



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LÍDIA CRISTINA DE LIMA NASCIMENTO

**ESTUDO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA
ASSENTADAS EM SOLO ARENOSO DE NATAL/RN**

ANGICOS

2022

LÍDIA CRISTINA DE LIMA NASCIMENTO

**ESTUDO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA
ASSENTADAS EM SOLO ARENOSO DE NATAL/RN**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Arthur Gomes Dantas de Araújo,
Prof. Dr.

ANGICOS

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N244e Nascimento, Lídia Cristina de Lima.
Estudo da capacidade de carga de estacas
hélice contínua assentadas em solo arenoso de
Natal/RN. / Lídia Cristina de Lima Nascimento. -
2022.
40 f. : il.

Orientador: Arthur Gomes Dantas de Araújo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2022.

1. Capacidade de Carga. 2. Métodos Semi-
Empíricos. 3. Prova de Carga Estática. 4. Estaca
Hélice Contínua. I. Araújo, Arthur Gomes Dantas de
, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em
conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo
autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia
DuarteCRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LÍDIA CRISTINA DE LIMA NASCIMENTO

**ESTUDO DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA
ASSENTADAS EM SOLO ARENOSO DE NATAL/RN.**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 23 / 11 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Arthur Gomes Dantas de Araújo (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Luís Henrique Gonçalves Costa (UFERSA)
Membro Examinador

Prof. Dr. Wendell Rossine Medeiros de Souza (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Joseane Maria de Lima Nascimento e Lucivaldo Jerônimo do Nascimento, por serem a luz no meu caminho, por todo apoio, por nunca terem deixado faltar nada na minha vida, e fazer o possível para que eu tivesse a melhor educação, por todos os nãoos que me deram, pois fizeram com que eu crescesse e tornando-me o que sou hoje. Vocês sempre serão meus heróis, meu espelho e meus melhores exemplos de força, perseverança e garra. Amo muito vocês.

Ao meu irmão, Lucas Vinícius de Lima Nascimento, por ser o melhor e insubstituível irmão, meu gêmeo de ano diferente. Amo você.

Aos meus avós que junto aos meus pais ajudaram na minha educação, contribuindo para o que sou hoje. Minha eterna gratidão.

A todos os meus familiares, tias, tios e primos, que torceram por minha vitória.

Ao meu orientador, Arthur Gomes Dantas de Araújo, por todas as orientações para que esse trabalho ficasse da melhor maneira possível. Muito obrigada.

A minha companheira de residência e vida acadêmica, Thalia Queiroz, obrigada por todos os momentos.

A todo corpo docente da UFERSA, que contribuiu para o meu conhecimento. Gratidão por serem os profissionais que são.

À banca examinadora, pela disponibilidade e tempo para avaliar este trabalho.

A todos que direta e indiretamente participaram da minha jornada. Gratidão.

RESUMO

As estacas são elementos de fundação responsáveis pela transferência das cargas da estrutura ao solo. A relação estaca-solo é uma variável muito importante na determinação da resistência e capacidade de carga. Este trabalho estuda-se a capacidade de carga de estacas hélice contínua assentadas em solos arenosos, em duas obras na cidade de Natal-RN, comparando capacidade de carga estimado pelos métodos semi-empíricos de Aoki-Veloso (1975), Decourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996), com os resultados de prova de carga estática pelos métodos de Van der Veen (1953), afim de verificar se os resultados pelos métodos experimentais condizem com os resultados obtidos na fase de projeto. Com relação aos resultados, foi comparado a capacidade de carga pelos métodos semi-empíricos com a curva das provas de carga através do método de Van de Veen, percebe-se que a capacidade de carga por Van der Veen foi superior a obtida pelos métodos semi-empíricos, ou seja, as estacas executadas poderiam suportar uma carga superior a estimada em projeto.

Palavras-Chave: Capacidade de Carga; Métodos Semi-Empíricos; Prova de Carga Estática; Estaca Hélice Contínua.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Representação do tipo de fundação	12
Figura 2 - Bases de tubulões.....	13
Figura 3 - Etapas de execução da estaca hélice contínua	14
Figura 4 - Execução da sondagem.....	15
Figura 5 - Sistema de reação em prova de carga estática em estacas.	18
Figura 6 - Solução gráfica	19
Figura 8 - Localização das obras	24
Figura 9 - Planta de localização dos furos da sonda OBRA-1	25
Figura 10 - Perfil de sondagem SP-01 da OBRA-1.....	26
Figura 11 - Perfil de sondagem SP-02 da OBRA-1.....	27
Figura 12 - Perfil de sondagem SP-03 da OBRA-1.....	28
Figura 13 - Planta de localização dos furos da sondagem OBRA-2	29
Figura 14 - Perfil de sondagem SP-01 da OBRA-2.....	30
Figura 15 - Perfil de sondagem SP-02 da OBRA-2.....	31
Figura 16 - Perfil de sondagem SP-03 da OBRA-2.....	32
Figura 17 - Geometria da estaca ensaiada OBRA-1	33
Figura 18 - Locação da estaca ensaiada OBRA-1	34
Figura 19 - Geometria da estaca ensaiada OBRA-2.....	35
Figura 20 - Locação da estaca ensaiada OBRA-2	36
Figura 21 - Esquema de montagem da prova de carga.....	37
Figura 22 - Montagem da prova de carga.....	38
Figura 23 - Curva da Prova de Carga Estática Obra-1	39
Figura 24 - Curva da Prova de Carga Estática Obra-2	40
Figura 25 - Capacidade de carga para os métodos semi-empíricos OBRA-1	41
Figura 26 - Capacidade de carga para os métodos semi-empíricos OBRA-2	41
Figura 27 - Capacidade de carga por Van Der Veen OBRA-1	42
Figura 28 - Capacidade de carga por Van Der Veen OBRA-2	43

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Compacidade e consistência do solo	16
Tabela 2 - Fatores de correlação $F1$ e $F2$	20
Tabela 3 - Razão de atrito (α) e K	21
Tabela 4 - Coeficiente característico do solo (C)	22
Tabela 5 - Fator α	22
Tabela 6 - Fator β	22
Tabela 7 - Parâmetro α	23
Tabela 8 - Parâmetro β	23
Tabela 9 – Capacidade de carga para todos os critérios de ruptura.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA	10
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 Objetivo Geral	10
1.2.2 Objetivos Específicos	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 FUNDAÇÕES	12
2.1.1 Fundações Profundas	12
2.1.1.1 Estacas de Hélice Contínua	13
2.2 ENSAIO SPT	14
2.3 VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA	16
2.3.1 Prova de carga estática	17
2.3.2 Curva Carga x Recalque	18
2.3.2.1 Método de Van Der Veen (1953)	18
2.3.3 Métodos semi-empíricos para previsão de capacidade de carga em estacas	19
2.3.3.1 Método de Aoki-Velloso (1975)	19
2.3.3.2 Método Decourt & Quaresma (1978)	21
2.3.3.3 Método de Teixeira (1996)	23
3 METODOLOGIA	24
3.1 LOCALIZAÇÃO DAS OBRAS DE ESTUDO	24
3.2 ASPECTOS DOS SOLOS	24
3.3 CARACTERÍSTICAS DAS ESTACAS ENSAIADAS	32
3.4 PROVA DE CARGA ESTÁTICA	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 CURVAS DA PROVA DE CARGA ESTÁTICA	39
4.2 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE CARGA PELOS MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS	40
4.3 CAPACIDADE DE CARGA POR CRITÉRIO DE RUPTURA	42
4.4 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS	43
5 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Em qualquer que seja a obra de engenharia é de suma importância que haja a investigação do solo. Nesta etapa é realizado ensaios in loco para a determinação das características do solo e garantir uma maior confiabilidade dos projetos de fundações. Um dos ensaios mais utilizados na construção civil, para aquele fim, é o ensaio de penetração dinâmica (SPT - Standard Penetration), ele é normatizado pela NBR 6484 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2020). É através dessas sondagens que se inicia o projeto e execução das fundações, atentando sempre para a disponibilidade técnica e econômica.

A capacidade de carga de uma estaca pode ser determinada através de métodos teóricos, semiempíricos ou experimentais encontrados na literatura. Usualmente, utiliza-se métodos semiempíricos baseados no resultado da sondagem de simples reconhecimento com SPT para estimar a resistência de ponto e resistência por atrito lateral das estacas. O uso do método experimental deve-se a execução de provas de carga estática o qual reproduz o comportamento carga x recalque de uma estaca na obra.

Sendo assim, o presente trabalho busca fazer um estudo de capacidade de carga de estacas hélice continua assentadas em solo arenoso, com a finalidade de comparar a capacidade de carga calculada por métodos semi-empíricos com os resultados obtidos experimentalmente através de provas de carga estática da estaca isolada com a capacidade de carga definida em projeto.

1.1 JUSTIFICATIVA

Como normalmente a estaca é projetada utilizando métodos semiempíricos baseados nos resultados da sondagem à percussão SPT, é importante comparar esses resultados com os resultados experimentais através das provas de carga estática. Sendo assim, pode-se verificar se o desempenho da estaca condiz com os resultados obtidos no projeto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

- Determinar a capacidade de carga de estacas hélice continua localizadas em duas obras em Natal-RN.

1.2.2 Objetivos Específicos

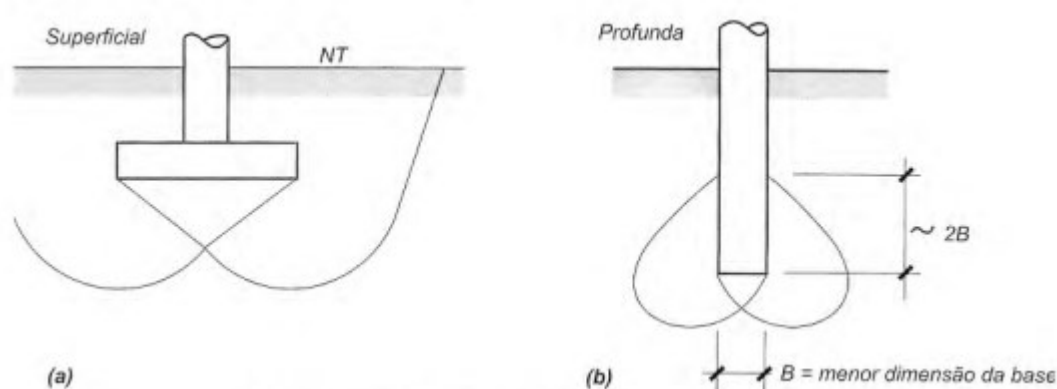
- Calcular a capacidade de carga das estacas utilizando os métodos de Aoki-Velloso, Decourt-Quaresma e Teixeira.
- Comparar a capacidade de carga de uma estaca isolada com a capacidade de carga definida em projeto.
- Estimar a capacidade de carga através dos métodos de Van der Veen, por meio do relatório da prova de carga estática executada nas duas obras.
- Comparar o relatório da capacidade de carga obtida experimentalmente (prova de carga) com o resultado estimado em projeto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FUNDAÇÕES

As fundações podem ser definidas de acordo com Azeredo (1997), como sendo estruturas onde a sua principal função é transmitir as cargas da construção para o solo. Comumente separadas em dois grupos: fundação superficiais (diretas ou rasas) e fundações profundas, como mostra a figura 1, respectivamente.

Figura 1 - Representação do tipo de fundação



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

As fundações diretas são aquelas em que as camadas do subsolo que estão logo abaixo da estrutura, consegue suportar seus esforços. Já as fundações profundas são aquelas em que é preciso utilizar camadas mais profundas do substrato para que esse resista a carga da estrutura (CAPUTO; CAPUTO E RODRIGUES, 2015).

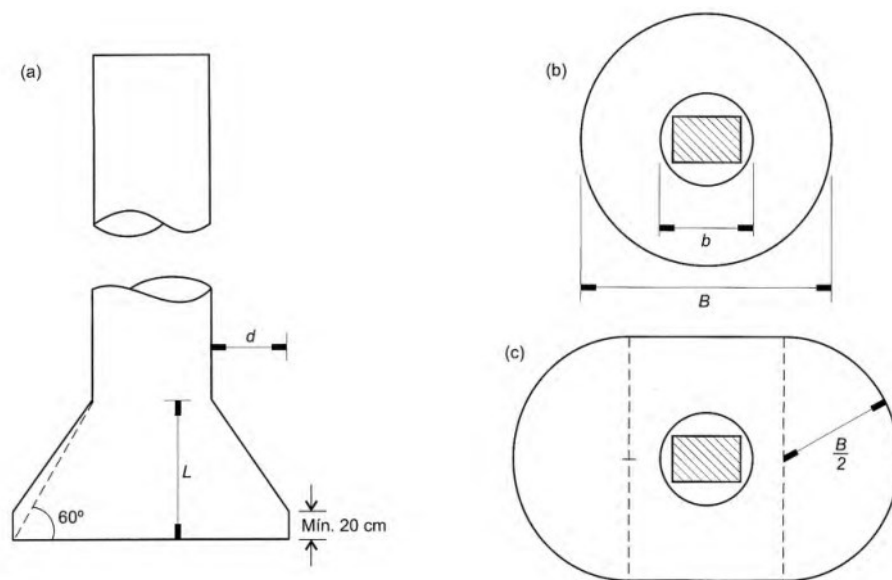
2.1.1 Fundações Profundas

Segundo Velloso e Lopes (2010) fundações profundas são aquelas em que sua ruptura não ocorre na superfície do terreno. Para NBR 6122 (ABNT, 2019) fundações profundas são aquelas que os esforços da estrutura são transmitidos para o terreno através da resistência de ponta (através da base da fundação), resistência de fuste (superfície lateral) ou combinação das duas, e sua base está fixada a uma profundidade maior que duas vezes a sua menor dimensão e no mínimo a 3,0 metros da base do terreno.

De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019) este tipo de fundações está dividido em estacas e tubulões. As estacas se diferem dos tubulões por serem executadas inteiramente por

ferramentas, sem que haja necessidade de o operário descer em seu interior. Ainda segundo a norma o tubulão tem sempre a descida de um trabalhador em alguma fase de sua execução, isso é necessário ao menos para que o operário faça a limpeza do fundo da fundação, em razão que neste tipo de fundação as cargas são resistidas apenas pela ponta. Os tubulões tem sempre seu segmento inferior cilíndrico e sua base pode ser alargada ou não. O alargamento pode ser de base circular ou “falsa” elipse. Como podemos ver na figura 2 a) mostra o perfil do tubulão; a figura b) e c) mostra a base circular e de “falsa” elipse.

Figura 2 - Bases de tubulões



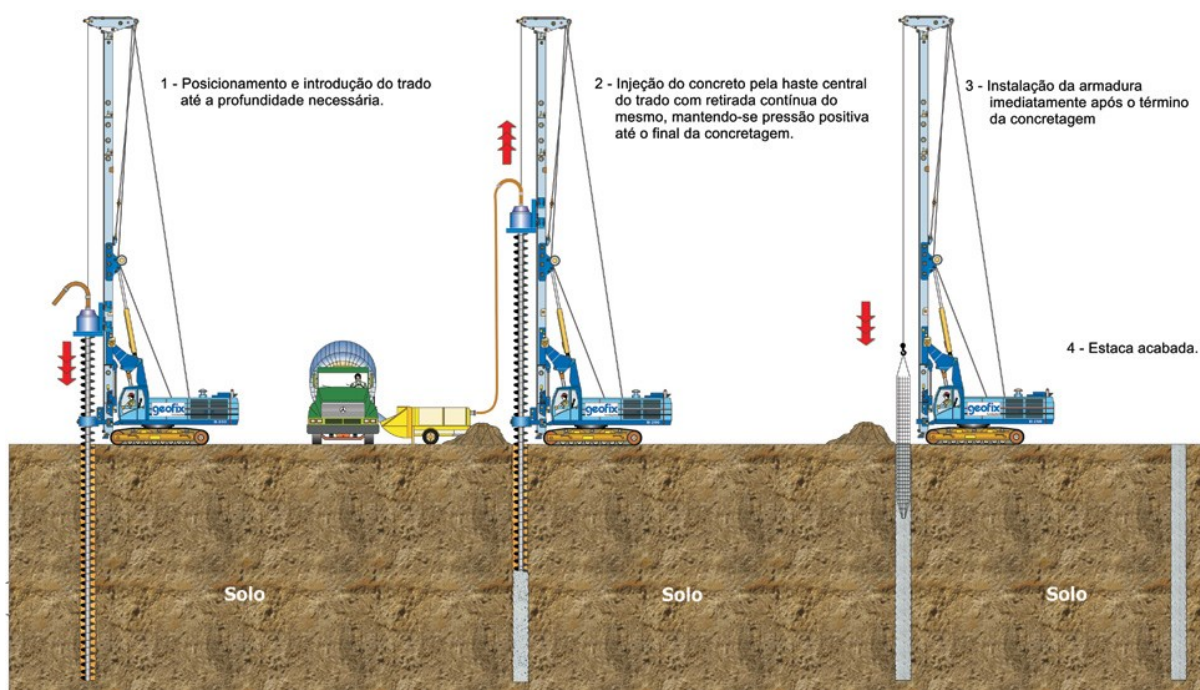
Fonte: Velloso E Lopes (2010)

As estacas são elementos de fundações grandiosos, firmados no solo por cravação ou perfuração e concretagem, podendo ser classificadas como estacas cravadas ou estacas escavadas (JOPPERT, 2007). Um exemplo de estaca escavada é a de hélice contínua, que é o foco do nosso trabalho.

2.1.1.1 Estacas de Hélice Contínua

A NBR 6122 (ABNT, 2019), descreve que estaca “hélice contínua” é uma fundação profunda moldada in loco, escavada por meio de um trado contínuo, onde o concreto é lançado através da haste do trado. Quando é atingida a cota prevista em projeto é iniciada a concretagem da estaca. Após a concretagem, inicia-se a descida da armadura.

Figura 3 - Etapas de execução da estaca hélice contínua



Fonte: Geofix (2022)

A execução das estacas hélice contínua é dividida em três fases: perfuração, concretagem e colocação da armadura, como podemos observar na Figura 3 acima. A etapa de perfuração consiste em inserir o trado no solo de forma contínua por rotação até a cota dada em projeto. O trado deve ser nivelado de modo que garanta a centralização e a verticalidade da estaca. Após a perfuração até a cota prevista, inicia-se a concretagem. É de tamanha importância a coordenação do operador do equipamento da hélice e do responsável pela bomba de concreto, assim busca garantir que o concreto chegue ao solo da base da estaca. Nesta etapa o monitoramento eletrônico deve registrar a velocidade de subida do trado, pressão do concreto injetado e o quanto de concreto está sendo bombeado. Em seguida, é iniciado a colocação da armadura, que pode ser facilitada por uso de peso ou vibrador. (NBR 6122 - ABNT, 2019)

2.2 ENSAIO SPT

De acordo com Velloso e Lopes (2010), esse tipo de sondagem são escavações capazes de ultrapassar solos compactos ou duros, porém não ultrapassa matacões, blocos de rochas e possui resistência em atravessar solos jovens muito compactos.

A norma que rege e executa este tipo de sondagem é a NBR 6484. A norma NBR 6484 (ABNT, 2001) descrevia apenas o sistema manual de execução do ensaio, na versão mais atual

NBR 6484 (ABNT, 2020), traz o sistema manual e amplia normatizando o sistema mecanizado. Podemos observar através da Figura 4 os equipamentos utilizados na execução do ensaio. Os dois sistemas têm como principal objetivo informar: amostras de solos e suas respectivas profundidades; nível de água e resistência a penetração a cada metro de sondagem.

Figura 4 - Execução da sondagem



Fonte: Vwffundações (2022)

O ensaio com sistema manual consiste em cravar com um trado manual e lavagem da perfuração com circulação de água, até a profundidade de 1m, onde deve ser colhido uma amostra do solo através do amostrador-padrão. Depois coloca-se o amostrador-padrão e o batedor, demarcando na haste um comprimento de 45cm dividido em três espaços de 15cm. Em seguida o martelo é posicionado com cuidado em cima do batedor e deixa penetrar o solo através do peso próprio do martelo que possui 65kg. O martelo é elevado a altura de 75cm, através de um cabo de aço encaixado em uma roldana no topo o tripe, e por gravidade o martelo

é solto no batedor. A diferença do sistema manual para o mecanizado é que a elevação do martelo a altura de 75cm é por acionamento mecânico e a frequência mínima é de 10 golpes por minuto e máxima de 40golpes por minuto. Dessa forma conta-se quantos golpes são necessários para que o amostrador-padrão penetre 15cm e anota-se o número de golpes para cravar cada seguimento, até completar os 45cm. Sendo o valor do SPT (ou Nspt) é o número de golpes necessários para cravar os últimos 30cm. O critério de parada é de responsabilidade do contratante ou de acordo com a necessidade do projeto. Caso não haja critérios de parada pré definidos a norma determina que avance a sondagem até um dos seguintes critérios: até a profundidade de 10m quando N igual ou superior a 25 golpes; até a profundidade de 8m quando N igual ou superior a 30 golpes; até a profundidade de 6m quando N igual ou superior a 35 golpes. O número de golpes também define a compactidade consistência do solo, como é visto na Tabela 1. (NBR 6484 - ABNT, 2020)

Tabela 1 - Compactidade e consistência do solo

Solo	Índice de resistência à penetração N	Designação ^a
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Medianamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	20 a 30	Muito rija(o)
	> 30	Dura(o)
^a As expressões empregadas para a designação da compactidade das areias (fofa, compacta etc.) são referências à deformabilidade e à resistência destes solos, sob o ponto de vista de fundações, e não podem ser confundidas com as mesmas denominações empregadas para a designação da compactidade relativa das areias ou para a situação perante o índice de vazios críticos, definidos na mecânica dos solos.		

Fonte: NBR 6484 - ABNT (2020).

2.3 VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA

De acordo com Cintra e Aoki (2010), a capacidade de carga em fundações do tipo estaca, se refere em termos geotécnicos ao máximo valor para a ruptura do sistema. Observando que essa ruptura não se refere a quebra da fundação, o que ocorre é o recalque da estaca. Ou seja, capacidade de carga em fundações do tipo estaca, é o máximo valor da força que o sistema solo-estaca resiste para haver uma ruptura.

As formulas teóricas para o cálculo de capacidade de carga por estaca de acordo com Cintra e Aoki (2010) não são muito confiáveis por não ser um tema muito aberto na geotecnia. Por esse motivo, alguns autores tem proposto métodos semi-empíricos com base em ensaios in situ e ajustados a prova de carga. Alguns desses ensaios muito usados em projetos de fundações no Brasil e no exterior, são o de Aoki-Velloso (1975), Decourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996).

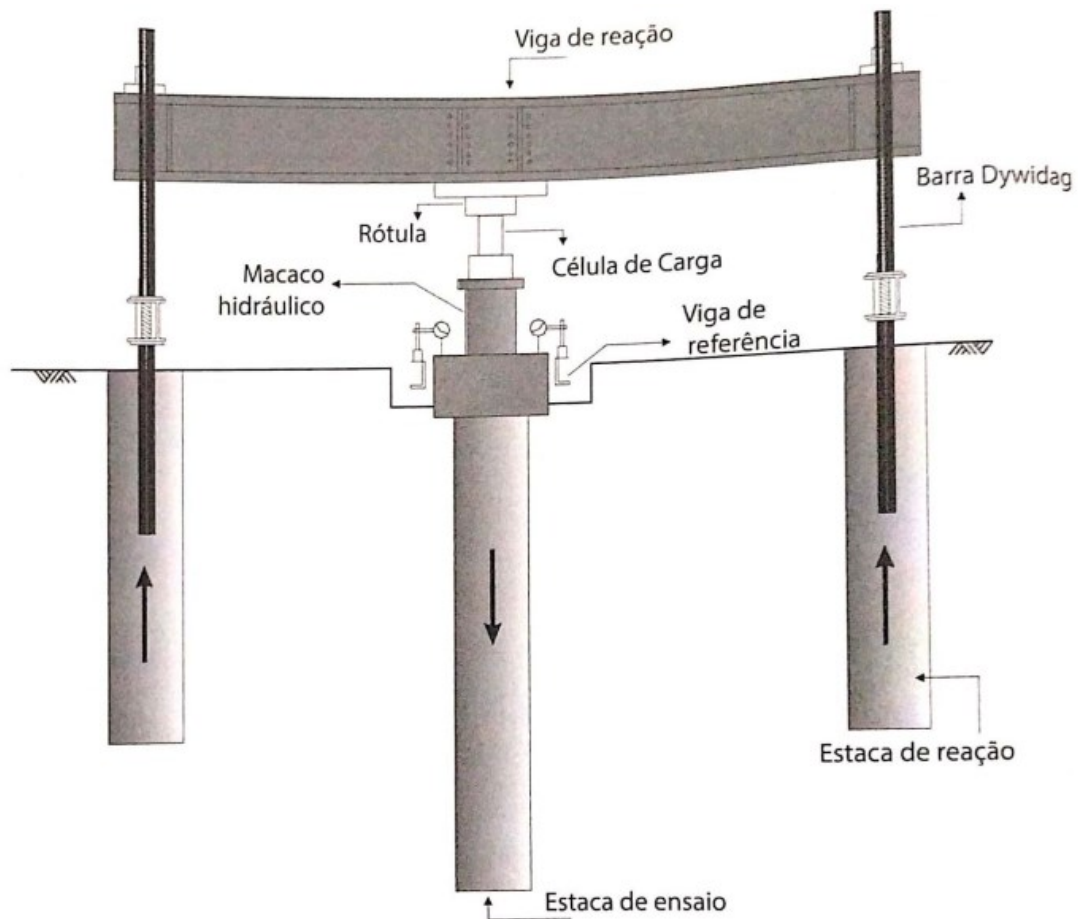
2.3.1 Prova de carga estática

A prova de carga estática, de acordo com a NBR 16903 (ABNT, 2020), compreende em aplicar uma força, seja ela de tração, compressão, ou flexocompressão, em qualquer que seja a direção vertical, horizontal ou inclinada, e apontar os deslocamentos correspondentes. O tipo de prova de carga deve ser escolhido pelo projetista, e deve ser levado em conta o carregamento pelo qual a estaca está sendo submetida.

O ensaio consiste em aplicar uma carga sobre a estaca, com carga progressiva de no máximo 20% da carga prevista, registrando os deslocamentos a cada aumento de carga. O indicador de leitura da célula de carga deve ser preciso em pelo menos 0,5% da capacidade de carga máxima da célula. As vantagens do ensaio são representar os esforços de uma estrutura, observando o comportamento da fundação sob um carregamento. (NBR 16903 - ABNT, 2020)

De acordo com Cintra et al. (2013), a mobilização da resistência é gerada pelo aumento gradativo da carga da estaca, proporcionando assim o equilíbrio. Os deslocamentos da estaca são iguais a resistência mobilizável, que por ação e reação, será igual a carga aplicada. Essa resistência está dividida em: resistência lateral e de ponta. A ruptura ocorre quando a resistência mobilizável não é suficiente para causar o equilíbrio, acarretando em recalques incessantes. A realização do carregamento na estaca é através de um macaco hidráulico que exerce um esforço contra o sistema de reação, o qual são estacas de reações construídas em torno da estaca a ser ensaiada. A Figura 5 mostra o sistema de reação utilizado na prova de carga estática em estacas.

Figura 5 - Sistema de reação em prova de carga estática em estacas.



FONTE: Cintra et al. (2013)

Como descreve Cintra et al. (2013), a prova de carga não pode ser feita em uma única estaca, pois para cada estaca tem-se um valor de capacidade de carga, consequentemente não conseguindo representar a curva de resistência, que depende do desvio padrão de n estacas que determina também a resistência média que é fundamental para determinar o fator de segurança global.

2.3.2 Curva Carga x Recalque

2.3.2.1 Método de Van Der Veen (1953)

Segundo Cintra et al. (2013), Van Der Veen correlaciona a curva carga (P) x recalque (ρ) a seguinte função exponencial (1):

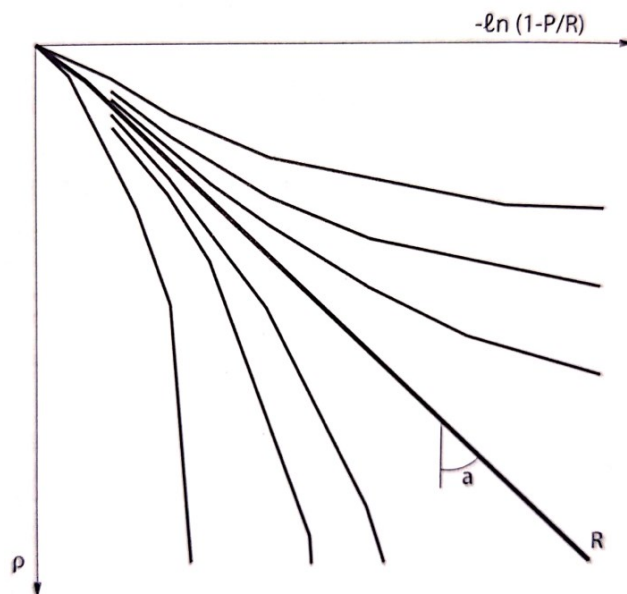
$$P = R(1 - e^{-\alpha \rho}) \quad (1)$$

α - define a forma da curva (sua unidade em mm^{-1} quando ρ estiver em mm), e R- é a carga de ruptura. Reescrevendo a função (2), temos a equação que representa uma reta:

$$\alpha * \rho + \ln \left(1 - \frac{P}{R} \right) = 0 \quad (2)$$

α e R- são determinados por tentativas e plotando o gráfico de $-\ln \left(1 - \frac{P}{R} \right)$ x ρ , o valor de R é definido através do gráfico em que r^2 mais se aproximar de 1, consequentemente teremos a capacidade de carga representado por uma reta, e α é dado pelo coeficiente angular da reta, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Solução gráfica



FONTE: Cintra et al. (2013) adaptado de Van der Veen (1953)

Com o tempo o método, que era todo de forma manual, foi surgindo programas computacionais, planilhas de Excel elaboradas para esta finalidade, e utilizando o método dos mínimos quadrados para encontrar o valor R.

2.3.3 Métodos semi-empíricos para previsão de capacidade de carga em estacas

Abaixo estão descritos três métodos semi-empíricos brasileiro que são muito utilizados em projetos de fundações.

2.3.3.1 Método de Aoki-Velloso (1975)

Segundo Cintra e Aoki (2010) o método de Aoki-Velloso (1975) para o cálculo da capacidade de carga, inicialmente era baseado no ensaio CPT (Ensaio de Penetração de Cone), onde a capacidade de carga era igual a:

$$R = U * \Sigma (r_L * \Delta_L) + r_p * A_p \quad (3)$$

U é o perímetro do fuste e Δ_L é a espessura da camada de solo. Sendo r_p e r_L inicialmente correlacionados com o ensaio CPT, definidos como:

$$r_p = \frac{q_c}{F_1} \text{ e } r_L = \frac{f_s}{F_2} \quad (4)$$

F_1 e F_2 são fatores de correlação em função do tipo de estaca, ver Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores de correlação F_1 e F_2

Tipo de estaca	F_1	F_2
Franki	2,50	2 F1
Metálica	1,75	2 F1
Pré-moldada	1 + D/0,80	2 F1
Escavada	3,0	2 F1
Raiz, Hélice contínua e Ômega	2,0	2 F1

FONTE: Cintra e Aoki (2010) adaptado de Aoki-Velloso (1975)

Como o ensaio CPT no Brasil é menos utilizado que o SPT, foi feita a correlação entre a resistência de ponta (q_c) com o N_{SPT} (índice de resistência à penetração)

$$q_c = K * N_{SPT} \quad (5)$$

Substituindo o atrito lateral em função do N_{SPT} utilizando a razão de atrito (α)

$\alpha = \frac{f_s}{q_c}$. Reescrevendo, temos:

$$f_s = \alpha * q_c = \alpha * K * N_{SPT} \quad (6)$$

α e K são tabelados (Tabela 3) e depende do tipo de solo.

Tabela 3 - Razão de atrito (α) e K

Solo	K (MP_a)	α (%)
Areia	1,00	1,4
Areia siltosa	0,80	2,0
Areia siltoargilosa	0,70	2,4
Areia argilosa	0,60	3,0
Areia argilossiltosa	0,50	2,8
Silte	0,40	3,0
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte arenoargiloso	0,45	2,8
Silte argiloso	0,23	3,4
Silte argiloarenoso	0,25	3,0
Argila	0,20	6,0
Argila arenosa	0,35	2,4
Argila arenossiltosa	0,30	2,8
Argila siltosa	0,22	4,0
Argila siltoarenosa	0,33	3,0

FONTE: Aoki-Velloso (1975)

Portanto, o valor da capacidade de carga pode ser estimado através da seguinte expressão:

$$R = \frac{K \cdot N_p \cdot A_p}{F_1} + \frac{U}{F_2} \sum (\alpha * K * N_L * \Delta_L) \quad (7)$$

N_p e N_L são N_{SPT} na ponta da estaca e N_{SPT} na lateral das camadas de solo atravessada pela estaca, respectivamente.

2.3.3.2 Método Decourt & Quaresma (1978)

De acordo com Cintra e Aoki (2010), para este método a resistência lateral e de ponta são definidos como:

$$R_L = r_L * U * L \quad \text{e} \quad R_p = r_p * A_p \quad (8)$$

Em Decourt (1982) o atrito lateral (r_L) e a resistência de ponta (r_p) são definidos como:

$$r_L = 10 \left(\frac{N_L}{3} + 1 \right) \quad \text{e} \quad r_p = C * N_p \quad (9)$$

C – é o coeficiente característico do solo, encontrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficiente característico do solo (C)

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

* alteração de rocha (solos residuais)

FONTE: Decourt-Quaresma (1978)

Decourt (1996) introduz os fatores α e β (Tabela 5 e Tabela 6) de acordo com o tipo de estaca e solo.

Tabela 5 - Fator α

Tipo de solo	Tipo de estaca				
	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	0,85	0,85	0,3*	0,85*	1,0*
Solos intermediários	0,6	0,6	0,3*	0,6*	1,0*
Areias	0,5	0,5	0,3*	0,5*	1,0*

* valores apenas orientativos diante do reduzido número de dados disponíveis

FONTE: Decourt (1996)

Tabela 6 - Fator β

Tipo de solo	Tipo de estaca				
	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	0,8*	0,9*	1,0*	1,5*	3,0*
Solos intermediários	0,65*	0,75*	1,0*	1,5*	3,0*
Areias	0,5*	0,6*	1,0*	1,5*	3,0*

* valores apenas orientativos diante do reduzido número de dados disponíveis

FONTE: Decourt (1996)

Definindo a capacidade de carga como sendo:

$$R = \alpha * C * N_p * A_p + \beta * 10 \left(\frac{N_L}{3} + 1 \right) * U * L \quad (10)$$

Onde: N_p e N_L são N_{SPT} médio na ponta da estaca e N_{SPT} médio ao longo do fuste da estaca, respectivamente.

2.3.3.3 Método de Teixeira (1996)

Para Cintra e Aoki (2010), o método de Teixeira é baseado no método de Aoki-Velloso, Decourt-Quaresma e outros. Esse método unifica as parcelas e resistência (R_L e R_p) em função a dois parâmetros, α e β .

$$R = R_p + R_L = \alpha * N_p * A_p + \beta * N_L * U * L \quad (11)$$

Onde: N_p - é N_{SPT} médio no intervalo de 4 diâmetros acima da ponta da estaca e 1 abaixo; N_L N_{SPT} médio ao longo do fuste da estaca; α - parâmetro de resistência de ponta conforme o tipo de estaca e solo (Tabela 7); e β - parâmetro de resistência lateral conforme o tipo de estaca (Tabela 8).

Tabela 7 - Parâmetro α

Solo (4 < N_{SPT} < 40)	Tipo de estaca - α (kPa)			
	Pré-moldada e perfil metálico	Franki	Escavada a céu aberto	Raiz
Argila siltosa	110	100	100	100
Silte argiloso	160	120	110	110
Argila arenosa	210	160	130	140
Silte arenoso	260	210	160	160
Areia argilosa	300	240	200	190
Areia siltosa	360	300	240	220
Areia	400	340	270	260
Areia com pedregulhos	440	380	310	290

FONTE: Teixeira (1996)

Tabela 8 - Parâmetro β

Tipo de estaca	β (kPa)
Pré-moldada e Perfil metálico	4
Franki	5
Escavada a céu aberto	4
Raiz	6

FONTE: Teixeira (1996)

3 METODOLOGIA

3.1 LOCALIZAÇÃO DAS OBRAS DE ESTUDO

Para este trabalho foi utilizado relatórios de prova de carga estática de fundação e projetos de duas obras, ambas localizadas no bairro de Lagoa Nova em Natal, Rio Grande do Norte. Para fins de codificação e melhor entendimento, utilizaremos as seguintes nomenclaturas para cada obra, “OBRA-1” e “OBRA-2”, na Figura 8 podemos ver as suas respectivas localizações.

Figura 7 - Localização das obras



FONTE: Google Earth, (2022)

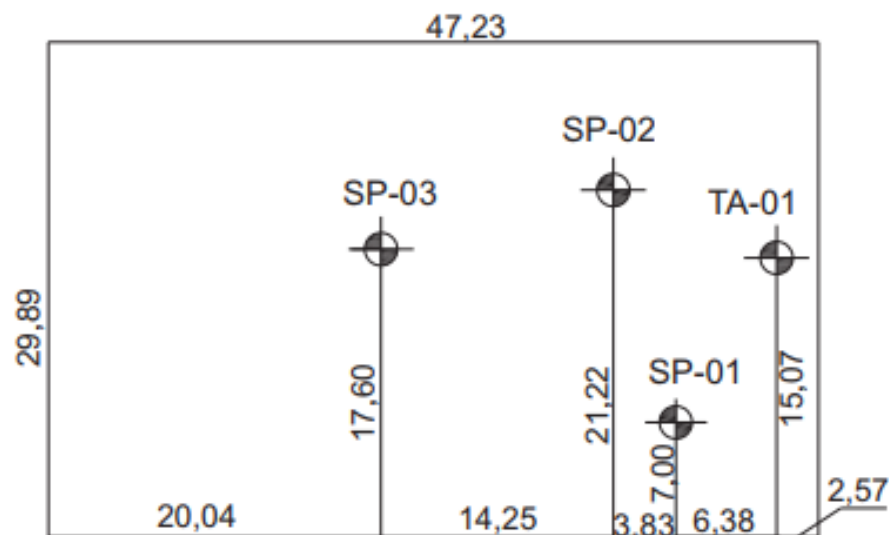
3.2 ASPECTOS DOS SOLOS

As características do subsolo local foram definidas em ambas as obras através de sondagem de simples reconhecimento, com medidas de resistência a penetração através de um amostrador padrão. Na “OBRA-1”, o solo é composto inicialmente por camada de areia fina e média, com pouca matéria orgânica, pouco compacta, seguida por camada com aproximadamente 7 metros de areia fina e média, pouco argilosa, variando de pouco compacta a medianamente compacta. Seguida de sucessivas camadas de areia de textura variada, com a presença de argila e nódulos de óxido de ferro e estas variam de compacta a muito compacta, por fim apresenta-se camada de areia de textura variada, muito argilosa, com pedregulhos de quartzo e nódulos de óxido de ferro, muito compacta, até atingir-se o impenetrável. Na “OBRA-

2”, em geral, o solo é composto por camada de areia fina e média, com matéria orgânica, fofa, seguida por camadas de areia fina e média, com presença de silte, fofa. Depois apresenta-se camada de areia fina e média, pouco argilosa, fofa e então, sucessivas camadas de areia fina e média, com presença de argila e nódulos de óxido de ferro, variando de fofa a medianamente compacta. Em seguida apresentam-se camadas de areia de textura variada, muito argilosa, com pedregulhos de quartzo e nódulos de óxido de ferro, oscilando entre pouco compacta e medianamente compacta, finalmente, ver-se camadas de argila, com areia fina e média e raros nódulos de óxido de ferro de consistência dura, até que é atingido o impenetrável.

Na “OBRA-1”, foram executados 3 furos, denominados SP-01, SP-02 e SP-03, de sondagem a percussão, como pode ser observado na planta de localização na Figura 9. Os furos foram perfurados de acordo com as recomendações da norma NBR 6484 da ABNT. A localização e a quantidade de furos foram estipuladas pelo contratante.

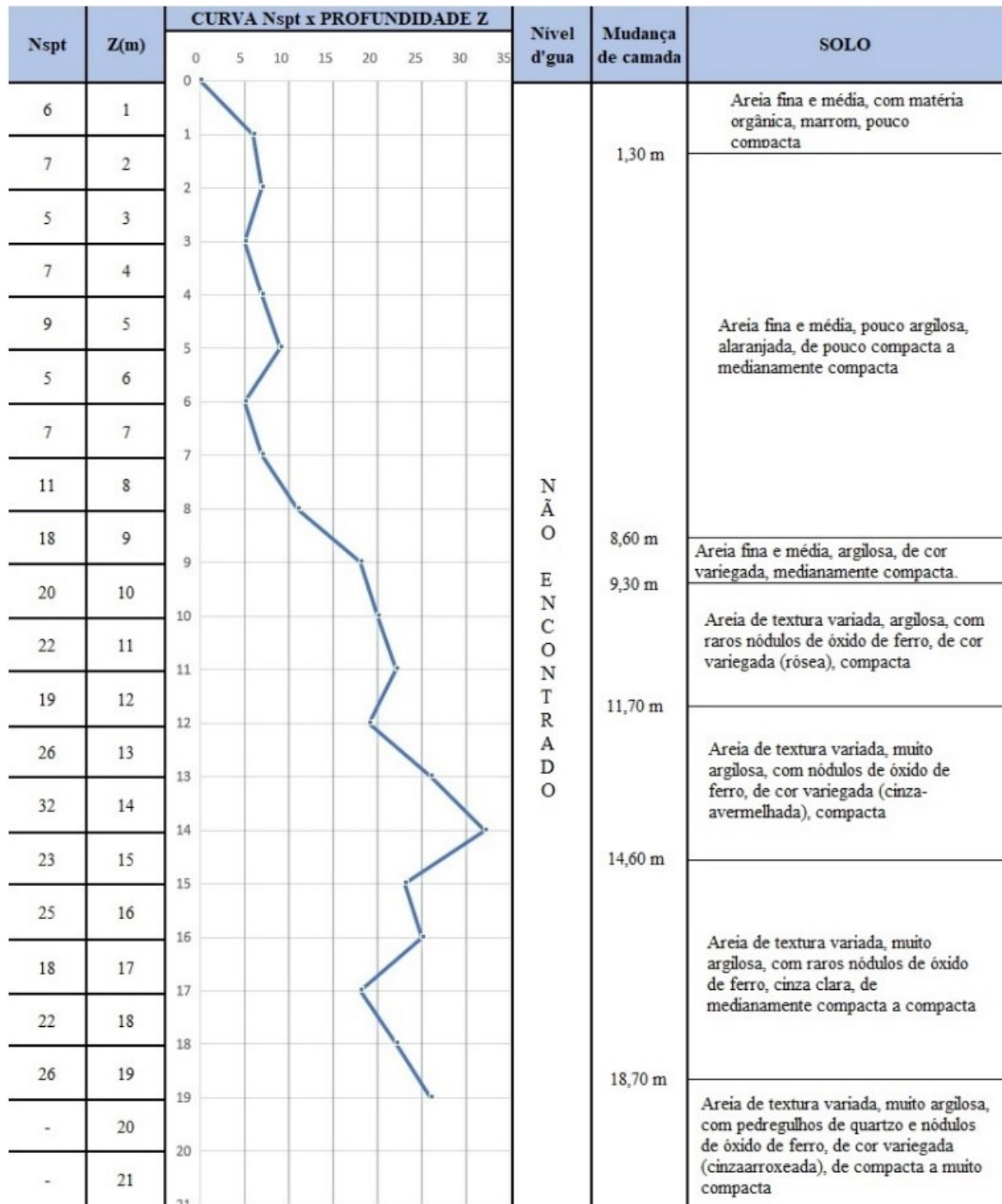
Figura 8 - Planta de localização dos furos da sonda OBRA-1



FONTE: Relatório de sondagem da Obra

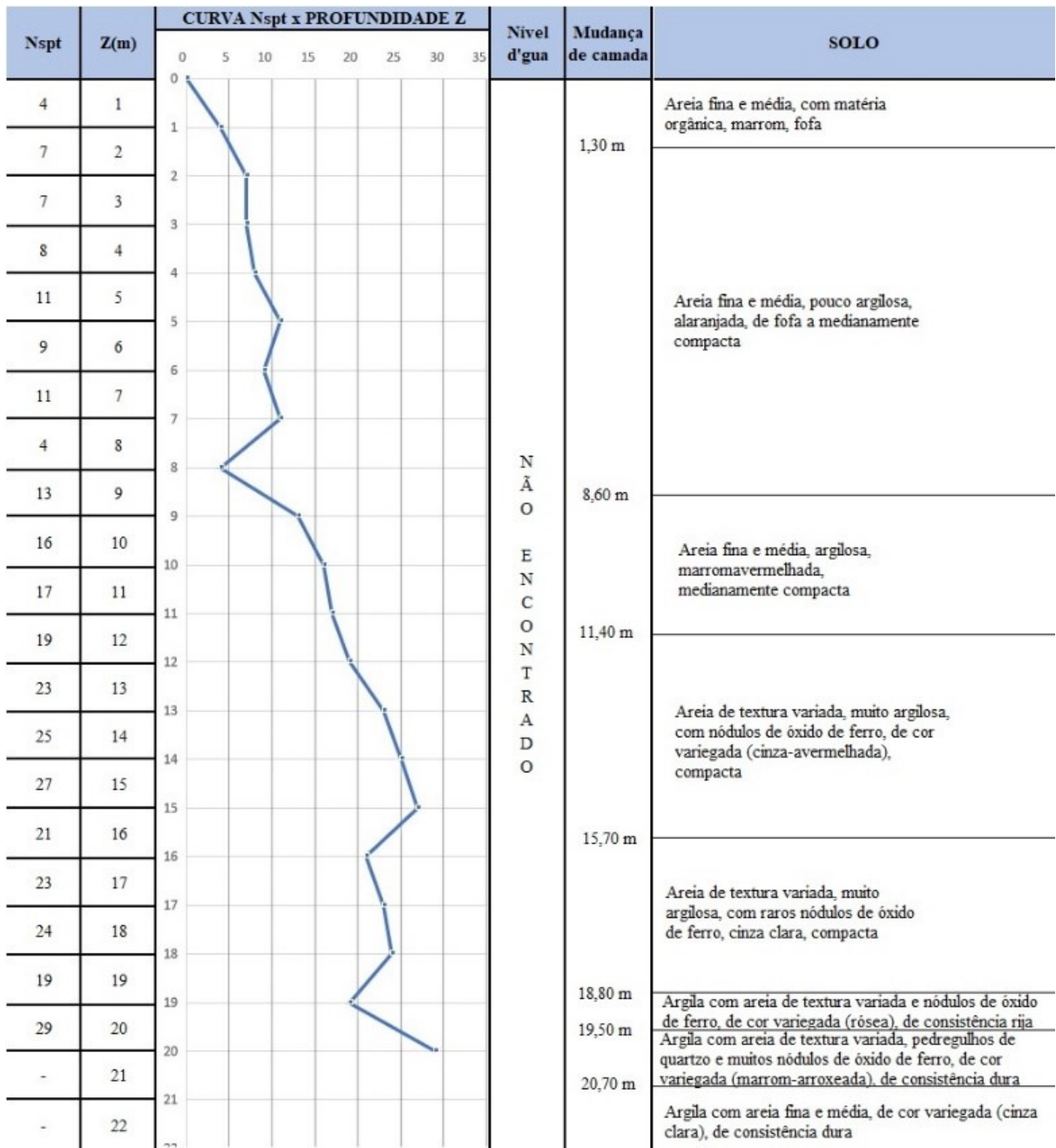
Abaixo estão apresentados os resultados das sondagens para a OBRA-1.

Figura 9 - Perfil de sondagem SP-01 da OBRA-1



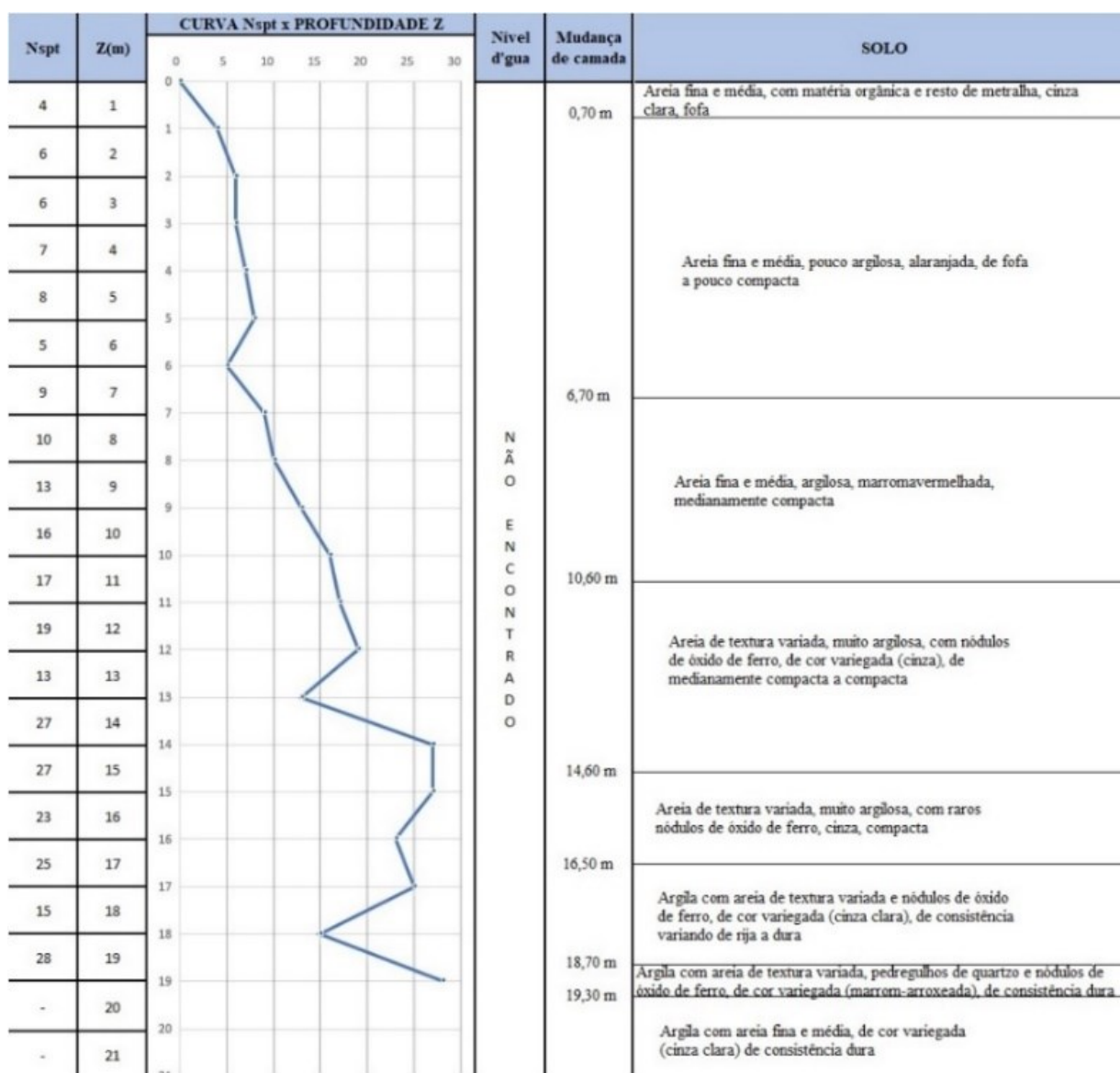
Fonte: Autoria Própria

Figura 10 - Perfil de sondagem SP-02 da OBRA-1



Fonte: Autoria Própria

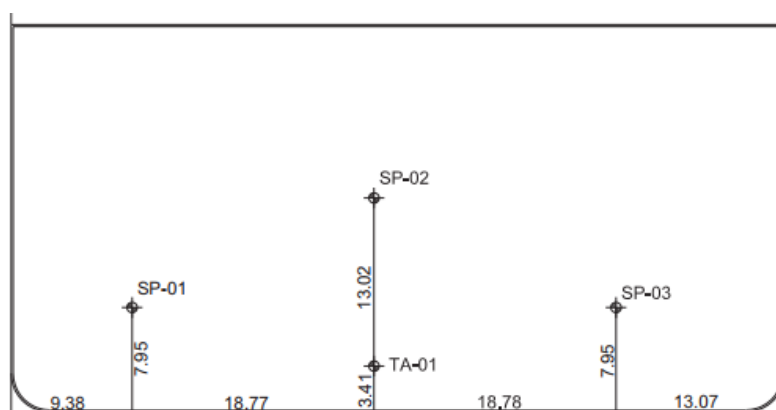
Figura 11 - Perfil de sondagem SP-03 da OBRA-1



Fonte: Autoria Própria

Na “OBRA-2”, também foram executados 3 furos, denominados SP-01, SP-02 e SP-03, de sondagem a percussão, como pode ser observado na planta de localização na Figura 13. Assim como na “OBRA-1” os furos foram perfurados de acordo com as recomendações da norma NBR 6484 da ABNT. A localização e a quantidade de furos foram estipuladas pelo contratante.

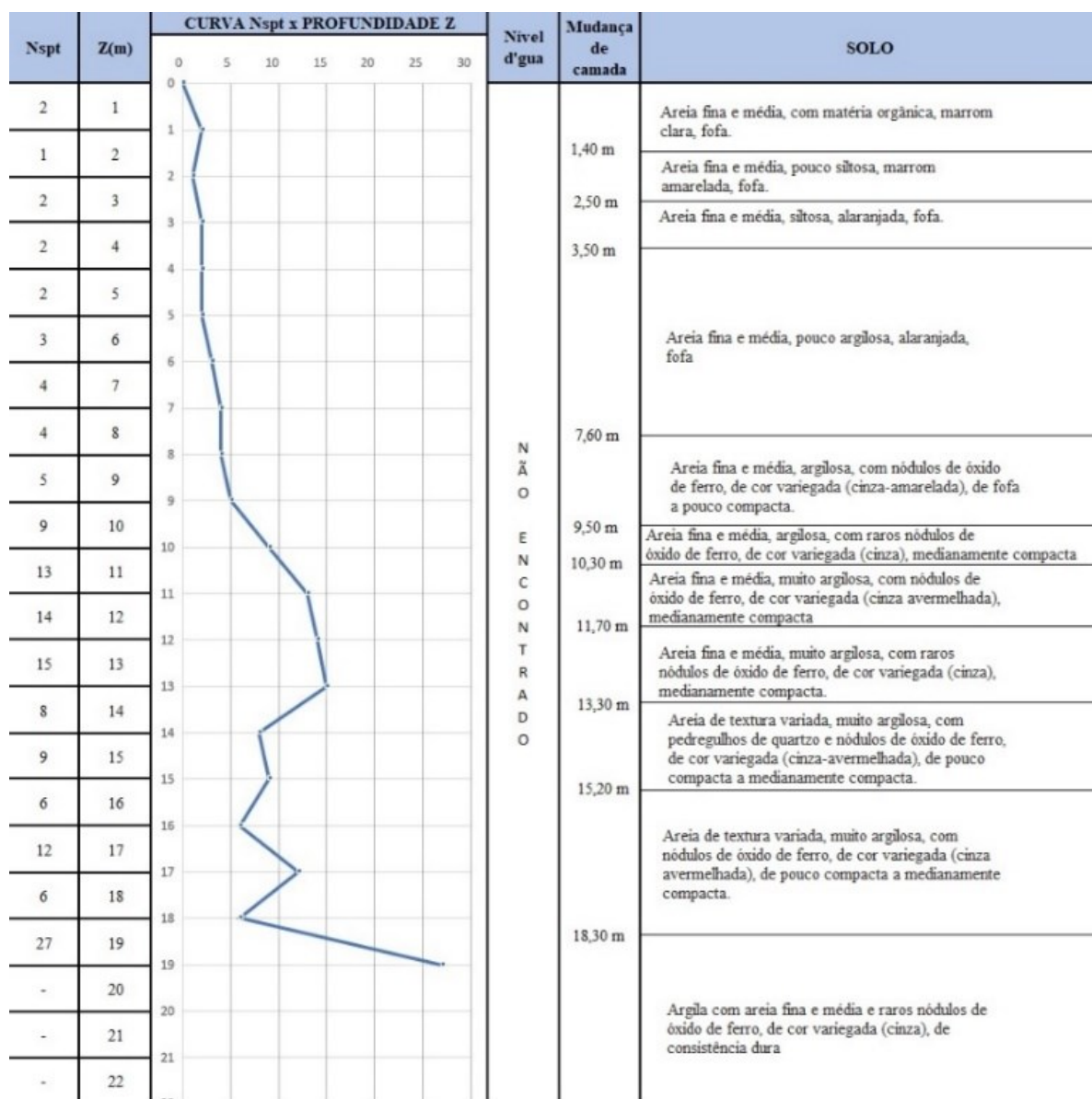
Figura 12 - Planta de localização dos furos da sondagem OBRA-2



Fonte: Relatório de sondagem da Obra

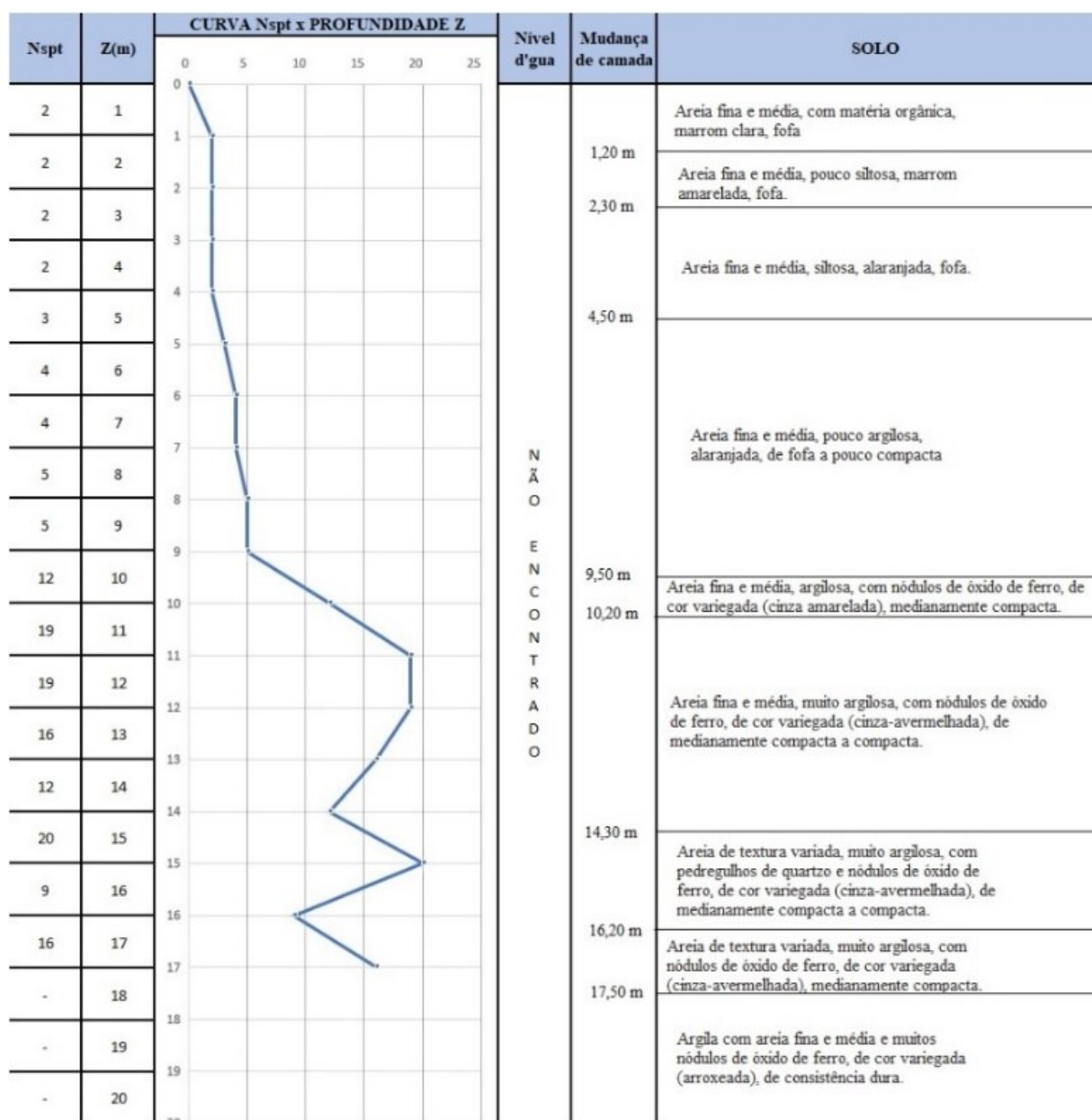
Abaixo estão apresentados os resultados das sondagens para a OBRA-2.

Figura 13 - Perfil de sondagem SP-01 da OBRA-2



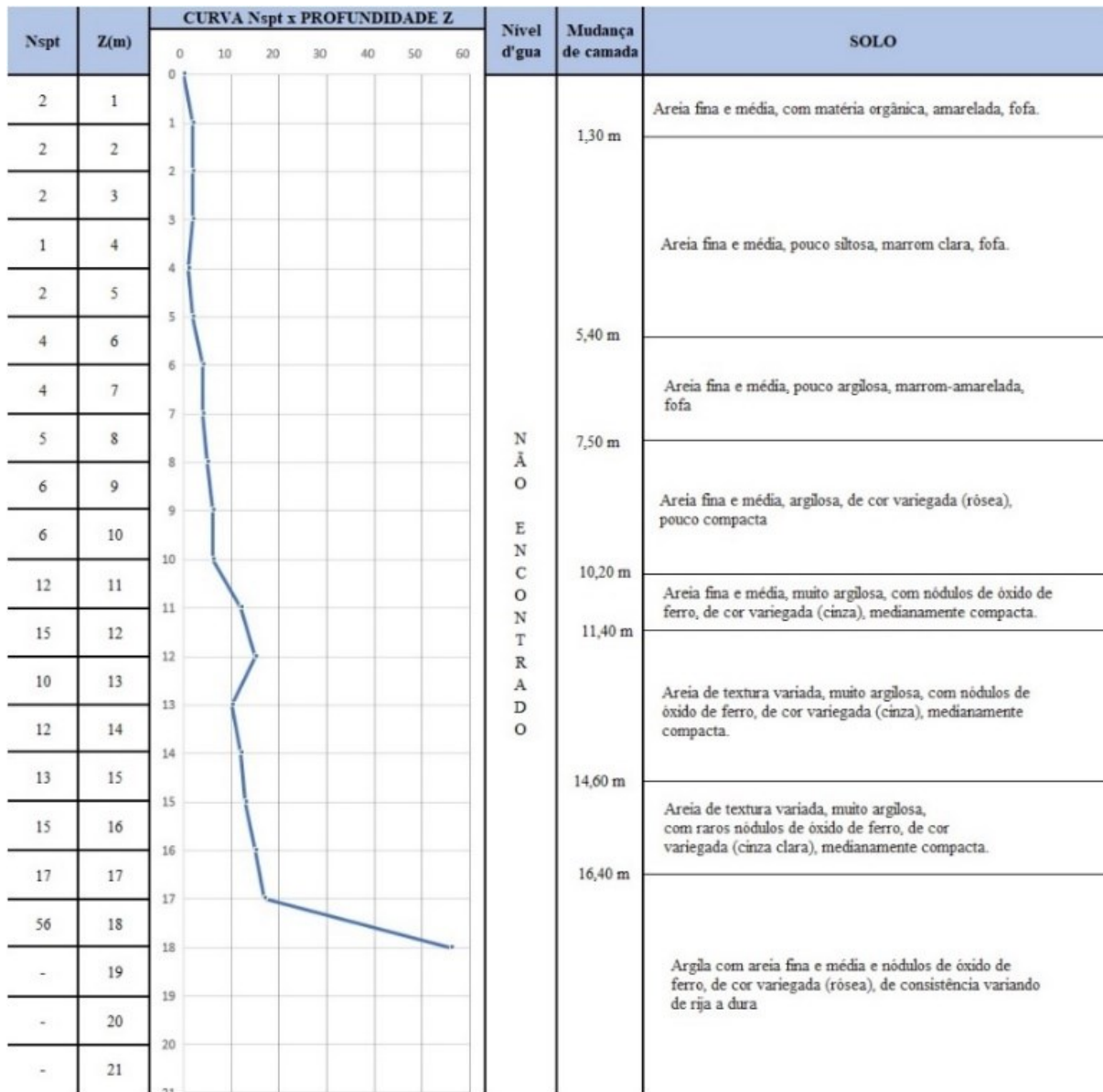
Fonte: Autoria Própria

Figura 14 - Perfil de sondagem SP-02 da OBRA-2



FONTE: Autoria Própria

Figura 15 - Perfil de sondagem SP-03 da OBRA-2

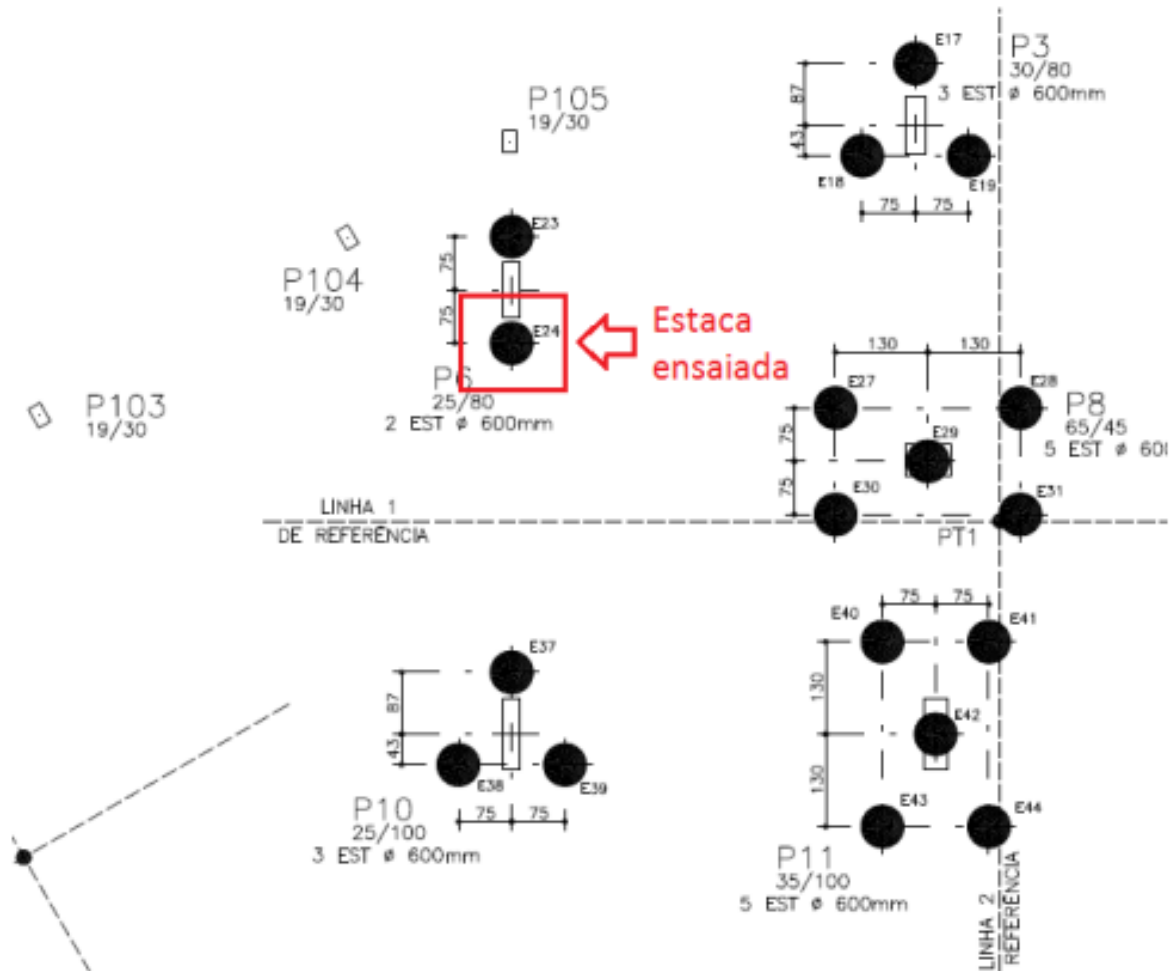


Fonte: Autoria Própria

3.3 CARACTERISTICAS DAS ESTACAS ENSAIADAS

A estaca utilizada na prova de carga da “OBRA-1” foi do tipo hélice contínua e de numeração E24 do pilar 6. A mesma possui 60 cm de diâmetro com 16,5 m de comprimento, 5 barras de aço CA-50 com diâmetro nominal de 20 mm e 600 cm de comprimento; 6 estribos com diâmetro nominal de 8 mm com comprimento de 160 cm espaçados a cada 100 cm e ainda 1 estribo no final da armação com 8 mm de diâmetro nominal e 130 cm de comprimento, na Figura 17 está presente toda a geometria da estaca. A locação das estacas

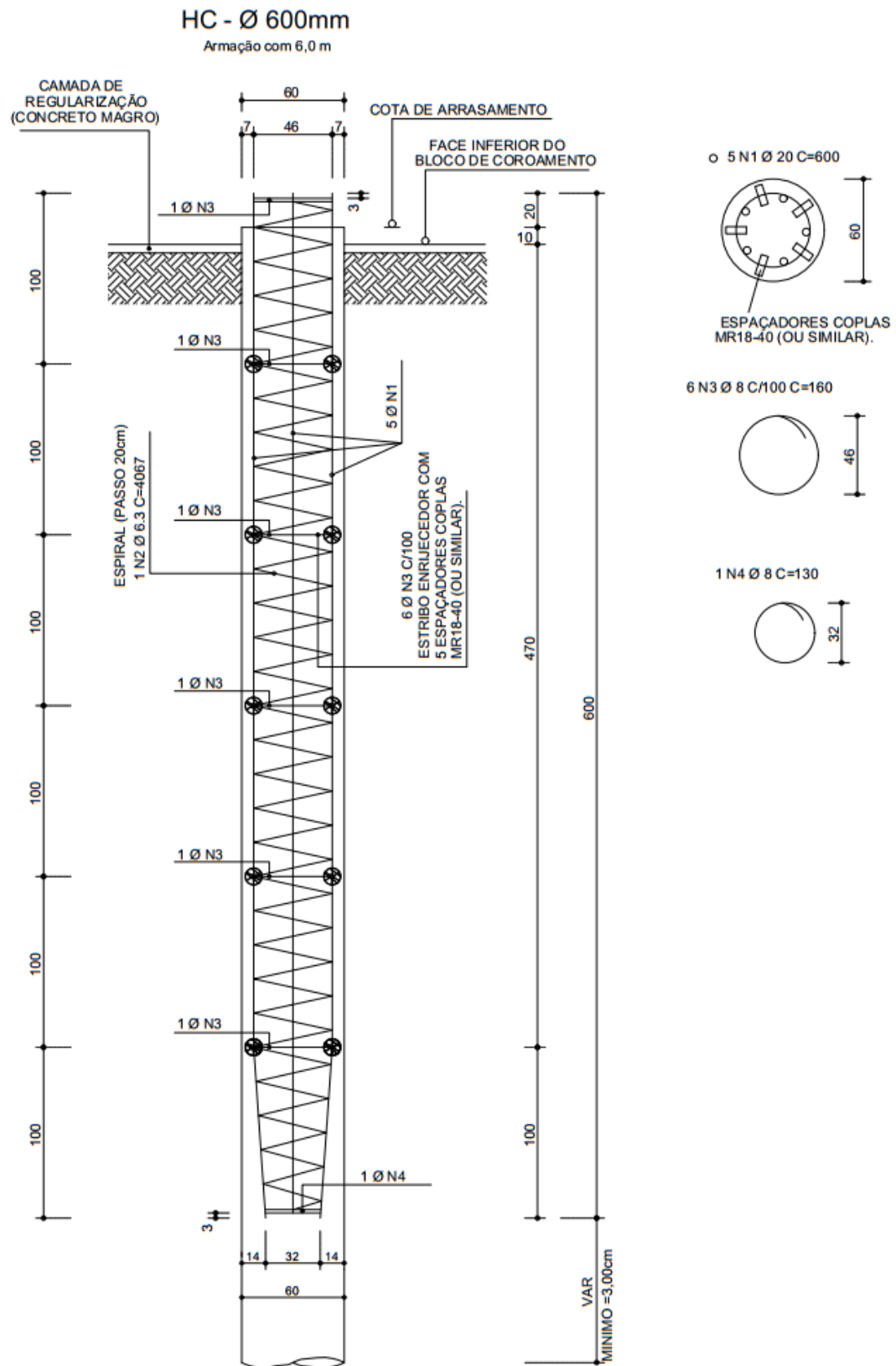
Figura 17 - Locação da estaca ensaiada OBRA-1



Fonte: Relatório de sondagem da Obra

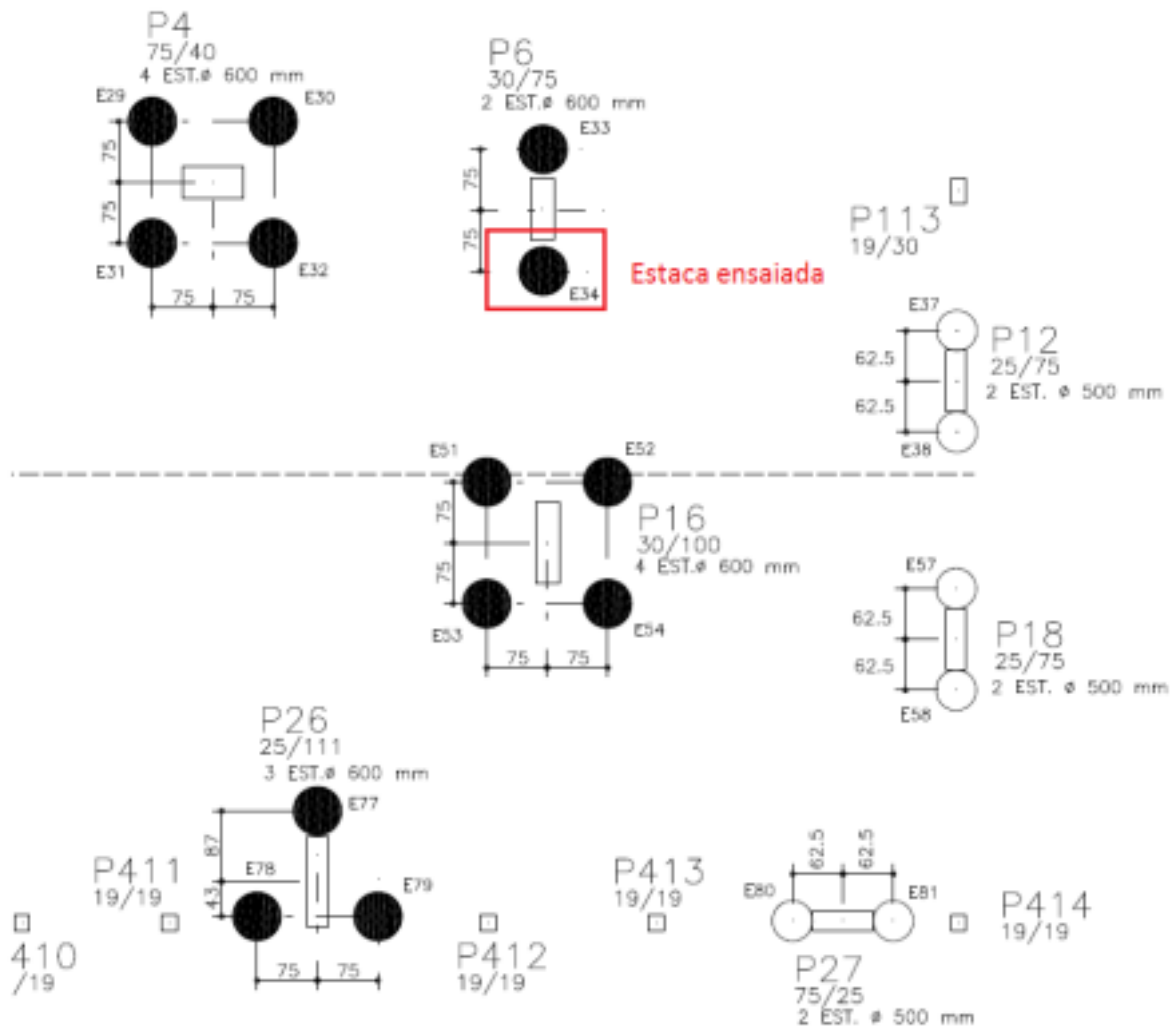
A estaca utilizada na prova de carga da “OBRA-2” assim como na “OBRA 1”, à estaca é do tipo hélice contínua, com o título de E34 do pilar 6. A mesma possui 60cm de diâmetro com 18m de comprimento, 5 barras de aço CA-50 com diâmetro nominal de 20mm e 600 cm de comprimento; 6 estribos com diâmetro nominal de 8mm com comprimento de 160cm espaçados a cada 100cm e ainda 1 estribo no final da armação com 8mm de diâmetro nominal e 130cm de comprimento, na Figura 19 está presente toda a geometria da estaca. A locação das obedece ao projeto de estaqueamento da obra, na Figura 20 podemos ver parte da planta de locação das estacas.

Figura 18 - Geometria da estaca ensaiada OBRA-2



Fonte: Projeto de fundações da Obra

Figura 19 - Locação da estaca ensaiada OBRA-2



Fonte: Relatório de sondagem da Obra

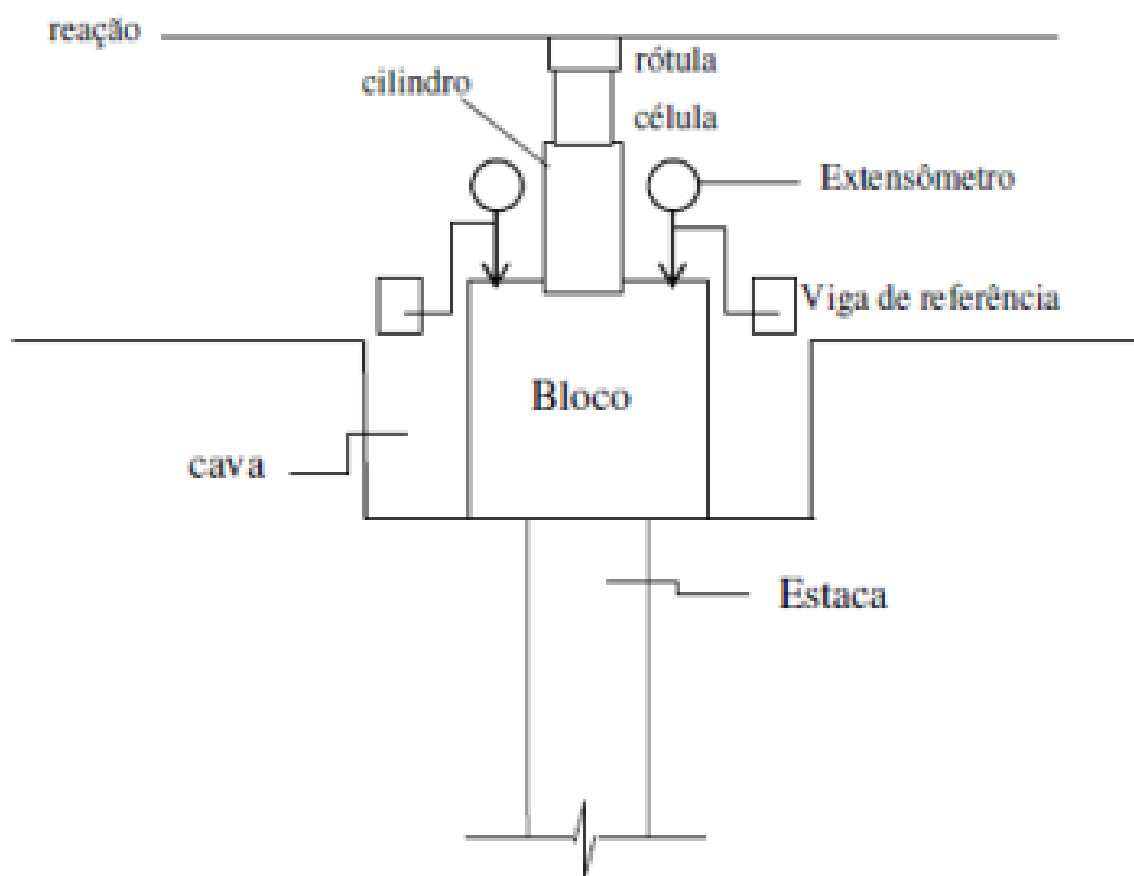
3.4 PROVA DE CARGA ESTÁTICA

A prova de carga escolhida em ambas as obras, “OBRA-1” e “OBRA-2”, foi do tipo rápida em função do tipo de solo encontrado nas sondagens que é em grande parte granular. O esquema de montagem da prova de carga em ambas as obras são os mesmos, podemos observar na Figura 21, assim como a Figura 22. Com a carga mantida constante em estágios de 10 minutos de duração e carga aplicada em estágio equivalente a 10% da carga prevista. Quando atingida a carga máxima foi feita quatro leituras: a 10 min, 30 min, 60 min e 90min, sendo constatado que em 120 min os recalques haviam cessado. Com isso inicia-se o descarregamento, feito em cinco estágios a cada 10 minutos.

Na estaca a ser ensaiada foi feito um bloco de coroamento com dimensões 0,7 x 0,7 x 0,7 m para receber as cargas de modo uniforme. As cargas foram aplicadas por um cilindro

hidráulico com capacidade de 4000 kN e medidas a partir de células de carga que tem capacidade de realizar cargas de até 6000 kN as leituras são obtidas através de um *data logger*. A montagem do ensaio é feita com o cilindro hidráulico sobre o bloco de coroamento, a célula de carga e a rótula são utilizadas na conservação dos carregamentos. Os recalques são medidos por 4 extensômetros fixados nas vigas de referência que possui 3 m de comprimento, colocadas transversalmente à cava da estaca.

Figura 20 - Esquema de montagem da prova de carga



Fonte: Relatório de sondagem da Obra

Figura 21 - Montagem da prova de carga



Fonte: Relatório de sondagem da Obra

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

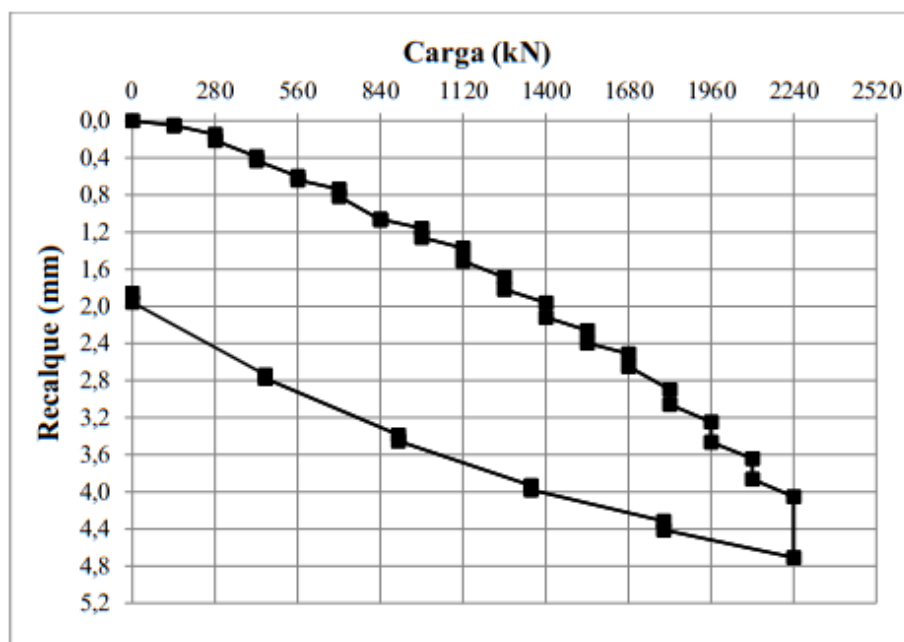
Neste tópico, será abordado a curva da capacidade de carga estática da estaca ensaiada, para cada obra. Assim como, a estimativa da capacidade de carga pelos métodos semi-empíricos de Aoki-Velloso (1975), Decourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996). Como também, as curvas Carga (P) x Recalque (ρ) através do critério de ruptura pelo método de Van Der Veen (1953).

4.1 CURVAS DA PROVA DE CARGA ESTÁTICA

A carga admissível indicada no projeto de fundações foi igual a 1400 kN. As provas de cargas foram levadas, nas obras 1 e 2, até uma carga máxima igual a 2240 kN, o equivalente a 1,6 vezes a carga admissível de projeto.

A carga máxima atingida, de acordo com o relatório da prova de carga da “OBRA-1”, foi de 2240 kN, com recalque total de 4,71 mm. Sendo 1,86 mm de recalque residual e recalque elástico de 2,85 mm. A Figura 23 apresenta a curva Carga (kN) x Recalque (mm) da prova de carga estática.

Figura 22 - Curva da Prova de Carga Estática Obra-1

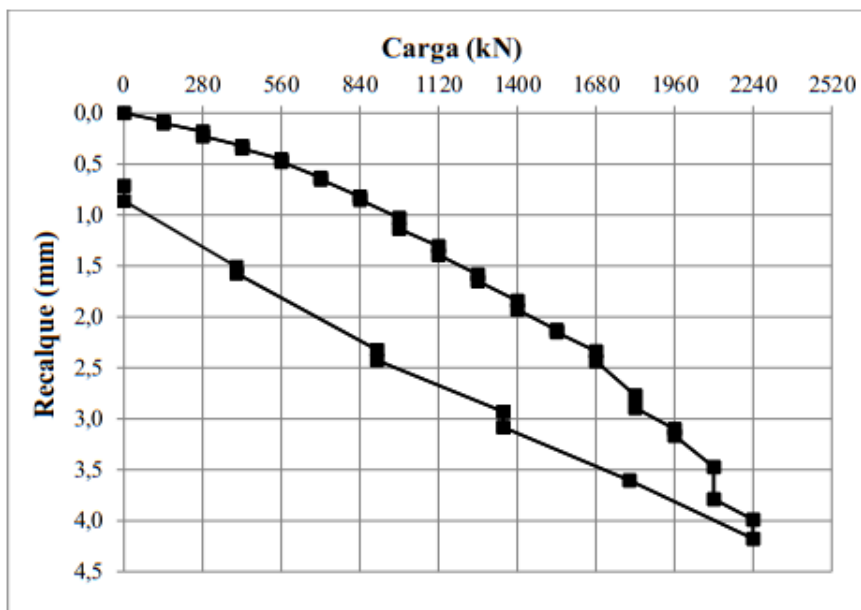


Fonte: Relatório de sondagem da Obra.

Através do relatório de prova de carga estática da OBRA-2, temos carga máxima atingida de 2240 kN com recalque total de 4,18 mm. Sendo 0,71 mm de recalque residual e

recalque elástico de 2,85 mm. Na Figura 24 apresenta a curva Carga (kN) x Recalque (mm) da prova de carga estática.

Figura 23 - Curva da Prova de Carga Estática Obra-2



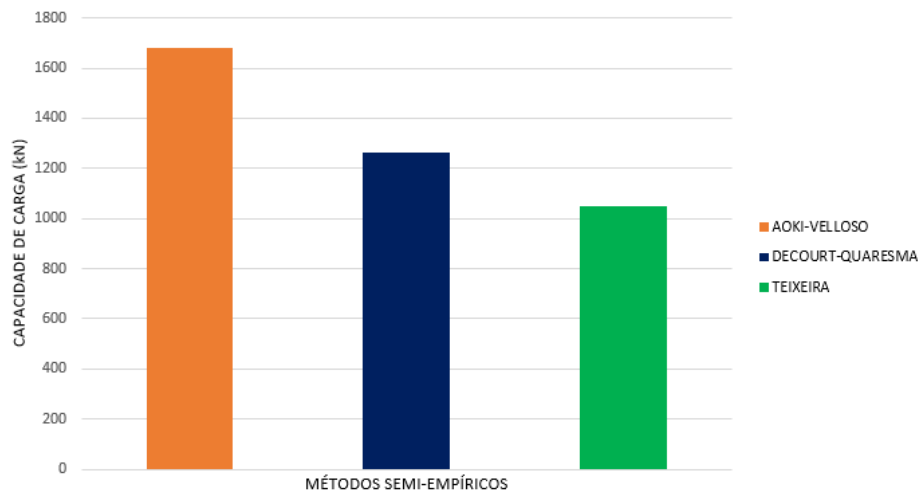
Fonte: Relatório de sondagem da Obra.

4.2 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE CARGA PELOS MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS

Através dos boletins de sondagem de simples reconhecimento com SPT das obras A e B, foi realizada a estimativa da capacidade de carga utilizando três métodos semi-empíricos consagrados na literatura: Aoki-Veloso, Decourt-Quaresma e Teixeira.

Os resultados dessa estimativa da capacidade de carga na OBRA 1, para o método de Aoki-Veloso foi igual a 1680,61 kN, para o método de Decourt-Quaresma foi de 1261,57 kN e para o método de Teixeira foi de 1046,83 kN. A Figura 25 mostra os valores da capacidade de carga de acordo com os métodos semi-empíricos.

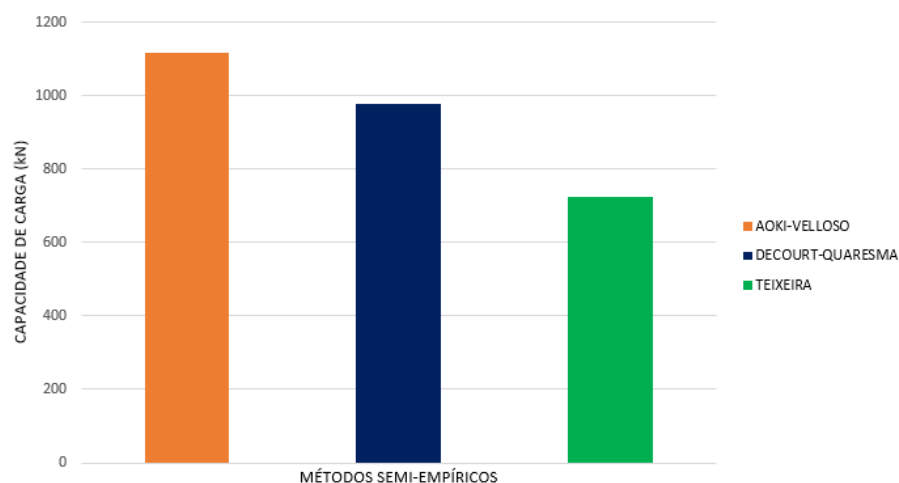
Figura 24 - Capacidade de carga para os métodos semi-empíricos OBRA-1



Fonte: Autoria Própria

Na OBRA-2 os resultados da estimativa da capacidade de carga foram mais baixos que na OBRA-1. No critério de Aoki-Velloso, a maior carga dentre os métodos semi-empíricos utilizados neste trabalho, a carga foi igual a 1116,52 kN, para o método de Decourt-Quaresma foi de 977,57 kN e para o método de Teixeira foi de 722,86 kN. A Figura 26 mostra os valores da capacidade de carga obtidos para a OBRA-2.

Figura 25 - Capacidade de carga para os métodos semi-empíricos OBRA-2



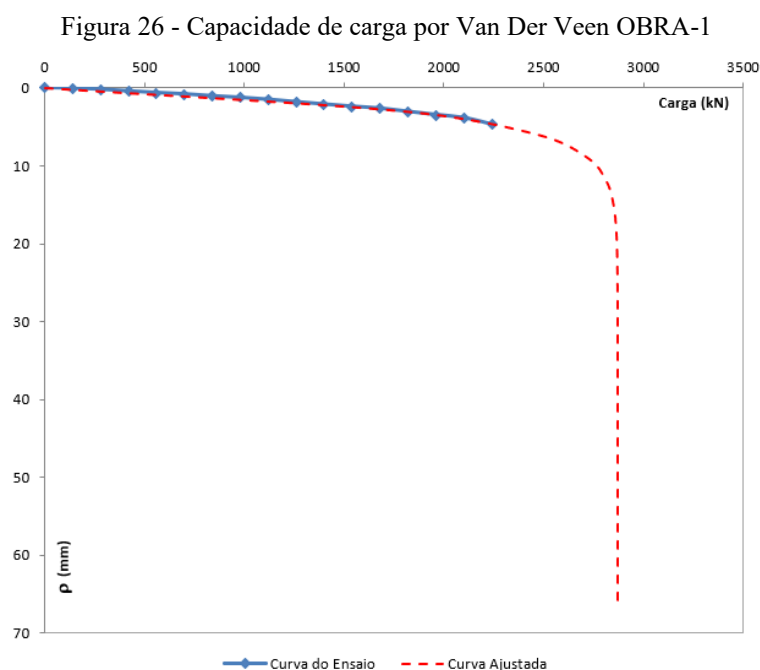
Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser visto nas figuras 25 e 26, em ambas as obras a capacidade de carga pelo método de Aoki-Velloso obtiveram valores superiores aos outros dois métodos (Decourt-Quaresma e Teixeira)

4.3 CAPACIDADE DE CARGA POR CRITÉRIO DE RUPTURA

Utilizando o relatório da prova de carga estática estabelecemos os resultados da capacidade de carga com as relações carga x recalque pelos critérios de Van Der Veen.

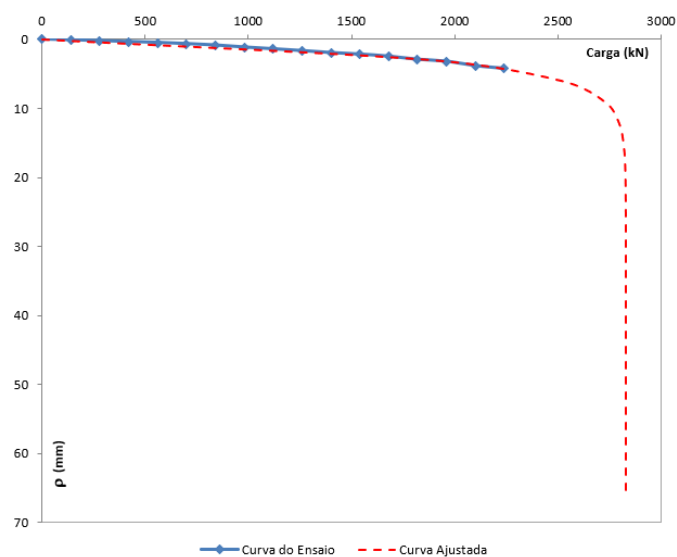
O resultado da capacidade de carga sobre a curva ajustada utilizando o critério de Van Der Veen na OBRA-1 foi de 2870 kN e r^2 igual a 0,99916, ou seja, temos um bom ajuste da curva, com 28,12%, o que mostra que a extrapolação por esse método é aceitável. A Figura 27, mostra o gráfico com os valores da prova de carga do ensaio, e também da curva ajustada a partir do método citado acima.



Fonte: Autoria Própria.

Utilizando o critério de Van Der Veen na OBRA-2 a curva ajustada obteve o valor da capacidade de carga igual a 2830 kN e r^2 igual a 0,99876, ou seja, temos um bom ajuste da curva, com 26,34%, o que mostra que a extrapolação por esse método para essa capacidade de carga também é aceitável. Na Figura 28 podemos ver a curva do ensaio e a curva ajustada.

Figura 27 - Capacidade de carga por Van Der Veen OBRA-2



Fonte: Autoria Própria.

4.4 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Foi realizada uma comparação da capacidade de carga pelos métodos semi-empíricos com a curva das provas de carga extrapoladas pelo método de Van der Veen.

Analisando a Tabela 9 percebe-se que resultado experimental de capacidade de carga obtido pela prova de carga estática ajustada pelo método de Van der Veen, foi bem superior a capacidade de carga obtida pelos modelos semi-empíricos. Isso significa que as estacas executadas poderiam suportar uma carga superior a estimada em projeto. Em outras palavras, as estacas da obra estão com uma margem considerável de segurança. Comparando os resultados entre as OBRAS 1 e 2, verifica-se uma maior dispersão de resultados entre os modelos semi-empíricos. Isso se deve à variação da resistência N_{spt} , apesar dos boletins de sondagem serem relativamente semelhantes. Quanto aos resultados experimentais entre as obras 1 e 2 verifica-se que os resultados foram muito semelhantes.

Tabela 9 – Capacidade de carga para todos os critérios de ruptura

CAPACIDADE DE CARGA (kN)		
CRITÉRIOS DE RUPTURA	OBRA-1	OBRA-2
AOKI-VELLOSO	1680,61	1116,52
DECOURT-QUARESMA	1261,57	977,57
TEIXEIRA	1046,83	722,86
VAN DER VEEN	2870	2830

Fonte: Autoria Própria.

5 CONCLUSÃO

A ideia principal do trabalho constituiu em determinar a capacidade de carga de estacas hélice contínua localizadas em duas obras em Natal-RN. Desse modo, foi comparada a capacidade de carga obtida pelos métodos semi-empíricos, Aoki-Velloso, Decourt-Quaresma e Teixeira, com os resultados das provas de carga estáticas ajustadas pelo método de Van der Veen.

Ao comparar os resultados da capacidade de carga pelos métodos semi-empíricos com a curva das provas de carga extrapolada pelo método de Van der Veen, os resultados da capacidade de carga pelos métodos semi-empíricos foram menores que os resultados obtidos pelo método de Van der Veen, o que nos leva a concluir que as estacas executadas estão dentro das margens de segurança.

Por fim, sugere-se que outros trabalhos acadêmicos sejam realizados, com análises de outros tipos de fundações (superficiais ou profundas) e outros métodos de capacidade de carga encontrado na literatura.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 6122 (2019). **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6484 (2020). **Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 16903 (2020). **Solo - Prova de carga estática em fundações profundas**. Rio de Janeiro.

AZEREDO, H. A. **O edifício até sua cobertura**: prática da construção civil. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1997. 182 p.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. D. A. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações - Mecânica das Rochas, Fundações e Obras de Terra** - Vol. 2, 7ª ed. LTC: Grupo GEN, 2015.

CINTRA, J. C. A., AOKI, N. **Fundações por estacas**: projeto geotécnico. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; TSUHA, C. H. C.; GIACHETI, H. L. **Fundações**: ensaios estáticos e dinâmicos. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 144p.

GEOFIX. **Estaca Hélice Contínua**. Disponível em: <http://www.geofix.com.br/servico-ehc.php>. Acesso em: 19 mar. 2022

JOPPERT, I. J. **Fundações e contenções de edifícios**. 1ªed. São Paulo: Pini, 2007.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**: Critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VWFFUNDAÇÕES. **Sondagem percussão**. Disponível em: <https://www.vwffundacoes.com.br/sondagem-percussao>. Acesso em: 14 abr. 2022