

Uma Proposta de Metodologia de Superfície Resistente a partir de Uma Sondagem

Arthur T. Askinis

Coord. DT de Geotecnia, Instituto de Engenharia, São Caetano do Sul, Brasil, askinis.arthur@hotmail.com

Nelson Aoki

Consultor, São Paulo, Brasil, nelson.aoki@uol.com.br

RESUMO: O presente artigo visa apresentar uma metodologia para cálculo de superfície resistente a partir de uma sondagem. A NBR 6122 apresenta o item “Segurança de fundações profundas” que apresenta o fator de segurança global igual a 2,0 para determinar a carga admissível. Baseado no fator de segurança tradicional determinamos uma profundidade onde a capacidade de carga é atingida.

Para avaliação de riscos propõe-se determinar a profundidade para superfície resistente e uma avaliação das resistências média, mínima e máxima geradas a partir da sondagem. Baseado nessas resistências propõe-se avaliar a melhor curva que se adequa podendo assim determinar a resistência característica R_k e avaliando o risco.

PALAVRAS-CHAVE: Carga admissível, Fator de Segurança, Resistência característica, superfície resistente e risco em fundações profundas.

ABSTRACT: The present article aims to present a methodology for calculating the bearing capacity of a surface based on a survey. NBR 6122 presents the item "Safety of deep foundations," which introduces a global safety factor of 2.0 to determine the allowable load. Based on the traditional safety factor, we determine a depth where the bearing capacity is reached.

For risk assessment, it is proposed to determine the depth for the resistant surface and evaluate the average, minimum, and maximum resistances generated from the survey. Based on these resistances, it is proposed to assess the best-fitting curve to determine the characteristic resistance R_k and evaluate the risk.

KEYWORDS: Allowable load, Safety factor, Characteristic resistance, resistant surface, and risk in deep foundations.

1 INTRODUÇÃO

A Análise de risco em fundações é uma avaliação importante durante um projeto/execução de fundação. Toda fundação tem uma probabilidade de ruir em maior ou menor grau. Para calcular a probabilidade de ruína alguns elementos são importantes como a carga admissível, as resistências mínima e média e a própria superfície resistente.

No presente artigo é feita uma avaliação e proposta de metodologia de determinarmos esses valores baseados em uma sondagem SPT. A análise da sondagem SPT oferecendo três valores de resistência, o cálculo da resistência característica e discussão dos valores de ξ_1 e ξ_2 para uma sondagem em comparação a mais de uma sondagem.

Por fim, uma interpretação da superfície resistente utilizando, quando possível, informações da gênese do material e a topografia e uma forma simplificada quando não é possível fazer a avaliação anterior.

2 CARGA ADMISSÍVEL

A carga admissível pode ser definida com base no estado limite último (ELU) ou no estado limite de serviço (ELS). Baseado no ELU a carga admissível é a maior carga que pode ser aplicada numa estaca isolada sem que haja ruptura com aplicação dos fatores de segurança pré-determinados.

Avaliando a carga admissível em função do ELS, a máxima carga aplicada é determinada em função do recalque ou vibração e a carga admissível é a máxima carga aplicável utilizando os fatores de segurança determinados na NBR 6122.

Na estaca podem ocorrer dois tipos de rupturas: estrutural, quando o próprio elemento de fundação rompe ou geotécnica quando a ruptura ou escoamento do solo.

2.1 Carga Estrutural

A carga estrutural é função apenas da estaca não da interação estaca solo. Exemplificando, avaliando de estacas hélices contínuas não armadas (exceto na cabeça) a carga máxima estrutural é dada pela equação 1:

$$P_k = \frac{0,85.Ac.fck}{\gamma_f.\gamma_c} \quad (1)$$

Onde:

Ac- Área da seção transversal da estaca;

Fck- Resistência característica máxima do concreto de acordo com a NBR 6122;

γ_f - Coef. de majoração das cargas, de valor 1,4;

γ_c - Coef. de minoração da resistência do concreto, de valor 2,7 a 3,8.

Tabela 1. Estacas moldadas in loco e tubulões: parâmetros para dimensionamento

Tipo de estaca	Classe de agressividade (CAA) conforme ABNT NBR 6118	Classe de concreto/resistência característica da argamassa ou concreto	γ_c	% de armadura mínima	Tensão de compressão simples atuante abaixo da qual não é necessário armar (exceto ligação com o bloco) MPa
Hélice/hélice de deslocamento/ hélice com trado segmentado	I, II	C30	2,7	0,4	6,0
	III, IV	C40	3,6		
Escavada sem fluido	I, II	C25	3,1	0,4	5,0
	III, IV	C40	5		
Escavada com fluido	I, II	C30	2,7	0,4	6,0
	III, IV	C40	3,6		
Strauss (a)	I, II	20MPa	2,5	0,4	5,0
Franki (a)	I, II, III, IV	20 MPa	1,8	0,4	-
Tubulões não encamisados	I, II	C25	2,2	0,4	5,0
	III, IV	C40	3,6		
Raiz (a, b, c)	I, II, III, IV	20 MPa	1,6	0,4	-
Micro estacas (a, b, c, d)	I, II, III, IV	20 MPa	1,8	0,4	-
Estaca trado vazado (c)	I, II, III, IV	20 MPa	1,8	0,4	-

a. Neste tipo de estaca, o diâmetro a ser considerado no dimensionamento é o diâmetro externo do revestimento;

- b. As taxas máximas devem ser verificadas na seção de maior concentração de aço (considerando inclusive emendas e transpasse). Em situações críticas o dimensionamento deve ser feito em função da área de aço. Para $A_s \leq 6\% A_c$ o dimensionamento deve ser feito considerando a estaca trabalhando como pilas de concreto. Quando $A_s \geq 6\% A_c$ o dimensionamento deve ser feito com a consideração que todo esforço solicitante é resistido integralmente pelo aço da seção;
- c. Argamassa;
- d. Calda de cimento.

Os valores limites de resistência a compressão e tensões limites para estacas de concreto não armado são indicados na tabela 1 (4 da norma). Para o dimensionamento estrutural de estaca com concreto armado o valor de N_d é calculado da seguinte maneira, conforme equação 2:

$$N_d = \frac{0,85.A_c.f_{ck}}{\gamma_f.\gamma_c} + \frac{A_s.f_{yk}}{\gamma_s} \quad (2)$$

2.2 Carga Geotécnica

Na carga geotécnica baseada em métodos semiempíricos a resistência é a soma entre a resistência do atrito lateral da estaca somada a resistência de ponta (equação 3).

$$R = A_p.q_p + U.\Sigma(\Delta l.q_L) \quad (3)$$

A capacidade de carga geotécnica é dada pela resistência geotécnica dividida pelo fator de segurança 2,0 para cálculo baseado em métodos semiempíricos. No método Decourt-Quaresma os autores propõem fatores de segurança diferenciados para resistência de ponta e lateral, respectivamente 4,0 e 1,3.

Sendo a fundação composta pelo elemento estrutura e a resistência estaca-macço de solo a capacidade de carga é a menor entre a capacidade estrutural e geotécnica. Sendo assim a capacidade de carga é o início da análise onde pode haver solos que apresentem capacidade de carga bem inferior a capacidade estrutura para determinada estaca assim como solos onde o limitante será a capacidade estrutural da estaca.

Aoki e Cintra (2000 e 2001) tratam de três metodologias para a carga admissível a partir da: carga de catálogo, L_{max} (imposto pela limitação do comprimento máximo exequível) e faixa de N_{spt} que provoca a parada da estaca.

Metodologia de cálculo a partir da carga estrutural multiplicada pelo fator de segurança calcula-se a capacidade geotécnica que otimiza o aproveitamento da estaca aproveitando o máximo da carga estrutural e geotécnica. Com base nesse valor procura-se qual comprimento da estaca onde se atinge essa resistência, conforme figura 2.



Figura 2. Comprimento da estaca em função da Capacidade Estrutural

Metodologia de cálculo com o L_{max} obtemos que o comprimento da estaca é o L_{max} e pode-se calcular a resistência geotécnica que dividida pelo FS obtemos a capacidade de carga, conforme figura 3.



Figura 3. Capacidade de carga em função do comprimento máximo

Metodologia com base na faixa de Nspt obtém-se a profundidade de parada da estaca e calcula-se a resistência geotécnica, dividindo pelo FS obtém-se a capacidade de carga, demonstrado na figura 4.

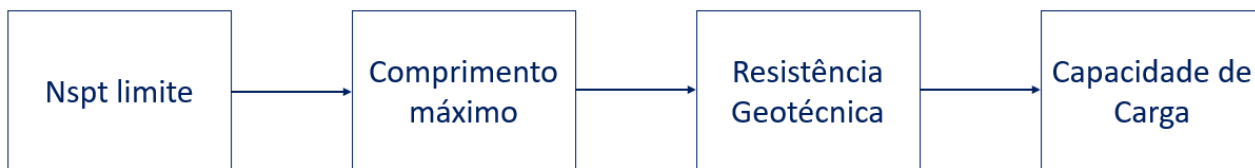


Figura 4. Capacidade de carga em função do Nspt limite

Os três métodos são interdependentes onde devem ser avaliados para evitar projetos onde as estacas não sejam otimizadas ou não seja exequível o projeto seja limitação dos equipamentos ou atinja uma camada de solo que para a estaca não consiga ultrapassar.

3 RESISTÊNCIAS MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA

Para a resistência característica a norma 6122 estabelece que precisamos da resistência média e mínima. Para projetos com duas ou mais sondagens é mais intuitivo que calculado separadamente por sondagens é possível determinar a resistência mínima e média.

Propondo uma metodologia para uma sondagem é possível se trabalhar com a estatística entre resistência em função da profundidade. O SPT nos fornece como resultado o N spt que é feito de metro em metro, ou seja, é possível calcular três resistências de interesse: 1m acima da profundidade de projeto, na profundidade de projeto e também 1m abaixo da profundidade.

Sendo assim pode-se obter três valores de resistência e a partir disso definir resistência mínima, média e máxima. Vale ressaltar que pode haver valores de resistências iguais para as profundidades diferentes. Com essa avaliação é possível fazer uma análise estatística, com base em três valores de resistência com a utilização de uma sondagem SPT.

4 RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA E FATOR DE SEGURANÇA GLOBAL

A NBR 6122 nos itens 6.2.1.2.1 e 6.2.1.2.1 apresenta como calcular a resistência característica determinada com base na quantidade de sondagens utilizando métodos semiempíricos e com base nas provas de carga, respectivamente. Nesse artigo o foco é a abordagem a partir de sondagens, portanto será discorrido sobre a tabela 2 e valores de ξ_1 e ξ_2 .

Para o cálculo da resistência característica a NBR 6122 no item 6.2.1.2.1 “Resistência determinada por método semiempírico”, utiliza-se as equações 3 para determinar a resistência característica e a equação 4 apresentando o fator de segurança global.

$$R_k = \text{mín} \left[\frac{(R_{se})_{\text{méd}}}{\xi_1}; \frac{(R_{se})_{\text{mín}}}{\xi_2} \right] \quad (3)$$

$$P_{adm} = R_k / FS_g \text{ onde } FS_g \geq 1,4$$

$$1,4 \leq R_k / P_{adm} \quad (4)$$

Onde:

R_k é a resistência característica;

(R_{se})_{méd} é a resistência determinada com base em valores médios dos resultados dos ensaios de campo;

(R_{se})_{mín} é a resistência determinada com base em valores mínimos dos resultados dos ensaios

de campo.

ξ_1 e ξ_2 são os fatores de minoração da resistência especificados na Tabela 2.

Note que o Fator de Segurança global é regido pela Carga admissível com metodologias de cálculos citadas anteriormente e as resistências.

Tabela 2. Valores de ξ_1 e ξ_2 da NBR 6122

n^a	1	2	3	4	5	6	≥ 10
ξ_1^b	1,42	1,35	1,33	1,31	1,29	1,27	1,27
ξ_2^b	1,42	1,27	1,23	1,20	1,15	1,13	1,11

Sendo $R_k = \min \left[\frac{(R_{se})_{méd}}{\xi_1}; \frac{(R_{se})_{mín}}{\xi_2} \right]$ e para uma sondagem $\xi_1 = \xi_2$ implica que $R_k = \frac{(R_{se})_{mín}}{\xi_2}$. Note que isso só ocorre para uma sondagem, nos outros casos $\frac{(R_{se})_{méd}}{\xi_1}$ pode ser menor do que $\frac{(R_{se})_{mín}}{\xi_2}$.

5 AVALIAÇÃO COM UMA SONDAAGEM

Para determinar a resistência característica a NBR 6122 nos fornece no caso de cálculo com base em número de sondagens os valores de ξ_1 e ξ_2 . Nota-se que o valor de ξ_1 é sempre maior que ξ_2 , exceto para uma sondagem. Como R_k é o valor mínimo entre $R_{méd}/\xi_1$ e $R_{mín}/\xi_2$, é intuitivo que $\xi_2 < \xi_1$.

Porém no caso de uma sondagem os valores de ξ_1 e ξ_2 são iguais (tabela 2), isso provavelmente ocorre pela interpretação que com uma sondagem só é possível extrair uma resistência, sendo assim $R_{méd} = R_{mín}$.

Entretanto com base na metodologia proposta com uma sondagem onde se calcula a resistência na profundidade de interesse, a resistência 1 m acima e 1 m abaixo, obtém-se 3 valores de resistência, sendo assim $R_{mín} \leq R_{méd}$ e, portanto, ξ_1 e ξ_2 poderiam ter valores distintos.

Para determinação da resistência característica divide-se a $R_{mín}$ ou $R_{méd}$ pelo ξ_i , para uma análise da minoração causada na $R_{méd}$ ou $R_{mín}$ apresenta-se o inverso dos ξ 's na figura 5.

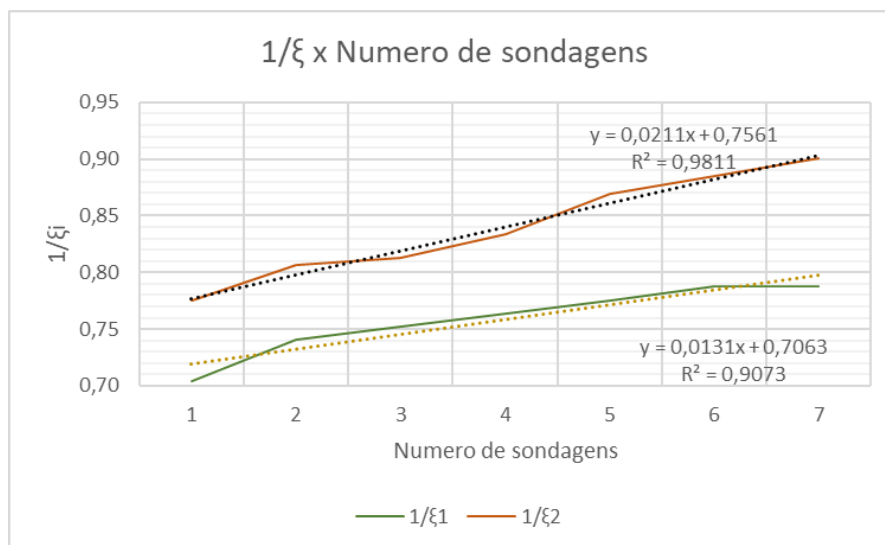


Figura 5. Valores de $1/\xi$ x número de sondagens

Foi utilizada regressão linear e para ≥ 10 sondagens para fins de cálculo foi considerado como 7 sondagens que seria o próximo valor não agrupado. Nota-se que o R^2 do inverso de ξ_1 é relativamente maior que o R^2 do inverso de ξ_2 . Ainda para analisar a regressão utilizou-se o MAPE (Erro Absoluto Médio Percentual) conforme tabela 3.

Tabela 3. Tabela para cálculo do MAPE
Número de Sondagens

	1	2	3	4	5	6	7
$1/\xi_1$	0,70	0,74	0,75	0,76	0,78	0,79	0,79
Dif. % ($1/\xi_1$)	2,1%	1,1%	0,9%	0,6%	0,5%	0,3%	1,3%
$1/\xi_2$	0,70	0,81	0,81	0,83	0,87	0,88	0,90
Dif. % ($1/\xi_2$)	5,4%	4,3%	1,4%	0,4%	1,2%	0,3%	1,7%

Os valores de erro absoluto médio percentual são MAPE ($1/\xi_1$) = 1,0% e MAPE ($1/\xi_2$) = 2,1%. É notável que o valor do inverso de ξ_2 para 1 sondagem tem discrepância com os outros valores de ξ_2 , portanto presume-se que ξ_1 é um valor ajustado para uma sondagem e o valor de ξ_2 foi igualado ao ξ_1 para uma sondagem.

Analisando a linha de regressão para o inverso de ξ_2 excluindo o valor de uma sondagem p MAPE é de 0,77%, bem mais aderente que o 2,1%. E calculando com base na regressão obtemos que para uma sondagem $1/\xi_2=0,7789$ e, portanto, um valor sugerido para ξ_2 para uma sondagem seria 1,29. Dessa forma o cálculo da resistência característica será o mínimo $\frac{(R_{se})_{méd}}{\xi_1}$; $\frac{(R_{se})_{min}}{\xi_2}$, podendo ser os dois cálculos valores mínimos.

Atendendo a NBR 6122 o ξ_2 para uma sondagem é de 1,42, porém ocorre uma penalização na resistência característica pela hipótese do $R_{min} = R_{méd}$ para uma sondagem. Para equalizar o valor de ξ_2 em comparação aos valores para mais de uma sondagem propõe-se o ajuste de $\xi_2=1,29$.

6 SUPERFÍCIE RESISTENTE

O ensaio SPT pode ser interpretado como um Pedon, conforme figura 6, menor volume de solo contendo todos os horizontes de solo. Com a classificação do solo, o N spt e conhecimento da geologia local o ensaio SPT é uma informação rica que pode apresentar mais claramente a gênese do solo.

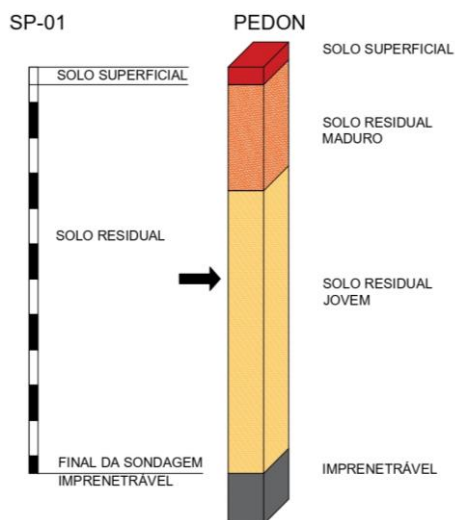


Figura 6. Sondagem SPT e Pedon

Tendo a carga admissível e a profundidade pode-se definir a superfície resistente. Especificamente para a análise com uma sondagem a superfície resistente pode ser determinada de duas maneiras.

6.1 Superfície Resistente horizontal

Nesse caso definida a profundidade onde se atinge a capacidade de carga, por ausência de maiores informações a superfície resistente pode ser definida como o plano horizontal na profundidade de interesse (figura 7).

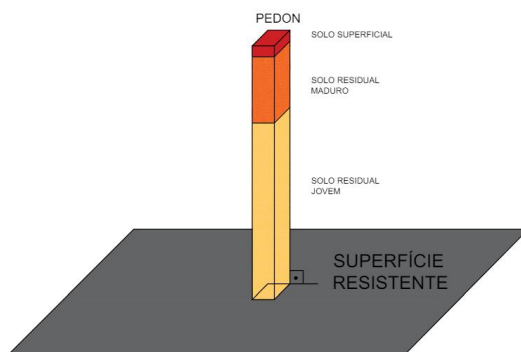


Figura 7. Superfície Resistente horizontal

6.2 Superfície Resistente com informações topográficas e geológicas

A gênese do solo aliada com uma topografia que ainda guarda informações da história do solo é de extremo valor. Sabendo o contexto geológico da obra é possível extrapolar a sondagem em função do tipo e solo e de rocha local. São exemplos os perfis de alteração de rocha e a superfícies deposicionais conforme figura 8.

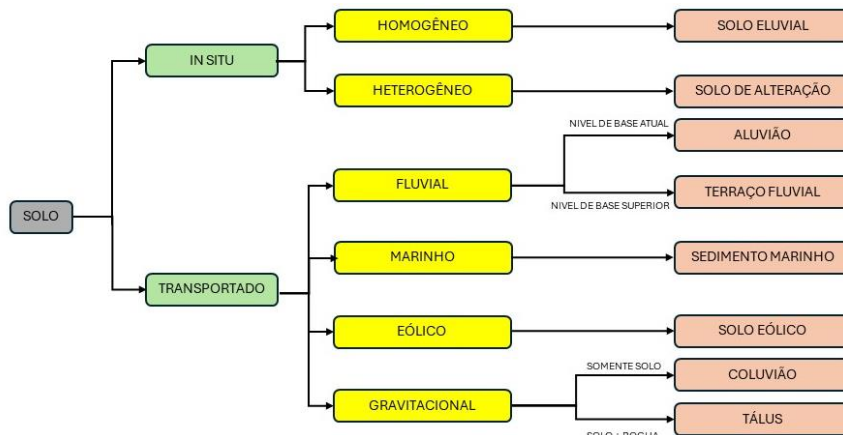


Figura 8. Gênese do solo

Caso a topografia do terreno guarde informações da história geológica pode-se adotar que em relação ao nível do terreno a sondagem é adotada representativa em toda área, isso significa que se existe, por exemplo, uma camada de solo residual maduro a 20m de profundidade essa camada esta paralela ao terreno deslocada 20m abaixo conforme ilustrado na figura 9. Portanto nesse caso a superfície resistente, mesmo com uma sondagem, não é plana e horizontalizada.

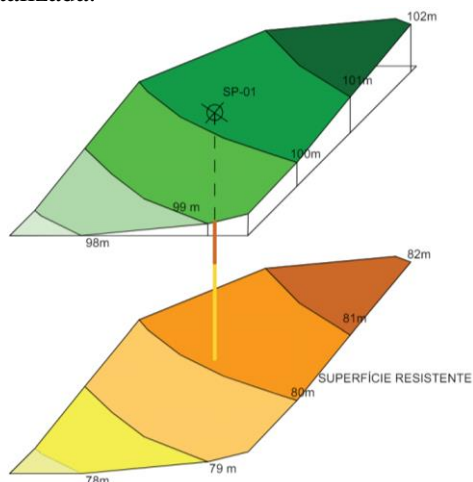


Figura 9. Superfície Resistente paralela a topografia

Caso seja necessária fazer uma terraplenagem, com o pedon pode-se avaliar a Superfície Resistente ajustada. O trecho de aterro pode-se não considerar ganho de resistência na estaca, sendo assim esse trecho da SR fica inalterado. No trecho de corte avaliando qual a nova profundidade para se atingir a capacidade de carga pode-se determinar a superfície resistente desse trecho que será mais profunda que a inicial, devido a perda de resistência lateral do solo cortado, apresentado na figura 10.

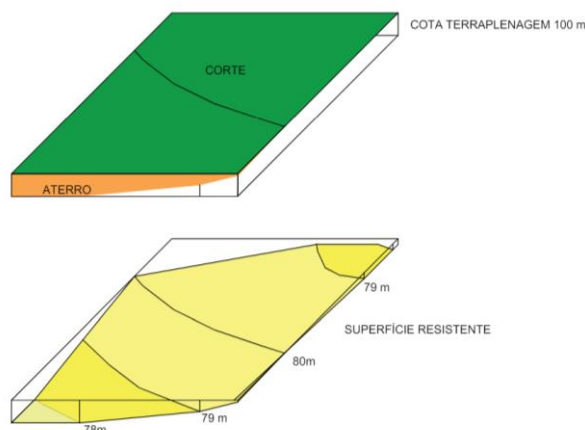


Figura 10. Superfície Resistente ajustada pos terraplenagem

Se o estaqueamento permita um controle na execução, como é o exemplo de estacas cravas a Superfície Resistente feita em projeto acima pode ser comparada com a Superfície Resistente com base nos dados de execução.

7 CONCLUSÃO

A NBR 6122 determina a resistência característica baseado na quantidade de sondagens e quantidade de prova de cargas, abordando o calculo a partir do numero de sondagens nota-se que para uma sondagem os valores de ξ_1 e ξ_2 são iguais, sendo assim R_k é determinado pela R_{min}/ξ_2 . Com a proposta de metodologia de cálculo de três valores de resistência propõe-se um valor ajustado de ξ_2 para uma sondagem no valor de 1,29. Dessa forma a resistência característica seria o mínimo entre $R_{méd}/\xi_1$ e R_{min}/ξ_2 assim como é para 2 ou mais sondagens.

Avaliando a superfície resistênte com uma sondagem pode-se avaliar a profundidade resistente e baseado nela a superfície pode ser definida em conjunto com a informação da gênese do material quando é possível avaliar essas informações junto, por exemplo da topografia local. Mesmo com uma sondagem informações adicionais podem e devem ser utilizadas para que a superfície resistênte seja a mais assertiva possível.

BIBLIOGRAFIA

- Cintra, J. C. A. e Aoki N. Fundações por estacas: projeto geotécnico. . São Paulo: Oficina de Textos. Acesso em: 29 mar. 2024, 2010.
- NBR 6122 – Projeto e execução de fundações. ABNT 2022.
- Aoki, N. Instituto de Engenharia. Palestra: Fator de Segurança e Risco Geotécnico, 2023.
- Aoki,N.; Cintra, J.C.A.- Influência da variabilidade do maciço de solos no comprimento de estacas / Sefe III,1996 ABEF e ABMSNRSP.
- Monticeli, et al. Geologia de Engenharia e Ambiental. Volume 2. Sçao Paulo: ABEG, 2023.
- Danziger,B ; Lopes, F. Fundações em estacas. Ed. 1. Editora Geni, 2021.