

AValiação DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACA TIPO STRAUSS ATRAVÉS DE PROVA DE CARGA DINÂMICA

Rodrigo Rogerio Cerqueira da Silva¹

RESUMO

As estacas do tipo strauss são muito utilizadas no Brasil, em edificações que não apresentam cargas elevadas e devido ao seu baixo custo, tornando o emprego dessas estacas, como uma boa opção de fundação profunda. Entretanto avaliar a qualidade e o desempenho deste tipo de fundação profunda é uma das maiores preocupações dentro da engenharia de fundações, sendo que sua carga admissível estimada na fase de projeto, dificilmente é comprovada por meio de ensaios de carregamento estático ou dinâmico. O presente artigo tem como objetivo avaliar a acurácia da previsão de capacidade de carga das estacas tipo strauss, através dos métodos mais consagrados da literatura, comparados a partir dos resultados obtidos em provas de cargas dinâmicas, realizados na região central de São Paulo – Brasil. Dentre os métodos de previsão de capacidade de carga, o que mais se aproxima dos resultados obtidos nas provas de carga dinâmica subestima as cargas em cerca de 47%, permitindo assim avaliar o comportamento da interação entre solo e estrutura adotados em fase de projeto. As cargas de catálogos possuem pouca disparidade em relação as cargas admissíveis encontradas in loco, mesmo sem levar em consideração os aspectos geotécnicos, podendo ser utilizadas em fase de projeto dimensionado a favor da segurança. Contribuindo a pesquisa no campo de engenharia de fundações, para um aumento do banco de dados principalmente para obras de pequeno e médio porte.

Palavras-Chaves: estaca strauss, prova de carga dinâmica, capacidade de carga, métodos semi-empíricos, carga de catálogo.

ASSESSMENT OF THE LOAD-CARRYING CAPACITY OF STRAUSS TYPE PILES THROUGH DYNAMIC LOAD TESTING

ABSTRACT

Strauss piles are widely used in Brazil, in buildings that do not present high loads and due to their low cost, making the use of these piles, as a good option of deep foundation. However, evaluating the quality and performance of this type of deep foundation is one of the major concerns within foundation engineering, and its estimated allowable load at the design stage is hardly proven through static or dynamic loading tests. The present article aims to evaluate the accuracy of the load capacity prediction of Strauss piles, through the most established methods in the literature, compared from the results obtained in dynamic load tests, carried out in the central region of São Paulo - Brazil. The load capacity prediction method, which is closer to the breaking load, underestimates the results obtained in dynamic load tests by about 47%, allowing the behaviour of the interaction between soil and structure adopted in the design phase to be evaluated. The catalogue loads have little disparity with the permissible loads found on site, even without taking into account the geotechnical aspect, and can be used in the design phase in favour of safety. Contributing to research in the field of foundation engineering, for an increase in the database mainly for small and medium-sized works.

Keywords. strauss pile; dynamic load test; load capacity; semi-empirical methods; catalog load.

Recebido em 24 de maio de 2023. Aprovado em 27 de julho de 2023

¹ Pós-doutorado pela Universidade Estadual de Campinas na área de inspeção de estruturas por ensaios não destrutivos aplicadas ao material concreto, Doutorado na área de inspeção de estruturas por ensaios não destrutivos pela Universidade Estadual de Campinas, Mestrado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas em fundações profundas, Especialista em Docência do Ensino Superior pela Universidade Municipal de São Caetano do Sul, graduação pela Universidade Estadual de Campinas e formação Pedagógica de Docentes pela Universidade Nove de Julho. E-mail: rodrigorogerioudotorado@gmail.com

INTRODUÇÃO

As estacas tipo strauss com o passar do tempo foram perdendo sua utilidade no campo de engenharia de fundações, para as estacas executadas com maquinários mais modernos e de alta produtividade. Entretanto as estacas strauss ainda são bastante utilizadas em obras de pequeno e médio porte, cuja a características das edificações não impõem cargas elevadas às fundações, devido ao seu custo (CARVALHO E ALBUQUERQUE, 2002).

Segundo a ABNT-NBR 6122 (2019) este tipo de estaca é executado por perfuração do solo com uma sonda ou piteira e revestimento total com camisa metálica, realizando-se gradativamente o lançamento e apiloamento do concreto, com retirada simultânea do revestimento. As características da estaca tipo strauss apresentados pelo manual da ABEF (2016), informa que esse tipo de estaca possui diâmetro nominal variando de 250 a 450 mm, e carga nominal variando entre 200 a 600 KN, submetidas a esforços de compressão, entretanto não recomendada a sua execução para diâmetros acima de 450 mm.

Em relação ao carregamento horizontal, Almeida et al. (2011) avaliaram estacas strauss com diâmetro de 300 mm e profundidade de 12 m, executas em solos laterítico coesivos, apresentaram cargas de 30 KN. Este tipo de estaca, varia seu comprimento entre 15 a 35 m, dentre suas principais vantagens são sua ponta fechada, podendo ser realizada independentemente do nível d'água, base alargada contribuindo para o aumento da sua resistência de ponta e através do apiloamento do fuste o aumenta o atrito lateral. Dentre as desvantagens estão os ruídos e vibrações elevadas, ocasionado possíveis elevações de estacas, além do estrangulamento do fuste, baixa produtividade em torno de 50 m/dia e grande quantidade de lama durante a perfuração (ALONSO, 2019).

Pesquisadores em fundações como Rebello (2008) e Padilha e Ferreira (2017) apontam críticas quanto as estacas tipos strauss, em relação ao seu processo de execução, devido ao estrangulamento do fuste corrido pela entrada de solo, principalmente em argilas moles, não recomendando a utilização desse tipo de estaca abaixo do nível da água, salvo quando sua execução seja extremamente cuidadosa. Quando realizada abaixo do nível da água, em solos como areia saturada, argila muito mole, solos de alta resistência, matacão, rochas e argilas rijas, os autores recomendam considerar uma redução na capacidade de carga da estaca.

A execução de um bom projeto de estrutura de fundações é de suma importância que se tenha o conhecimento do comportamento das cargas, permitido através de provas de cargas seja do tipo estática o dinâmica, através da obtenção da curva carga x recalque e pela mobilização de resistências ao longo do seu fuste.

A verificação das tensões limites de fundações, contribuirá na otimização dos blocos de concretos sobre as estacas. Segundo Turini et al. (2018) a análise das tensões limites de estacas contribui para reduzir o custo final de produção dos blocos, variando a resistência característica do concreto à compressão, geometria do bloco, áreas de aço e número de estacas. Os estudos realizados por Marques et al. (2021), demonstram que durante a análise estrutural das edificações, deve-se considerar a sequência do histórico de cargas aplicadas, o chamado "efeito incremental" (ou análise incremental) que é definido como a influência das etapas construtivas em uma edificação. De acordo com Marques et al. (2021), para avaliar a influência do efeito incremental através da interação solo-estrutura nas análises de estabilidade global, deve-se considerar parâmetros como instabilidade, cargas de fundação, recalques e quantidade de materiais, parâmetros estes que podem influenciar no projeto da edificação. Segundo Alves et al. (2020) considerar o efeito da interação solo-estrutura torna a estrutura mais flexível, sendo necessário um superdimensionamento da superestrutura.

Entretanto dificilmente obras de pequeno e médio porte realizam um controle técnico através de provas de cargas, principalmente em estacas tipo strauss, gerando incertezas quanto

sua capacidade de carga, sendo obtida apenas por fórmulas de previsão para capacidade de carga, sendo estas empíricas ou teóricas.

Pesquisadores como Bohn et al. (2017) e Silva (2020) apontam que a prova de carga é o método mais seguro para avaliar a capacidade de suporte de carga estrutural das fundações, contribuindo na previsão do recalque através da interação solo-estrutura. As alterações das propriedades do solo, ocasionada durante a execução da fundação, falta de informações do maciço de solo, justificam a necessidade de provas de cargas, para produzir as condições de funcionamento a que a estaca estará submetida na realidade de forma mais próxima (MILITITSK, 1991; SILVA 2020).

A literatura referente a fundações aborda a capacidade de carga de estacas tipos strauss através de prova de carga estática, com pesquisas realizados a mais de uma década, sendo uma das contribuições da presente pesquisa verificar a capacidade de carga deste tipo de fundação através da prova de carga dinâmica, aumentando do banco de dados em relação a cargas e melhor método em sua previsão de carga.

De acordo com Goble et al. (1992) e Cintra et al. (2013), a prova de carga dinâmica 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. O ensaio de carregamento dinâmico visa à avaliação de cargas mobilizadas na interface solo-estaca, eficiência do sistema de impacto, tensões de compressão e de tração ao longo da estaca, integridade estrutural e características dinâmicas do sistema solo-estaca (ABNT- NBR 13208, 2007).

Os estudos realizados por Silva (2020) demonstram que o ensaio de carregamento dinâmico é um método de teste rápido e de menor custo comparado ao método de carregamento estático, possibilitando a realização de maior número de ensaios em um único dia além de conseguir utilizar as estacas como elemento estrutural, sua execução é realizada por um equipamento portátil e de fácil transporte.

O presente trabalho objetiva contribuir para a confiabilidade da avaliação de capacidade de carga de estacas tipo strauss, confrontando com os métodos de previsão de capacidade carga mais consagrados da literatura, contribuindo no campo de engenharia de fundações para um aumento do banco de dados principalmente para obras de pequeno e médio porte.

Métodos de Previsão de Capacidade de Carga

O número restrito de contribuições existentes na literatura brasileira para previsão de carga em estaca strauss motivou a utilização de métodos baseados em sondagens à percussão (SPT). De acordo com Silva (2018) os métodos de previsão da capacidade de carga em estacas, 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). Segundo Pereira et al. (2020) os métodos de previsão de capacidade de carga, ajustam suas equações por meio dos coeficientes empíricos aos mais diversos tipos de solo, de acordo com o processo executivo do tipo de estaca, tendo em vista as alterações nas condições iniciais do terreno de parâmetros como o ângulo de atrito da interface solo/estaca, a tensão horizontal que age sobre a estaca, a adesão solo/estaca e a dimensão da área de contato.

As previsões de capacidade de cargas na presente pesquisa, foram realizadas através dos métodos mais consagrados no meio geotécnico, como Aoki e Velloso (1975), Décourt (1996) e Teixeira (1996).

O método de Aoki e Velloso (1975), avalia a capacidade de carga das estacas indiretamente, por meio de correlações estabelecidas para solos brasileiros o (SPT) e os

parâmetros de resistência obtidos em ensaios de penetração estática (CPT – Cone de Penetração Estática). De acordo com Décourt et al. (2019) a maior dificuldade para a correta aplicação desse método é a necessidade da perfeita caracterização do tipo de solo envolvido, o que na prática é quase impossível de se conseguir.

O método proposto por Décourt (1996) sofreu algumas melhorias em relação ao método original proposto para estacas pré-moldadas, para que fosse possível a inclusão de coeficientes de ponderação do tipo de solo com intuito de ajusta-lo para mais tipos de estacas.

O método proposto por Teixeira (1996) para previsão de capacidade de carga de estacas teve como base para a formulação de seu método os estudos desenvolvidos por Aoki e Velloso (1975) e Décourt (1996), apresentados anteriormente. Teixeira (1996) adotou parâmetros de correção aplicados à resistência de ponta e à resistência lateral da estaca, respectivamente, para o cálculo da capacidade de carga de um sistema solo/estaca e, com isso, propôs uma espécie de equação unificada.

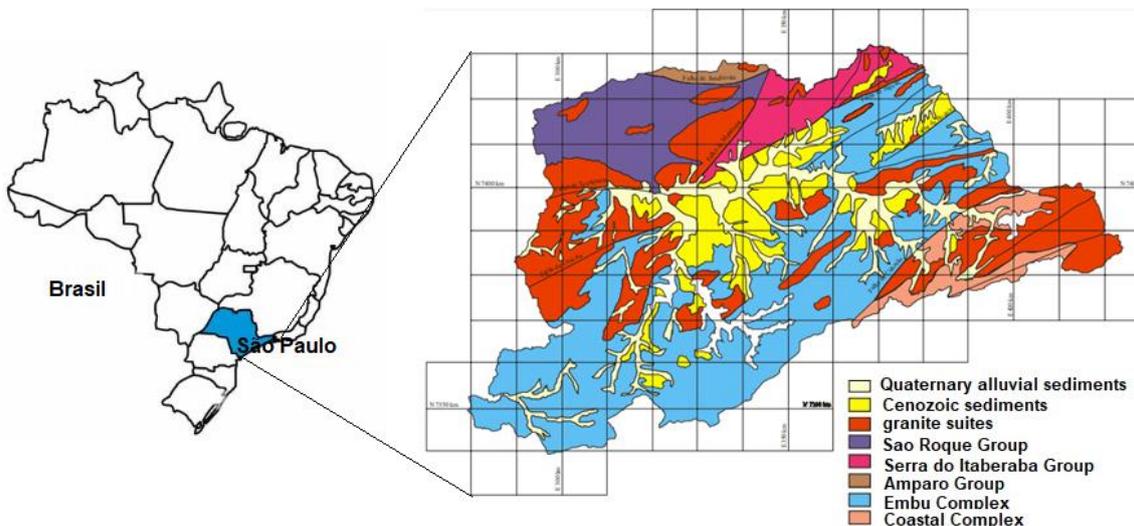
MATERIAIS E MÉTODOS

O campo experimental da análise das estacas Strauss, está localizado na região da Praça da Sé, no centro histórico de São Paulo, cuja característica da obra compreende um edifício com finalidade comercial de 4 andares, construído em uma área de 250 m².

Características geológicas geotécnicas

O arcabouço geológico da Região Metropolitana de São Paulo é constituído por terrenos policíclicos do Cinturão de Dobramentos Ribeira (Hasui et al. 1975) representados por rochas metamórficas, migmatitos e granitóides. Segundo Etchebehere (2007) sobre esses terrenos assentam-se sedimentos cenozóicos das bacias sedimentares de São Paulo, ocupando a porção central da área de estudos, e de Taubaté, situados no flanco nordeste da área, a região central de São Paulo está situada em uma área de rochas sedimentares do Grupo Bauru, que foram depositadas durante o período Cretáceo. Ainda, recobrando todas essas unidades, registram-se ocorrências de depósitos aluviais e colúviais quaternários. A figura (1) ilustra a distribuição das principais unidades litológicas da Região Metropolitana de São Paulo.

Figura 1 - Distribuição das grandes unidades litoestratigráficas do estado de São Paulo.



Fonte: adaptado (Rodrigues, 1998).

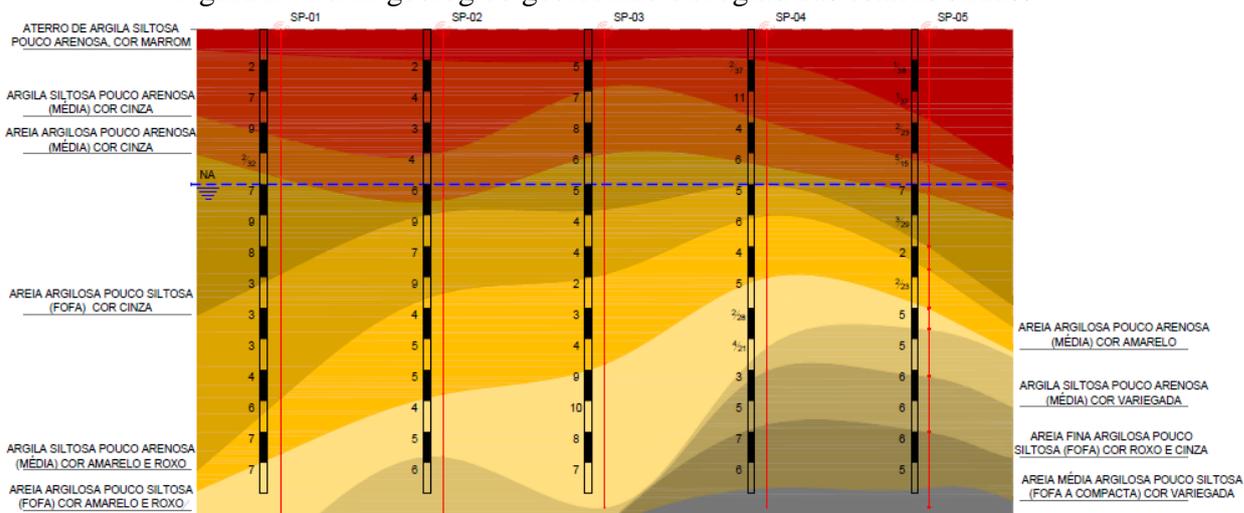
Segundo Marinho et al. (2015) e Fialho et al. (2017) a região central histórica de São Paulo é caracterizada por um solo de origem sedimentar, composto principalmente por camadas de argila, intercaladas por areia fina e cascalho, apresentando solos com baixa permeabilidade e alta plasticidade, o que pode causar problemas em fundações e obras de construção.

Essas camadas de solo estão assentadas sobre um substrato de rochas sedimentares (MARINHO ET AL., 2015). Os sedimentos são basicamente partículas ou fragmentos de rochas que foram erodidas ou sofreram intemperismo. Então a sua origem de rochas metamórficas, ígneas ou mesmo sedimentares que eventualmente se desintegram em partículas menores e são transportadas pela ação do ar, da água ou sumariamente devido escavações e aterros que depositadas em camadas compactadas se tornam parte do registro de rochas.

De acordo com as características geotécnicas obtidas a partir das sondagens tipo SPT (Standart Penetration Test) realizada na região central (Praça da Sé - São Paulo), o subsolo local é compreendido por camadas de argilas siltosas e areias argilosas, com presença de nível de água a partir de 5,00 m. Foram realizados 5 sondagens SPT em uma área de aproximadamente 357,28 m², conforme especificação da ABNT-NBR 6484, os resultados dos valores de N_{SPT} estão compreendidos entre 20 e 40 golpes, com profundidades entre 24 e 30 metros.

A figura (2) apresenta um perfil com as características encontradas nas sondagens N_{SPT} executadas em cada bloco de fundação das estacas tipo strauss.

Figura 2 - Perfil geológico geotécnico da região das estacas strauss.



Fonte: Autores (2023).

Características das estacas de teste

As estacas do tipo strauss foram executadas com os seguintes diâmetros nominal de 320 e 380 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. O concreto utilizado das estacas testes possui um consumo de cimento igual ou superior a 300 kg/m³, com abatimento ou slump test entre 120 a 140 mm para estacas armadas, com agregado graúdo com diâmetro entre 12,5 mm e 25 mm e fck ≥ 20 MPa aos 28 dias, seguindo as recomendações da ANBT-NBR 6122 (2019). A figura (3) demonstra a execução das estacas testes.

Figura 3 - Vista geral da execução das estacas testes com diâmetros de 320 e 380 mm.

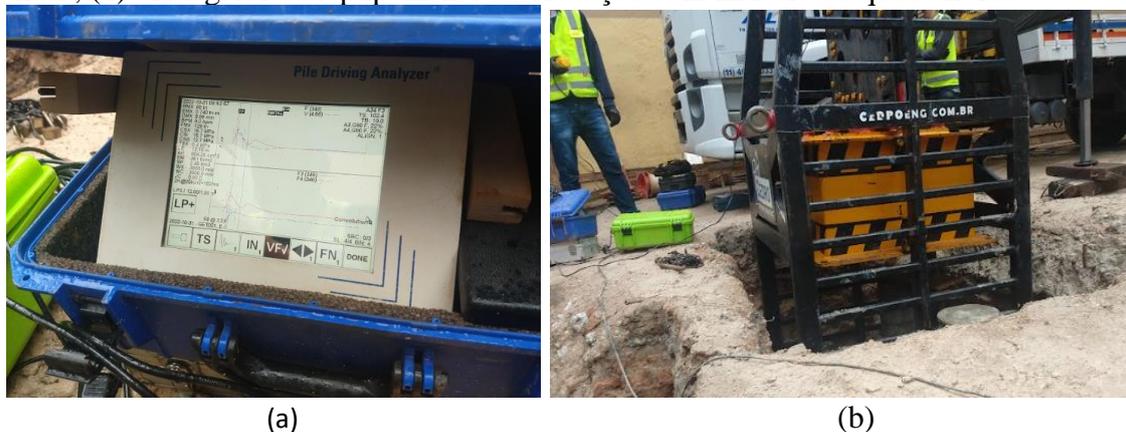


Fonte: Autores (2023).

Provas de carga dinâmica (PDA)

Antes da execução do ensaio de carregamento dinâmico, foi realizado o preparo através de um bloco de coroamento circular, com concreto de resistência mínima 35 MPa. Para a coleta de sinais foram instalados um par de sensores de deformação específica strain gages (sensibilidade entre 350 e 450 μ s/m V/V) e um par de sensores de aceleração (sensibilidade de 1 m V/g) na superfície da estaca, diametralmente opostos, situados em uma seção distante do topo, a pelo menos 2 diâmetros do topo do bloco. Esses sensores instalados na estaca são ligados ao aparelho PDA (Pile Driving Analyser) através de frequências de rádios ou de um cabo com o intuito de transmitir os sinais para o aparelho (Figura 4a). Para utilização de cravação das estacas, foi utilizado um bate-estaca equipado com martelo para queda livre, com massa de 2,0 tf (Figura 4b).

Figura 4 - (a) Aparelho PDA (Pile Driving Analyser) para análise dos sinais de propagação de ondas, (b) vista geral do equipamento de cravação com martelo de queda livre.



Fonte: Autores (2023).

A interpretação dos resultados obtidos nos ensaios dinâmicos foi realizada pelo método CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program), utilizado para previsão da capacidade de carga por meio da análise interativa dos dados de medições de força e aceleração em função do deslocamento da estaca e reação dos parâmetros elásticos do maciço de solo. A tabela (1) apresenta um resumo dos números de golpes realizados durante os ensaios.

Tabela 1 - Características dos aplicados durante o monitoramento.

Estaca	Peso Martelo (tf)	Golpes	Altura de queda (cm)
E-1 (320 mm)	2,0	3	20 a 60
E-2 (320 mm)		3	20 a 60
E-3 (320 mm)		4	20 a 80
E-4 (380 mm)		2	20 a 80
E-5 (380 mm)		3	20 a 60

Fonte: Autores (2023).

Na tabela (2) são apresentados os principais resultados obtidos através das provas de carga dinâmica (PDA) para as grandezas de maior interesse, obtidos através das análises efetuadas pelo programa CAPWAP, como resistência Total (RT), resistência lateral (RL) e resistência de ponta (RP). O referido programa utiliza o sinal de velocidade para calcular, baseado em um modelo assumido do solo, a curva de força em função do tempo, na seção da estaca ao nível dos sensores. Tal modelo é então aprimorado iterativamente, até se obter o melhor ajuste possível entre as curvas de força medida e calculada. Assim, este modelo corresponde à solução CAPWAP para o golpe considerado.

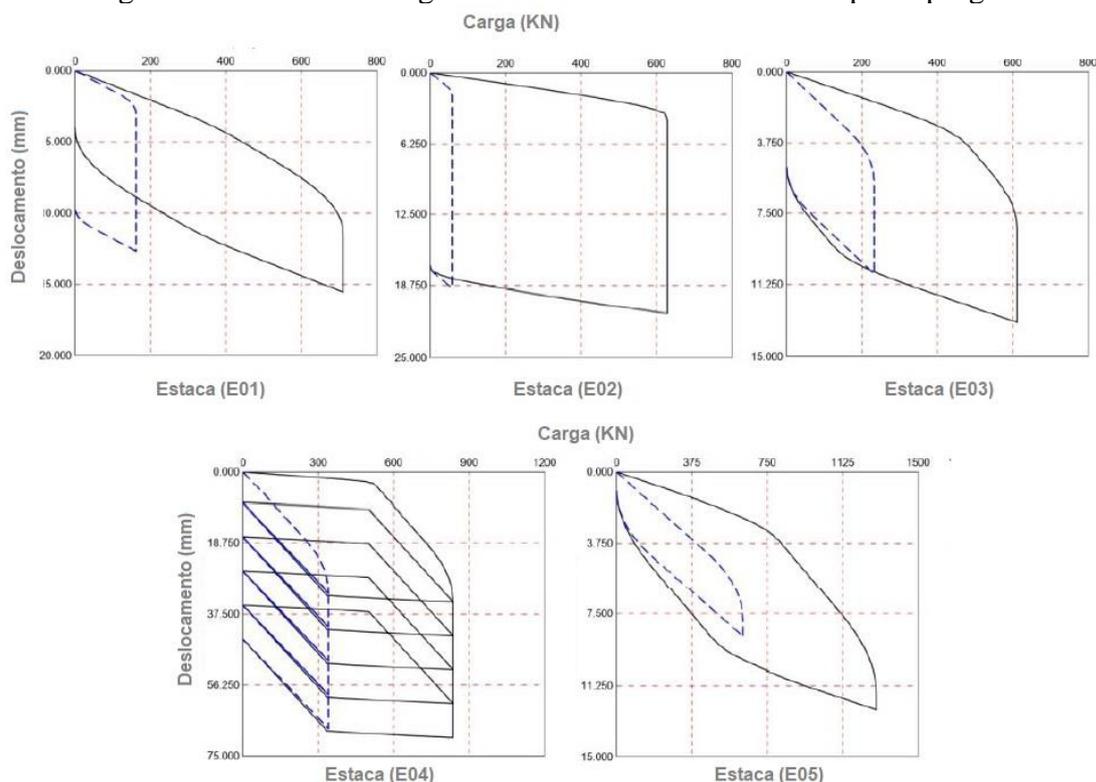
Tabela 2 - Resumo dos resultados obtidos na análise Capwap.

Estaca	Resistência (KN)			Resistência (%)		Carga catálogo (KN)	Fator de segurança
	Total	Ponta	Lateral	Ponta	Lateral		
E-1 (320 mm)	711	162	549	23	77	300	2,4
E-2 (320 mm)	629	57	571	9	91		2,1
E-3 (320 mm)	612	232	379	38	62		2,0
E-4 (380 mm)	836	340	496	41	59	400	2,1
E-5 (380 mm)	1.292	628	64	49	51		3,2

Fonte: Autores (2023).

Com base nos ensaios dinâmicos, foram avaliadas as capacidades de carga das estacas strauss utilizando-se o modelo CAPWAP, e foram obtidos os dados das curvas carga x recalque, conforme figura (5).

Figura 5 - Curvas carga x deslocamento fornecido pelo programa CAPWAP.



As estacas que sofreram maiores carregamentos durante a execução dos ensaios de compressão, obtiveram maiores acréscimos do aumento da capacidade de carga, devido a uma maior mobilização de resistência lateral, conforme apresentado na figura (4), o que demonstra a necessidade de grandes deslocamentos para a mobilização desta resistência.

Pesquisadores como Carvalho e Albuquerque (2002), Candra (2017) e Winata e Susilo (2022) analisaram a capacidade de carga para estacas tipos strauss, em substrato de características argilosa, siltosa e arenosa, para estacas com diâmetros de 300, 320 e 380 mm, com profundidades de 7,00 a 9,00 m, obtendo cargas de 400, 650 e 900 KN. As cargas obtidas através das provas de cargas dinâmicas, para as estacas strauss em estudo, completam e se enquadram dentro o banco de dados de bibliografias de engenharia de fundações, fornecendo parâmetros para o dimensionamento de fundações profundas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das previsões de capacidade de carga de ruptura por Aoki e Velloso (1975), Décourt (1996) e Teixeira (1996), foram calculados a partir do diâmetro nominal determinado em projeto (320 e 380 mm) e a partir de valores de índice de resistência a penetração N_{SPT} localizados mais próximos das estacas testes, respeitando os limites fixados na revisão bibliográfica para previsão de capacidade de carga.

Comparação entre métodos de previsão de carga e prova de carga dinâmica

A determinação da capacidade de carga das estacas strauss foi realizada a partir do diâmetro de projeto (310 e 380 mm), por conta da variação de diâmetro das estacas após o apiloamento do concreto durante sua execução. Como parâmetros de índice de resistência à penetração N_{SPT} , foram utilizadas as sondagens localizadas próximo as estacas testes. As tabelas (3 e 4) apresentam os valores de previsão de capacidade de carga estimados pelos métodos semi-empíricos.

Tabela 3 - Previsões das capacidades de carga para estaca de 320 mm.

Estaca strauss diâmetro de 320 mm profundidade 14 m						
Método	RL	RL %	RP	RP%	RT	Carga Admissível
Aoki e Velloso (1975)	166,92	76	53,08	24	220	110
Décourt (1996)	342,09	86	57,91	14	400	200
Teixeira (1996)	317,88	84	60,12	16	378	189

Fonte: Autores (2023).

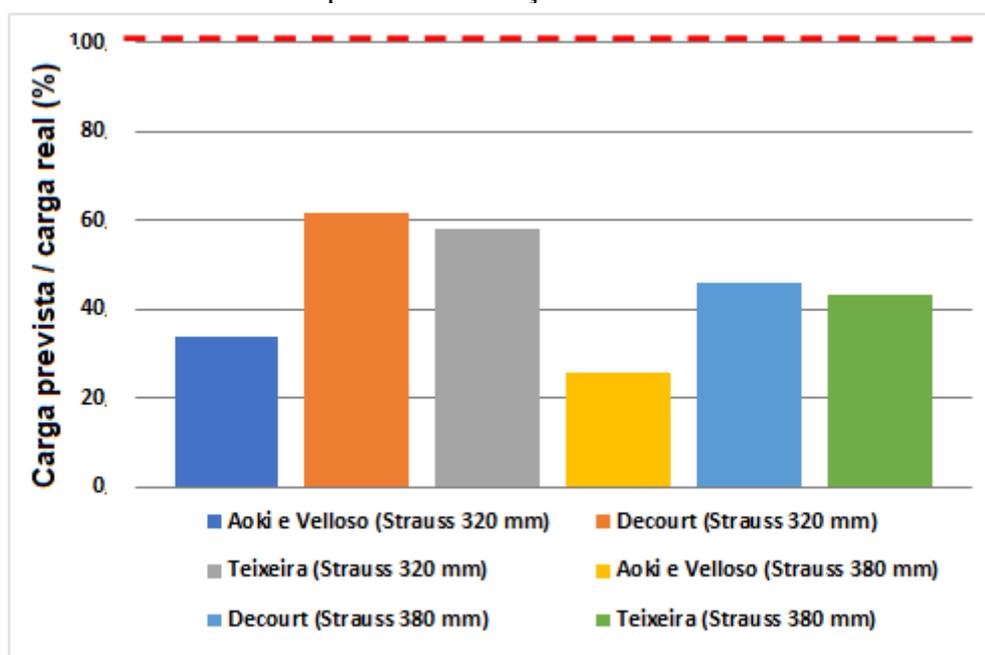
Tabela 4 - Previsões das capacidades de carga para estaca de 380 mm.

Estaca strauss diâmetro de 380 mm profundidade 14 m						
Método	RL	RL %	RP	RP%	RT	Carga Adm.
Aoki e Velloso (1975)	201,15	73	74,85	27	276	138
Décourt (1996)	407,34	83	81,66	17	489	245
Teixeira (1996)	377,22	82	84,78	18	462	231

Fonte: Autores (2023).

A figura (6) apresenta o desempenho dos métodos semi-empíricos comparando as cargas obtidas in loco para provas de carga dinâmica (PDA).

Figura 6 - Comparação entre os valores de estimativa de capacidade de carga pelos métodos semi-empíricos em relação aos ensaios PDA.



Fonte: Autores (2023).

Considerando a média dos resultados obtidos in loco pelos ensaios de carregamento dinâmico, para as estacas com diâmetro de 320 e 380 mm, dentre os métodos semi-empíricos, o que apresentou valores mais próximos da realidade, conforme figura (5), foi Décourt (1996), subestimando a carga média das estacas em 39% para estacas de 320 mm e 54% para as estacas de 380 mm.

O coeficiente de variação apresenta discrepâncias entre os quatro métodos, porém o método de Décourt (1996) apresenta menor variabilidade na distribuição dos resultados,

demonstrando ser o método mais confiável ao considerar os parâmetros específicos para estaca tipo strauss em sua previsão de carga para solos coesivos.

A discrepância em subestimar a capacidade de carga a partir dos métodos semi-empíricos para estacas do tipo strauss, está relacionada com a metodologia de execução, diferenciada em relação às estacas escavadas tradicionais. Segundo Miguel et al. (2005) quando as estacas strauss são preenchidas por apiloamento do concreto magro, após a abertura do furo por pilão, a ponta da estaca sofre um alargamento e pequenos bulbos no fuste se formam, aumentando com isto a área de contato com o solo. Neste caso, ambas as resistências de ponta e ao atrito lateral contribuem para a capacidade de carga da estaca.

Segundo Silva (2020) este aumento do diâmetro da estaca é devido à compactação radial do solo, fenômeno que ocorre nos solos com maiores valores de índices de vazios e porosidade, como os solos coesivos de resistência entre muito mole a média, características geotécnicas encontradas para a obra em estudo. Geralmente os parâmetros como índices físicos não são considerados pelos métodos de previsão de carga semi-empíricos, aumentando a disparidade com os valores encontrados in loco.

De acordo com Miguel et al. (2005) essas estacas que apiloam o concreto apresentam resistências de ponta e ao atrito lateral bem superiores às estimadas pelos métodos semi-empíricos clássicos brasileiros, conforme foi verificado na presente pesquisa, apresentando in loco cerca de 40% a mais que a estimativa de capacidade de carga.

De acordo com dados obtidos pelo PDA, em média as estacas strauss possui cerca 23% Rp e 77% RL para as estacas de 320 mm, e 45% Rp e 55% RL para as estacas de 380 mm. No caso para as estacas de 380 mm, ocorre mobilização da ponta, podendo, assim, ser consideradas ambas as resistências de ponta (Rp) e ao atrito lateral (RL) na capacidade de carga dessas fundações. Para as estacas de 320 mm, os valores de RL superiores aos de Rp, vai contra o esperado para esse tipo de estaca, pois a execução do alargamento da base, em função do apiloamento de uma camada de brita, antes do concreto ser lançado ao fundo do furo, deveria acarretar numa resistência de ponta mais expressiva. Devendo a execução da concretagem ser realizada de maneira mais criteriosa possível. Antes da concretagem recomenda-se executar, o pé da estaca, que consiste no lançamento de brita no 1 (no volume de, aproximadamente, uma “carriola” cheia) e posterior apiloamento desse material no fundo do furo com o pilão, neste caso, há um ganho de resistência de ponta, significativo em relação à resistência ao atrito lateral Miguel et al. (2005).

Entretanto durante a execução das estacas testes não foram realizados o pé da estaca, e segundo Campos et al. (2008) a técnica construtiva de apiloar somente o concreto conferi melhor resistência ao atrito/adeseção lateral (fuste), ou seja, o processo executivo possivelmente proporciona eficiência na formação dos bulbos laterais, ao longo do comprimento das mesmas. Ferreira et al. (2002), considera-se mais apropriado o procedimento da concretagem sem a realização do pé da estaca, pois se elimina a possibilidade do contato do soquete com a parede do furo, e a conseqüente contaminação do concreto, com a mistura de solo.

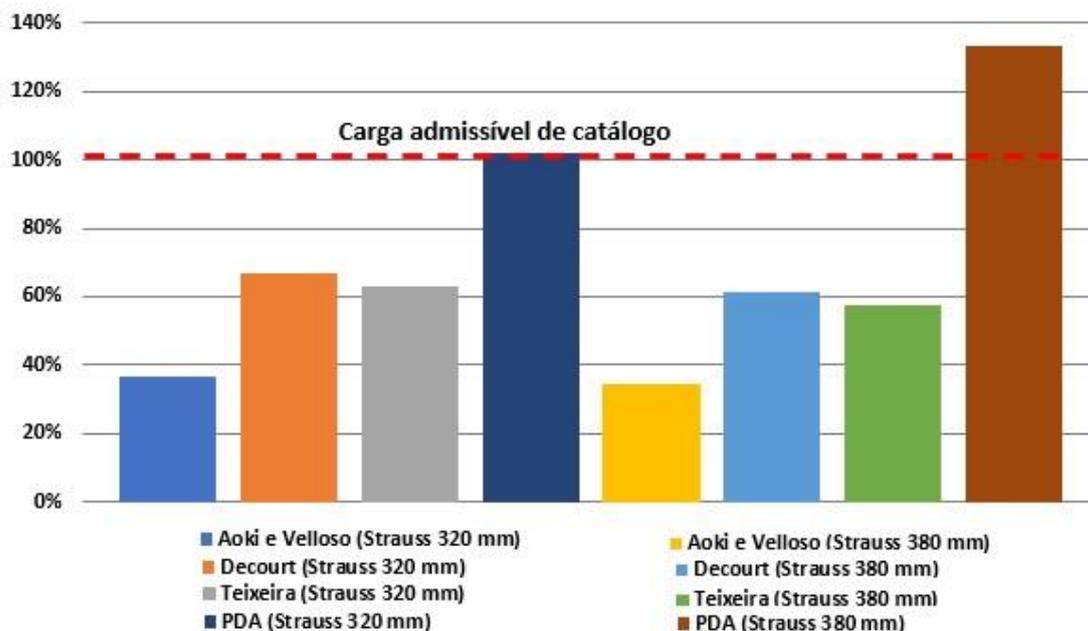
O método de Décourt (1996) destaca-se em relação aos outros métodos, pela consideração dos coeficientes F1 e F2, que para a estaca tipo strauss é satisfatória na análise de capacidade de carga, mas não representa bem o comportamento das mesmas quando se deseja obter as resistências de ponta e ao atrito lateral, separadamente.

Comparação entre métodos semi-empíricos e carga de catálogo

Segundo Cintra e Aoki (2010) a carga de catálogo é um modo de verificação do estado limite último de ruína que contempla exclusivamente a resistência estrutural da estaca, sem levar em consideração o aspecto geotécnico, obtida através do produto entre a tensão admissível do material da estaca e a área da seção transversal do fuste da estaca. Em uma situação ideal,

procura-se ter valores de carga admissível e carga de catálogo bem próximos. Entretanto quando comparada a carga admissível das estacas obtido pelos métodos semi-empíricos, comparada com a carga de catálogo prevista na literatura (Cintra e Aoki, 2010; ABEF, 2020) os métodos subestimaram em torno de 46% e 68% as estacas de 320 e 380 mm (figura 7).

Figura 7 - Comparação da carga admissível encontrada pelos métodos semi-empíricos e pelo ensaio de carregamento dinâmico, comparadas a carga de catálogo.



Fonte: Autores (2023).

Os métodos empregados subestimaram a carga de ruptura das estacas tipo Strauss em relação a carga de catálogo para as estacas de 320 mm (Aoki e Velloso 63%; Décourt 33%; Teixeira 37%), para as estacas de 380 mm (Aoki e Velloso 66%; Décourt 39%; Teixeira 42%). Entretanto todos os métodos semi-empíricos são considerados confiáveis em sua aplicabilidade, com destaque para Aoki e Velloso (1975) em relação ao fator de segurança global e visando a integridade das estacas, subestimando a sua resistência como elemento estrutural para prever a capacidade de carga, atribuindo maior segurança devido sua metodologia de execução e pela formação do substrato geológico com estratigrafia alternadas de camadas de solos coesivos e não coesivos.

Considerando as cargas admissíveis encontradas através dos valores das provas de cargas dinâmicas, superestimaram as cargas de catálogos para as estacas de 320 e 380 mm em média de 8% e 33%, demonstrando pouca disparidade das cargas de catálogos em relação às encontradas in loco, mesmo sem levar em consideração o aspecto geotécnico.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na presente pesquisa, demonstra que os métodos mais utilizados na literatura para previsão de capacidade de carga subestimam os valores obtidos nos ensaios de carregamento dinâmico entre 20% a 70%.

O método de Décourt (1996) foi o único que apresentou melhor estimativa da capacidade de carga de ruptura, subestimando a capacidade de carga obtida in loco em torno de 45%.

A distância dos valores entre as formulações dos métodos semi-empíricos para estimativa da capacidade de carga e as provas de cargas, está relacionada com a metodologia executiva das estacas Strauss, através do alargamento da sua base durante a cravação do tubo com ponteira fechada, contribuindo para o aumento da sua resistência de ponta e através do apiloamento do fuste o aumenta o atrito lateral.

Os métodos semi-empíricos são considerados confiáveis quando comparados as cargas de catálogos, com destaque para Aoki e Velloso (1975) subestimando a resistência do elemento estrutural a favor da segurança. As cargas de catálogos quando comparadas com os valores encontrado das cargas admissíveis in loco, apresentam pouca disparidade, em média cerca de 20% menor, podendo ser atribuída em fase de projeto, mesmo sem levar em consideração o aspecto geotécnico da obra local.

Os resultados encontrados nas provas de cargas dinâmicas na presente pesquisa, contribui para o avanço e crescimento constante de banco de dados aplicadas em estaca Strauss, apresentando proximidades das cargas obtidas na literatura executadas em diferentes tipos de solo, permitindo a utilização do método de previsão de maior confiabilidade na carga admissível estimada na fase de projeto.

Dentre as principais sugestões para futuros trabalhos destacam-se a realização de provas de carga dinâmica comparadas com provas de cargas estáticas em mesmo perfil de solo, ao qual permitirá maior confiabilidade no emprego de métodos semi-empíricos de previsão de capacidade de carga de acordo com o tipo de ensaio.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA. **Manual de Especificações e Procedimentos**. São Paulo: Ed. PINI. p.499. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**, Rio de Janeiro, ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6122: **projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-NBR 13208 - Estacas - Ensaio de carregamento dinâmico. Rio de Janeiro. p.12. 2007.
- ALMEIDA, M. A.; MIGUEL, Miriam Gonçalves; TEIXEIRA, Sidnei Helder Cardoso. **Horizontal bearing capacity of piles in a lateritic soil. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 137, n. 1, p. 59-69, 2011.
- ALONSO, U.R. Execução de fundações profundas: estacas pré-moldadas. In: HACHICH, W.; FALCONI, F.F.; SAES, J.L.; FROTA, R.G.Q.; CARVALHO, C.S.; N IYAMA, S. (Org.). **Fundações: teoria e prática. 3. ed. São Paulo: Pini, p. 375-382. 2019.**
- AOKI, N; VELLOSO, D. A. **An approximated method to estimate the bearing capacity of piles**. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 5, Buenos Aires, 1975, Proceedings, v.1, p.367-376. (1975).
- CARVALHO, D.; ALBUQUERQUE, P. J. R. **Estaca Tipo Strauss Instrumentada em Solo Arenoso**. Cobranseg. 2002.
- CINTRA, J. C.; AOKI, N. (2010). **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina dos Textos.
- CINTRA, J. C. A. AOKI, N., TSHUA, C. H. C., GIACHETI, H. L. **Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de textos. 2013.
- DÉCOURT, L.; ALBIERO, J. H.; CINTRA, J. C. A. Análise e projeto de fundações profundas. In: HACHICH, W. et al.. (Edit.). **Fundações: teoria e prática. 2 ed. São Paulo: Editora PINI. p. 265-327. 2019.**

DÉCOURT, L. **A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez**. In: 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 3., 1996. Anais [...]. São Paulo: [s. n.], v. 20, 10p. 1996.

ETCHEBEHERE, M. L.; SAAD, A. R.; BISTRICHI, C. A.; GARCÍA, M. J.; DA SILVA, M. F.; DE FÁTIMA BEDANI, E. **Modelo de Evolução Geológica da Região do Atual Município de Atibaia (SP) durante o Cenozóico**. Revista Geociências-UNG-Ser, v. 6, n. 1, p. 4-31, 2007.

FERREIRA, C.V.; LOBO, A.S.; CARVALHO, D. ALBUQUERQUE, P.J.R. **Comportamento de estacas apiloadas carregadas lateralmente**. In: Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, XVI CAMSIG, Patagônia Argentina, Anais em CD. 11p. 2002.

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 1992.

CANDRA, A. I. **Analisis Daya Dukung Pondasi Strous Pile Pada Pembangunan Gedung Mini Hospital Universitas Kadiri**. Ukarst, v. 1, n. 1, p. 27-39, 2017.

FIALHO, J. B.; MENEZES JÚNIOR, N. L. (2017). **Fundamentos da Mecânica dos Solos e das Rochas**. Editora LTC.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A.M. 1975. **The Ribeira Folded BeFolded Belt**. Rev. Bras. Geociências. SBG. São Paulo, 5:257-266.

MARINHO, F. A. M.; ROSA, M. L. C. C. (2015). **Geologia de Engenharia: Conceitos, Métodos e Aplicações**. Editora Oficina de Textos.

MARQUES, O. C.; FEITOSA, L. A.; BICALHO, K. V.; ALVES, E. C. **Analysis of constructive effect and soil-structure interaction in tall building projects with shallow foundations on sandy soils**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 14, p. 1-12, 2021.

MILITITSK, J. **Provas de cargas estática**. In: seminário de engenharia de fundações especiais, 2., São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABMS, 1991, v. 2 p. 203-228.

MIGUEL, M. G.; DA SILVA, D. F.; CAMPOS, G. G. G.; DE ALMEIDA, M. A.; BELINCANTA, A. **Adaptação de métodos semi-empíricos para estimar capacidade de carga de estacas de pequeno diâmetro no solo de Londrina, Estado do Paraná**. Acta Scientiarum. Technology, v. 27, n. 2, p. 155-165, 2005.

PEREIRA, A. B.; PORTO, T. B.; GOMES, R. C.; DOS SANTOS, R. L. R.; RABELO, J. M. G. **Análise de desempenho de métodos semi-empíricos de previsão de capacidade de carga geotécnica aplicados a estacas pré-moldadas de concreto assentes em argila arenosa**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 2, p. 5948-5976, 2020.

PADILHA, A. C. C.; FERREIRA, J. C. A. A. F. **Prevenção de Patologias Advindas de Terremotos em Edificações**. LONDRINA EM DESENVOLVIMENTO, p. 44. 2017.

REBELLO, Y. C. P. **Fundações: Guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. São Paulo: Zigurete, 2008.

RODRIGUEZ, S. K. **Geologia urbana da região metropolitana de São Paulo**. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da USP). 171p. 1998.

SILVA, R. R. C. **Análise de métodos de previsão de capacidade de carga em estaca raiz a partir do comportamento em ensaios de carregamento estático e dinâmico**. Revista Tecnologia, v. 41, n. 2, 2020.

SILVA, R. R. C. da. **Previsão da capacidade de carga em estacas raiz através de métodos semi-empíricos associados a análises estatísticas**. Revista CIATEC-UPF, UPF, vol.10 (2), p. 102-114. 2018.

TEIXEIRA, A. H. **Projeto de execução de fundações**. SEFE, 3, São Paulo, vol. 1. 1996.

TURINI, T. T.; KERKOFF, M. A.; FAVARATO, L. F.; ALVES, É. C.; THOMAZ, A. G. **Análise comparativa de dimensionamento otimizado de blocos de concreto sobre estacas de concreto.** Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, v. 16, n. 1, 2019.

WINATA, M. C.; SUSILO, A. J. **Analisis efektivitas micropile dan strauss pile untuk memperbesar daya dukung fondasi.** JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil, p. 349-358, 2022.