DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/55

Efeito Set Up em Estacas Metálicas Cravadas com Martelos Vibratórios e de Impacto – Caso de Obra

Marina Didier Amorim
Doutoranda em Geotecnia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, marinadamorim@gmail.com

Alexandre Duarte Gusmão
Professor titular, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, alexandreduartegusmao@gmail.com

Gilmar de Brito Maia
Diretor de Projetos, Gusmão Engenheiros Associados, Recife, Brasil, gilmar@gusmao.eng.br

Sílvio Romero Ferreira
Professor titular, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, sr.mf@hotmail.com

RESUMO: Fundações com estacas metálicas da cidade do Recife têm sido bastante utilizadas devido à necessidade atingir grandes profundidades (acima de 40 metros) tanto pela necessidade de resistir a elevados esforços de vento, como devido a configuração do subsolo, que possui camadas de argila mole e camadas resistentes intermediárias. Tem por objetivo analisar o comportamento de estacas metálicas em solos de Formação Sedimentar, considerando a influência do tempo de cravação das estacas e o processo de cravação de estacas com martelo vibratório e de impacto. São descritos e validados dois métodos de avaliação para deste efeito: Skov e Denver (1988) e Gusmão (2022). É apresentado um caso de obra com fundação em estacas metálicas com seção decrescente com a profundidade, com realização de Ensaios de Carregamento Dinâmico e Provas de Carga Estática. Resultados indicaram que o ganho de capacidade de carga pode atingir até 50% após 30 dias e tende à estabilização em cerca de 60 dias. E também que as estacas cravadas com martelo de impacto apresentaram uma capacidade de carga cerca de 20% superior às cravadas com martelo vibratório.

PALAVRAS-CHAVE: Efeito Set Up, Estacas metálicas, Fundação, Martelo Vibratório, Martelo de Impacto.

ABSTRACT: Steel pile foundations in the city of Recife have been widely used due to the need to reach great depths (above 40 meters), both to resist high wind loads and because of the local subsoil configuration, which consists of layers of soft clay interspersed with intermediate resistant layers. The objective of this study is to analyze the behavior of steel piles in sedimentary formation soils, considering the influence of the time after pile driving and the pile installation process using vibratory hammers and impact hammers. Two evaluation methods for this effect are described and validated: Skov and Denver (1988) and Gusmão (2022). A case study is presented involving a project with steel pile foundations with a section decreasing with depth, including the execution of Dynamic Load Tests and Static Load Tests. The results indicated that the gain in load-bearing capacity can reach up to 50% after 30 days, tending to stabilize at around 60 days. A comparison between the two types of hammers showed that piles driven with an impact hammer presented a load capacity approximately 20% higher than those driven with a vibratory hammer.

KEYWORDS: Set Up Effect, Steel piles, Foundation, Vibratory Hammer, Impact Hammer

1 INTRODUÇÃO

A cidade do Recife apresenta duas paisagens distintas: os morros e a planície. O núcleo urbanho central do Recife assenta sobre a planície aluvionar de origem flúvio-marinha em torno da qual se eleva, ao norte, ao sul e a oeste, a formação Barreiras. A leste, desenvolve-se o litoral oceânico, que, defendido pelos cordões arrecifes, propociou condições favoráveis ao estabelecimento dos portos comerciais (FERREIRA, 1982). A

maior parte da ocupação urbana e das obras de grande porte se localizam na planície e em torno de 50% da área da planície podem ser encontrados depósitos de argila mole (GUSMÃO FILHO, 1998). A presença de depósitos de argila mole, favorece o uso de estacas pré-moldadas de concreto e de aço, as quais, são soluções de fundações largamente utilizadas na referida cidade (GUSMÃO et al., 2005). A utilização de estacas de perfil metálico tem crescido no Brasil com a disponibilização no mercado de grande variedade de bitolas em aço com limite de escoamento de 345 MPa. Essa oferta de bitolas permitiu a utilização de estacas longas constituídas de perfis com peso de aço decrescente com a profundidade, conforme relata Gusmão et al. (2006).

Usualmente as estacas metálicas têm a ponta paralisada em substrato competente ou no impenetrável à percussão, mobilizando elevada resistência de ponta. Nas estacas longas o atrito lateral é significativo e precisa ser adequadamente estimado, principalmente ao dimensionar estaqueamento em perfil metálico com seção de aço decrescente com a profundidade. (POLIDO et al., 2019).

A NBR 6122 (ABNT, 2019) exige a execução de provas de carga estáticas de desempenho, no decorrer do estaqueamento, em obras com um número de estacas superior a 100, que é o caso das obras do Recife.

As estacas metálicas podem ser cravadas com a utilização de martelos de queda livre, martelos hidráulicos, martelos a diesel, martelos pneumáticos e martelos vibratórios. A escolha de um ou outro martelo depende, principalmente, das características do solo, do comprimento da estaca e do nível de ruído e vibração (GERDAU, 2015). A cravação com martelo hidráulico, é o processo mais utilizado na cidade do Recife. O martelo vibratório usa contrapesos giratórios para criar vibração na estaca, a vibração de alta velocidade faz com que o solo "liquefaça" e a estaca deslize no solo com menos esforço (BURGOS, 2019).

2 CAPACIDADE DE CARGA DAS ESTACAS

A capacidade de carga das estacas, em sua grande maioria, é calculada através de métodos semiempíricos onde são somadas a resistência lateral e de ponta baseados em ensaios SPT. A resistência lateral, por muitas vezes, é subestimada, pois não considera o ganho de resistência do solo como tempo, efeito *set up* (SOARES, 2006). Velloso e Lopes (2010), ao citar Vésic (1977), afirmam que as estacas cravadas em solos granulares, pouco a medianamente compactos, causam uma densificação ou aumento na compacidade destes solos, na medida em que o volume da estaca introduzido no terreno acarreta uma redução do índice de vazios. Já as estacas cravadas em solos argilosos saturados, devido à baixa permeabilidade, causam, num primeiro momento, um deslocamento do solo praticamente igual ao volume da estaca. Na região afetada, há um aumento nas poropressões e um amolgamento do solo.

Após a execução da estaca, os excessos de propropressão dissipam-se num processo de adensamento radial e há uma recuperação parcial da estrutura do solo, chamada de recuperação tixotrópica. Se o solo for pouco sensível e, portanto, sem uma perda considerável de resistência pelo amolgamento, o adensamento pode compensar o efeito do amolgamento e tem-se no final do processo, um solo melhorado. Se o solo for muito sensível, pode-se ter, no final do processo, um solo enfraquecido.

2.1 Métodos de Avaliação do Efeito *Set Up*

2.1.1 Método Skov e Denver (1988)

Skov e Denver (1988) desenvolveram um método para previsão do aumento da capacidade de carga das estacas como tempo, os autores estabelecem que o efeito *set up* em estacas cravadas, para qualquer tipo de solo, evolui proporcionalmente como logaritmo do tempo através da expressão 1:

$$Q(t) = Q_0\,[1 + A\log\left(\frac{t}{to}\right)] \qquad (1)$$

Q_0 = carga obtida no tempo t_0;
Q(t) = carga final obtida no tempo;
A = coeficiente adimensional empírico em função do tipo de solo;
t = dias após cravação;
t_0 = dia inicial, quando tem terreno argiloso, adotar valor igual a 1.

Os autores sugerem valores de A=0,2 para solos arenosos e A=0,6 para solos argilosos considerando intervalo inicial de tempo pós cravação para t0 = 0,5 dia (solos arenosos) e t0 = 1 dia (solos argilosos) quando então o ganho de resistência como logaritmo do tempo apresenta comportamento logarítmico linear.

2.1.2 Método Gusmão (2022)

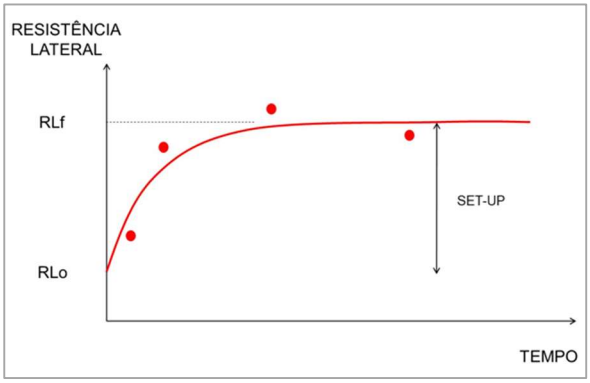
Em 2022, Gusmão apresentou um método para previsão do efeito *set up*, que toma por base um banco de dados de resultados de ECD realizados em vários estágios de tempo após cravação das estacas representado pela equação 2 utilizando a equação 3. O método proposto é empírico e baseado em uma curva exponencial.

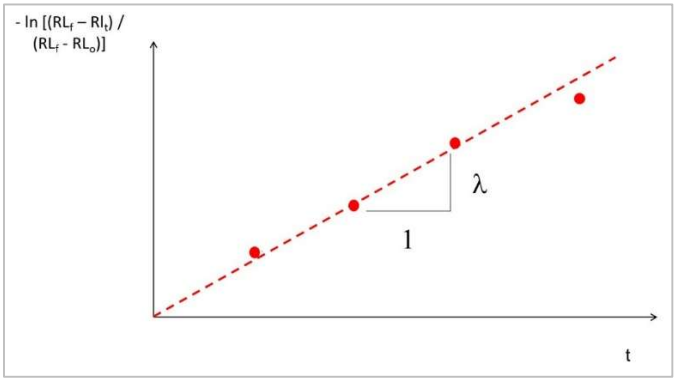
O autor enfatiza que escolheu um modelo exponencial para representar o efeito *set up*, visto que comportamento de uma curva exponencial se assemelha ao comportamento da resistência lateral de uma estaca ao longo do tempo: existe um ganho de resistência lateral, porém, este ganho tende a se estabilizar.

$$RL_{Total} = [RL_F - (RL_F - RL_0)^{-(\lambda.t)}] \quad (2)$$

RL_T = resistência lateral calculada;
RL_F = maior resistência lateral obtida no ensaio PDA acrescida de 1 unidade de carga;
RL_0 = menor resistência lateral obtida no ensaio PDA;
λ = inclinação da reta apresentada na Equação 11 e Figuras 4 e 5;
t = tempo em dias que deseja obter a RLtotal.

$$(\lambda.t) = -\ln\left[\frac{(RL_F - RL_T)}{(RL_F - RL_0)}\right] \quad (3)$$





Figuras 1 e 2. Modelo Gusmão (2022). Fonte: Gusmão (2022)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma empresa de consultoria geotécnica da região forneceu seu acervo para desenvolvimento do trabalho, portanto, foi selecionada uma obra da Região Metropolitana do Recife com solução de fundação estacas metálicas com perfis laminados com seção variável com a profundidade em que existiram três campanhas de Ensaios de Carregamento Dinâmico (ECD) em diferentes tempos após cravação das estacas, duas Provas de Carga Estáticas (PCE) e em que a cravação das estacas foi realizada através de dois equipamentos: martelo vibratório e martelo de impacto.

O um empreendimento é formado por 2 Torres com com 36 lajes cada, cargas verticais permanentes entre 3.901 a 19.772 kN, além cargas verticais e momentos decorrentes da ação do vento na estrutura. A Figura 3 mostra um perfil geotécnico simplificado baseado na campanha inicial de prospecção geotécnica que continha 11 sondagens a percussão. A avaliação da capacidade de cargas das estacas foi feita através dos Métodos de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978, 1982. Além disso, foi considerado um acréscimo de 15% da carga admissível para cenário de vento, como estabelecido pela NBR 6122 (ABNT 2019). As características das estacas utilizadas no projeto e seus quantitativos iniciais, estão apresentados na Tabela 1.

PROF. (m)	TIPO DE SOLO	NSPTmédio (golpes/0,3m)
0 – 3,00	AREIA	10
3,0 – 4,0	FRAGMENTOS DE ROCHA	40
4,0 – 7,0	AREIA SILTOSA	15
7,0 – 11,5	ARGILA ORGÂNICA SILTOSA	9
11,5 – 22,0	AREIA	8
22,0 – 26,5	AREIA	30
26,5 – 37,5	ARGILA ORGÂNICA	5
37,5 – 41,5	AREIA SILTO-ARGILOSA	21
41,5 – 45,5	AREIA	40

Figura 3. Perfil geotécnico simplificado do terreno do empreendimento

Tabela 1. Características das estacas e quantitativos iniciais de projeto

Tipo	Quanti-dade	Seção Transversal	Carga Adm. (kN)	Comp. Unitário (m)	Comp.Total (m)
Tipo A	156	18m (HP-310x125) + 12m (HP-310x93) + 12m (HP-310x79)	2.200	42,00	6.552,00
Tipo B	47	18m (HP-310x110) +12m (HP-310x93) +12m (HP-310x79)	1.900	42,00	11.974,00
Tipo C	13	16m (HP-310x93) +24m (HP-310x79)	1.550	40,00	520,00

O projeto de fundações previu a realização de dez ECD e duas PCE, uma em cada torre. A cravação das estacas se iniciou com o martelo vibratório ICE 28RF, montado em torre. Foi a primeira obra a utilizar martelo vibratório para cravação de estacas metálicas compostas por perfis laminados da cidade de Recife. Inicialmente, foi realizada uma PCE na estaca P1B-E08 e seis ECD em estacas piloto, como indicados na Tabela 2 e na Figura 3.

Tabela 2. Resultados ECD (Estacas piloto – Torre B)

Estaca	**Tipo**	**Comp. Unitário (m)**	**Tempo entre cravação e ensaio (dias)**	**RMX* (kN)**	**Tipo de martelo**
P8B-E01	A	42,00	0	1.870	Vibratório
P6B-E05	A	42,00	2	2.110	Vibratório
P1B-E01	B	42,00	10	3.880	Vibratório
P10B-E03	A	42,00	15	2.240	Vibratório
P12B-E02	B	42,00	17	3.370	Vibratório
P4B-E03	B	42,00	25	2.990	Vibratório

*Resistência Máxima do Ensaio.

Após os ensaios nas estacas piloto, foram executadas duas PCE, com resultados na Figura 4. Primeiro, foi executada a PCE da Torre B, que a estaca havia sido cravada 42 m com martelo vibratório. Como o resultado não havia sido satisfatório, acrescentou 6 m de comprimento na estaca da PCE da Torre A, que foram cravados com martelo de impacto (90 kN). Ou seja, aumentou o comprimento da estaca e alterou o método de cravação como tentativa de aumentar a resistência da estaca. Os resultados das duas PCE mostraram

novamente não satisfatórios, pois ambas as estacas atingiram 3.080 kN, com recalques significativos, o aumento do comprimento não trouxe ganho expressivo de resistência.

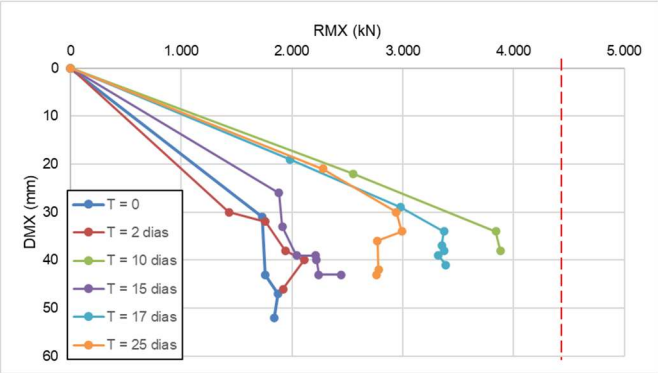


Figura 4. Resultados ECD (Estacas piloto – Torre B)

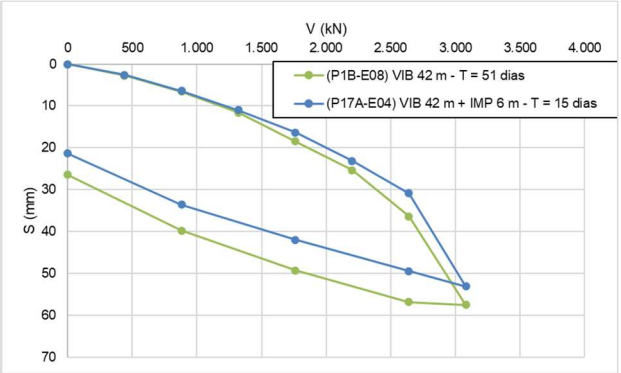


Figura 5. Resultados PCE.

Os resultados dos ECD das estacas piloto da Torre B mostram que ao sobrepor os resultados dos ensaios é notório o aumento da capacidade de carga das estacas e da rigidez com o passar do tempo e apesar da capacidade de carga das estacas ter aumentado, não se conseguiu mobilizar a carga de ruptura de projeto.

Foram, então, realizada uma segunda e terceira campanhas de PDA, adotando um comprimento maior e inserindo o martelo de impacto de 90 kN, logo após recravação das estacas e após 9 dias da cravação, com os resultados indicados na Tabela 3. Após 8 dias, apesar de ter existido um aumento de carga correspondente a 24%, continuava não satisfatório.

Tabela 3. Resultados ECD (2ª e 3ª campanhas)

Estaca	Tipo	Com. Unitário (m)	Tempo entre cravação e ensaio (dias)	RMX (kN)	Tempo entre cravação e ensaio (dias)	RMX (kN)
P8B-E08	A	44,0	1	2.547	9	3.042
P12B-E07	A	44,0	1	2.422	9	3.285
P4B-E04	B	47,0	1	2.299	9	2.813
P1B-E10	A	46,0	1	2.390	9	3.121
P6B-E01	B	47,0	1	2.062	9	2.561
P9B-E05	B	46,0	1	1.800	9	2.008

Foram realizadas 2 sondagens mistas para verificar o material da ponta das estacas. Foi encontrada uma camada de seixos rolados e angulosos, extremamente fraturados que corresponde a um material da ponta das estacas mais fraco do que os índices de resistência N_{SPT}. Outro fator que interfere nos resultados dos ensaios é que ensaios com grandes profundidades necessitam de uma energia maior para mobilizar a carga.

Como aumentar o comprimento não foi uma medida efetiva para obter capacidade de carga nas estacas, foi adotada uma solução com reforços nos blocos, introduzindo uma estaca Tipo D, com 42 m, sendo composta por 18 m (W-250x80) + 24 m (W-250x62), acrescentando 58 estacas de reforço na Torre A e 34 na Torre B.

Por fim, decidiu aguardar um tempo de cravação em torno de 50 dias para realizar os quatro ensaios PDA da Torre A. Com resultados apresentados na Figura 6. Após os 50 dias, as estacas obtiveram uma resistência aproximadamente de 4.358 kN, que era resistência mobilizada do projeto inicial. Nota-se que apesar de maior tempo entre cravação e ensaio (69 dias), a estaca cravada apenas com martelo vibratório apresentou menor resistência mobilizada. Comparando apenas os ensaios com tempos equivalentes, 50 e 51 dias, percebe-se que a utilização apenas do martelo de impacto, mesmo com menor comprimento de estaca, conseguiu mobilizar uma resistência maior.

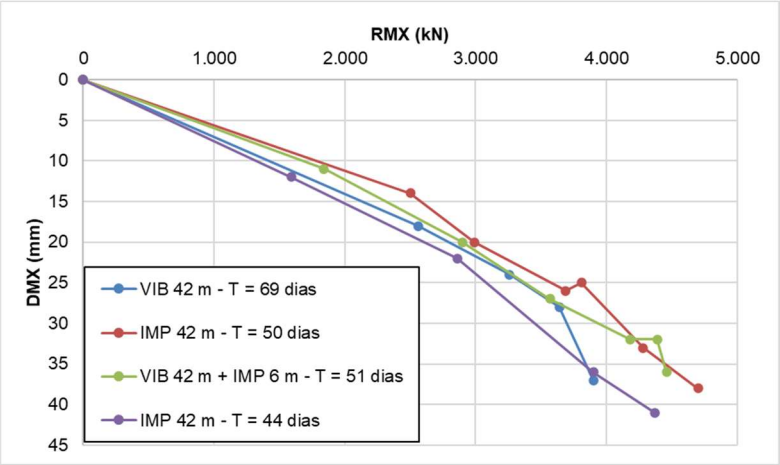


Figura 6. Resultados ECD.

4 APLICAÇÕES E RESULTADOS

4.1 Aplicação Método Skov e Denver (1988)

Foi feita uma aplicação do Método Skov e Denver (1988) dos resultados de ECD e PCE da obra. Foram separados seis ensaios realizados apenas nas estacas cravadas com martelo vibratório com diferentes tempos entre cravação e execução de ensaio. No relatório dos ECD da obra são fornecidos os resultados das análises CAPWAP, contendo as resistências laterais e de ponta separadas. Para obter a curva da equação 1, precisaria apenas obter o valor do coeficiente A, pois os demais valores, foram extraídos dos resultados dos ECD. O valor médio de A encontrado foi 1,37. Com este valor, pode-se obter a curva para as estacas cravadas com martelo vibratório aplicando o Método Skov e Denver (1988). O mesmo procedimento foi realizado para as estacas cravadas 42 a 48 m por martelo de impacto. Utilizando-se o valor médio de A (0,648) e aplicando à equação 1, foi encontrada a curva que mostra os valores da resistência lateral ao longo do tempo para o Método de Skov e Denver (1988) para as estacas cravadas pelo martelo de impacto. A média para encontrar o valor de A foi entre os resultados correspondentes aos tempos de cravação diferente de 1 dia.

Percebe-se tanto pelos gráficos aplicados, como pelos valores apresentados nos quadros “Set up x tempo” que o modelo se encaixa com os valores medidos até certo ponto. Pelo fato deste modelo ser logarítmico, o ganho de capacidade de carga nunca estabiliza. Portanto, será apresentado no próximo item a aplicação do modelo exponencial de Gusmão (2022). Para analisar a eficiência da cravação das estacas com martelo vibratório *versus* de impacto, foram sobrepostos os gráficos 6 e 7 do Modelo de Skov e Denver (1988) para os dois os martelos. Percebe-se que a resistência mobilizada pelo martelo de impacto é maior que do vibratório. Para um período de 30 dias depois da cravação das estacas, o ganho de carga é da ordem de 20% a mais. A figura 7 mostra esta sobreposição.

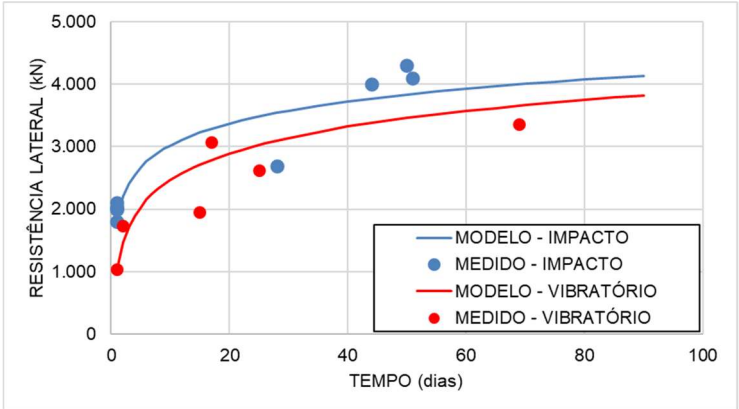


Figura 7. Martelo vibratório x Martelo de impacto (Skov e Denver, 1988)
Fonte: Gusmão (2022) modificado pela Autora (2026)

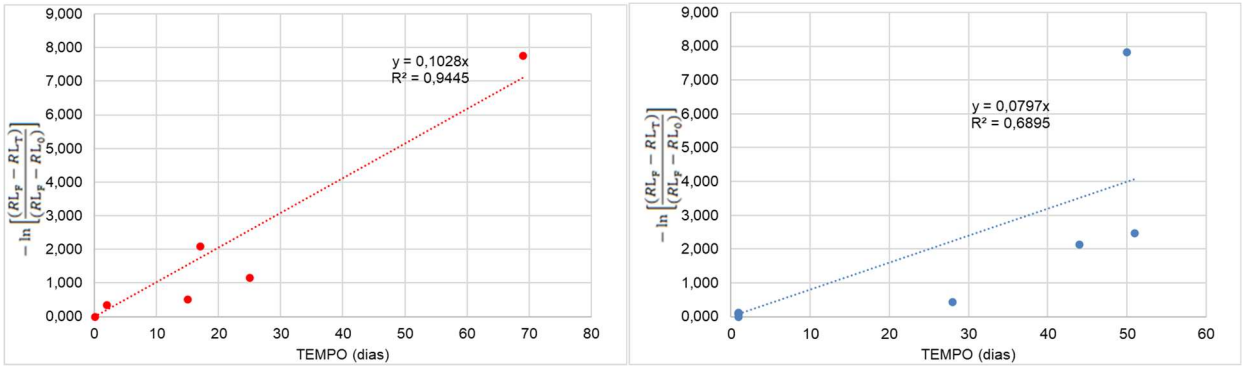
4.1.2 Aplicação do Método Gusmão (2022)

Para validação do Método Gusmão (2022) foram utilizados mesmos ensaios PDA de martelo vibratório e de martelo de impacto aplicados ao método anterior. A tabela 4 apresenta os dados para obtenção de λ. Os valores encontrados na terceira coluna, foram marcados no eixo Y de um gráfico ao longo do tempo, mostrado na Figura 7. Em seguida, foi traçada a linha de tendência do gráfico, onde a inclinação desta linha representa λ. Uma vez obtidos os λ, foi utilizada a equação 2 para traçar a curva do modelo Gusmão (2022) correspondente aos resultados dos ECD de martelo vibratório apresentado na Figura 8 em vermelho e do martelo de impacto na Figura 9 em azul.

Ao visualizar a Figura 10 é notório que o Método Exponencial Gusmão (2022) representa um modelo de previsão do efeito *set up* bastante satisfatório. As curvas se sobrepõem com os resultados de ECD e existe uma estabilização da carga das estacas. Nota-se que a partir de 60 dias já existe esta estabilização.

Tabela 4. Dados para obtenção de λ para Martelo Vibratório (esquerda) e Martelo de impacto (direita).
Fonte: Gusmão (2022) modificado pela Autora (2026)

Tempo entre cravação e ensaio (dias)	**R_L (kN)**	$-\ln\left[\frac{(RL_F - RL_T)}{(RL_F - RL_0)}\right]$	**Tempo entre cravação e ensaio (dias)**	**R_L (kN)**	$-\ln\left[\frac{(RL_F - RL_T)}{(RL_F - RL_0)}\right]$
1	1.040	0,000	1	2028	0,097
2	1.730	0,354	1	2023	0,094
15	1.960	0,506	1	1991	0,081
17	3.070	2,089	50	4304	7,827
25	2.620	1,145	51	4094	2,475
69	3.356	7,748	44	4006	2,127



Figuras 8 e 9. Dados para obtenção do λ: Martelo Vibratório (esquerda) e Impacto (direita)

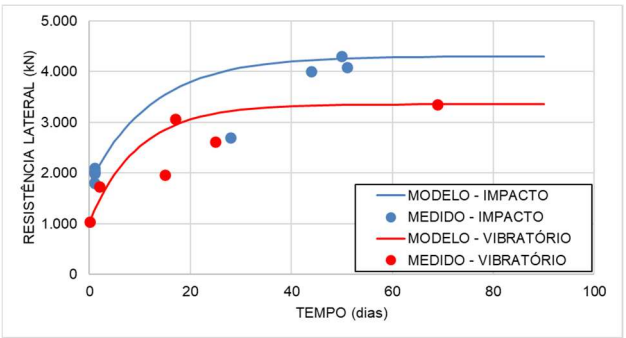


Figura 10. Martelo vibratório x Martelo de impacto (Gusmão, 2022)
Fonte: Gusmão (2022) modificado pela Autora (2026)

E para comparar a eficiência da cravação dos dois tipos de martelo para este Método, também foram sobrepostas as curvas obtidas do martelo de impacto e vibratório. Da mesma forma que no Método anterior, é

visível que as estacas que foram cravadas utilizando o martelo de impacto a capacidade de carga foi da ordem de 20% a mais.

5 CONCLUSÕES

É importante estimar o ganho de capacidade de carga das estacas com o tempo em solos argilosos, visto que as estacas metálicas de grandes comprimentos são executadas na maioria das vezes em solos moles. O efeito set up pode ser estimado utilizando o Método Gusmão (2022), validado, até então, por meio de resultados de PDA realizados em uma obra da cidade do Recife. As curvas estimadas da resistência lateral ao longo do tempo do Método Gusmão (2022) se demonstraram coerentes com os valores medidos em campo.

O tempo de cravação das estacas metálicas influencia significativamente a capacidade de carga, com um ganho de até 50% após 30 dias de cravação. A utilização de martelo vibratório para cravação de estacas metálicas pode resultar em uma capacidade de carga menor do que a obtida com martelo de impacto, em torno de 20% de diferença. Estimar a capacidade de carga final das estacas através de ensaios realizados logo após a cravação das estacas pode evitar a utilização de estacas de reforço e consequentemente evitar custos adicionais na obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122: *Projeto e execução de fundações*. RJ

BURGOS, R. D. F. et al., *Vibração Gerada na Cravação de Estacas: Comparação de Métodos de Previsão Através da Metodologia PRISMA***.** In: 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo. *Anais...* São Paulo. 2019.

FERREIRA, S. R. M. *Compressibilidade de uma argila orgânica mole do Recife*, Rio de Janeiro, Dissertação Mestrado, Rio de Janeiro, 1982.

GERDAU. *Manual de Estacas Metálicas da Coletânea do Uso do Aço da Gerdau***.** 8ª ed. 2015

GUSMÃO ENGENHEIROS ASSOCIADOS LTDA – Acervo técnico de 1990 a 2024. Recife, 2024.

GUSMÃO FILHO, J. A. *Fundações do conhecimento geológico à prática de engenharia*. Ed. Universitária, da UFPE, Recife, 1998.

GUSMÃO, A.D. et al. *Geotecnia no Nordeste.* Recife, PE: Editora Universitária, 2005.

GUSMÃO, A. D. *Efeito set-up em estacas metálicas***.** In Workshop Problemas, Soluções e Inovações – Cravação de estacas no Brasil. Belo Horizonte. 2022

GUSMÃO A. D.; GUSMÃO FILHO, J. A.; MAIA, G. B.; ALEIXO, L. *Otimização de fundações com estacas de perfis laminados*. In: COBRAMSEG 2006, Curitiba. Anais... 2006. v.2., p. 1161-1165.

POLIDO, U. F. et al. *Capacidade de Carga Geotécnica de Estacas de Perfil Metálico com Base em Provas de Carga à Compressão*. In: SEFE 9, São Paulo. *Anais...* São Paulo. 2019.

SOARES, F. L. *Análise de Provas de Carga Estática em Estacas Pré-moldadas Instrumentadas em Depósitos Argiloso*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 2006.

SKOV, R. e DENVER, H. (1988). *Time-Dependent of Bearing Capacity of Piles*, Proc. 3rd Int. Conf. App. Stress Wave Theory to Piles, Ottawa.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. *Fundações Vol. 2*. Nova Edição. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2010.