

PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS RAIZ ATRAVÉS DE MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS ASSOCIADOS A ANÁLISES ESTATÍSTICAS

PREDICTION OF THE LOAD CAPACITY IN ROOT PILES THROUGH SEMI-EMPIRICAL METHODS ASSOCIATED STATISTICAL ANALYSIS

Rodrigo Rogério Cerqueira da Silva

Universidade Nove de Julho, São Paulo/SP. E-mail:rodrigorogério@uni9.pro.br

Resumo

O presente artigo analisa a acurácia da previsão de capacidade de carga através dos métodos semi-empíricos Aoki e Velloso (1975), Decourt (1996) e Brasfond (1991), buscando uma melhor aproximação aos resultados obtidos *in loco* através de prova de carga dinâmica em estacas do tipo raiz realizados em uma obra de infraestrutura. O objetivo é apresentar uma metodologia que avance na qualidade da previsão do comportamento de estacas injetadas, demonstrando a eficiência dos métodos propostos através de análises estatísticas e correlações lineares, avaliando o método semi-empírico que mais se aproxima dos resultados obtidos *in loco*. Observando que o fator da injeção com aplicação de golpe de ar se mostra decisivo no que diz respeito ao aumento da seção da estaca e capacidade de carga, devido aos índices físicos do solo adjacente. Verificou-se que o método de Decourt (1996) é o que mais se aproxima da carga de ruptura obtida através de seis prova de carga dinâmica, comprovando a eficácia do método através da previsão de carga associada as análises estatísticas.

Palavras chave: Estaca raiz, capacidade de carga, prova de carga dinâmica, análises estatísticas.

Abstract

The present paper analyzes the accuracy of the load capacity prediction using the semi-empirical methods Aoki and Velloso (1975), Decourt (1996) and Brasfond (1991), seeking a better approximation to the results obtained *in loco* through dynamic load test in stakes of the root type realized in an infrastructure work. The objective is to present a methodology that advances the quality of predicted behavior of injected cuttings, demonstrating the efficiency of the proposed methods through statistical analysis and linear correlations, evaluating the semi-empirical method that best approximates the results obtained *in loco*. Observing that the injection factor with air blow application is decisive with respect to the increase of the section of the stake and load capacity, due to the physical indexes of the adjacent soil. It was verified that the method of Decourt (1996) is the one closest to the load of rupture obtained through six tests of dynamic load, proving the effectiveness of the method through the prediction of load associated with the statistical analyzes.

Keywords: Root piles, Load Test, dynamic load test, statistical analyzes.

1. INTRODUÇÃO

Várias correlações entre capacidade de carga das estacas através de provas de carga associadas a métodos semi-empíricos, que utilizam dados geotécnicos *obtidos in loco* são utilizados na engenharia de fundações, sendo a finalidade destas previsões obter estimativas de cargas de ruptura nas diversas condições geológicas-geotécnicas no contorno da obra.

A heterogeneidade do solo condiciona a incerteza em projetos de fundações, levando ao superdimensionamento das estruturas que necessitam da interação solo-fundação, aumentando o fator de segurança para gerar maior confiabilidade em projeto e conseqüentemente maior prazos e valores de execução durante a obra.

É fundamental na engenharia de fundações brasileira adotar métodos semi-empíricos baseados em dados de investigações de campo através de sondagens do tipo SPT e CPT, realizando uma correlação empírica-estatística através de provas de carga ensaiadas até a ruptura, ocasionando incertezas na capacidade de carga decorrentes desde a própria execução de sondagens até a falta de parâmetros técnicos principalmente para fundações com fuste injetadas com argamassa. O presente trabalho objetiva contribuir para a confiabilidade da avaliação de capacidade de carga de estacas injetadas do tipo raiz, através de métodos semi-empíricos mais utilizados na geotecnia brasileira como Aoki e Velloso (1975), Decourt (1996) e Brasfond (1991), utilizando parâmetros em suas equações desenvolvidos especialmente para estaca raiz, associando estes métodos a análises estatísticas e correlações lineares considerando as melhores proximidades dos resultados entre capacidade de carga obtida *in loco* versus capacidade de carga prevista.

A denominação estacas escavadas injetadas incluem vários tipos de estacas moldadas *in loco*, através de diferentes técnicas, a norma NBR 6122 (2010) define como estaca raiz a fundação injetada com argamassa para moldar o fuste. Imediatamente após a moldagem do fuste, é aplicada pressão no topo com ar comprimido, uma ou mais vezes durante a retirada do tubo de revestimento, usando-se pressões baixas (inferiores a 0,5 MPa) que visam apenas garantir a integridade da estaca. A limpeza interna do furo é realizada através de uma composição de lavagem, introduzida até a cota inferior da estaca, sendo considerada concluída quando a água de retorno não apresentar presença de material transportável. A injeção ascendente deve ser interrompida apenas quando a argamassa emergente sair limpa, sem sinais de contaminação com lama ou detritos na boca do furo, devendo o tubo ser preenchido até que atinja a superfície do terreno, a Figura 1 ilustra a sequência executiva das estacas do tipo raiz.

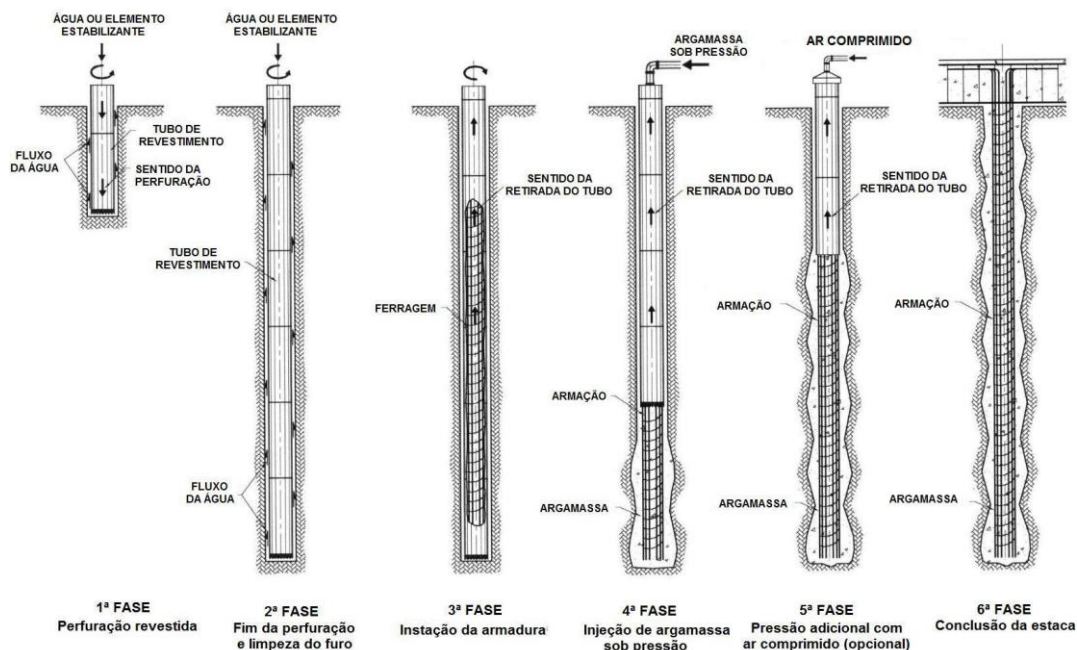


Figura 1 - Processo executivo da estaca injetada tipo raiz (Silva, 2011)

Considera-se que para a estaca raiz durante sua execução tenha pouco refluxo de argamassa, fator este relacionado ao tipo de solo, pode apresentar alta capacidade de carga e pequenos recalques em comparação às estacas convencionais ou até mesmo escavadas de mesmo diâmetro, fator este que estaria relacionado à aplicação da pressão de injeção.

Para justificar este fenômeno Costa Nunes (1985) levantou algumas explicações com o aumento confinante do fuste da estaca, efeito este denominado de “protensão do terreno”, geralmente com um valor de pressão confinante menor do que a originalmente imposta pela injeção, esta pressão residual aumenta o atrito na interface estaca-solo.

Estudos realizados pelos pesquisadores Silva (2017), Schlosser e Frank (2004), demonstram que o efeito de melhoria da capacidade de carga das estacas tipo raiz, é influenciada pela pressão de injeção, fenômeno este que ocorre nos solos de alto módulo de deformação, sejam eles arenosos ou argilosos.

Moseley e Kirsch (2004) e Ciria (2000) constataram através de análises laboratoriais, que injeções de argamassa provocam alterações das características físicas e mecânicas do solo, aumentando a resistência a deformação, coesão, resistência ao cisalhamento e compressão axial, além de reduzir a permeabilidade do solo. Silva e Pereira (2017), Shao (2015) verificaram *in loco* que dentre os diversos fatores que influenciam na transferência de carga deste tipo de estaca, estão relacionados à influência da pressão de injeção e o método de instalação, que se constitui na principal diferença entre as estacas injetadas convencionais. Os pesquisadores verificaram que a utilização da aplicação de injeções constantes através de pressões médias da ordem de (5 á 10 kg/cm²) com pouca possibilidade de refluxo de argamassa, é um fator de destaque no aumento de sua capacidade de carga. Segundo Silva (2011) e Lizzi (1981) a transferência de carga das estacas injetadas com argamassa para o solo é realizada através do atrito lateral garantindo uma interação radial de ancoragem, criando um conglomerado com o solo através de uma resistência à ruptura na seção do fuste da estaca.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O desempenho das estacas tipo raiz executadas como fundações de um viaduto, foram analisados por meio da interpretação de investigação geotécnica do tipo SPT e através de provas de carga dinâmica (PDA). Os testes foram realizados em blocos de fundações próximos um dos outros, com a finalidade de reduzir ao máximo as diferenças do comportamento de cargas devido a heterogeneidade do subsolo local. A previsão da capacidade de carga foi realizada a luz de métodos brasileiros desenvolvidos por Aoki e Velloso (1975), Decourt (1996), Brasfond (1991) através de parâmetros específicos para estaca raiz, sendo a aplicabilidade dos métodos demonstrada através de análises estatísticas comprovadas pela melhor correlação R².

2.1. Características Geológica Geotécnica local

A avaliação da capacidade de carga das estacas foram realizadas no município de Arujá, região nordeste da região Metropolitana de São Paulo. De acordo com Perrotta et al. (2005) o substrato geológico do município é caracterizado por rochas oriunda de granito e gnaisses de baixo a médio grau, com predomínio na região oeste pelos solos da classe do terciário, a Figura 2 demonstra a geologia da área de pesquisa.

Estudos realizados por Fernandes et al. (2001) demonstra que a região de Arujá, esta inserida na porção SW da Bacia de Taubaté, com presença de rochas graníticas, fartamente distribuídos nesta região, não apresentando nenhuma feição anômala peculiar. Estas rochas do município de Arujá se localizam em muitas partes recobertas pelos sedimentos terciários da Bacia de São Paulo.

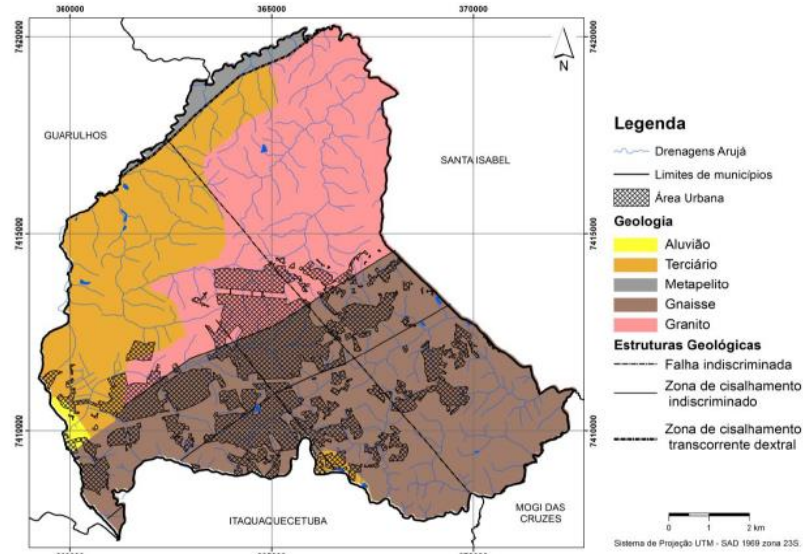


Figura 2 - Mapa de Geologia do Município de Arujá Perrotta et al. (2005)

O subsolo local das estacas testes é constituído por uma camada superficial de solo residual com espessura de 2 m, com textura variando entre uma argila siltosa pouco arenosa e silte arenoso pouco siltoso de consistência mole e cor marrom, sotoposta a estas camadas encontra-se uma transição de camada residual com cerca de 18 m de textura silto-argilosa, com presença de mica e cascalho de cor avermelhada. A camada inferior é resultante da alteração da rocha local proveniente de um metamorfismo, onde predominam micaxistos associados a algumas intrusões de quartzitos com espessura de 4 m de cor amarelada. A Figura 3 apresenta as características encontradas das sondagens N_{SPT} executadas junto a cada bloco de fundação em estacas raiz.

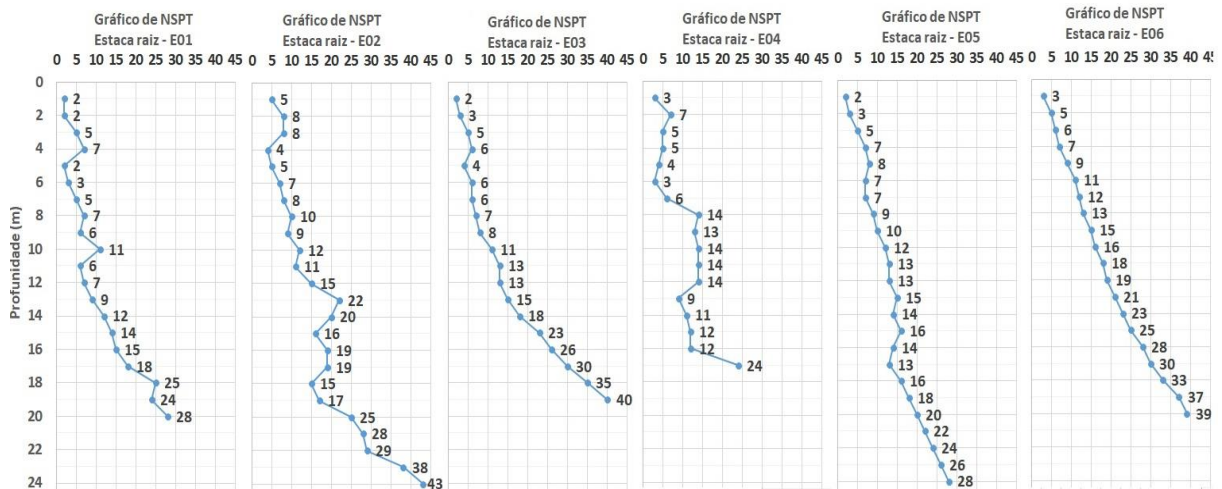


Figura 3 - Boletins de sondagens N_{SPT} realizado nos blocos de fundações das estacas

Na Tabela 01 encontram-se os principais índices físicos dos solos de acordo com a profundidade, considerando como critério de parada para caracterização a profundidade limite da fundação, estes parâmetros foram obtidos através de amostras de solos amolgadas conforme a realização das sondagens.

Tabela 1 – Índices físicos do local dos blocos de fundação das estacas tipo raiz.

Profundidade (m)	e	n	γ_s (KN/m ³)	Sr %	LP	LL	W (%)
1	1,171	53,75	27,74	40,28	26,5	35	16,3
2	1,088	51,99	27,74	43,78	20,9	31,4	16,8
3	0,956	48,61	27,73	53,98	18,6	38	18,9
4	0,639	35,03	27,55	47,97	19,4	34,6	19,6
5	0,976	49,49	27,70	49,9	21,9	30	23,2
6	1,301	56,34	28,10	49,75	25,8	35,6	31,1
7	1,081	52,95	28,65	55,84	25,9	33,4	34,9
8	1,103	52,58	29,85	61,31	23	38,2	32,7
9	1,391	58,19	29,08	63,19	22,9	40	37,6
10	1,278	53,91	29,02	52,74	19,3	36	34,7
11	1,307	57,38	28,30	55,98	21,4	37,9	33,18
12	1,239	58,62	29,73	59,69	20,1	33,2	32
13	1,281	52,48	28,70	53,49	25,5	31	27,18
14	1,383	54,30	28,99	54,3	24	30	29
Média	1,157	52,54	28,49	53,01	22,5	34,6	27,7

Onde: (e) índice de vazios; (n) porosidade, (γ_s) peso específico das partículas sólidas, (Sr) grau de saturação, (LP) limite de plasticidade, (LL) limite de liquidez, (W) teor de umidade.

2.2. Características das estacas testes

As estacas do tipo raiz foram executadas como fundação de um viaduto com diâmetro nominal de 410 mm e comprimento de 14 m, ferragem composta por 6 Ø 16 mm CA 50 e estribos de Ø 6,3 mm a cada 20 cm, a Figura 4 (a) demonstra os blocos de fundações das estacas. Para injeção de argamassa foram considerados um traço equivalente á (1 saco de cimento, 65 litros de areia e 25 litros de água). Durante a preparação das argamassas junto aos misturadores foram moldados corpos de prova com dimensões de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, submetidos a ensaios resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias. A Tabela 2 demonstra as características das argamassas injetadas durante a execução das estacas raiz.

Tabela 2 - Características das argamassas das estacas ensaiadas pelo PDA.

Estaca Raiz	Fck Projeto (MPa)	Resistencia Compressão (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 Dias
E01	25	15,2	23,2	35,2
E02		15,6	22,4	34,1
E03		19,6	26,5	31,5
E04		20,2	21,6	32,7
E05		14,4	18,5	24,8
E06		11,2	17,9	25,0

Durante a extração do tubo de revestimento foram aplicados golpes de ar comprimido, segundo Silva e Pereira (2017) esta metodologia contribui para que a estaca tenha uma resistência

estrutural adequada, e uma excelente aderência ao solo garantindo uma capacidade de carga elevada devido aumento do fuste, a Figura 4 (b) demonstra a formação de fustes irregulares de argamassa, com diâmetro final diferente do nominal da estaca quando a injeção é realizada sobre pressão.



Figura 4 – (a) Vista geral bloco de estacas raiz , (b) aumento do diâmetro gerado pela aplicação de golpe de ar

2.3. Ensaio de carregamento dinâmico

De acordo com Goble et al. (1980) e Smith (1960), o método baseia-se na aplicação de um carregamento dinâmico axial na estaca e a análise é realizada através do princípio da teoria da onda, empregada durante a cravação da estaca, tendo o objetivo de apurar informações referentes a aceleração, tensões máximas e deslocamento versus força para verificar a capacidade de carga.

A eficiência do sistema de cravação e integridade das estacas, como também as propriedades dinâmicas do solo, são realizadas através do programa CAPWAP, cujo sinal obtido de velocidade calcula-se baseado em um modelo assumido do solo a criação de uma curva de força em função do tempo, sendo que o modelo é aprimorado até que se obtenha o melhor ajuste entre as curvas força medida e a força calculada. Com base nos ensaios dinâmicos foram avaliadas as capacidades de carga das estacas em seis blocos de fundação, utilizando-se o modelo *CAPWAP* foram obtidos os dados das curvas carga x recalque conforme Figura 5.

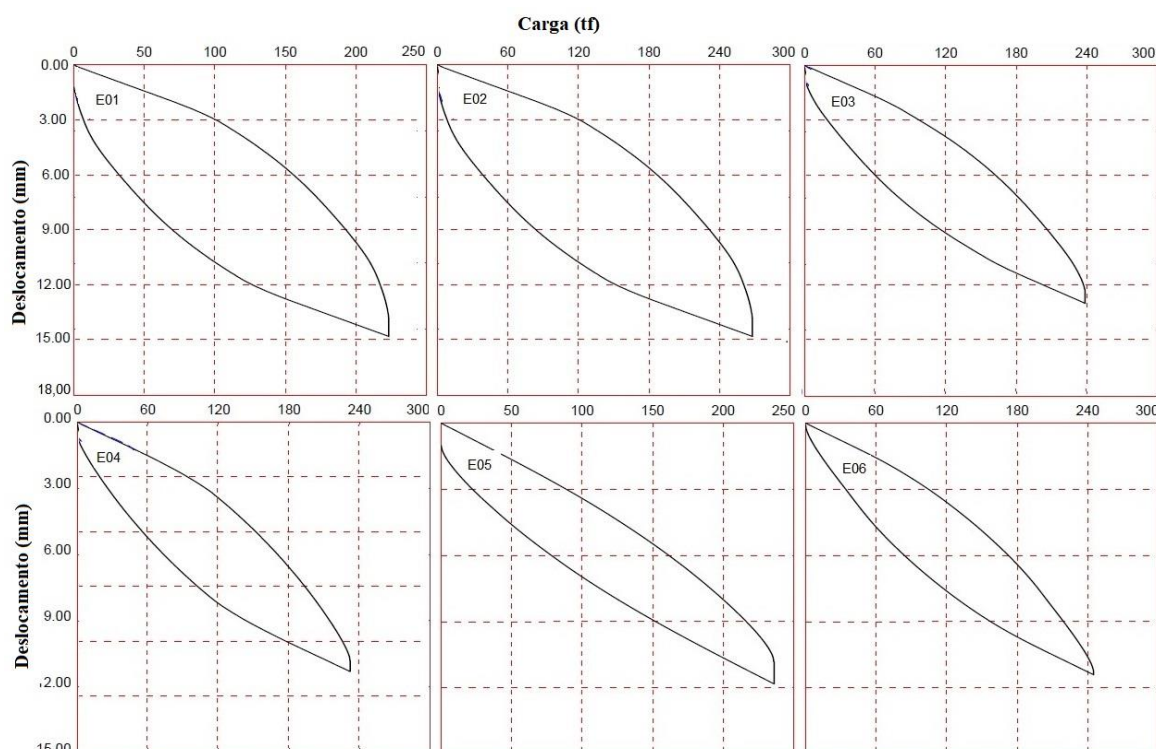


Figura 5 - Curvas carga x deslocamento fornecido pelo programa CAPWAP

2.4. Análise dos resultados a partir dos métodos semi-empíricos

As formulações semi-empíricas empregadas na previsão da capacidade de carga em estacas em todo Brasil, utilizam em grande parte dos projetos valores de resistência à penetração estática, fornecidos através dos ensaios de cone (CPT), ou valores de resistência à penetração dinâmica, medidos através das sondagens à percussão (SPT). Estes métodos empregam condições específicas para determinado tipo de fundação, limitando sua determinação de capacidade de carga de acordo com a geologia local e seu método construtivo. Os métodos de previsão de capacidade de carga utilizados no desenvolvimento do trabalho serão especificamente empregados para estacas raiz.

A previsão de capacidade de carga por Aoki e Velloso (1975), foi criada originalmente através de correlações de resultados de provas de carga em estacas com ensaios CPT (Cone Penetration Test), onde para se aplicar o método elaborado em ensaios de penetração dinâmica SPT (Standard Penetration Test) utiliza-se o coeficiente de conversão K da resistência de ponta do cone para N_{spt} . Logo para calcular a capacidade de carga em estaca utiliza-se a seguinte equação 1

$$Pr = \underbrace{A_p \cdot K \cdot N_p}_{F1} + U \sum \underbrace{\alpha \cdot K \cdot N_L}_{F2} \cdot \Delta L \quad (1)$$

Sendo:

A_p : Área da ponta da estaca;

K: Coeficiente função do tipo de solo, que relaciona o ensaio SPT com o CPT (Tabela 3);

N_p : índice de resistência à penetração na cota de apoio da fundação;

N_L : índice de resistência à penetração médio na camada de espessura ΔL ;

U: Perímetro do fuste da estaca calculado com o diâmetro equivalente da mesma;

ΔL : Profundidade e camada analisada;

α : Coeficiente função do tipo de solo, que relaciona o ensaio SPT com o CPT (Tabela 3).

F1 e F2: Fatores de correções das resistências laterais e da ponta das estacas denominadas levam em consideração as diferenças entre os comportamentos do cone estático e das estacas estudadas, para estaca raiz F1=2,00 e F2=4,00.

Tabela 3 - Valores de K e α em função do tipo de solo.

Tipo de solo	K (MPa)	α (%)
Areia	1,00	1,4
Areia siltosa	0,80	2,0
Areia silto-argilosa	0,70	2,4
Areia argilosa	0,60	3,0
Areia argilo-siltosa	0,50	2,8
Silte	0,40	3,0
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte areno-argiloso	0,45	2,8
Silte argiloso	0,23	3,4
Silte argilo-arenoso	0,25	3,0
Argila	0,20	6,0
Argila arenosa	0,35	2,4
Argila areno-siltosa	0,30	2,8
Argila siltosa	0,22	4,0
Argila silto-arenosa	0,33	3,0

O método proposto por Decourt (1996) sofreu algumas adaptações no método original com intuito de ajusta-lo a mais tipos de estacas, apresentando melhorias ao método incluindo coeficientes de ponderação para a ponta (α) e para o fuste (β), onde a expressão final é obtida através da equação 2.

$$PR = \alpha.KP.NP. AP.+ \beta.FC . \left(\frac{N+1}{3}\right). U. \Delta L \quad (2)$$

Onde:

NP: valor médio do NSPT na ponta da estaca, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior.

KP: coeficiente para resistência de ponta em função do tipo e solo (Tabela 4).

AP: área da ponta da estaca.

U: perímetro da estaca.

N: valor médio do NSPT para cada ΔL .

ΔL : Espessura de cada camada (metros).

α e β : coeficientes em função da estaca raiz (Tabela 5).

Tabela 4 - Valores de KP em função do tipo de solo NSPT.

Tipo de solo	KP (tf/m ²)
Argila	12
Silte argiloso	20
Silte arenoso	25
Areia	40

Tabela 5 - Valores de α e β em função do tipo de estaca e do tipo de solo.

Tipo de Solo	Estaca Raiz	
	α	β
Argilas	0,85	1,5
Solos intermediários	0,60	1,5
Areia	0,50	1,5

O terceiro método aplicado foi desenvolvido pela empresa Brasfond (1991), obtendo a capacidade de carga de acordo Moura et al. (2011) com a seguinte equação 3 e parâmetros.

$$PR = \alpha \cdot N_{SPT} \cdot AP + \beta \cdot N_s \cdot U \cdot \Delta L \quad (3)$$

Em que:

α : Coeficiente que depende do tipo de solo onde se encontra a ponta da estaca (Tabela 6);

N_{SPT} : Média dos valores de SPT determinados a um metro acima e a um metro abaixo da ponta da estaca. Os valores de N_{SPT} superiores a 40 devem ser adotados iguais a 40;

AP : Área da ponta da estaca;

β : Índice de atrito lateral (Tabela 6);

N_s : Média dos valores de SPT medidos ao longo do fuste da estaca. Os valores de SPT superiores a 40 devem ser adotados iguais a 40;

U : Perímetro do fuste da estaca calculado com o diâmetro equivalente desta;

ΔL : Comprimento unitário.

Tabela 6 - Valores de α e β em função do tipo de solo.

Solos	α (kPa)	β (kPa)
Argila Siltosa	80	5,0
Silte Argiloso	100	5,0
Argila Arenosa	120	5,0
Silte Arenoso	150	5,0
Areia Argilosa	180	5,0
Areia Siltosa	210	5,0
Areia	270	5,0
Areia com pedregulhos	300	5,0

3. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados das previsões de capacidade de carga de ruptura foram calculados a partir do diâmetro nominal determinado em projeto e a partir de valores de índice de resistência a penetração N_{SPT} mais próximos das estacas, respeitando os limites fixados na revisão bibliográfica para previsão de capacidade de carga. A Tabela 7 apresenta os valores da capacidade de carga através do ensaio PDA *in loco* e encontrados pelos métodos semi-empíricos.

Tabela 7 - Previsões das capacidades de carga pelos métodos semi-empíricos.

Estaca Raiz	PDA (tf)	Aoki e Velloso (tf)	Decourt (tf)	Brasfond (tf)
E01	225,0	98,0	107,0	79,0
E02	270,0	125,0	162,0	135,0
E03	240,0	141,0	142,0	111,0
E04	238,0	100,0	131,0	111,0
E05	236,0	117,0	141,0	116,0
E06	245,0	191,0	191,0	166,0
Média	242,3	128,7	145,7	119,7

Considerando a média dos resultados obtidos in loco pelos ensaios de carregamento dinâmico, com a media dos valores encontrados pelos métodos semi-empíricos, o que apresentou valor médio mais próximo da realidade conforme Figura 6 foi Decourt (1996) subestimando a carga média das estacas em 40%.

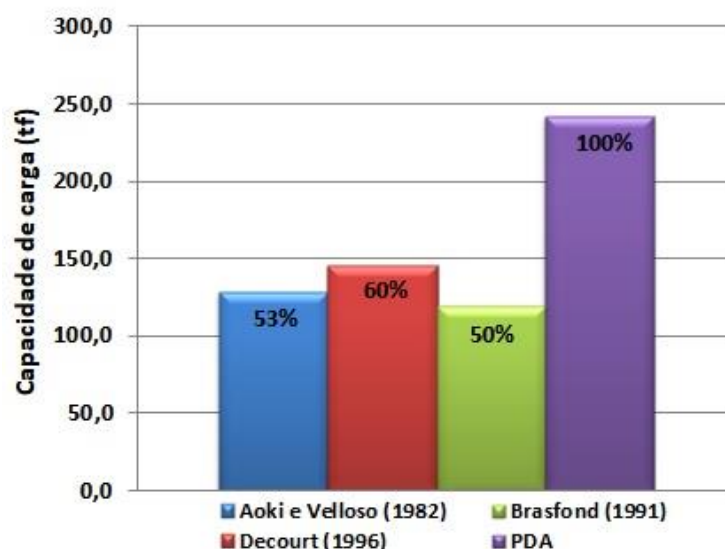


Figura 6 - Comparação da capacidade de carga PDA com métodos semi-empíricos

O alargamento do fuste ocasionado pelo aumento da pressão de injeção nas estacas tipo raiz, esta relacionado com as características físicas e mecânicas na área do maciço do solo próximo das estacas. Os parâmetros geotécnicos encontrados na Tabela 1, contribuem para o aumento do diâmetro da estaca devido a compactação radial do solo ocasionado pelo volume de argamassa injetada, fenômeno que ocorre nos solos com maiores valores de índices de vazios e porosidade, parâmetros como os índices físicos não são considerados pelos métodos de previsão carga semi-empíricos, aumentando a disparidade com os valores encontrados in loco.

A análise da estimativa da melhor aplicabilidade proposta pelos métodos semi-empíricos em relação ao valor medido pela prova de carga dinâmica foram baseadas na porcentagem de erros, calculados conforme a equação 4 como demonstra a Tabela 8.

$$\text{Erro (\%)} = \frac{(\text{Estimado} - \text{Medido})}{(\text{Medido})} \times 100 \quad (4)$$

Tabela 8 – Porcentagem de Erro entre Métodos semi-empíricos e PDA.

Estaca Raiz	Aoki e Velloso (tf)	Decourt (tf)	Brasfond (tf)
E01	-56,4	-52,4	-64,9
E02	-53,7	-40,0	-50,0
E03	-41,3	-40,8	-53,8
E04	-58,0	-45,0	-53,4
E05	-50,4	-40,3	-50,8
E06	-22,0	-22,0	-32,2
Média	-47,0	-40,1	-50,8
Mediana	-50,4	-40,3	-50,8
Variância	184,5	100,5	111,7
Desvio Padrão	13,58	10,03	10,57
Coeficiente de variação	-0,29	-0,25	-0,21

Considerando a Tabela 8 o valor da extrapolação de carga de ruptura proposta pelo método de Decourt (1996) é o que mais se aproxima dos valores da prova de carga dinâmica, considerando o valor da média dos erros.

A mediana é coerente com a média para as estacas injetadas com argamassa, evidenciando a confiabilidade de Decourt (1996) em relação aos outros métodos, porém a distribuição das estimativas de erros pelos métodos propostos evidência a distância dos valores encontrados pelos ensaios obtidos *in loco*.

A variância é acentuada tanto para Aoki e Velloso (1975), Decourt (1996) quanto para Brasfond (1991), confirmando que esses métodos apresentaram resultados longes dos obtidos pela prova de carga.

O desvio padrão e o coeficiente de variação dos erros apresentam discrepâncias entre os três métodos, apesar do método Brasfond (1991) apresentar menor coeficiente de variação entre os dados, o método de Decourt (1996) apresenta menor variabilidade a distribuição dos resultados, demonstrando ser o método mais favorável com os valores obtidos *in loco*.

Tendo em vista a segurança na utilização dos métodos, a Figura 7 confirma que Decourt (1996) apresentou melhor desempenho atendendo um critério de confiabilidade, com uma dispersão de dados menor em relação aos outros métodos. Com valor de R^2 mais significativo obtido a partir de modelo de regressão linear, demonstrando Decourt o melhor coeficiente de correlação ($R^2=40\%$), sendo que a aplicabilidade deste método é ideal para solos coesivos com curvas de ruptura não bem definidas encontradas durante as provas de cargas.

Através de modelos de regressão linear, a expressão obtida com melhor R^2 a partir de dados experimentais obtidos *in loco* associados a métodos de previsão de capacidade de carga, contribui a partir da expressão obtida das correlações simplificar a estimativa de cargas na ausência de parâmetros geotécnicos.

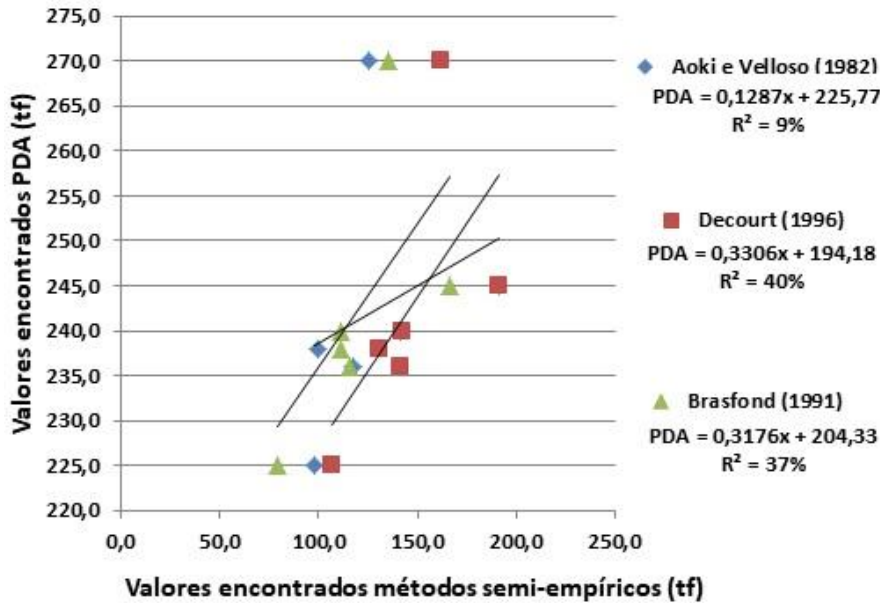


Figura 7 - Correlação linear das cargas PDA com métodos semi-empíricos

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho procurou demonstrar através de resultados de provas de carga dinâmica a capacidade de carga da interação solo x estrutura das estacas tipo raiz, a previsão de sua capacidade de carga foi realizada através de métodos semi-empíricos consagrados na prática brasileira da engenharia de fundações, estabelecendo-se uma metodologia de previsão mais segura associada a análises estatísticas e correlações lineares.

A capacidade de carga das estacas tipo raiz é influenciada pelo volume de argamassa injetado e pela pressão de injeção, podendo admitir que a cada tipo de solo exista uma pressão limite de injeção, influenciando no aumento da capacidade de carga em virtude da ocorrência do fraturamento do solo, aumentando o seu diâmetro e gerando protuberâncias e irregularidades junto ao fuste que aumentam sua rugosidade contribuindo com o atrito lateral.

O método de Decourt (1996) apesar de conservador apresentou em media valores em cerca de 50% dos encontrados no ensaio PDA, a utilização de parâmetros de previsão de capacidade de carga associados a análises estatísticas, torna-se possível resultados mais próximos da realidade. A busca de banco de dados utilizando métodos de capacidade de carga para cada tipo de estaca e de solo permite na maioria dos casos uma economia no dimensionamento e na execução de fundação.

A otimização dos diversos métodos analisados almejam ser apenas um passo para um processo de ajuste estatístico associado a qualquer método empírico. O crescimento constante de banco de dados em números de provas de cargas e sua aplicação em termos de diferentes localidades testadas permitirá uma maior confiabilidade no emprego de métodos de previsão de carga.

5. REFERÊNCIAS

AOKI, N; VELLOSO, D. A. An approximated method to estimate the bearing capacity of piles. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foudantion Engineering, 5, Buenos Aires, 1975, Proceedings, v.1, p.367-376. (1975).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto e execução de fundações. NBR 6122. Rio de Janeiro, 2010.

CIRIA. "Grouting for grouting engineering". CIRIA press, London, U. K., ISBN 0 86017 514 6. pp: 17-22. 2000.

COSTA NUNES, A.J. Estacas injetadas - relato geral. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais – SEFE, 1., 1985, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS, 1985. v.1, p.103-118.

FERNANDES, Flávio Luís; CHANG, Hung Kiang. Modelagem gravimétrica da bacia de Taubaté-vale do rio Paraíba do Sul, leste do estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geofísica, p. 131-144, 2001.

GOBLE, G. G., RAUSCHE, F., LIKINS, G. E. "The Analysis of Pile Driving – A State of the Art", Seminar on Application of Stress Wave Theory on Piles, Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia, Junho 1980.

LIZZI, F. The pali radice (root piles) a state-of-the-art report. In: Symposium on recent developments in ground improvement techniques, Bangkok, Proceeding. Rotterdam: A. A. Balkema, p.417-450. (1985).

MOSELEY, M. P., KIRSCH, K. 2004. "Ground Improvement (2nd edition)". Spon Press in an imprint of Taylor & Francis group, U. K., ISBN 0 415 27455 9. pp: 119-160.

PERROTTA, M. M. et al. Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, CPRM, São Paulo, 2005.

SCHLOSSER, F.; FRANK, R. "FOREVER (Fondations Renforcées Verticalement): Synthèse des résultats et recommandations du Projet national sur les Micropieux." Presse de l'ENPC, Paris. (2004)

SHAO, G. Application of Steel Pipe Pile Composite Soil Nailing Supporting Combined Foundation Underpinning Technology. 2015.

SILVA, R. R. C. da. Estacas injetadas autoperfurantes: metodologia de execução e determinação da sua capacidade de carga através de métodos semi-empíricos. 216p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, São Paulo. 2011.

SILVA, R. R. C. da. Verificação do desempenho das estacas injetadas autoperfurantes executadas em solos arenosos para construção de usina eólica. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 2.2017.

SILVA, R. R. C. da; PEREIRA, G. A. Verificação do aumento da capacidade de carga em estaca tipo raiz, através da aplicação de ar comprimido. Revista Ciência e Tecnologia, v. 20, n. 36, 2017.

SMITH, E. A. L. Pile Driving Analysis by the wave equation, Journal of Soil Mechanics and Foundation, ASCE, Vol. 86, Agosto 1960.