

APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS DE CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS SOBRE SOLOS ARENOSOS: UM ESTUDO GEOTÉCNICO COMPARATIVO ENTRE BAURU-SP E SANTOS-SP

APPLICATION OF LOAD-BEARING CAPACITY METHODOLOGIES IN PILES ON SANDY SOILS: A COMPARATIVE GEOTECHNICAL STUDY BETWEEN BAURU-SP AND SANTOS-SP

¹MIRANDA, Luciana; ²RODRIGUES, André Luis de Carvalho

^{1e2}Departamento de Engenharia - Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos- Unifio/FEMM

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo comparar metodologias de cálculo de capacidade de carga em estacas escavadas aplicadas a solos arenosos de diferentes composições geomorfológicas. Foram analisados perfis de sondagem (SPT) dos municípios de Santos e Bauru, ambos no estado de São Paulo, utilizando-se as formulações propostas por Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978, 1996) e Teixeira (1996). Os resultados evidenciam que, enquanto o método de Décourt-Quaresma apresenta caráter conservador e linear, os métodos de Aoki-Velloso e Teixeira são mais sensíveis às variações bruscas de resistência, resultando em maiores capacidades estimadas. A comparação entre os solos mostrou que Bauru apresenta comportamento mais homogêneo e crescente com a profundidade, enquanto Santos revela maior heterogeneidade, incluindo picos de resistência e zonas de instabilidade. Conclui-se que a escolha da metodologia deve considerar tanto a natureza do solo quanto o nível de segurança desejado no dimensionamento das fundações.

Palavras-chave: fundações profundas; estacas escavadas; capacidade de carga; solos arenosos

ABSTRACT

This study aims to compare methodologies for calculating the load-bearing capacity of bored piles in sandy soils with different geomorphological compositions. Standard Penetration Test (SPT) profiles from the municipalities of Santos and Bauru, in São Paulo state, were analyzed using the formulations proposed by Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978, 1996), and Teixeira (1996). The results show that while the Décourt-Quaresma method presents a more conservative and linear approach, the Aoki-Velloso and Teixeira methods are more sensitive to abrupt variations in soil resistance, leading to higher estimated capacities. The comparison between soils indicated that Bauru exhibits a more homogeneous and gradually increasing behavior with depth, whereas Santos reveals greater heterogeneity, with peaks of resistance and instability zones. It is concluded that the choice of methodology should consider both the soil characteristics and the required safety level for foundation design.

Keywords: deep foundations; bored piles; load-bearing capacity; sandy soils.

INTRODUÇÃO

Dentro do cenário da engenharia civil os solos podem ser definidos como uma reunião de partículas minerais, construídas gradualmente durante a decomposição das rochas ocorrida em seu ciclo natural, que podem se apresentar totalmente desunidas, soltas, ou ainda com um aspecto “cimentado”, no qual as partículas se mostram fracamente unidas, agrupadas a espaços vazios preenchidos por água, ar ou ambos (Knappett; Craig, 2012).

Além do ciclo das rochas acima citado, o transporte de um solo por agentes como a gravidade, o vento e as geleiras podem gerar, ainda, alterações em sua granulometria, ou seja, reduzir o tamanho e alterar a forma de suas partículas, parâmetros importantes utilizados na classificação final deste solo (Knappett; Craig, 2012). Diante dessa classificação com base no tamanho das partículas tem-se as areias, definidas como um solo não coesivo e não plástico cujo tamanho dos grão varia dentro da faixa de 0,06mm a 0,2mm (NBR6502, 1995).

Outra característica importante dos solos é sua resistência ao cisalhamento (Neto, 2019), definida por Wood (1990) como a tensão necessária para causar um deslocamento relativo entre partículas, em solos granulares, como é o caso das areias, existem duas variações possíveis inteiramente dependentes do estado inicial do solo antes da aplicação da força. Em caso de areias densas é possível observar a ocorrência de um efeito denominado dilatação (Reynolds, 1885), onde há um aumento do volume da amostra devido a um aumento do número de espaços vazios durante o cisalhamento, já em amostras fofas seu volume tende a permanecer inalterado.

Com as informações necessárias de um solo passa a ser possível o desenvolvimento de uma fundação adequada a sua capacidade de suporte de carga, responsável por transferir os esforços da superestrutura para o solos, a fundação de uma edificação é a parte mais importante de um sistema estrutural (Schulze, 2013).

As fundações, ainda, podem ser divididas em dois subgrupos sendo eles o item 3.1. da NBR6122/2022 que define fundações superficiais com um *“elemento de fundação em que a carga é transmitida ao terreno pelas tensões distribuídas sob a base da fundação, e a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente à fundação é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação”* e o item 3.7. que define fundações profundas como um *“elemento de fundação que transmite a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, devendo sua ponta ou base estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0m. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas e os tubulões”*.

Frente a tais definições adiciona-se, ainda, as fundações profundas a capacidade de suportar carregamentos capazes de gerar recalques excessivos ou rupturas por cisalhamento do solo (Schulze, 2013). Diante de um solo não coesivo se torna interessante a utilização das estacas, definidas no item 3.8. da NBR6122/2010 como *um*

“elemento de fundação profunda executado inteiramente por equipamentos ou ferramentas, sem que, em qualquer fase da execução, haja descida de pessoas...”, como modo de transmissão de cargas.

Dessa forma, unindo as características cisalhantes dos solos arenosos com a evidenciada contenção das fundações profundas (Schulze, 2013) foi determinada à estaca escavada — elemento moldado in loco (NBR6122,2022) - como fundação a ser utilizada no decorrer do estudo a ser desenvolvido.

Com a definição da fundação a ser aplicada a determinação da capacidade de carga, definida por Alonso (1981) como *“...aquela que aplicada ao mesmo provoca o colapso ou o escoamento do solo que lhe dá suporte ou do próprio elemento”* será realizada por meio da utilização de três métodos distintos a serem comparados.

O primeiro método desenvolvido por Aoki e Velloso (1975) considerado o primeiro método semiempírico brasileiro, utiliza para a determinação da carga de estacas submetidas ao carregamento por compressão resultados obtidos pelas sondagens à percussão (SPT). Nesse método, a carga de ruptura do solo, representada na formulação pela incógnita Q_1 , é determinada por meio da união de sua resistência de ponta (Q_p) e da resistência proveniente do atrito lateral (Q_l), ambas calculadas a partir dos coeficientes k e a particulares de cada tipo e composição de solo, assim como o NSPT, correspondente ao número de golpes por camada obtido através do ensaio de percussão.

Em seguida tem-se o método de Décourt e Quaresma (1978,1996), desenvolvido como um processo para estimar tal capacidade levando em consideração os valores de NSPT, teve de sofrer diversas mudanças para que sua aplicação fosse viável a todos os tipos de estacas — tendo em vista seu desenvolvimento focado no estudo das estacas cravadas.

O método consiste na aplicação de elementos como o coeficiente característico do solo (C), particular de cada composição geomorfológica, coeficientes α e β (Décourt, 1996), dados em função do tipo de estaca utilizada e do tipo de solo estudado, assim como valores médios de NSPT. Em conjunto com as particularidades recebidas do solo, as formulações também exigem dados como a área da seção transversal da ponta da estaca (A_p), o perímetro da seção transversal da estaca (U) e o seu comprimento.

Por fim o método de Teixeira (1996) que, em uma tentativa de unir os dois métodos anteriormente apresentados, propõe que a determinação da capacidade de carga deve

ser feita por meio de novos parâmetros α e β , onde o coeficiente α passa a oferecer informações de uma composição entre o tipo de estaca utilizada e o solo no qual esta está inserida, enquanto o coeficiente β é decorrente apenas do tipo de estaca, independentemente das composições oferecidas pelas camadas do solo (Ferreira; Delalibera; Silva, 2014).

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida em dois locais do estado de São Paulo com solos classificados como arenosos, porém com composições geomorfológicas distintas. O primeiro local corresponde ao município de Bauru, situado no interior do estado, e o segundo à cidade de Santos, localizada no litoral paulista. A escolha destas localidades tem como finalidade evidenciar a variabilidade geotécnica existente mesmo em solos de classificação semelhante dentro de um mesmo território.

Para que a comparação fosse possível os parâmetros dos solos estudados foram necessários, estes foram obtidos por meio de levantamento bibliográfico em estudos já consolidados na literatura técnica devido a inviabilidade de se executar diretamente os ensaios de campo. Entre os dados considerados estão as propriedades físicas e índices geotécnicos pertinentes à análise da capacidade de carga de um solo frente a utilização de fundações profundas.

A avaliação da capacidade de carga foi realizada por meio de simulações da aplicação de estacas escavadas de mesmo diâmetro em ambos os solos estudados, para o desenvolvimento dos cálculos foram aplicadas formulações consagradas na geotecnia, propostas pelos autores Décourt – Quaresma, Aoki-Velloso e Teixeira. Cada método apresenta suas particularidades quanto ao tratamento dos parâmetros do solo e a estimativa da capacidade de carga.

A metodologia desenvolvida por Aoki e Velloso (1975) fundamenta-se na aplicação da Equação 01, abaixo apresentada, em conjunto com parâmetros provenientes das Tabelas 01 e 02, seguidamente exibidas, definidos em função do tipo de solo estudado.

$$R = \frac{K * Np}{F1} * Ap + \frac{U}{F} * \sum_{1}^n (a * K * Nl * \Delta l)$$

Onde:

A_p : área da seção transversal da ponta

U : perímetro da seção transversal do fuste

N_p : N (SPT) na cota de apoio da fundação

N_l : N (SPT) médio na camada de solo de espessura Δl

Tabela 01. F_1 e F_2 (fatores de correção)

Tipo de estaca	F_1	F_2
Franki	2,50	5,0
Metálica	1,75	3,5
Pré-moldada	1,75	3,5
Escavadas	$F_2 = 2F_1$	4,5 - 10,5
Escavadas c/ lama bentonítica	3,50	7,0
Escavadas*	3,00	6,0

FONTE: AOKI E VELLOSO (1975)

Tabela 02. Coeficiente K e α

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

FONTE: Aoki e Velloso (1975)

Já a metodologia Décourt e Quaresma (1978) desenvolve-se por meio da aplicação da Equação 02, abaixo descrita, conjuntamente a dados específicos referentes às propriedades dos solos e as características das fundações, parâmetros estes reunidos nas Tabelas 03, 04 e 05 em seguida oferecidas.

$$R = \alpha * c * N_p * A_p + \beta * 10 * \left(\frac{N_l}{3} + 1 \right) * U * \Delta l$$

Onde:

A_p : área da seção transversal da ponta

N_p : N (SPT) médio na cota de apoio da fundação

N_l : N (SPT) médio na camada de solo de espessura Δl

β : coeficiente de ajuste para tipos de estacas

Tabela 03. Coeficiente C

Tipo de solo	C (kPa)
Argila	120
Silte argiloso*	200
Silte arenoso*	250
Areia	400

FONTE: Décourt e Quaresma (1978)

Tabela 04. Coeficiente α

Tipo de solo	Escavadas em geral	Escavadas (Bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetadas sob alta pressões
Argila	0,85	0,85	0,30	0,85	1,00
Solos intermediários	0,60	0,60	0,30	0,60	1,00
Areias	0,50	0,50	0,30	0,50	1,00

FONTE: Décourt e Quaresma (1978)

Tabela 05. Coeficiente β

Tipo de solo	Escavadas em geral	Escavadas (Bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetadas sob alta pressões
Argila	0,80	0,90	1,00	1,50	3,00
Solos intermediários	0,65	0,75	1,00	1,50	3,00
Areias	0,50	0,60	1,00	1,50	3,00

FONTE: DÉCOURT E QUARESMA (1978)

Por fim, a metodologia de Teixeira (1996), que apresenta-se que é desenvolvida por meio da Equação 03, concomitantemente com os parâmetros específicos deste métodos exibidos nas Tabelas 06 e 07.

$$R = \alpha * N_p * A_p + \beta * N_l * U * L$$

Onde:

A_p : área da seção transversal da ponta

N_p : N (SPT) médio

N_l : N (SPT) médio na camada de solo de espessura Δl

L : comprimento da estaca

U : perímetro da estaca

Tabela 06. Coeficiente α

Tipo de solo ($4 < N < 40$)	Pré – moldadas de concreto e metálicas	α (kPa) Tipos de estacas		
		Tipo Franki	Escavadas a céu aberto	Estaca Raiz
Areia com pedregulho	440	380	310	290
Areia	400	340	270	260
Areia Siltosa	360	300	240	220
Areia Argilosa	300	240	200	190
Silte Arenoso	260	210	160	160
Silte Argiloso	160	120	110	110
Argila Arenosa	210	160	130	140
Argila Siltosa	110	100	100	100

FONTE: TEIXEIRA (1996)

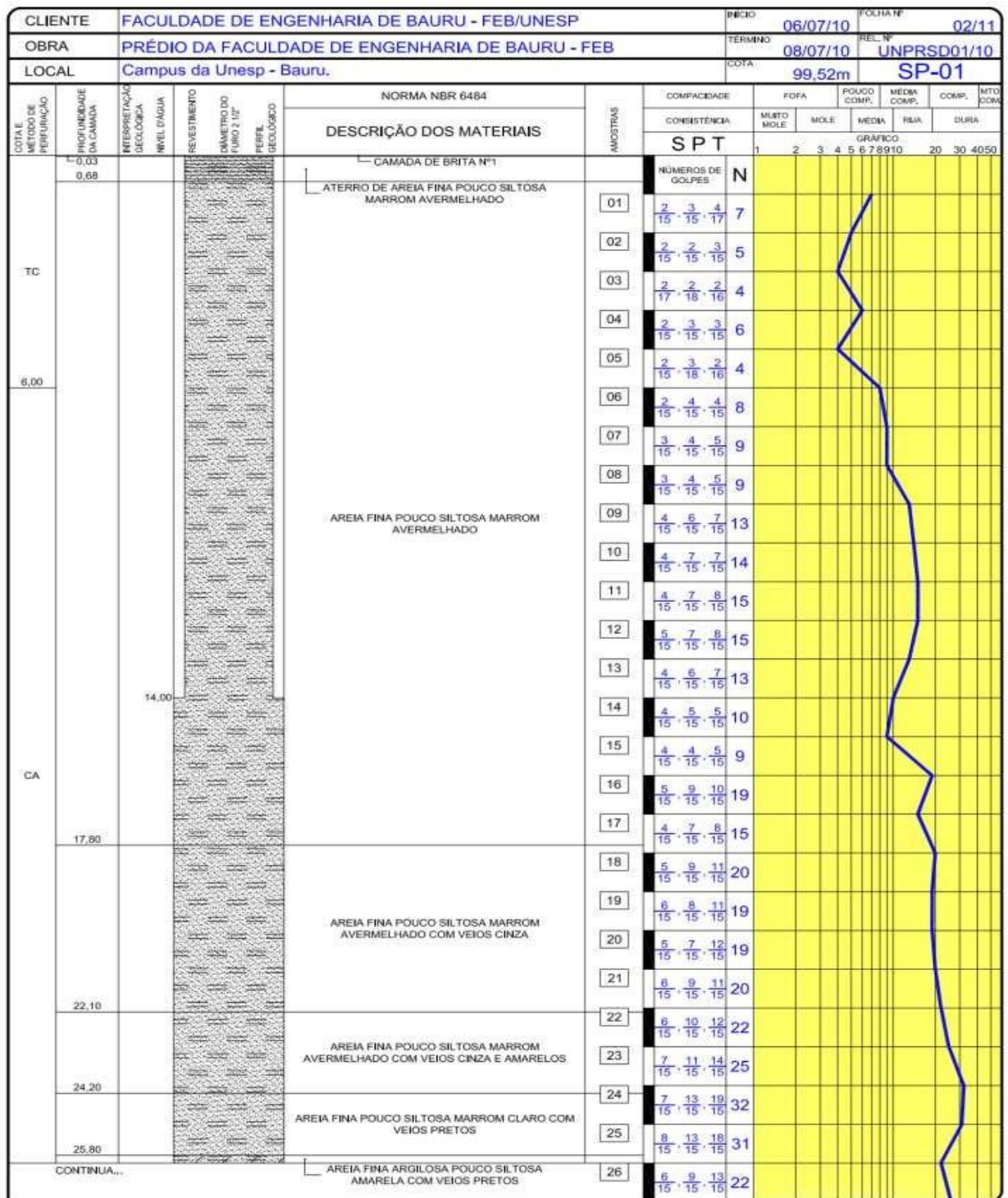
Tabela 07. Coeficiente β

Tipo de Estaca	β (kPa)
Pré – moldadas e metálicas	4
Tipo Franki	5
Escavadas a céu aberto	4
Estaca Raiz	6

FONTE: TEIXEIRA (1996)

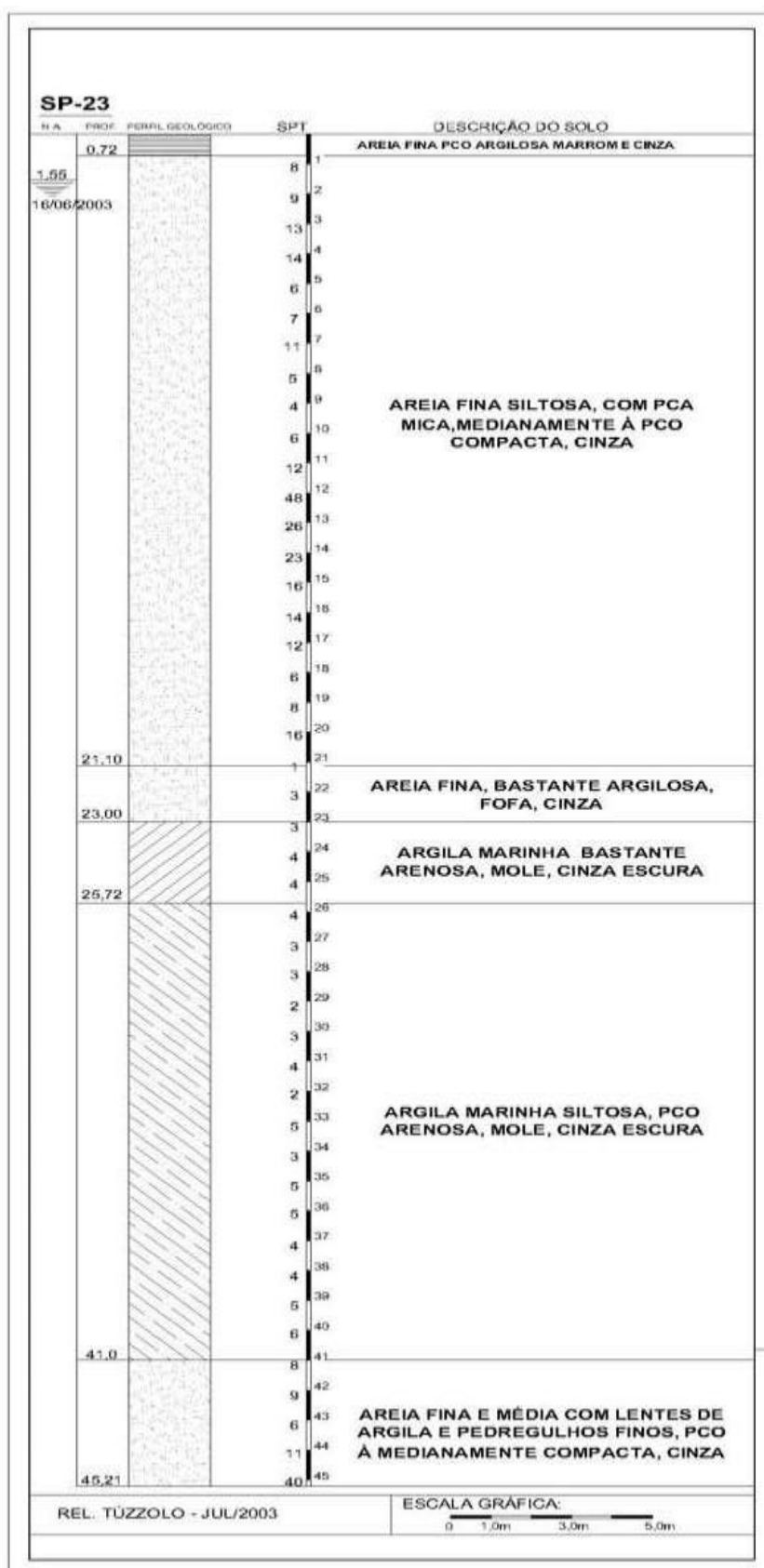
Dessa forma, as formulações e os parâmetros apresentados anteriormente foram aplicados aos solos dos municípios de Bauru e Santos, considerando os respectivos valores de SPT ilustrados nas Figuras 01 e 02, que apresentam os perfis de sondagem de cada local, posteriormente organizados em forma de síntese nas Tabelas 08 e 09, evidenciando o perfil predominantemente formado por areia em ambos os solos. Além disso, os relatórios SPT escolhidos foram realizados no mesmo período em anos diferentes, atribuindo aos locais de estudo características climáticas semelhantes visando reduzir as variabilidades do estudo.

Figura 01. Relatório SPT Bauru - SP



FONTE: BONI, H.S. (2018)

Figura 02. Relatório SPT Santos - SP



FONTE: DIAS, M.S. (2010)

Tabela 08. Síntese SPT Santos - SP

SONDAGEM		
PROFUNDIDADE (M)	NSPT	COMPOSIÇÃO DA CAMADA
0	0	AREIA SILTOSA
1	8	AREIA SILTOSA
2	9	AREIA SILTOSA
3	13	AREIA SILTOSA
4	14	AREIA SILTOSA
5	6	AREIA SILTOSA
6	7	AREIA SILTOSA
7	11	AREIA SILTOSA
8	5	AREIA SILTOSA
9	4	AREIA SILTOSA
10	6	AREIA SILTOSA
11	12	AREIA SILTOSA
12	48	AREIA SILTOSA
13	26	AREIA SILTOSA
14	23	AREIA SILTOSA
15	16	AREIA SILTOSA
16	14	AREIA SILTOSA
17	12	AREIA SILTOSA
18	6	AREIA SILTOSA
19	8	AREIA SILTOSA
20	16	AREIA SILTOSA
21	1	AREIA SILTOSA
22	3	AREIA ARGILOSA
23	3	AREIA ARGILOSA

Tabela 09. Síntese SPT Bauru - SP

SONDAGEM		
PROFUNDIDADE (M)	NSPT	COMPOSIÇÃO DA CAMADA
0	0	AREIA SILTOSA
1	7	AREIA SILTOSA
2	5	AREIA SILTOSA
3	4	AREIA SILTOSA
4	6	AREIA SILTOSA
5	4	AREIA SILTOSA
6	8	AREIA SILTOSA
7	9	AREIA SILTOSA
8	9	AREIA SILTOSA
9	13	AREIA SILTOSA
10	14	AREIA SILTOSA
11	15	AREIA SILTOSA
12	15	AREIA SILTOSA
13	13	AREIA SILTOSA
14	10	AREIA SILTOSA
15	9	AREIA SILTOSA
16	19	AREIA SILTOSA
17	15	AREIA SILTOSA
18	20	AREIA SILTOSA
19	19	AREIA SILTOSA
20	19	AREIA SILTOSA
21	20	AREIA SILTOSA
22	22	AREIA SILTOSA
23	25	AREIA SILTOSA
24	32	AREIA SILTOSA
25	31	AREIA SILTOSA

FONTE: o autor (2025)

Após a organização dos dados de entrada procedeu-se à aplicação das metodologias de Aoki-Velloso, Décourt-Quaresma e Teixeira aos perfis geotécnicos e relatórios de sondagem SPT previamente selecionados. A partir dessa etapa, cada equação foi utilizada de acordo com as condições estabelecidas pelas tabelas de coeficientes e parâmetros apresentadas anteriormente, contemplando tanto a resistência de ponta quanto a resistência lateral das estacas escavadas cujo diâmetro corresponde a 30 (trinta) centímetros.

Com o intuito de sistematizar e facilitar a interpretação, os resultados provenientes da aplicação das fórmulas foram organizados em quadros comparativos. Dessa forma, os cálculos geraram valores que serão dispostos nas Tabelas 10 a 17, estruturadas de modo a apresentar, para cada município analisado (Bauru e Santos), os resultados obtidos segundo cada metodologia. Essa organização permitirá a posterior análise comparativa entre os métodos adotados, bem como entre os diferentes contextos geomorfológicos estudados.

Tabela 10. Método Aoki e Velloso (1975) aplicado ao solo de Santos

MÉTODO AOKI VELLOSO (1975)									
PROFUNDIDADE	K (Kpa)	α	F1	F2	Rp na camada (KN)	Rl por metro (KN)	Rl acumulada (KN)	R total do solo (KN)	P adm (KN)
0	800	0,02	3	6	0,0	0,0	0	0,0	0,0
1	800	0,02	3	6	150,8	20,11	20,11	170,9	85,5
2	800	0,02	3	6	169,6	22,62	42,73	212,4	106,2
3	800	0,02	3	6	245,0	32,67	75,40	320,4	160,2
4	800	0,02	3	6	263,9	35,19	110,58	374,5	187,2
5	800	0,02	3	6	113,1	15,08	125,66	238,8	119,4
6	800	0,02	3	6	131,9	17,59	143,26	275,2	137,6
7	800	0,02	3	6	207,3	27,65	170,90	378,2	189,1
8	800	0,02	3	6	94,2	12,57	183,47	277,7	138,9
9	800	0,02	3	6	75,4	10,05	193,52	268,9	134,5
10	800	0,02	3	6	113,1	15,08	208,60	321,7	160,8
11	800	0,02	3	6	226,2	30,16	238,76	465,0	232,5
12	800	0,02	3	6	904,8	120,64	359,40	1264,2	632,1
13	800	0,02	3	6	490,1	65,35	424,74	914,8	457,4
14	800	0,02	3	6	433,5	57,81	482,55	916,1	458,0
15	800	0,02	3	6	301,6	40,21	522,76	824,4	412,2
16	800	0,02	3	6	263,9	35,19	557,95	821,8	410,9
17	800	0,02	3	6	226,2	30,16	588,11	814,3	407,2
18	800	0,02	3	6	113,1	15,08	603,19	716,3	358,1
19	800	0,02	3	6	150,8	20,11	623,29	774,1	387,0
20	800	0,02	3	6	301,6	40,21	663,50	965,1	482,5
21	800	0,02	3	6	18,8	2,51	666,02	684,9	342,4
22	600	0,03	3	6	42,4	8,48	674,50	716,9	358,5
23	600	0,03	3	6	42,4	8,48	682,98	725,4	362,7

FONTE: o autor (2025)

Tabela 11. Método Décourt e Quaresma (1978) aplicado ao solo de Santos

MÉTODO DÉCOURT QUARESMA (1978)								
PROFUNDIDADE	Np	NI	COEFICIENTE DO SOLO	Rp (KN)	Rl (KN)	Rl acumulada (KN)	R total (KN)	P adm (KN)
1	8,50	8,00	400	120,17	17,28	0,00	120,17	30,04
2	10,00	8,50	400	141,37	18,06	0,00	141,37	35,34
3	12,00	10,00	400	169,65	20,42	20,42	190,07	58,12
4	11,00	11,00	400	155,51	21,99	42,41	197,92	71,50
5	9,00	10,00	400	127,23	20,42	62,83	190,07	80,14
6	8,00	9,50	400	113,10	19,63	82,47	195,56	91,71
7	7,67	9,71	400	108,38	19,97	102,44	210,82	105,89
8	6,67	9,13	400	94,25	19,05	121,48	215,73	117,01
9	5,00	8,56	400	70,69	18,15	139,64	210,32	125,08
10	7,33	8,30	400	103,67	17,75	157,39	261,06	146,98
11	22,00	8,64	400	311,02	18,28	175,66	486,68	212,88
12	28,67	9,17	400	405,27	19,12	194,78	600,05	251,15
13	32,33	9,62	400	457,10	19,82	214,60	671,71	279,36
14	21,67	10,00	400	306,31	20,42	235,02	541,33	257,36
15	17,67	10,33	400	249,76	20,94	255,96	505,72	259,33
16	14,00	10,56	400	197,92	21,30	277,26	475,18	262,76
17	10,67	10,65	400	150,80	21,44	298,70	449,50	267,47
18	8,67	10,39	400	122,52	21,03	319,74	442,26	276,58
19	10,00	10,26	400	141,37	20,83	340,57	481,94	297,32
20	8,33	10,50	400	117,81	21,21	361,77	479,58	307,74
21	6,67	10,14	400	94,25	20,64	382,41	476,66	317,73
22	2,33	9,82	400	32,99	20,14	402,55	435,54	317,90
23	3,00	9,52	400	42,41	19,67	422,22	464,63	335,38

FONTE: o autor (2025)

Tabela 12. Método Teixeira (1996) aplicado ao solo de Santos

MÉTODO TEIXEIRA (1996)									
PROFUNDIDADE	Np	NI	α (Kpa)	b (Kpa)	Rp (KN)	RI (KN)	RI acumulada (KN)	R total (KN)	P adm (KN)
1	8,00	8,00	240	4,00	135,72	30,16	30,16	165,88	82,94
2	8,50	8,50	240	4,00	144,20	32,04	62,20	206,40	103,20
3	11,00	10,00	240	4,00	186,61	37,70	99,90	286,51	143,26
4	13,50	11,00	240	4,00	229,02	41,47	141,37	370,39	185,20
5	10,00	10,00	240	4,00	169,65	37,70	179,07	348,72	174,36
6	6,50	9,50	240	4,00	110,27	35,81	214,88	325,15	162,58
7	9,00	9,71	240	4,00	152,68	36,61	251,49	404,17	202,09
8	8,00	9,13	240	4,00	135,72	34,42	285,91	421,63	210,81
9	4,50	8,56	240	4,00	76,34	32,27	318,18	394,52	197,26
10	5,00	8,30	240	4,00	84,82	31,29	349,47	434,29	217,15
11	9,00	8,64	240	4,00	152,68	32,57	382,04	534,72	267,36
12	25,50	11,17	240	4,00	432,60	42,11	424,15	856,75	428,38
13	32,50	12,31	240	4,00	551,35	46,41	470,56	1021,91	510,95
14	42,50	13,07	240	4,00	721,00	49,27	519,83	1240,83	620,41
15	19,50	13,27	240	4,00	330,81	50,03	569,86	900,67	450,33
16	15,00	13,31	240	4,00	254,47	50,18	620,04	874,51	437,25
17	13,00	13,24	240	4,00	220,54	49,91	669,95	890,49	445,25
18	9,00	12,83	240	4,00	152,68	48,37	718,32	871,00	435,50
19	7,00	12,58	240	4,00	118,75	47,43	765,74	884,50	442,25
20	12,00	12,75	240	4,00	203,58	48,07	813,81	1017,39	508,69
21	10,00	12,33	240	4,00	169,65	46,48	860,29	1029,94	514,97
22	4,00	11,95	200	4,00	56,55	45,05	905,34	961,89	480,95
23	4,00	11,61	200	4,00	56,55	43,77	949,11	1005,66	502,83

FONTE: o autor (2025)**Tabela 13. Média dos métodos de cálculo de capacidade de carga aplicados ao solo de Santos**

PROFUNDIDADE (M)	AOKI VELLOSO	DÉCOURT QUARESMA	TEIXEIRA	MÉDIA (KN)
1	85,5	30,04	82,94	66,14
2	106,2	35,34	103,20	81,58
3	160,2	58,12	143,26	120,53
4	187,2	71,50	185,20	147,98
5	119,4	80,14	174,36	124,63
6	137,6	91,71	162,58	130,63
7	189,1	105,89	202,09	165,70
8	138,9	117,01	210,81	155,56
9	134,5	125,08	197,26	152,27
10	160,8	146,98	217,15	174,99
11	232,5	212,88	267,36	237,57
12	632,1	251,15	428,38	437,20
13	457,4	279,36	510,95	415,91
14	458,0	257,36	620,41	445,27
15	412,2	259,33	450,33	373,95
16	410,9	262,76	437,25	370,31
17	407,2	267,47	445,25	373,29
18	358,1	276,58	435,50	356,74
19	387,0	297,32	442,25	375,54
20	482,5	307,74	508,69	432,99
21	342,4	317,73	514,97	391,71
22	358,5	317,90	480,95	385,77
23	362,7	335,38	502,83	400,30

FONTE: o autor (2025)

Tabela 14. Método Aoki e Velloso (1975) aplicado ao solo de Bauru

MÉTODO AOKI VELLOSO (1975)									
PROFUNDIDADE	K (Kpa)	α	F1	F2	Rp na camada (KN)	Rl por metro (KN)	Rl acumulada (KN)	R total do solo (KN)	P adm (KN)
0	800	0,02	3	6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	800	0,02	3	6	131,95	17,59	17,59	149,54	74,77
2	800	0,02	3	6	94,25	12,57	30,16	124,41	62,20
3	800	0,02	3	6	75,40	10,05	40,21	115,61	57,81
4	800	0,02	3	6	113,10	15,08	55,29	168,39	84,19
5	800	0,02	3	6	75,40	10,05	65,35	140,74	70,37
6	800	0,02	3	6	150,80	20,11	85,45	236,25	118,12
7	800	0,02	3	6	169,65	22,62	108,07	277,72	138,86
8	800	0,02	3	6	169,65	22,62	130,69	300,34	150,17
9	800	0,02	3	6	245,04	32,67	163,36	408,41	204,20
10	800	0,02	3	6	263,89	35,19	198,55	462,44	231,22
11	800	0,02	3	6	282,74	37,70	236,25	518,99	259,50
12	800	0,02	3	6	282,74	37,70	273,95	556,69	278,35
13	800	0,02	3	6	245,04	32,67	306,62	551,66	275,83
14	800	0,02	3	6	188,50	25,13	331,75	520,25	260,12
15	800	0,02	3	6	169,65	22,62	354,37	524,02	262,01
16	800	0,02	3	6	358,14	47,75	402,12	760,27	380,13
17	800	0,02	3	6	282,74	37,70	439,82	722,57	361,28
18	800	0,02	3	6	376,99	50,27	490,09	867,08	433,54
19	800	0,02	3	6	358,14	47,75	537,84	895,98	447,99
20	800	0,02	3	6	358,14	47,75	585,59	943,73	471,87
21	800	0,02	3	6	376,99	50,27	635,86	1012,85	506,42
22	800	0,02	3	6	414,69	55,29	691,15	1105,84	552,92
23	800	0,02	3	6	471,24	62,83	753,98	1225,22	612,61
24	800	0,02	3	6	603,19	80,42	834,41	1437,59	718,80
25	800	0,02	3	6	584,34	77,91	912,32	1496,65	748,33

FONTE: o autor (2025)

Tabela 15. Método Décourt e Quaresma (1978) aplicado ao solo de Bauru

MÉTODO DÉCOURT QUARESMA (1978)								
PROFUNDIDADE	Np	NI	COEFICIENTE DO SOLO	Rp (KN)	Rl (KN)	Rl acumulada (KN)	R total (KN)	P adm (KN)
1	6,00	7,00	400	84,82	15,71	0,00	84,82	21,21
2	5,33	6,00	400	75,35	14,14	0,00	75,35	18,84
3	5,00	5,33	400	70,69	13,08	13,08	83,77	27,74
4	4,67	5,50	400	66,02	13,35	26,44	92,46	36,84
5	6,00	5,20	400	84,82	12,88	39,32	124,14	51,45
6	7,00	5,67	400	98,96	13,62	52,94	151,90	65,46
7	8,67	6,14	400	122,57	14,36	67,29	189,86	82,41
8	10,33	6,50	400	146,04	14,92	82,22	228,25	99,75
9	12,00	7,22	400	169,65	16,05	98,27	267,92	118,00
10	14,00	7,90	400	197,92	17,12	115,39	313,31	138,24
11	14,67	8,55	400	207,39	18,14	133,53	340,93	154,57
12	14,33	9,08	400	202,59	18,98	152,51	355,09	167,96
13	12,67	9,38	400	179,12	19,45	171,96	351,07	177,05
14	10,67	9,43	400	150,84	19,52	191,48	342,32	185,00
15	12,67	9,40	400	179,12	19,48	210,96	390,08	207,05
16	14,33	9,75	400	202,59	20,03	230,99	433,57	228,33
17	18,00	10,06	400	254,47	20,51	251,50	505,97	257,08
18	18	10,33	400	254,47	20,94	272,44	526,91	273,19
19	19,33	10,58	400	273,27	21,33	293,77	567,04	294,30
20	19,33	10,80	400	273,27	21,68	315,45	588,72	310,97
21	20,33	11,00	400	287,41	21,99	337,44	624,85	331,42
22	22,33	11,18	400	315,68	22,27	359,71	675,40	355,62
23	26,33	11,35	400	372,23	22,54	382,25	754,48	387,10
24	29,33	11,5	400	414,64	22,78	405,03	819,67	415,22
25	31,5	11,64	400	445,32	23,00	428,03	873,35	440,58

FONTE: o autor (2025)

Tabela 16. Método Teixeira (1996) aplicado ao solo de Santos

MÉTODO TEIXEIRA (1996)									
PROFUNDIDADE	Np	NI	α (Kpa)	b (Kpa)	Rp (KN)	RI (KN)	RI acumulada (KN)	R total (KN)	P adm (KN)
1	7,00	7,00	240	4,00	118,75	26,39	26,39	145,14	72,57
2	6,00	6,00	240	4,00	101,79	22,62	49,01	150,80	75,40
3	4,50	5,33	240	4,00	76,34	20,09	69,10	145,44	72,72
4	5,00	5,50	240	4,00	84,82	20,73	89,84	174,66	87,33
5	5,00	5,20	240	4,00	84,82	19,60	109,44	194,26	97,13
6	6,00	5,67	240	4,00	101,79	21,38	130,82	232,60	116,30
7	8,50	6,14	240	4,00	144,20	23,15	153,96	298,16	149,08
8	9,00	6,50	240	4,00	152,68	24,50	178,47	331,15	165,57
9	11,00	7,22	240	4,00	186,61	27,22	205,69	392,30	196,15
10	13,50	7,90	240	4,00	229,02	29,78	235,47	464,49	232,25
11	14,50	8,55	240	4,00	245,99	32,23	267,70	513,69	256,84
12	15,00	9,08	240	4,00	254,47	34,23	301,93	556,40	278,20
13	14,00	9,38	240	4,00	237,50	35,36	337,29	574,80	287,40
14	11,50	9,43	240	4,00	195,09	35,55	372,84	567,94	283,97
15	9,50	9,40	240	4,00	161,16	35,44	408,28	569,45	284,72
16	14,00	10,00	240	4,00	237,50	37,70	445,98	683,48	341,74
17	17,00	10,29	240	4,00	288,40	38,79	484,77	773,17	386,59
18	17,50	10,83	240	4,00	296,88	40,83	525,60	822,48	411,24
19	19,50	11,26	240	4,00	330,81	42,45	568,05	898,86	449,43
20	19,00	11,65	240	4,00	322,33	43,92	611,97	934,30	467,15
21	19,50	12,05	240	4,00	330,81	45,43	657,40	988,21	494,10
22	21,00	12,50	240	4,00	356,26	47,12	704,52	1060,78	530,39
23	23,50	13,04	240	4,00	398,67	49,16	753,68	1152,35	576,17
24	28,5	13,83	240	4,00	483,49	52,14	805,82	1289,31	644,65
25	31,5	14,52	240	4,00	534,38	54,74	860,56	1394,94	697,47

FONTE: o autor (2025)

Tabela 17. Média dos métodos de cálculo de capacidade de carga aplicados ao solo de Bauru

PROFUNDIDADE (M)	AOKI VELLOSO	DÉCOURT QUARESMA	TEIXEIRA	MÉDIA (KN)
1	74,77	21,21	72,57	56,18
2	62,20	18,84	75,40	52,15
3	57,81	27,74	72,72	52,75
4	84,19	36,84	87,33	69,46
5	70,37	51,45	97,13	72,98
6	118,12	65,46	116,30	99,96
7	138,86	82,41	149,08	123,45
8	150,17	99,75	165,57	138,50
9	204,20	118,00	196,15	172,79
10	231,22	138,24	232,25	200,57
11	259,50	154,57	256,84	223,64
12	278,35	167,96	278,20	241,50
13	275,83	177,05	287,40	246,76
14	260,12	185,00	283,97	243,03
15	262,01	207,05	284,72	251,26
16	380,13	228,33	341,74	316,73
17	361,28	257,08	386,59	334,98
18	433,54	273,19	411,24	372,66
19	447,99	294,30	449,43	397,24
20	471,87	310,97	467,15	416,66
21	506,42	331,42	494,10	443,98
22	552,92	355,62	530,39	479,64
23	612,61	387,10	576,17	525,29
24	718,80	415,22	644,65	592,89
25	748,33	440,58	697,47	628,79

FONTE: o autor (2025)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da Tabela 13, o Gráfico 01 foi gerado como forma de resultados à aplicação das metodologias de cálculo de capacidade de carga para o solo de Santos.

Gráfico 01. Comparação de métodos para capacidade de carga em estacas aplicadas ao solo de Santos em período com pouca chuva



FONTE: o autor (2025)

A análise dos resultados obtidos para o solo de Santos, evidencia diferenças demasiadamente importantes entre os três métodos aplicados no decorrer da pesquisa. De modo geral, os três métodos utilizados apresentam um crescimento progressivo de capacidade de carga decorrente do aumento da profundidade de sondagem. Entretanto, é notório o modo como cada metodologia reage as variações do perfil geotécnico é distinta, resultando em curvas com comportamentos particulares.

Na faixa inicial do solo, até aproximadamente 5 metros de profundidade, a capacidade admissível é baixa, com uma gradual e leve elevação até os 10 metros de profundidade, demonstrando uma melhora na capacidade de suporte do solo. Na faixa de 11 até 14 metros há uma zona crítica, na qual ocorre um súbito aumento na capacidade de carga, advindo de um notoriamente alto número de SPT, nesta seção os métodos de Aoki e Velloso e Teixeira se mostram mais sensíveis a aumentos súbitos dos parâmetros dos solos, enquanto o método de Décourt e Quaresma aparece mais conservador,

apresentando sim uma subida fora da curva nesta região, mas ainda sim mais contido quando comparado aos outros dois autores.

Até os 20 metros, os resultados se tornam mais estáveis e consistentes, onde os métodos se aproximam levemente entre si. Ainda assim, o método de Décourt e Quaresma se apresenta conservador e com crescimento leve e contínuo, frente a um método de Aoki e Velloso intermediário e a um método de Teixeira elevado.

Dessa forma, a interpretação das curvas obtidas confirma a relevância da comparação entre metodologias distintas e ressalta a importância da avaliação crítica da estratigrafia local para o dimensionamento seguro das fundações.

Em seguida, por meio da Tabela 17, o Gráfico 02 foi gerado como forma de resultados à aplicação das metodologias de cálculo de capacidade de carga para o solo de Bauru.

Gráfico 02. Comparação de métodos para capacidade de carga em estacas aplicadas ao solo de Bauru em período com pouca chuva



FONTE: o autor (2025)

Os resultados apresentados para o solo de Bauru mostram uma evolução da capacidade mais consistente ao longo da profundidade de sondagem, destacando diferenças importantes entre os métodos.

Na faixa inicial, novamente até os 5 metros, tem-se, assim como no primeiro caso, capacidades de carga reduzidas, seguida pela faixa até os 10 metros apresentando um

crescimentos gradual em todos os métodos, mesmo que tal crescimento se mostre mais leve no método Décourt e Quaresma, o que o faz permanecer ligeiramente abaixo dos outros dois. Na seção até 15 metros Aoki e Velloso e Teixeira apresentam resultados demasiadamente semelhantes e com certa oscilação devido a sensibilidade a variações apresentada por esse método, enquanto Décourt e Quaresma se mantêm com um comportamento linear e conservador de evolução.

A partir dos 16 metros até o final da sondagem o método de Aoki e Velloso apresenta maiores valores, seguido por Teixeira que apresenta dados ligeiramente menores que o primeira, por fim Décourt e Quaresma que segue a tendência das faixas anteriores de se manter com valores reduzidos ao ser comparado com os demais.

De modo geral, os resultados indicam que, embora todos os métodos confirmem a melhoria da resistência com o aumento da profundidade, as discrepâncias entre eles se acentuam nas camadas mais profundas. Aoki-Velloso tende a fornecer valores mais elevados, Teixeira apresenta resultados intermediários, mas ainda elevados, enquanto Décourt-Quaresma assume uma postura claramente mais conservadora.

Por conseguinte, as Tabelas 13 e 17 foram unidas para a obtenção do Gráfico 03, visando comparar, neste momento, apenas o desempenho dos solos, sem distinguir os métodos utilizados.

Gráfico 03. Capacidades médias de carga Bauru x Santos



FONTE: o autor (2025)

A análise comparativa entre as capacidades médias de carga obtidas para os solos de Santos e Bauru evidencia diferenças marcantes no comportamento dos perfis ao longo da profundidade. Nos primeiros metros de sondagem, até aproximadamente 8 metros, observa-se que o solo de Santos apresenta valores ligeiramente superiores, com a presença de alguns picos, enquanto o solo de Bauru cresce de maneira mais gradual e contínua. Em seguida, até a faixa dos 15 metros é possível perceber em Santos novamente a presença de grandes picos de resistência, sugerindo camadas intermediárias com grande capacidade de carga, já Bauru segue com sua característica de crescimento constante e homogêneo.

Até os 20 metros as resistências começam a se aproximar, evidenciando uma queda de resistência no solo de Santos e um aumento da resistência no solo de Bauru, ao final da sondagem nota-se que Santos permanece em queda em um ponto no qual o relatório apresenta a presença de um solo descrito como “fofo” e com valores de SPT próximos a 3, enquanto Bauru atinge uma região de solo mais firme e número de SPT perto de 20.

Sendo assim, essa distinção reforça a importância de considerar não apenas o valor absoluto de resistência, mas também o perfil de evolução ao longo da profundidade, de forma a selecionar métodos de fundação compatíveis com as características específicas de cada local.

CONCLUSÕES

O presente estudo buscou avaliar a capacidade de carga dos solos de Santos e Bauru utilizando diferentes métodos de cálculo aplicados a estacas escavadas.

Após a aplicação dos métodos e geração das tabelas e gráficos comparativos entre os métodos foi possível notar alguns padrões entre as metodologias aplicadas, o método de Aoki e Velloso se revelou sensível a variações bruscas e/ou altas de capacidade de carga, apresentando resultados notoriamente maiores que os dos outros dois métodos utilizados quando aplicado a faixas específicas de um solo inconsistente e heterogêneo como o caso do solo de Santos, voltando a dar lugar a método de Teixeira, que assume os maiores valores, quando o solo retorna a faixas com menores variações de resistência e/ou com quedas bruscas de capacidade de carga.

Já em um solo com crescimento mais homogêneo, como é o caso do solo bauruense estudado, os métodos de Aoki e Velloso e Teixeira andam bem próximo, hora

praticamente iguais, hora um dos dois exibindo resultados ligeiramente maiores do que o outro.

Em contrapartida, o método de Décourt e Quaresma se mostrou estável e conservador em ambos os solos, com crescimento quase linear no solo de Bauru e uma curva pouco acentuada no solo de Santos, quando comparada a curva descrita pelos outros dois métodos. Sendo assim, é possível afirmar que os métodos de Teixeira e Aoki e Velloso se enquadram bem situações nas quais se buscas extrair o máximo de resistência possível dentro dos parâmetros de segurança, enquanto Décourt e Quaresma se enquadra em situações mais receosas de dimensionamento, onde se considera que a capacidade de carga é reduzida.

Por fim, ao analisar-se exclusivamente os solos, é possível afirmar que na época do ano cuja condição climática apresenta um cenário reduzido em chuvas, o solo de Bauru se mostra com um crescimento linear e homogêneo, onde espera-se que com maiores profundidades virão maiores resistências. Já Santos se apresenta como um local com solo mais instável, imprevisível levando em consideração a presença de uma faixa de grande resistência dentro de uma profundidade que estava se mostrando mais homogênea, sendo necessários estudos mais aprofundados e talvez um maior número de sondagens para cravar a escolha da melhor fundação a ser aplicada nesta localidade.

Portanto, caso o estudo se estenda, seria possível o estudo destes solos em outras épocas do ano, com condições climáticas distintas, assim como estender a análise a todo o perfil geotécnico do solo, buscando verificar como a parte arenosa se comporta em conjunto com os demais tipos de solos encontrados nas regiões.

REFERÊNCIAS

ALONSO, U. R. Estimativa da curva carga-recalque de estacas a partir dos resultados de sondagens à percussão. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 4, p. 19-32, 1981.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. *In: Anais...* do Congreso Panamericano De Mecanica De Suelos Y Cimentaciones Passmfe, 5., 1975, Buenos Aires. Buenos Aires: Sociedad Argentina de Mécanica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones, p. 367-376.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, 1995. (atualizado 2022).

BONI, H. S. **Avaliação da segurança de fundações em estacas escavadas de pequeno diâmetro na região de Bauru/SP via teoria da confiabilidade**. Dissertação (Mestrado)

Apresentado ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, 2018, UNESP - Bauru-SP.

DIAS, M. S. **Análise do comportamento de edifícios apoiados em fundação direta no bairro da Ponta da Praia na cidade de Santos**. Dissertação (Mestrado) apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010, São Paulo.

DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. *In: Anais... Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Fundações*, 6., 1978, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: ABMS, p. 45-53, v. 1.

DÉCOURT, L. **A Ruptura de Fundações Avaliada com Base no Conceito de Rigidez**. *In: Anais... do SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS*, 3., 1996, São Paulo. São Paulo: ABEF/ABMS, 1996. p. 215-224, v. 1.

EMBRAPA. **Solos brasileiros**. Página inicial. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>. Acesso em: 22 fev. 2025.

FERREIRA, T. B.; DELALIBERA, R. G.; SILVA, W. A. Comparação da acurácia dos métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma em relação a provas de carga na obtenção da capacidade de carga em estacas do tipo hélice-contínua. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 10, e023035, p. 1-28, 2023.

FERREIRA, T. B.; DELALIBERA, R. G.; SILVA, W. A. **Planilha para previsão da capacidade de carga em fundações por estacas**. Iniciação científica apresentada à Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2010.

KANAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. **Graig mecânica dos Solos**. Tradução Amir Elias Abdalla Kurban. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

NETO, G. C. A. **Estudo do comportamento geomecânico da areia de Araqui e sua aplicação ao dimensionamento de estacas escavadas**. 134 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

REYNOLDS, O. **Dilatação de meios compostos de partículas rígidas em contato**. 1885.

SCHULZE, T. **Análise da capacidade de carga de estaca escavada instrumentada de pequeno diâmetro por meio de métodos semi-empíricos**. 168 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia – UNICAMP, Campinas, 2013.

TEIXEIRA, A. H. **Projeto e execução de fundações**. *In: Anais... do SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA*, 3., 1996, São Paulo - São Paulo, 1996. p. 33-50, v. 1.

WOOD, D. M. **Soil behaviour and critical state soil mechanics**. Cambridge, 1990.