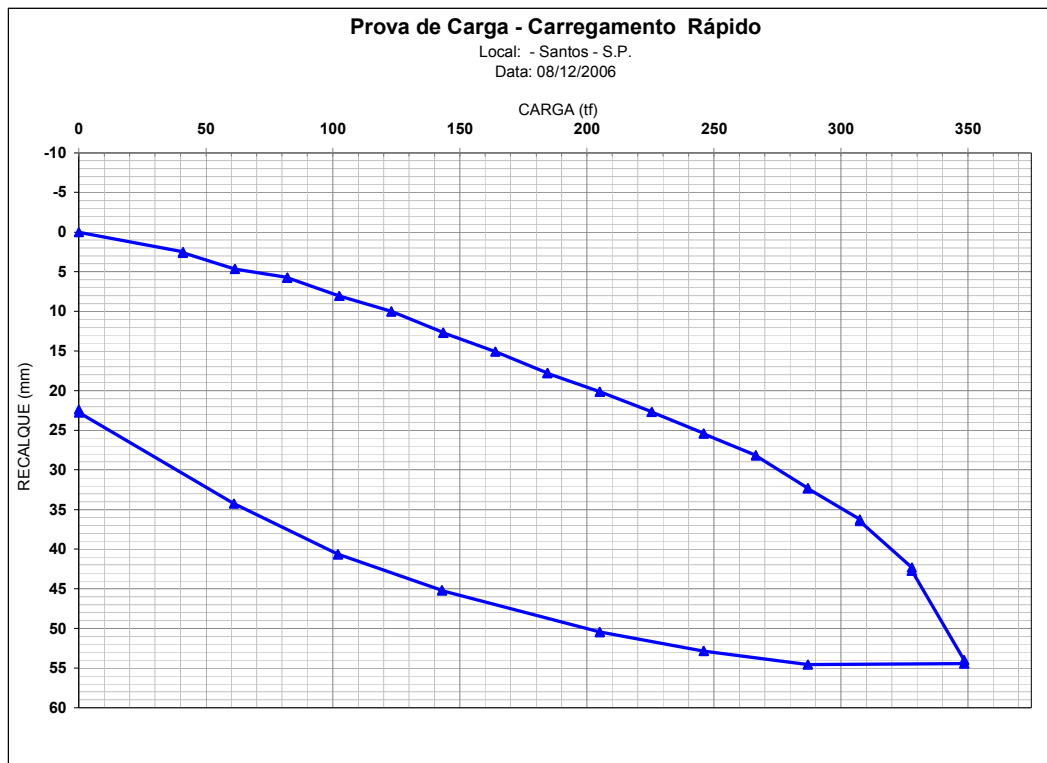


Figura 21 – Curva carga x recalque

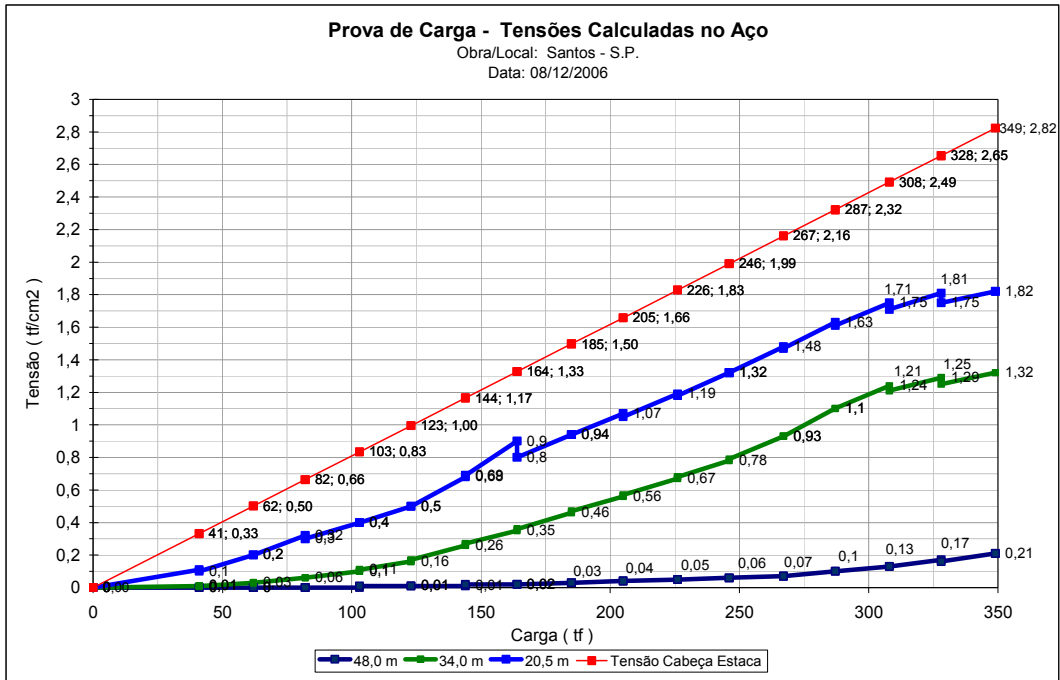


Figura 22 – Gráfico carga aplicada x tensão no aço durante o carregamento

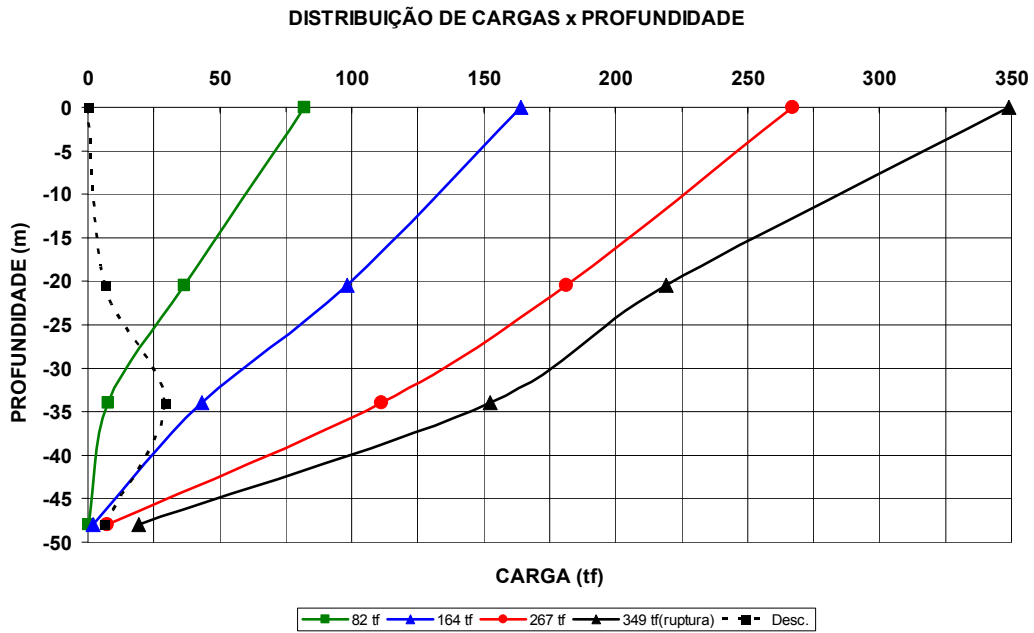


Figura 23 – Diagrama de transferência de carga

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A estaca apresentou um recalque total de 54,58mm, sendo 22,39mm de recalque permanente.

As curvas indicadas na figura 23 são meramente ilustrativas, pois não indicam a real distribuição de cargas entre os Strain Gages, uma vez que entre eles tem-se camadas de materiais distintos. Observa-se ainda nesta figura que para a carga de ruptura da estaca (349 tf), a carga atuante no 3º nível de Strain gages, situado a 1,0m na ponta, era de 19,0 tf correspondente a 5,5% da carga aplicada no topo.

Estimando-se o valor de atrito lateral desenvolvido neste último metro pelo método de Decourt Quaresma, tem-se a carga acumulada de 10 tf. Desta forma a carga atuante na ponta seria de 9 tf, desconsiderando-se cargas residuais geradas pelos efeitos de cravação. Logo a tensão de ruptura no solo sob a ponta da estaca seria de 9,0 kg/cm<sup>2</sup> se considerarmos a área circunscrita da ponta estaca.

Na tabela 3 apresenta-se a estimativa da carga de ruptura pelos métodos de Aoki-Veloso, Decourt-Quaresma e Pedro Paulo Veloso, considerando-se a área circunscrita e o perímetro colado.

Tabela 3

	AOKI VELOSO (tf)	DECOURT QUARESMA (tf)	PEDRO PAULO VELOSO (tf)
PL	363	390	508
PP	38	52	61
<b>PR</b>	<b>401</b>	<b>442</b>	<b>569</b>

Obs.: valores de PR sem coeficientes de segurança.

As cargas obtidas através das medidas de deformações dos “strain gages” (figura 24) mostram que o desenvolvimento do atrito lateral acumulado é inferior ao previsto pelos métodos semi-empíricos.

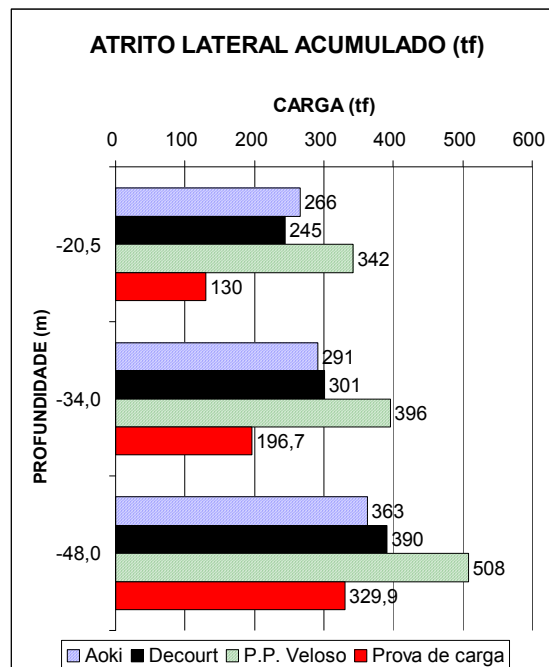


Figura 24 – Comparação entre cargas previstas e cargas medidas

Analisando-se os resultados desta e de mais 5 outras provas de carga estáticas indicadas na tabela 4, pode-se chegar a um método expedito para a estimativa da carga de ruptura de estacas metálicas em Santos.

Tabela 4 – Provas de carga estáticas realizadas em Santos

CIDADE	SANTOS	SANTOS	SANTOS	SANTOS	SANTOS
ESTADO	SP	SP	SP	SP	SP
OBRA	B	P	L	EC	ES
DATA	dez/05	mai/06	jul/06	set/06	1/9/2006
COMPOSIÇÃO DOS PERFIS	HP 310X125 (12,0m) HP 310X110 (12,0m) HP 310X 93 (12,0m) HP 310X 79 (12,0m)	HP 310X110 (9,7) HP 310X 93 (12,0) HP 310X 79 (12,0) HP 310X 79 (12,0)	W 310X107 (11,1) W 310X 97 (12,0) HP310X 93 (12,0) HP310X 79 (12,0)	HP 250X 89 (4,85) HP 310X 80 (12,0) HP 310X 73 (12,0) HP 310X 62 (12,0)	HP 310X110 (12,0) HP 310X 93 (12,0) HP 310X 79 (12,0) HP 310X 79 (12,0)
COMPRIMENTO CRAVADO	46,0	45,7	47,1	40,85	52,00
NEGA (mm)	SEM INFORMAÇÕES	5	74	2	SEM INFORMAÇÕES
REPIQUE (mm)	SEM INFORMAÇÕES	11	18	SEM INFORMAÇÕES	SEM INFORMAÇÕES
SOLO PONTA	SOLO RESIDUAL	ARGILA MARINHA	TRANSIÇÃO ARGILA / AREIA	SOLO RESIDUAL	SOLO RESIDUAL
CARGA TRABALHO (tf)	240	227	218	180	214
CARGA RUPTURA (tf)	386	380	355	325	384
FATOR DE SEGURANÇA	1,6	1,7	1,6	1,8	1,8
<b>CARGAS DE RUPTURA PREVISTAS (tf)</b>					
AOKI	350	237	285	87	410
DECOURT	379	299	329	147	435
P.P.VELOSO	462	334	398	155	585
MÉTODO PROPOSTO	305	238	274	305	467
VAN DER WEEN	424	434	431	471	430

a) Carga de Ruptura total ( $PR$ )

$$PR = PP + PL \quad (1)$$

$$fs = 0,21 \times \bar{N} \quad [\text{tf/m}^2] \quad (3)$$

b) Cálculo da capacidade de carga por atrito lateral ( $PL$ ):

$$PL = U \times \sum (L \times fs) \quad (2)$$

$fs$ .....adesão (tabela 5) [ $\text{tf/m}^2$ ]

$U$ .....Perímetro colado da estaca [m]

$L$ .....Espessura da camada [m]

$fs$ .....adesão média

$\bar{N}$ ..... média dos N SPT's das camadas de areia

c) Cálculo da capacidade de carga na ponta da estaca ( $PP$ ):

$$PP = A_{circ} \times k \quad (4)$$

$A_{circ}$ ... área circunscrita à ponta da estaca [ $\text{m}^2$ ]

$k$ ..... varia em função do SPT médio do solo, conforme a tabela 6

Tabela 5 -Valores de  $fs$  utilizados para as argilas.

Camada	SPT médio $\bar{N}$	$fs$ [ $\text{tf/m}^2$ ]
Argila marinha	$\bar{N} < 2,0$	2,0
Argila marinha (tipo "SFL")	$2 < \bar{N} < 4$	3,0
Argila marinha (tipo "AT")	$4 < \bar{N} < 6$	6,0

Os valores de  $fs$  sugeridos foram baseados na retroanálise efetuada com os resultados deste ensaio e também nos valores sugeridos por Massad e Teixeira (1988, 1990, 2003).

Para as areias recomenda-se que o valor de  $fs$  seja obtido da seguinte forma:

$\bar{N}$ .....média dos N SPT's na ponta e 1,0m abaixo.

Tabela 6 -Valores de K

SPT médio $\bar{N}$	K [ $\text{tf/m}^2$ ]
$10 < \bar{N} < 30$	200 a 400
$\bar{N} > 40$	1000 a 4000



### Desenvolvimento do atrito lateral x Profundidade

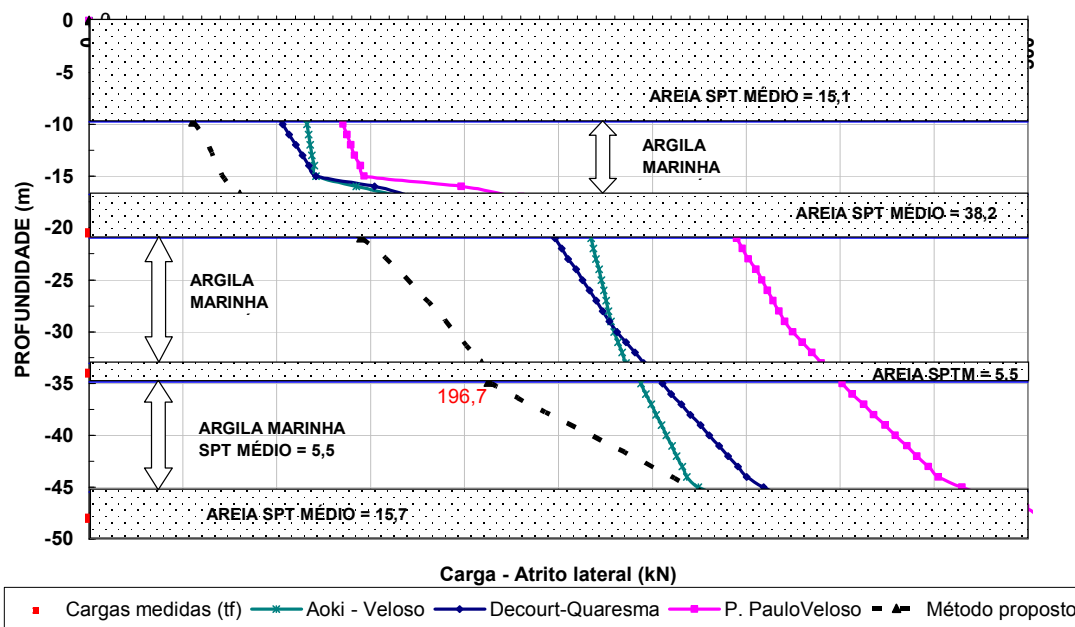


Figura 25 – Desenvolvimento do atrito lateral x profundidade

## 7. CONCLUSÕES

Pela figura 25, observa-se grande divergência na previsão da capacidade de carga pelos métodos mais usuais. Consta-se que a camada de argila existente entre 36,3 e 46,90m, cujo SPT médio é de 5,5 golpes, apresenta capacidade de carga muito superior as demais, sendo considerada sobre-adensada. Tal fato está ligado a história geológica da formação dos sedimentos, conforme apresentado por Massad (1990). Sendo assim a capacidade de carga de uma estaca instalada nestas argilas poderá ser subestimada quando calculada somente com base nos SPT.

Desta forma os métodos semi-empíricos mais consagrados no meio técnico necessitam de ajustes para aplicação em estacas metálicas profundas instaladas nos Sedimentos Quaternários da Baixada Santista.

O método para cálculo de capacidade de carga proposto pelos autores foi desenvolvido com base nas características geotécnicas e critérios de cravação aqui apresentados, servindo apenas como uma referência inicial. Quando utilizado deverá ser aferido com mais provas de carga estáticas, se possível, instrumentadas.

Os tradicionais métodos de controle de cravação não se mostraram eficientes para o controle da cravação. A nega obtida foi relativamente alta (69mm). No entanto os resultados da prova de carga mostram que o coeficiente de segurança obtido na prova de carga foi de 1,7, plenamente satisfatório e bastante próximo do coeficiente de 1,6 previsto em projeto.

Para a utilização da solução em obras com características semelhantes à

apresentada, os autores recomendam que:

a) deverá ser realizada uma investigação geotécnica confiável p/ uma boa caracterização do subsolo. Nos locais onde o subsolo apresenta características heterogêneas, torna-se difícil estabelecer critérios executivos para a composição das estacas.

b) a composição das estacas deverá respeitar a semelhança geométrica dos perfis de modo que o perímetro colado das estacas, apresente reduções insignificantes, tendo em vista que a maior parcela de carga de trabalho é obtida pelo atrito lateral. Além disto é fundamental que os perfis sejam da mesma série de fabricação para que não comprometam a qualidade e o procedimento executivo das soldas.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem a Construtora Confel , Gerdau Açominas, a Bureau de Projetos e a Fundamenta pela parceria no trabalho realizado.

### 8.REFERÊNCIAS

ABMS, 1983. Encontro Técnico: Capacidade de Carga de Estacas Pré-Moldadas.

ABMS, ABEF, (2º ed.)1998. Fundações: Teoria e Prática. São Paulo: PINI.

Açominas. Catálogos de Perfis.

Gusmão A.D.; Gusmão Filho J.A; Maia G.B.- Otimização de Fundações com Estacas de Perfis Laminados, - XIII-COBRAMSEG, 2006.

Falconi, F.F. e Perez W.; Estacas metálicas com seção variável ao longo da Profundidade. IX Seminário de de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, 2007.

Massad, F. História geológica e propriedades dos solos das baixadas – Comparação entre diferentes locais da Costa Brasileira. “ Simpósio sobre Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras: Origem, Características Geotécnicas e Experiências de Obras, Anais, Vol. II, Rio de Janeiro, Agosto 1988;

Massad, F. “ O Atrito Lateral em Estacas Flutuantes nos Sedimentos Quaternários da Baixada Santista. IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Fundações, 1990-, Salvador Bahia, anais, vol.2, , pág. 421-428

Massad, F. “ Características Geotécnicas dos solos da Baixada Santista, com ênfase na Cidade de Santos. Workshop – Passado, Presente e Futuro dos Edifícios da Orla Marítima de Santos , 2003.

Norma Técnica NBR 6122

Rocha, Luciana Martinez Borba; Falconi Frederico; Correa, Celso Nogueira outros-Fundação em Estacas Metálicas com Seção Variável – Avaliação do Desempenho- XIII-COBRAMSEG, 2006.

Teixeira, Alberto Henriques “Capacidade de Carga de Estacas Pré-moldadas de Concreto nos Sedimentos Quaternários da Baixada Santista. “ Simpósio sobre Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras: Origem, Características Geotécnicas e Experiências de Obras, Anais, Vol. II, , Rio De Janeiro, Agosto 1988, pág. 5.1 – 5.25.

Schenck, W. – Cálculo de Capacidade de carga de estacas por meio de fórmulas estáticas, “ Grundbau – Taschenbuch, 1966.