XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/9

Análise de desempenho de um bloco sobre estacas pré-moldadas de concreto pelo método S+D

Matheus Bernini Cecere
Engenheiro Civil, CONSAG Engenharia., São Paulo, Brasil, matheus.bernini@agnet.com.br

Marco Aurelio Abreu Peixoto da Silva
Engenheiro Civil, M.Sc., CONSAG Engenharia., São Paulo, Brasil, marco.peixoto@agnet.com.br

Lucas de Araujo Estanqueiro
Engenheiro Civil, CONSAG Engenharia., Rio de Janeiro, Brasil, lucas.estanqueiro@agnet.com.br

Lucas Ribeiro Silva
Engenheiro Civil, CONSAG Engenharia., São Paulo, Brasil, lucas.silva@agnet.com.br

Nathalia Pizzol de Oliveira
Engenheira Civil, Casagrande Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, npoliveira@cagen.com.br

RESUMO: O presente estudo tem por objetivo analisar o desempenho de um bloco de fundação apoiado sobre estacas pré-moldadas de concreto, com ênfase na avaliação da capacidade de carga mobilizada por cada elemento cravado. Para a condução da investigação, foram realizados Ensaios de Carregamento Dinâmico (ECD) com aplicação de energia crescente em estacas testes. A partir dos resultados obtidos nos ECD's, foram determinados os parâmetros do método S+D, possibilitando a estimativa da capacidade de carga das demais estacas por meio das medições de nega e repique registradas durante o processo de cravação. O bloco analisado corresponde à fundação de uma Obra de Arte Especial rodoviária, implantada na região metropolitana do Rio de Janeiro, caracterizada pela ocorrência de depósitos sedimentares constituídos por solos moles. O estudo tem como propósito comparar as capacidades de carga indicadas pelos ECD's com as estimativas calculadas pelo método S+D, visando verificar a aplicabilidade da metodologia proposta na análise do desempenho de estaqueamentos.

PALAVRAS-CHAVE: método S+D, estaca pré-moldada, fundação, solos moles.

ABSTRACT: The present study aims to evaluate the performance of a pile cap supported by precast concrete piles, with emphasis on assessing the load-bearing capacity mobilized by each driven pile. To this end, Dynamic Load Tests (PDA) with progressively increasing energy levels were carried out on selected test piles. Based on the PDA results, the parameters of the S+D method were calibrated, allowing the estimation of the load-bearing capacity of the remaining piles through the set and rebound measurements recorded during the driving process. The analyzed pile cap constitutes the foundation of a highway bridge structure located in the metropolitan region of Rio de Janeiro, Brazil, an area characterized by sedimentary deposits consisting predominantly of soft soils. The study compares the load-bearing capacities obtained from the PDA with those estimated using the S+D method, aiming to assess the applicability of the proposed methodology for evaluating the performance of pile foundations.

KEYWORDS: method S+D, precast piles, foundation, soft soils.

1 INTRODUÇÃO

O estudo apresentado avalia o desempenho das estacas de um bloco de fundação de uma Obra de Arte Especial rodoviária, implantada em uma rodovia na região metropolitana do Rio de Janeiro.

O projeto executivo considerou a cravação de estacas pré-moldadas com diâmetro de 60 cm, sendo que no início das atividades de campo foi executada uma estaca teste com a realização de um ensaio de carregamento dinâmico (PDA), de forma que seja possível considerar no projeto geotécnico um fator de segurança reduzido.

Após a execução do ensaio PDA, os resultados obtidos foram retroanalisados para a aplicação do método S+D na análise de desempenho das demais estacas do bloco de fundação estudado.

2 ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

A análise das cartas geológicas permite situar a área de estudo no contexto morfoestrutural da Baixada da Baía de Guanabara, inserida na região metropolitana do Rio de Janeiro, caracterizada pela intensa acumulação de sedimentos flúvio-marinhos de idade quaternária. A área desenvolve-se sobre superfície predominantemente aplainada, correspondente a extensas planícies flúvio-marinhas que incluem ambientes de manguezal, configurando um cenário geotécnico propício à ocorrência de solos moles, com baixa resistência mecânica e elevada compressibilidade.

Os depósitos sedimentares apresentam granulometria variada, abrangendo desde cascalhos até argilas, formados em ambientes fluviais e marinho-costeiros ao longo das calhas dos rios e de amplas planícies deposicionais. Em função de sua idade geológica recente, esses materiais são, em geral, inconsolidados e pouco adensados, destacando-se a presença de argilas orgânicas saturadas, com baixa resistência ao cisalhamento e alta compressibilidade. Conforme indicado pela Carta de Geodiversidade da CPRM (2008), a área caracteriza-se ainda por baixa capacidade de suporte e nível freático subaflorante a aflorante, abrangendo planícies de maré e manguezais, bem como planícies fluviomarinhas holocênicas, compostas por sedimentos argiloarenosos a argilosos, ricos em matéria orgânica, sais e enxofre.

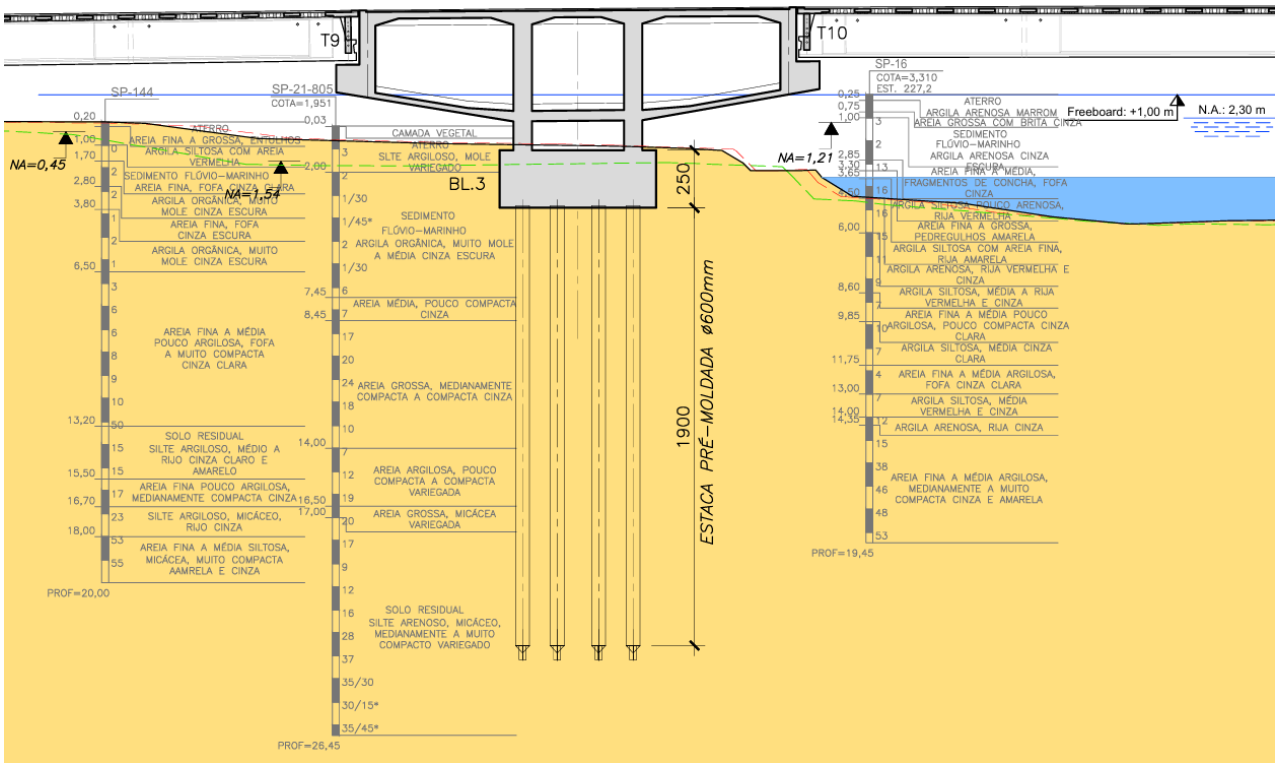


Figura 1 - Boletins de sondagem na região do bloco de fundação analisado.

3 MÉTODOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS

3.1 Método S+D

O método S+D proposto por Aoki (1996 apud Cintra et al. 2013) consiste em calcular a capacidade de carga de estacas cravadas por meio do monitoramento da nega e repique durante o instante final de cravação. Para tanto, deve-se primeiro estabelecer alguns parâmetros geotécnicos por meio de uma retroanálise de um Ensaio de Carregamento Dinâmico executado com energia crescente.

Conforme apresentador por Querelli (2022), o método S+D pode ser escrito da seguinte forma:

$$R_{mx} = \zeta \cdot \frac{\eta \cdot W \cdot h}{s+D} \quad (1)$$

Onde:

Rmx = resistência última geotécnica da estaca
η = eficiência da cravação
W = peso do martelo
h = altura de queda do martelo
s = nega no instante final de cravação

Sendo que os parâmetros η e ζ podem ser calculados através de uma retroanálise de um Ensaio de Carregamento Dinâmico executado com energia crescente.

3.2 Definição de Parâmetros pelo Ensaio de Carregamento Dinâmico

Para a definição dos parâmetros utilizados no método S+D, foi realizado um Ensaio de Carregamento Dinâmico com energia crescente em uma estaca teste, cravada no local do bloco de fundação (estaca E46). O ensaio em questão foi executado 10 dias após a cravação, visando inclusive avaliar o ganho de resistência por set-up.

Tabela 1 - Resultados do ensaio PDA executado com energia crescente na estaca E46 do bloco de fundação.

Table 1

BN	LP m	RMX tn	DMX mm	EMX tn-m	DH m	ETH (%)	ETR (%)	FMX tn	CSX Mpa	CSI Mpa	CSB Mpa	TSX Mpa	BTA (%)	SET mm
AG - BR-493 - Itaboraí - RJ - 3ª Mobilização														
E46														
1	37,00	135,5	5,80	0,68	0,10	84,9	7,1	153,8	8,9	10,9	5,9	1,2	100,0	1,00
2	37,00	201,4	10,34	2,03	0,30	84,7	21,2	243,0	14,1	15,8	9,8	2,1	100,0	1,00
3	37,00	252,0	15,14	4,08	0,60	85,0	42,5	327,5	19,0	21,7	14,4	3,0	100,0	3,00
4	37,00	283,4	18,49	5,85	0,80	91,4	60,9	383,2	22,2	25,6	17,6	3,2	78,0	4,00
5	37,00	302,5	20,96	7,25	1,00	90,6	75,5	422,9	24,5	28,4	20,2	3,6	81,0	6,00
6	37,00	307,0	21,61	7,72	1,10	87,7	80,4	439,8	25,5	29,5	21,0	3,5	80,0	4,91
Maximum	37,00	307,0	21,61	7,72	1,10	91,4	80,4	439,8	25,5	29,5	21,0	3,6	100,0	6,00
@ BN	1	6	6	6	6	4	6	6	6	6	6	5	1	5

Destaca-se que este estudo considerou o ensaio PDA executado com energia crescente com um Match Quality pela análie CAPWAP de 1,78. Assim sendo, os resultados obtidos no Ensaio de Carregamento Dinâmico possuem uma boa qualidade, e podem ser utilizados para o estudo proposto.

```
CAPWAP match quality      =    1.78        (Wave Up Match) ; RSA = 0
Observed: Final Set       =   5.900 mm;    Blow Count      =     169 b/m
Computed: Final Set       =   4.909 mm;    Blow Count      =     204 b/m
Transducer     F3 (D979)  CAL:  91.4; RF: 1.00; F4 (D990)  CAL:  91.3; RF: 1.00
               A3 (K2484) CAL:   325; RF: 1.00; A4 (K6069) CAL:   390; RF: 1.00
```

Figura 2 - Indicação do CAPWAP Match Quality do ensaio PDA executado na estaca teste E46.

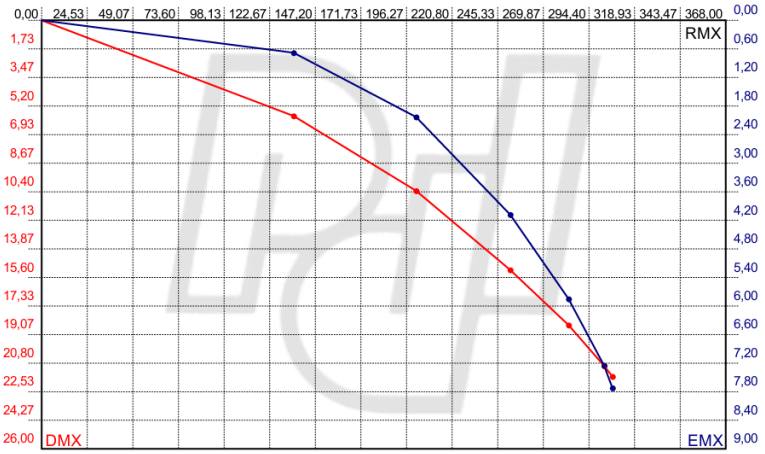


Figura 3 - Resultado do ensaio PDA com energia crescente na estaca teste 10 dias após a cravação.

A partir dos dados obtidos pelo PDA, deve-se então estabelecer a regressão linear encontrada no ensaio entre a Energia Potencial (EMX) e o Deslocamento (DMX).

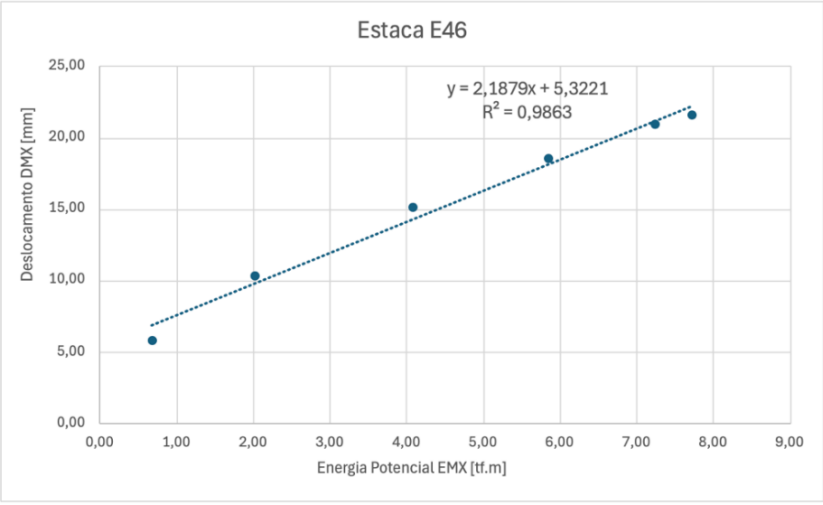


Figura 4 - Regressão linear estabelecida pelo ensaio PDA entre EMX e DMX (Estaca E46).

A partir da regressão linear realizada, calcula-se então os parâmetros “a” e “b”:

$$DMX = a\,.EMX + b \tag{2}$$

A eficiência da cravação é estabelecida a partir da seguinte relação obtida com o ensaio PDA:

$$\eta = \frac{EMX}{DH\,.W} \tag{3}$$

No caso do PDA executado com energia crescente, calcula-se uma eficiência média de 87%.

O parâmetro ζ será calculado a partir dos dados do PDA utilizando a seguinte expressão:

$$\zeta = RMX \,.\frac{(S+DMX)}{EMX} \tag{4}$$

No caso do PDA executado na estaca teste, calcula-se para o parâmetro ζ um valor médio de 1,14.

Tabela 2 - Planilha de cálculo com os valores médios dos parâmetros η e ζ.

ESTACA E46 - PDA NO FINAL DA CRAVAÇÃO (EOD)							a =	2,1879		b =	5,3221	
BN	**DH** [m]	**S** [mm]	**RMX** [tf]	**EMX** [tf.m]	**DMX** [mm]	**W** [tf]	**η**	**ζ**	**Dmx** [mm]	**Rmx** [tf]	**Emx** [tf.m]	**Rmx/RMX**
1	0,10	1,00	135,50	0,68	5,80	8,00	0,85	1,36	6,85	101,94	0,70	0,752
2	0,30	1,00	201,40	2,03	10,34	8,00	0,85	1,13	9,91	220,08	2,10	1,093
3	0,60	3,00	252,00	4,08	15,14	8,00	0,85	1,12	14,50	274,44	4,19	1,089
4	0,80	4,00	283,40	5,85	18,49	8,00	0,91	1,09	17,56	297,02	5,59	1,048
5	1,00	6,00	302,50	7,25	20,96	8,00	0,91	1,12	20,62	300,71	6,99	0,994
6	1,10	4,91	307,00	7,72	21,61	8,00	0,88	1,05	22,15	325,41	7,69	1,060
Média							**0,87**	**1,14**				**1,006**

Onde:

Os parâmetros DH, S, RMX, EMX, DMW e W foram medidos durante o ensaio PDA executado com energia crescente na estaca teste;

Os parâmetros Dmx, Rmx e Emx foram calculados pela formulação do método S+D apresentada anteriormente;

O parâmetro Rmx/RMX avalia se a resistência calculada pelo método S+D está compatível com o valor de RMX medido durante a execução do ensaio PDA;

O valor médio do parâmetro Rmx/RMX ficou em 1,006, o que mostra que o cálculo pelo método S+D está condizente com os valores medidos durante o ensaio PDA.

Dessa forma, para o cálculo da capacidade de carga pelo método S+D para as demais estacas do bloco de fundação analisado serão considerados os seguintes parâmetros:

η = 0,87
ζ = 1,14
W = altura de queda do martelo no instante final de cravação da estaca
H = peso do pilão do martelo utilizado para a cravação da estaca
S = medida de nega no instante final e cravação da estaca

$$Emx = \eta \,.W\,.H = 0{,}87\,.W\,.H \tag{5}$$

$$Dmx = 2{,}1879 \times Emx + 5{,}3221$$

$$Rmx = \zeta \,.\frac{Emx}{(S + Dmx)} = 1{,}14\,.\frac{0{,}87\,.W\,.H}{(S + 2{,}1879\,.0{,}87\,.W\,.H + 5{,}3221)}$$

Onde:

Os parâmetros S, W e H serão medidos durante a cravação das estacas, e podem ser obtidos pelo digrama de cravação dos elementos;



Figura 5 - Execução do ensaio de carregamento dinâmico (PDA) na estaca teste.

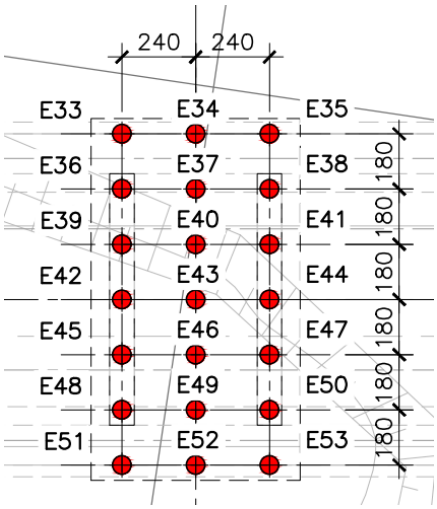


Figura 6 - Arranjo das estacas de fundação no bloco analisado.

3.3 Análise do Set-Up

Conforme informado anteriormente, o ensaio PDA na estaca E46 foi realizado 10 dias após a cravação do elemento de fundação. Assim sendo, os resultados no instante final de cravação (EOD) serão comparados com os resultados no instante da recravação após 10 dias para avaliar o efeito de set-up.

Para avaliar o efeito de set-up nas estacas cravadas foram comparados os valores de Rmx calculados pelo Método S+D no instante final de cravação, com o valor de RMX calculado durante a execução do ensaio PDA (10 dias após a cravação).

Tabela 3 - Avaliação do set-up na estaca E46.

BOLETIM DE CRAVAÇÃO			**MÉTODO S+D**						**ENSAIO PDA**	
Martelo: **8,00 t**			a = **2,1879**			b = **5,3221**				
L [m]	**Alt. de Queda** [m]	**Nega para 10 golpes** [mm]	**η**	**ζ**	**S** [mm]	**Emx** [tf.m]	**Dmx** [mm]	**Rmx** [tf]	**RMX** [tf]	**SET-UP**
37,0	0,60	23	0,87	1,14	2,3	4,19	14,5	285,9	307,0	1,07

Final da cravação (EOD): Rmx = 285,9 tf ; calculado pelo método S+D
Recravação após 10 dias (PDA): RMX = 307 tf ; calculado pelo ensaio PDA

Set-up calculado na estaca:

$$\frac{RMX}{Rmx} = \frac{307\ tf}{285{,}9\ tf} = \mathbf{1{,}07}$$

4 ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGA

4.1 Bloco de Fundação Analisado

O presente trabalho analisou o desempenho de um bloco de fundação composto por 21 estacas pré-moldadas de concreto com diâmetro de 60 cm e carga de trabalho de 2000 kN.

Vale pontuar que para estabelecer os parâmetros do método S+D, foi utilizado como base o ensaio PDA executado na estaca teste (E46) com energia crescente.

4.2 Capacidade de Carga das Estacas de Fundação

Ao avaliar os boletins com os diagramas de cravação das estacas pré-moldadas foram calculadas as seguintes capacidades de carga para as estacas de fundação do bloco analisado.

Tabela 4 - Carga admissível calculada para as estacas do bloco de fundação pelo método S+D, considerando o efeito do set-up.

FINAL DA CRAVAÇÃO (EOD)					MÉTODO S+D						CARGA ADMISSÍVEL		
					a = 2,1879			b = 5,3221			FS = 1,60		
Estaca	L [m]	H [m]	W [t]	Nega para 10 golpes [mm]	S [mm]	η	ζ	Emx [tf.m]	Dmx [mm]	Rmx [tf]	SET-UP	Ru [tf]	Carga Adm. [tf]
E33	27,0	0,60	8,0	8,0	0,80	0,87	1,14	4,19	14,50	313,9	1,07	337,1	210,7
E34	27,0	0,60	8,0	10,0	1,00	0,87	1,14	4,19	14,50	309,9	1,07	332,7	208,0
E35	29,5	0,60	8,0	10,0	1,00	0,87	1,14	4,19	14,50	309,9	1,07	332,7	208,0
E36	26,0	0,60	8,0	10,0	1,00	0,87	1,14	4,19	14,50	309,9	1,07	332,7	208,0
E37	27,0	0,60	8,0	8,0	0,80	0,87	1,14	4,19	14,50	313,9	1,07	337,1	210,7
E38	27,3	0,60	8,0	10,0	1,00	0,87	1,14	4,19	14,50	309,9	1,07	332,7	208,0
E39	26,8	0,60	8,0	10,0	1,00	0,87	1,14	4,19	14,50	309,9	1,07	332,7	208,0
E40	26,7	0,60	8,0	13,0	1,30	0,87	1,14	4,19	14,50	304,0	1,07	326,4	204,0
E41	28,0	0,60	8,0	10,0	1,00	0,87	1,14	4,19	14,50	309,9	1,07	332,7	208,0
E42	28,5	0,60	8,0	8,0	0,80	0,87	1,14	4,19	14,50	313,9	1,07	337,1	210,7
E43	25,0	0,60	8,0	10,0	1,00	0,87	1,14	4,19	14,50	309,9	1,07	332,7	208,0
E44	27,0	0,60	8,0	7,0	0,70	0,87	1,14	4,19	14,50	316,0	1,07	339,3	212,1
E45	26,1	0,60	8,0	11,0	1,10	0,87	1,14	4,19	14,50	307,9	1,07	330,6	206,6
E47	24,8	0,60	8,0	8,0	0,80	0,87	1,14	4,19	14,50	313,9	1,07	337,1	210,7
E48	26,0	0,60	8,0	10,0	1,00	0,87	1,14	4,19	14,50	309,9	1,07	332,7	208,0
E49	25,5	0,60	8,0	10,0	1,00	0,87	1,14	4,19	14,50	309,9	1,07	332,7	208,0
E50	24,4	0,60	8,0	10,0	1,00	0,87	1,14	4,19	14,50	309,9	1,07	332,7	208,0
E51	23,5	0,75	8,0	7,0	0,70	0,87	1,14	5,24	16,79	343,2	1,07	368,5	230,3
E52	24,2	0,60	8,0	7,0	0,70	0,87	1,14	4,19	14,50	316,0	1,07	339,3	212,1
E53	23,4	0,60	8,0	10,0	1,00	0,87	1,14	4,19	14,50	309,9	1,07	332,7	208,0
Média	**26,2**									**312,5**			**209,8**

Tendo em vista que foi executada uma prova de carga prévia em uma estaca teste, foi definido para o projeto executivo das estacas de fundação um fator de segurança de 1,60. Tal definição está de acordo com o estabelecido pelo item 6.2.1.2.2 da norma técnica ABNT NBR 6.122:2022.

Para o cálculo das Cargas Admissíveis indicadas na Tabela 4, foi realizado o seguinte cálculo:

- Resistência última geotécnica considerando set-up:

$$Ru = Rmx \times Set - up = 1{,}07 \times Rmx \quad (7)$$

- Carga admissível considerando FS = 1,60:

$$Qadm = \frac{Ru}{FS} = \frac{1{,}07 \times Rmx}{1{,}60} \quad (8)$$

4.3 Retroanálise dos resultados obtidos

Para avaliar se o método S+D conseguiu estimar as Cargas Admissíveis das estacas de forma adequada, foram realizados três Ensaios de Carregamento Dinâmico (PDA) adicionais. Novamente os ensaios foram executados 10 dias após a cravação dos elementos de fundação, de forma que seja possível avaliar as capacidades já considerando o ganho de resistência defido ao efeito de set-up.

A seguir está indicado na Tabela 5 um comparativo das Cargas Admissíveis nas estacas calculadas pelo método S+D com os valores medidos pelos 3 ensaios PDA adicionais.

Tabela 5 - Comparativo das Cargas Admissíveis calculadas pelo Método S+D com os valores do PDA.

Local	Método S+D			Ensaio PDA		
Estaca	Rmx [tf]	Ru [tf]	Qadm FS = 1,60 [tf]	RMX [tf]	Match Quality	Qadm FS = 1,60 [tf]
E37	313,9	337,1	210,7	400,0	2,25	250,0
E47	313,9	337,1	210,7	460,0	1,27	287,5
E49	309,9	332,7	208,0	437,7	1,06	273,6

A seguir está indicado como exemplo o resultado obtido com o ensaio PDA na estaca E37, executado como forma de avaliar a acurácia do método S+D.

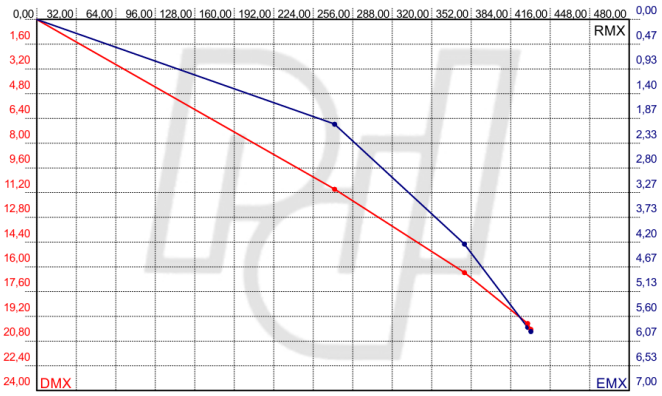


Figura 7 - Ensaio PDA executado na estaca E37 para avaliar a acurácia do método S+D.

5 CONCLUSÕES

A retroanálise do ensaio PDA na estaca teste com o método S+D permitiu avaliar o desempenho das estacas de fundação cravadas na obra, sendo que apenas com as medições da altura de queda do martelo e da nega final de cravação foi possível estimar a carga admissível nos elementos.

Em complemento, a execução do ensaio PDA na estaca teste 10 dias após a cravação permitiu avalair o ganho de resistência devido ao efeito do set-up. Tal consideração foi incorporada no cálculo das cargas admissíveis das estacas de fundação.

Com a finalidade de avaliar a acurácia do método S+D na estimativa da carga admissível das estacas, foram executados 3 ensaios PDA adicionais 10 dias após a cravação das estacas. Ao comparar as cargas admissíveis calculadas pelo método S+D com os valores medidos nos ensaios PDA das estacas E37, E47 e E49, observa-se que a metodologia utilizada conseguiu indicar a capacidade de carga dos elementos com uma boa acurrácia e segurança.

Após a aplicação do método S+D, observa-se que a metodologia proposta pode ser utilizada no controle e acompanhamento de obras geotécnicas de fundações cravadas, fornecendo resultados seguros para a análise de desempenho de estacas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CINTRA, J. C.; AOKI, N.; TSUHA, C. de H. C.; GIACHETI, H. L. (2013). Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos. São Paulo: Oficina de Textos.

QUERELLI, A.; SOUZA, T. J.; AOKI, N. (2022). Aplicação do método S+D calibrado à duas obras na baixada Fluminense. XI Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul – GEORS 2022, Santa Maria.

AOKI, N. (1997). Determinação da capacidade de carga última de estaca cravada em ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente. Tese de Doutorado – EESC - Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.