

Análise Probabilística das Fundações em Estacas Mistas de Obra Predial: um Estudo de Caso

Guilherme Iberê Bueno de Nadai

Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Bauru-SP, Brasil, guilhermeibere@hotmail.com

Caio Gorla Nogueira

Professor Assistente Doutor, Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Bauru-SP, Brasil, caio.nogueira@unesp.br

RESUMO: Quantificar as probabilidades de falhas geotécnicas é essencial para mensurar e avaliar os riscos envolvidos em um projeto de fundação de obra predial de engenharia assegurando, assim, a segurança das pessoas que habitarão sobre tais estruturas. Este trabalho analisa o comportamento probabilístico das fundações de uma obra predial de grande porte localizada em Barueri-SP (região metropolitana de São Paulo), com solução em estacas mistas (pré-moldada de concreto do tipo “estrela” com ponta em perfil metálico do tipo “H”), considerando a Teoria da Confiabilidade Estrutural a partir do Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM). As incertezas foram consideradas sobre as parcelas da carga estrutural, bem como sobre os resultados de ensaios de campo (ensaio SPT e ensaios dinâmicos) para definição dos modos de falha considerados. O estudo foi realizado em etapas sendo que, na fase de projeto, analisou-se o estaqueamento utilizando o método semiempírico de Aoki-Velloso para previsão de capacidade de carga. Na fase de execução da obra, reavaliou-se o estaqueamento utilizando os resultados dos ensaios dinâmicos. A utilização da análise probabilística via Teoria da Confiabilidade permitiu encontrar possibilidades de falhas localizadas no estaqueamento que não foram detectadas em uma análise tradicional. De modo geral, os índices de confiabilidade obtidos no estaqueamento foram satisfatórios quando comparados a valores alvos contidos na bibliografia internacional. Por fim, este trabalho visa auxiliar na busca de um processo sistemático para incorporação de análises probabilísticas, no meio geotécnico brasileiro, como forma complementar à verificação da segurança de estaqueamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, Ensaio SPT, Ensaio Dinâmico, Incertezas, Probabilidade de Falha.

ABSTRACT: Quantifying geotechnical failures probabilities is essential to measure and evaluate the risks of a foundation project in a high-rise building design ensuring the necessary safety for the people who will habit these structures. This paper analyzes the probabilistic behavior of the foundations in mix piles (precast in concrete with steel bottom) of a large building project located in Barueri-SP considering the Structural Reliability Theory using the First Order Reliability Method (FORM). Uncertainties were considered from the structural load, as well as the results of field tests (SPT test and dynamic loading tests) to define the failure modes considered. The study was made by stages and, in the design phase, was used Aoki-Velloso’s semi-empirical method to predict load bearing capacity. During the construction phase, the foundations was re-evaluated using the results of the dynamic tests. It was possible to find different types of failures by using the Reliability Theory. In general, the reliability indexes obtained were satisfactory when compared with indexes contained in the international literature. Finally, this paper aims in the search for a systematic process incorporating probabilistic analyzes in the Brazilian geotechnical environment, as a complementary mode to verify the safety of a foundation design.

KEYWORDS: Foundations, SPT Test, Dynamic Loading test, Uncertainties, Failure Probability.

1 INTRODUÇÃO

O solo é proveniente do remanejamento e decomposição de seu material de origem. Sendo ele um material natural, as incertezas encontradas em um campo amostral podem ser elevadas, aumentando a relevância de um estudo probabilístico para projetos de fundações e outras obras geotécnicas. Por outro lado, no Brasil, as sondagens de simples reconhecimento (ensaio SPT) constituem o principal ensaio empregado para a investigação geotécnica de obras, porém podem apresentar alta variabilidade em seus resultados. Portanto, o enfoque probabilístico pode ser uma alternativa para consideração explícita dessas incertezas, fornecendo ao engenheiro geotécnico informações de desempenho das fundações, a partir do conhecimento das probabilidades de falha dos elementos. Isso permite localizar elementos com maior risco de falha em suas obras e realizar melhorias onde necessário.

O perfil metálico, sobretudo do tipo “H”, possui uma pequena área transversal e um elevado módulo de elasticidade fazendo com que seja um componente que consiga penetrar terrenos com elevados índices de N_{SPT} (~70). Inserindo este elemento na ponta de uma estaca convencional pré-moldada de concreto, consegue-se atingir solos onde a estaca pré-moldada não conseguiria ser cravada devido ao seu limite físico. Alguns estudos já avaliaram o comportamento de estacas mistas de forma determinística, como os trabalhos de Neto (2012) e Thusoo (2020), enquanto outros estudaram a probabilidade de ruína associada às fundações, como o trabalho de Oluwatuyi (2023).

Neste contexto, o presente trabalho visa abordar esses dois temas (dimensionamento geotécnico de estacas mistas e incorporação de análises probabilísticas), auxiliando na divulgação desses temas no Brasil. Este artigo utiliza como base uma obra predial com soluções de fundações em estacas mistas analisadas via Teoria da Confiabilidade Estrutural. As incertezas pertinentes são consideradas como base em ensaios de prospecção geotécnica. Ensaios de desempenho preconizados na norma de fundações ABNT NBR 6122 (2019) são utilizados para confrontar e referendar os resultados obtidos.

2 APRESENTAÇÃO INICIAL DOS DADOS

2.1 Caracterização da Obra

A torre do empreendimento imobiliário estudado é constituída por subsolo e 20 pavimentos tipo. As cargas estruturais foram fornecidas pela “RM Mais Engenharia”, sendo o “TQS” o programa computacional utilizado. A empresa forneceu a separação das cargas entre Permanente, Acidental e Vento para a devida consideração dessas grandezas como variáveis aleatórias para as análises probabilísticas.

As investigações geotécnicas foram baseadas em ensaios SPT para determinação do perfil geológico do local. Uma espessa camada de aterro foi encontrada em todo o perímetro da obra, possivelmente por ser local de “bota-fora” de antigas obras de Alphaville e Tamboré (Barueri-SP). O aterro foi admitido como consolidado, contribuindo dessa forma para o cálculo de resistência última geotécnica das estacas. Em todos os casos, houve a parada do ensaio devido ao encontro do impenetrável. Sendo assim, prosseguiu-se com a realização de sondagens rotativas para confirmação da continuidade da rocha, suposição esta que foi confirmada. A Figura 1 ilustra uma seção transversal do terreno caracterizada a partir das sondagens.

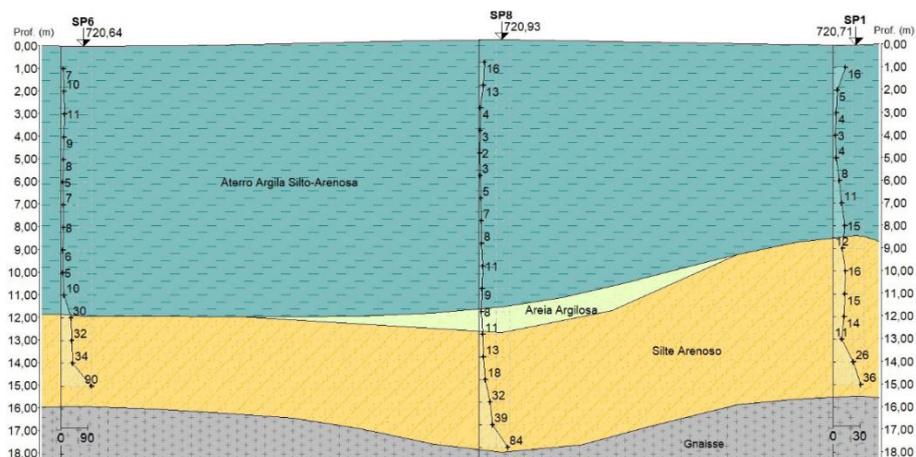


Figura 1. Corte transversal SP6 – SP8 – SP1.

2.2 Características da Estaca

Foram utilizados três conjuntos de estacas mistas, todas com a parte superior em estaca do tipo estrela fabricada pela empresa “FOÁ” e com a ponta em perfil metálico fabricado pela empresa “Gerdau”. Os conjuntos são: ETR445+HP310×93,0 com carga máxima estrutural de 1240 kN; ETR 525+HP310×110,0 com carga máxima estrutural de 1800 kN; ETR 605+HP310×125,0 com carga máxima estrutural de 2310 kN. Nesta obra, adotou-se o comprimento de 2 m para a ponteira metálica para que o conjunto alcançasse o impenetrável à percussão. A Figura 2 traz as características da estaca e considerações adotadas para o cálculo da resistência última geotécnica.



Figura 2. Considerações para as resistências geotécnicas na solução em estaca mista.

Para efeitos de cálculo da resistência última geotécnica das estacas, foram consideradas 2 pontas na estaca: i) ponta residual de concreto na interface da seção transversal de concreto e perfil metálico; ii) ponta final localizada na base do perfil metálico. Além disso, ao longo de ambos os comprimentos de concreto e metálico, foram consideradas as contribuições dos respectivos atritos laterais.

2.3 Premissas das Análises de Confiabilidade

A Teoria da Confiabilidade Estrutural foi empregada para realização das análises probabilísticas, de acordo com as seguintes premissas para a avaliação da segurança das estacas:

- Por se tratar de estacas pré-moldadas, todas as estacas da torre foram cravadas até o seu limite físico;
- Foi utilizado o limite de $N_{SPT} = 50$ para a quantificação das parcelas de resistência lateral e ponta;
- Para os perfis metálicos, foi utilizado o perímetro lateral colado e área do retângulo envolvente na ponta conforme orientação de Alonso (1998);
- Foram consideradas como variáveis aleatórias: resistências devido ao atrito lateral das estacas de concreto e ponteira metálica em contato com todas as camadas de solo; resistências devido à ponta residual de concreto na interface com o perfil metálico e a ponteira do perfil metálico; cargas permanentes; cargas variáveis; carga de vento máximo de 50 anos. Para as variáveis de resistência, as respectivas estatísticas foram compiladas utilizando os horizontes para cada material, a partir dos valores de N_{SPT} de 6 sondagens distintas, denominadas SP1, SP2, SP5, SP6, SP7 e SP8;
- A determinação da probabilidade de falha foi realizada para a estaca mais solicitada de cada bloco de coroamento de todo o estaqueamento da torre;
- O FORM (First Order Reliability Method) via acoplamento direto com o método semiempírico de previsão de capacidade de carga foi adotado para a solução do problema de confiabilidade. A descrição detalhada do FORM pode ser encontrada em outras publicações, como no estudo de Nogueira (2010);
- Foi utilizado como índice de confiabilidade alvo $\beta_T = 3,10$. O alvo adotado é levemente superior ao intervalo preconizado pela AASHTO (2020) para estacas isoladas e está de acordo com a recomendação do limite superior do intervalo proposto por Whitman (1984 e 2000).

3 RESULTADOS

3.1 Método Aoki-Velloso com Ensaio SPT (Etapa de Projeto)

A composição das estatísticas do N_{SPT} foi realizada considerando horizontes para cada tipo de solo, utilizando como critérios o tipo de material encontrado e a resistência à penetração. O primeiro metro, admitido referente ao bloco de coroamento, foi desprezado. O comprimento útil final das estacas mistas utilizado para definir a profundidade das camadas é função de sua localização no terreno e da sondagem de referência mais próxima. Com isso, os comprimentos das estacas variaram entre 9,5 m e 13,5 m.

A Tabela 1 apresenta as estatísticas para o N_{SPT} na mesma cota. Mesmo considerando a divisão do solo por horizontes, o que é mais consistente do ponto de vista geotécnico, em vez de apenas calcular as estatísticas metro a metro, observou-se alta variabilidade, com elevados desvios-padrão (σ) e coeficientes de variação (C.V.) maiores que 30%.

Tabela 1. Estatísticas N_{SPT} utilizadas para o método Aoki-Velloso.

Comp. Estaca (m)	Cota (m)	N_{SPT}						Média	σ	C.V. (%)
		Número da Sondagem								
		SP-1	SP-2	SP-5	SP-6	SP-7	SP-8			
0	716,00	4,0	5,0	4,0	8,0	4,0	2,0	4,50	1,97	43,89
1	715,00	8,0	7,0	5,0	5,0	5,0	3,0	5,50	1,76	32,01
2	714,00	11,0	8,0	7,0	7,0	8,0	5,0	7,67	1,97	25,65
3	713,00	15,0	11,0	8,0	8,0	7,0	7,0	9,33	3,14	33,65
4	712,00	12,0	6,0	10,0	6,0	4,0	8,0	7,67	2,94	38,40
5	711,00	16,0	10,0	6,0	5,0	5,0	11,0	8,83	4,36	49,30
6	710,00	15,0	13,0	5,0	10,0	6,0	9,0	9,67	3,88	40,15
7	709,00	14,0	15,0	26,0	30,0	13,0	8,0	17,67	8,45	47,85
8	708,00	11,0	14,0	38,0	32,0	20,0	11,0	21,00	11,49	54,71
9	707,00	26,0	18,0	50,0	34,0	26,0	13,0	27,83	13,06	46,92
10	706,00	36,0	50,0	-	50	36,0	18,0	38,00	13,19	34,71
11	705,00	-	-	-	-	50,0	32,0	41,00	12,73	31,04
12	704,00	-	-	-	-	50,0	39,0	-	-	-
13	703,00	-	-	-	-	-	50,0	-	-	-
Análise Probabilística	Horizonte 1	Argila Silto-Arenosa			N_{spt}		9,28	3,89	41,92	
	Horizonte 2	Silte Areno-Argiloso			N_{spt}		31,25	5,80	18,57	
	Horizonte 3	Silte Areno-Argiloso			N_{spt}		50,00	0,00	0,00	

A Tabela 2 apresenta os tipos e comprimentos de cada horizonte determinado pela sondagem de referência utilizados para o cálculo da resistência geotécnica das estacas. A ponta do perfil metálico (RP2) apoia em material de alteração (horizonte 3) em todas as sondagens.

Tabela 2. Comprimentos e horizontes utilizados no método Aoki-Velloso.

Característica		Região					
		SP-1	SP-2	SP-5	SP-6	SP-7	SP-8
RL1	Comprimento (m)	8,5	9,0	7,5	9,0	9,5	11,5
	Horizonte	1	1	1	1	1	1
RL2	Comprimento (m)	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
	Horizonte	2	1	2	2	2	2
RL3	Comprimento (m)	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
	Horizonte	3	3	3	3	3	3
RP1	Horizonte	2	1	2	2	2	2
RP2	Horizonte	3	3	3	3	3	3
Comprimento útil (m)		10,5	11,0	9,5	11,0	11,5	13,5

As sondagens mais próximas para cada bloco foram utilizadas como sendo as de referência para as estacas analisadas (Figura 3). Nesta imagem, também é possível visualizar parte do projeto de fundações desenvolvido pela “Solodactha Engenharia de Solos e Fundações” de modo tradicional.

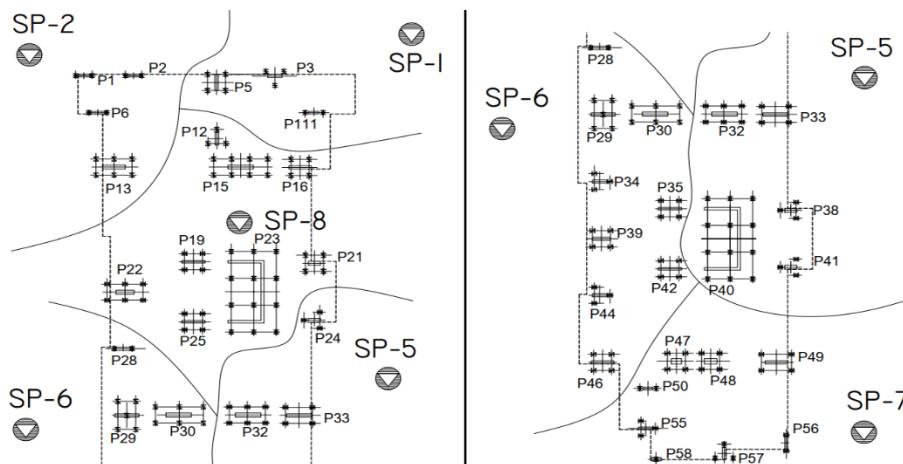


Figura 3. Apresentação de parte do Projeto de Fundações e das Sondagens de Referência para cada bloco.

A Equação 1 apresenta a função de estado limite para a hipótese analisada (cargas permanente, acidental e vento). A norma ABNT NBR 6122 (2019) autoriza a majoração da carga admissível em 15,0% para a hipótese com vento, porém, como está sendo analisada a carga de ruptura geotécnica das peças, tal majoração não será utilizada.

$$g(X) = R_{L1} + R_{L2} + R_{L3} + R_{P1} + R_{P2} - CP_e - CV_e - VC_e \quad (1)$$

Onde: $g(X)$: Função de Estado Limite (margem de segurança); R_{L1} : Resistência Lateral Trecho 1; R_{L2} : Resistência Lateral Trecho 2; R_{L3} : Resistência Lateral Trecho 3; R_{P1} : Resistência de Ponta (Residual); R_{P2} : Resistência de Ponta (Perfil Metálico); CP_e : Carga Permanente; CV : Carga Variável; VC_e : Carga de Vento Crítico; X : Função de Variável Aleatória não Determinística.

As orientações de Ellingwood et al. (1980) e de Souza Junior (2008) foram utilizadas para as estatísticas (média, coeficiente de variação e função de densidade de probabilidades) das cargas permanente, acidental e vento. Em todos os casos foram utilizados os valores das cargas nominais para obtenção das estatísticas. As orientações podem ser visualizadas na Tabela 3. A distribuição normal foi considerada para todas as variáveis aleatórias de resistência.

Tabela 3. Estatísticas da Solicitação.

Carga Permanente			Carga Variável			Carga Vento Crítico		
μ	Co.V.	FDP	μ	Co.V.	FDP	μ	Co.V.	FDP
$1,05 \times CP$	10,0%	Normal	$1,00 \times CV$	25,0%	Gumbel Tipo 1	$0,90 \times VC$	34,0%	Gumbel Tipo 1

A Tabela 4 apresenta todas as estatísticas das variáveis aleatórias adotadas nas análises de confiabilidade para cada estaca, incluindo as parcelas das cargas transferidas para cada estaca. O programa RELgen de Nogueira (2010) foi utilizado para a realização das análises. A abordagem adotada consistiu em obter, a partir do acoplamento direto entre o método de Aoki-Velloso e o FORM, as probabilidades de falha de cada estaca mais solicitada individualmente por bloco de coroamento. Dessa forma, foi possível avaliar o nível de segurança obtido por estaca em todo o sistema de fundações da edificação. A comparação dos índices de confiabilidade/probabilidades de falha com uma referência ($\beta_T = 3,10$ proposto por Whitman, 1984 e 2000) permitiu a inclusão ou não da estaca no grupo de falha. Essa abordagem pode fornecer ao analista de segurança das fundações o subsídio necessário para reforçar as estacas que violaram tal condição e, com isso, obter um projeto mais seguro.

Tabela 4. Dados de Entrada para inserção no programa RELgen de Nogueira (2010).

Pilar	nº est.	Sond.	Perfil Ponta	RL1 (kN)		RL2 (kN)		RL3 (kN)		RP1 (kN)		RP2 (kN)		CPe (kN)		CVe (kN)		VCe (kN)	
				μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
P1	2	SP2	HP310x93	430.48	180.45	46.74	19.59	320.40	0.00	145.13	60.83	1199.57	0.00	691.69	69.17	60.80	15.20	170.83	58.08
P2	2	SP2	HP310x93	430.48	180.45	46.74	19.59	320.40	0.00	145.13	60.83	1199.57	0.00	1052.73	105.27	117.20	29.30	93.55	31.81
P3	3	SP1	HP310x110	421.87	176.84	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	1074.54	107.45	111.20	27.80	105.55	35.89
P5	4	SP1	HP310x110	421.87	176.84	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	1008.00	100.80	130.38	32.59	67.02	22.79
P6	2	SP2	HP310x125	515.67	216.16	47.52	19.92	325.80	0.00	206.51	86.57	1251.00	0.00	1174.56	117.46	198.50	49.63	112.43	38.22
P12	3	SP8	HP310x110	570.77	239.25	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	944.41	94.44	167.30	41.83	65.94	22.42
P13	6	SP2	HP310x110	446.69	187.24	47.26	19.81	324.00	0.00	169.18	70.91	1227.86	0.00	1070.72	107.07	163.35	40.84	301.32	102.45
P15	8	SP8	HP310x110	570.77	239.25	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	1068.67	106.87	178.53	44.63	53.79	18.29
P16	4	SP8	HP310x110	570.77	239.25	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	905.20	90.52	140.85	35.21	494.84	168.25
P19	4	SP8	HP310x125	658.92	276.21	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1089.53	108.95	222.65	55.66	137.36	46.70
P21	4	SP8	HP310x110	570.77	239.25	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	983.16	98.32	125.13	31.28	139.97	47.59
P22	6	SP8	HP310x125	658.92	276.21	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1273.72	127.37	167.93	41.98	107.33	36.49
P23	12	SP8	HP310x125	658.92	276.21	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	995.94	99.59	143.08	35.77	321.63	109.35
P24	3	SP5	HP310x125	429.73	180.13	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1177.19	117.72	150.63	37.66	224.49	76.33
P25	4	SP8	HP310x125	658.92	276.21	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1148.80	114.88	215.05	53.76	145.27	49.39
P28	2	SP6	HP310x125	515.67	216.16	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1146.05	114.60	197.75	49.44	124.22	42.23
P29	5	SP6	HP310x110	446.69	187.24	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	916.95	91.70	155.76	38.94	472.20	160.55
P30	6	SP6	HP310x110	446.69	187.24	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	1114.63	111.46	195.40	48.85	304.61	103.57
P32	6	SP5	HP310x125	429.73	180.13	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1184.68	118.47	160.53	40.13	388.78	132.19
P33	4	SP5	HP310x125	429.73	180.13	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1159.40	115.94	162.20	40.55	535.23	181.98
P34	3	SP6	HP310x110	446.69	187.24	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	1017.14	101.71	175.20	43.80	139.62	47.47
P35	4	SP6	HP310x125	515.67	216.16	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1135.44	113.54	213.48	53.37	168.88	57.42
P38	3	SP5	HP310x125	429.73	180.13	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1242.71	124.27	143.60	35.90	281.99	95.88
P39	4	SP6	HP310x110	446.69	187.24	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	1070.08	107.01	138.23	34.56	173.98	59.15
P40	12	SP5	HP310x125	429.73	180.13	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	992.63	99.26	130.69	32.67	424.75	144.41
P41	3	SP5	HP310x125	429.73	180.13	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1270.96	127.10	157.57	39.39	297.20	101.05
P42	4	SP6	HP310x110	446.69	187.24	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	1035.48	103.55	215.35	53.84	257.41	87.52
P44	3	SP6	HP310x125	515.67	216.16	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1183.67	118.37	183.77	45.94	137.25	46.67
P46	4	SP6	HP310x110	446.69	187.24	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	870.18	87.02	116.33	29.08	485.72	165.15
P47	4	SP7	HP310x110	471.50	197.64	303.75	56.39	162.00	0.00	776.63	144.18	1227.86	0.00	1116.72	111.67	168.20	42.05	236.51	80.41
P48	4	SP7	HP310x125	544.32	228.17	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1266.56	126.66	201.30	50.33	152.41	51.82
P49	4	SP7	HP310x125	544.32	228.17	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1140.05	114.01	170.83	42.71	487.01	165.58
P50	2	SP7	HP310x93	454.40	190.47	300.38	55.77	160.20	0.00	666.23	123.69	1199.57	0.00	866.78	86.68	123.05	30.76	80.89	27.50
P55	3	SP7	HP310x93	454.40	190.47	300.38	55.77	160.20	0.00	666.23	123.69	1199.57	0.00	995.54	99.55	113.93	28.48	178.88	60.82
P56	2	SP7	HP310x125	544.32	228.17	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1085.04	108.50	148.30	37.08	211.55	71.93
P57	3	SP7	HP310x125	544.32	228.17	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1157.63	115.76	160.33	40.08	114.96	39.09
P58	1	SP7	HP310x125	544.32	228.17	305.44	56.71	162.90	0.00	948.04	176.01	1251.00	0.00	1230.81	123.08	117.80	29.45	242.64	82.50
P111	2	SP1	HP310x93	406.56	170.42	300.38	55.77	160.20	0.00	666.23	123.69	1199.57	0.00	957.52	95.75	162.00	40.50	62.51	21.25

Os resultados das análises de confiabilidade foram apresentados na Figura 4. É possível visualizar o índice de confiabilidade “beta” para a estaca mais solicitada de cada bloco. Em apenas um pilar (P13), o índice de confiabilidade resultou em valor abaixo do alvo ($\beta_T = 3,10$ linha em azul na Figura 4). Como possíveis soluções para elevar o nível de segurança podem ser citadas: i) aumento do perímetro lateral e área de ponta dessas estacas; ii) aumento na quantidade de estacas desse bloco, elevando a resistência geotécnica dessas estacas.

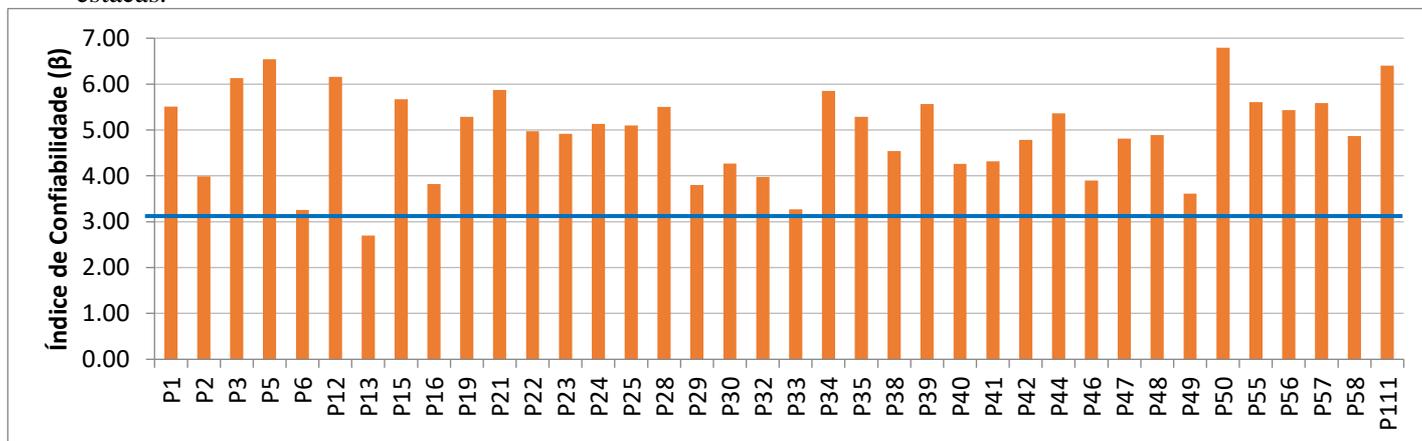


Figura 4. Índices de Confiabilidade para o método Aoki-Velloso.

3.2 Ensaios de Desempenho (Etapa de Obra)

Realizaram-se, nesta obra, ensaios de desempenho seguindo orientações preconizadas na norma ABNT NBR 6122 (2019). Os dados de resistência foram obtidos em um instante onde a obra já havia iniciado. Cravaram-se 9 estacas mistas para realizar os ensaios dinâmicos analisando as cargas admissíveis utilizadas no projeto de fundações e calculando seus respectivos fatores de segurança (FS). É possível visualizar os dados e resultados das estacas ensaiadas na Tabela 5. As abreviações “DMX” e “EMX” se referem ao deslocamento total vertical máximo e à energia efetivamente transferida à estaca.

Tabela 5. Dados e Resultados das Estacas Ensaçadas.

ESTACA	Conjunto		Golpe n°	Crav. (m)	Nega (mm)	DMX (mm)	EMX (kN.m)	RESISTÊNCIA MOBILIZADA (kN)	FS
	ETR	Perfil							
P16D	525	HP310x110	6	12.50	1.0	18.09	38.1	3050.0	2.5
P23H	605	HP310x125	9	13.30	1.0	21.22	64.0	3659.0	2.6
P29C	525	HP310x110	6	12.50	1.0	22.44	63.8	3224.0	2.7
P33A	605	HP310x125	7	14.20	2.0	23.96	72.7	3372.0	2.4
P38B	605	HP310x125	5	13.70	1.0	19.57	56.8	3697.0	2.6
P39B	525	HP310x110	6	13.10	1.0	23.04	60.0	3405.0	2.8
P40H	605	HP310x125	8	13.20	3.0	28.46	91.6	2865.0	2.0
P46D	525	HP310x110	7	10.55	5.0	25.67	64.8	2748.0	2.3
P56B	605	HP310x125	6	11.40	1.0	18.42	58.8	3827.0	2.7

Não há dados sobre o conjunto de estaca “ETR445+HP310x93,0”, portanto, não serão realizadas análises para tal conjunto. A função de estado limite, para os dois outros conjuntos de estacas, pode ser observada na Equação 2. Observa-se que, diferente da seção anterior, a resistência última geotécnica é obtida em apenas uma parcela, denominada como R_{Etot} .

$$g(X) = R_{Etot} - CP_e - CV_e - VC_e \quad (2)$$

A Tabela 6 apresenta as estatísticas (média, desvio padrão e coeficiente de variação) das parcelas de resistência dos dois conjuntos ensaiados. As solicitações foram as mesmas utilizadas na análise anterior e estão reunidas na Tabela 4. Por sua vez, a Figura 5 expõe os resultados dos índices de confiabilidade encontrados após a análise probabilística. Como pode ser visualizado na Figura 5, todos os índices de confiabilidade se mantiveram acima do índice alvo ($\beta_T = 3,10$), inclusive o bloco do P13, onde a análise via método Aoki-Velloso (1975) sugeriu reforços.

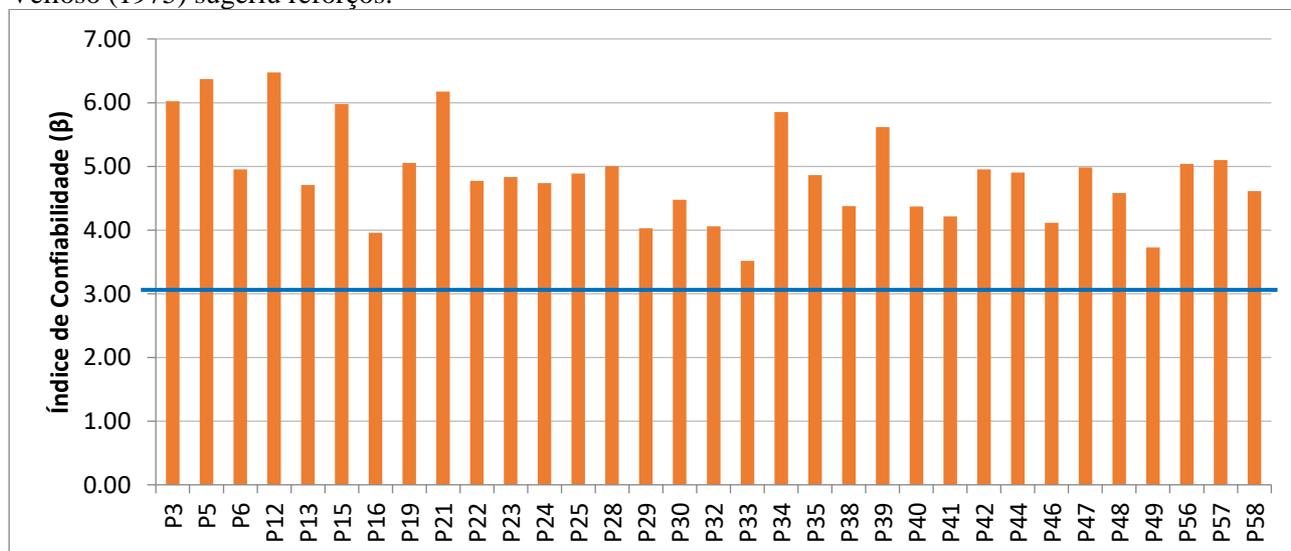


Figura 5. Índices de Confiabilidade para Ensaios Dinâmicos.

Tabela 6. Estatísticas de Resistências via Ensaio Dinâmico.

Conjunto		Capacidade Mobilizada		
Pré-Moldada	Perfil Metálico	μ (kN)	σ (kN)	Co.V. (%)
525	HP310x110	3407.00	469.77	13.79
605	HP310x125	3159.80	269.68	8.53

4 CONCLUSÕES

As análises foram realizadas utilizando o ELU (estado limite último) como premissa, isto é, utilizando as capacidades de carga (ruptura geotécnica) dos elementos. O menor índice de confiabilidade encontrado foi 2,70 (estaca mais solicitada do bloco P13) para o estudo via ensaio SPT pelo acoplamento direto FORM e método Aoki-Velloso (1975). Por sua vez, o menor índice de confiabilidade, via ensaios de desempenho, foi de 4,71 para a estaca mais solicitada do bloco do pilar P33. O reforço inicialmente sugerido pelo método semiempírico foi descartado pela análise posterior com os ensaios dinâmicos.

A análise via Teoria da Confiabilidade pode ser utilizada como abordagem complementar ao método tradicional de projeto despontando, assim, como uma ferramenta auxiliar para o dimensionamento de fundações no meio geotécnico brasileiro. A sua verificação complementar auxilia o engenheiro geotécnico a notar pontos críticos em seus projetos, reforçando onde necessário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. R. (1998). Estacas pré-moldadas. In: HACHIC, W. Fundações: teoria e prática.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2020). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. Washington, DC.
- Aoki, N; Velloso, D. (1975). *An Approximate method to Estimate the Bearing Capacity of Piles*. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Buenos Aires.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.
- Ellingwood, B. et al. (1980). *Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A57*. NBS Special Publication 577.
- Neto, L. C.; Corda, A.; Chnchelli, M. (2012). *Ampliação do terminal de contêineres do porto de Santos, SP*. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo. Anais... ABMS v. 2, 170 f.
- Nogueira, C. G. (2010). *Desenvolvimento de modelos mecânicos, de confiabilidade e de otimização para aplicação em estruturas de concreto armado*. Tese de Doutorado. São Carlos/USP.
- Oluwatuyi, O. E.; Ng, K.; Wulff S. S. (2023). *Improved resistance prediction and reliability for bridge pile foundation in shales through optimal site investigation plans*. Reliability Engineering and System Safety
- Thusoo, S. et al. (2020). *Performance of precast hollow steel-encased high-strength concrete piles*. Engineering Structures.
- Whitman, R. V. (1984). *Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering*. In: Journal of Geotechnical Engineering.
- Whitman, R. V. (2000). *Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering*. In: Journal of Geotechnical Engineering.
- Souza Junior, A. C. (2008). *Aplicação de confiabilidade na calibração de coeficientes parciais de segurança de normas brasileiras de projeto estrutural*. Tese de Doutorado. São Carlos/USP.