



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

ANA VITÓRIA DE SOUZA FARIAS

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS ESCAVADAS
UTILIZANDO SONDADE SPT ANTES E APÓS ESCAVAÇÃO DO SUBSOLO**

ANGICOS

2023

ANA VITÓRIA DE SOUZA FARIAS

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS ESCAVADAS
UTILIZANDO SONDAGEM SPT ANTES E APÓS ESCAVAÇÃO DO SUBSOLO**

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 Dantas Gomes de Araújo,
Prof. Dr.

ANGICOS

2023

© 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 tomar-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.

F224a Farias, Ana Vitória.
ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS
ESCAVADAS UTILIZANDO SONDAGEM SPT ANTES E APÓS
ESCAVAÇÃO DO SUBSOLO / Ana Vitória Farias. - 2023.
37 f. : il.

Orientador: Arthur Dantas Gomes de Araújo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2023.

1. SPT. 2. Alívio de tensões. 3. Capacidade de
carga. 4. Desconfinamento do solo. 5. Resistência
lateral. I. Gomes de Araújo, Arthur Dantas ,
orient. II. Título.

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

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 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.

ANA VITÓRIA DE SOUZA FARIAS

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS ESCAVADAS
UTILIZANDO SONDAÇÃO SPT ANTES E APÓS ESCAVAÇÃO DE UM SUBSOLO**

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: 09 / 10 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Avelino Lourenço da Silva Júnior, Engenheiro
Membro Examinador

Isaura de Farias Freitas (In Memoriam)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me sustentado até aqui, me dando força e sabedoria nos momentos de dificuldade durante essa caminhada.

Agradeço a minha família por sempre estarem ao meu lado. Meus pais: Izanir de Souza e Silvonês de Farias Freitas, e meus irmãos: Ana Clara de Souza Farias e Isaac Ramon de Souza Farias, agradeço a vocês por todo apoio, confiança e incentivo durante toda essa caminhada. Foram cinco anos de dedicação e sei que não trilhei esse caminho sozinha.

Minha família em geral, pois me incentivaram a ser melhor e dar o melhor de mim, sempre acreditaram no meu potencial e contribuíram para minha formação pessoal.

Agradeço Orientador, Arthur Gomes Dantas De Araújo, por toda a paciência e calma durante a orientação desse trabalho.

Agradeço a Banca Examinadora pela disponibilidade e tempo para avaliar este trabalho.

Agradeço aos meus amigos e companheiros de jornada, Vinícius Vale, Deverson Rafael, Ingrid Tito, Pablo Klinsmann, Pedro Henrique, Vanessa Karen e Adna, por todos os momentos em que estiveram comigo me ajudando e dando força. Agradeço de coração a todos os conselhos que ouvi de vocês, todas as vezes que me tranquilizaram sem nem saberem, torço muito pelo sucesso de todos vocês assim como sei que torcem por mim.

Agradeço ao meu namorado, Obadias Constantino Gurgel de Menezes, por todo apoio e por constantemente me lembrar que sou capaz. Agradeço por todas as vezes que se esforçou para me tranquilizar nos momentos de ansiedade e estresse.

Agradeço também aos meus amigos Karla Suzanna, Robert Danilo e Nelson Bezerra que acompanham minha trajetória desde o Ensino Fundamental e sempre me deram apoio.

Agradeço também as minhas 18 luzes roxas (Bangtan Girls) espalhadas pelo Brasil que tem me dado apoio e me incentivado a ir além. Agradeço a vocês por sempre me enviarem palavras carinhosas que me aquecem o coração.

A estrada segue sempre em frente
Deixando a porta onde começa
Agora distante a estrada continua
E eu devo segui-la, se eu puder

Conquistando-a com meus pés ávidos
Até que ela se junte a um grande caminho
Onde muitas trilhas e tarefas se encontram
E para onde depois? Não sei dizer.

J.R.R. Tolkien

RESUMO

Ao executar uma fundação é necessário conhecer previamente as características do subsolo, normalmente através da sondagem de simples reconhecimento, com medição de SPT. O tipo de solo e a resistência a penetração (N_{spt}) são resultados importantes para a estimativa da capacidade de carga através dos métodos semi-empíricos. Normalmente, a sondagem é executada no início da obra e no nível natural do terreno. Porém, em obras que apresentem escavação acentuada é importante realizar uma nova campanha de sondagem, pois esse processo provoca um alívio de tensões no terreno. Dessa maneira, este trabalho foi realizado com o intuito de observar tais influências, em que se comparou os resultados de sondagens de duas campanhas realizadas em uma mesma obra no bairro de Capim Macio, Município de Natal/RN. A primeira campanha de sondagem foi realizada no nível natural do terreno e a segunda no nível da escavação da fundação. A capacidade de carga foi estimada sem considerar a parcela de ponta pelos métodos de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996) para estacas com diferentes comprimentos e mesmo diâmetro. De modo geral, foi observado que a segunda campanha de sondagem apresentou valores de resistência a penetração 52% menores, nos primeiros 5 m de profundidade, em comparação aos resultados da primeira campanha de sondagem. Além disso, pode-se concluir que quanto mais curta for a estaca, maior será a influência da redução de resistência do N_{spt} , no cálculo da capacidade de carga.

Palavras-chave: SPT. Alívio de tensões. Desconfinamento do solo. Capacidade de carga. Resistência lateral.

ABSTRACT

When laying a foundation, it is necessary to know the characteristics of the subsoil beforehand, usually by means of a simple reconnaissance survey with SPT measurement. The type of soil and the penetration resistance (SPT) are important results for estimating the bearing capacity using semi-empirical methods. Boring is normally carried out at the start of the project and at the natural level of the ground. However, in the case of works involving heavy excavation, it is important to carry out a new drilling campaign, as this process relieves stresses in the ground. This study was therefore carried out with the aim of observing these influences, comparing the results of two drilling campaigns carried out on the same construction site in the Capim Macio neighborhood, in the municipality of Natal/RN. The first campaign was carried out at the natural level of the ground and the second at the level of the foundation excavation. The load capacity was estimated without considering the tip portion using the methods of Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) and Teixeira (1996) for piles with different lengths and the same diameter. In general, it was observed that the second drilling campaign showed 52% lower penetration resistance values in the first 5 m of depth compared to the results of the first drilling campaign. In addition, it can be concluded that the shorter the pile, the greater the influence of the reduction in N_{spt} resistance when calculating the load capacity.

Keywords: SPT. Stress relief. Deconfinement of the soil. Bearing capacity. Lateral resistance.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Dedução da equação de capacidade de carga	20
Equação 2 - Capacidade de Carga por Aoki-Velloso	20
Equação 3 - Capacidade de carga por Dècourt - Quaresma	22
Equação 4 - Capacidade de carga por Teixeira.	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Execução do ensaio SPT	18
Figura 2 - Índice de resistência a penetração de acordo com o solo	18
Figura 3 - Localização do município de Natal/RN	24
Figura 4 - Locação dos furos no terreno	25
Figura 5 - Perfil do solo identificados nos furos F1 e F2	26
Figura 6 - Detalhamento da Estaca A	27
Figura 7 - Comparação entre NSPT	29
Figura 8 - Comparação por Aoki-Velloso (1975) entre RLs das Estacas A, B, C e D	30
Figura 9 - Comparação por Décourt-Quaresma (1978) entre RLs das Estacas A, B, C e D	31
Figura 10 - Comparação por Décourt-Quaresma (1978) entre RLs das Estacas A, B, C e D ..	32
Figura 11 - Resistência lateral (RL) na Estaca A	33
Figura 12 - Resistência lateral (RL) para Estaca B	33
Figura 13 - Resistência lateral (RL) para Estaca C	34
Figura 14 - Resistência lateral (RL) para Estaca D	34
Figura 15 - Diferença percentual entre RL para as estacas A, B, C e D	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de correção F_1 e F_2	21
Tabela 2 - Coeficiente K e razão de atrito α	21
Tabela 3 - Valores de α e β em função do tipo de estaca e solo	22
Tabela 4 - Coeficiente característico do solo C	22
Tabela 5 - Valores do parâmetro α	23
Tabela 6 - Valores do parâmetro β	23
Tabela 7 - Características das estacas usadas	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Justificativa.....	15
1.2. Objetivos	16
1.2.1. Objetivo geral	16
1.2.2. Objetivos específicos	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1. Sondagem SPT	16
2.1.1. Processo de perfuração	17
2.1.2. Amostragem.....	17
2.1.3. Critérios de paralisação.....	19
2.2. Determinação da capacidade de carga: métodos semiempíricos	19
2.2.1. Método de Aoki-Velloso (1975).....	20
2.2.2. Método de Décourt-Quaresma (1978)	21
2.2.3. Método Teixeira (1996)	23
3. METODOLOGIA	24
3.1. Local da sondagem analisada	24
3.2. Aspectos geotécnicos do terreno analisado	24
3.3. Características das estacas.....	27
4. RESULTADOS E ANÁLISES	28
4.1. Comparação entre as sondagens	28
4.2. Cálculos de capacidade de carga.....	29
4.2.1. Aoki – Velloso (1975)	30
4.2.2. Décourt – Quaresma (1978).....	30
4.2.3. Teixeira (1996)	31
4.2.4. Comparação entre os métodos	32

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

Antes da execução de uma obra de construção, é de fundamental importância que o profissional tenha conhecimento a respeito do tipo de solo presente naquela região. Dessa forma, realiza-se o ensaio de sondagem que consiste em uma investigação *in loco* cujo propósito é a identificação do nível de lençol freático, a existência de aterros, nível de rochas e a resistência a penetração, por meio desses dados é possível determinar a capacidade de carga suportada pelo solo (GALVÃO et al., 2019).

Assim, a capacidade de carga pode ser determinada através dos métodos semiempíricos, tais quais, Aoki – Velloso (1975), Décourt - Quaresma (1978) e Teixeira (1996), voltados a aplicações em estacas. Tais métodos tem base em correlações empíricas cujos resultados provém de ensaios *in situ* (CINTRA et al., 2010).

1.1. Justificativa

A investigação do solo é fundamental pois permite traçar a metodologia ideal de fundação a ser implementada. Ao realizar a sondagem geotécnica, deve-se também atentar a cota em que está se realizando a análise e a que será executada a fundação de fato, tendo em vista a retirada de maciço de solo que pode influenciar nos resultados de capacidade de carga.

É válido destacar também o apelo comercial nos grandes centros urbanos, mediante a valorização do metro quadrado (m^2) do terreno, que busca cada vez mais otimizar a área de construção. Com isso, há um aumento na profundidade do subsolo escavado visando um maior aproveitamento de área. Assim, esse alívio maior de tensões em decorrência dessa escavação afeta sobremaneira a resistência lateral do sistema solo-fundação bem como a capacidade de carga.

Dessa forma, o presente trabalho busca comparar os resultados do boletim de sondagem SPT (“Standard Penetration Test”) de duas campanhas efetuadas em um mesmo terreno, uma realizada ao nível natural e outra a aproximadamente -5 m da cota do terreno, com a finalidade de estudar as divergências entre as resistências obtidas a uma profundidade convergente entre as campanhas e como estas influenciam no cálculo da capacidade de carga do solo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar a capacidade de carga de estacas escavadas através de duas campanhas de sondagem SPT: a primeira realizada na cota do terreno natural e a segunda realizada após escavação destinada ao subsolo de um edifício.

1.2.2. Objetivos específicos

- Comparar a variação da resistência N_{spt} das duas campanhas de sondagem SPT;
- Comparar a capacidade de carga obtida pelos métodos semiempíricos: Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996);
- Analisar a influência do comprimento da estaca no cálculo da capacidade de carga utilizando as duas campanhas de sondagem SPT.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Ao formular um projeto para fundação de uma obra, deve-se levar em consideração as tensões a que o solo estará submetido, em decorrência do próprio peso e as tensões ligadas ao carregamento na superfície. A tensão vertical σ_v devido ao maciço de solo está diretamente associada aos cálculos de capacidade de carga (CINTRA et al., 2012).

De acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2020), é possível chegar à resistência do solo por meio do ensaio de sondagem SPT (“Standard Penetration Test”), sendo essa diferente dependendo do tipo de solo encontrado ao longo da profundidade analisada. Essa resistência é uma das características levadas em consideração ao se determinar a capacidade que um solo tem de suportar uma determinada carga sem se romper, como é possível observar a partir dos métodos de Aoki-Velloso, Décourt-Quaresma e Teixeira.

2.1. Sondagem SPT

O ensaio SPT (“Standard Penetration Test”) é um método de execução de sondagem de simples reconhecimento de solo o qual consiste na cravação e perfuração dinâmica de um amostrador-padrão a cada metro. Por intermédio desse ensaio é possível obter informações como: tipo de solo, profundidade de sua ocorrência, posição do nível de água, bem como, o índice de resistência a penetração N a cada metro analisado (NBR 6484, 2020).

Conforme Cintra *et al.* (2013), esse tipo de ensaio é o mais usado no Brasil, sendo essencial sua execução antes de se elaborar qualquer projeto de fundação. Através da sondagem, o profissional saberá o tipo de solo em que se está trabalhando assim como sua resistência, dessa maneira poderá traçar a melhor metodologia de fundação que atenda as características do maciço analisado.

2.1.1. Processo de perfuração

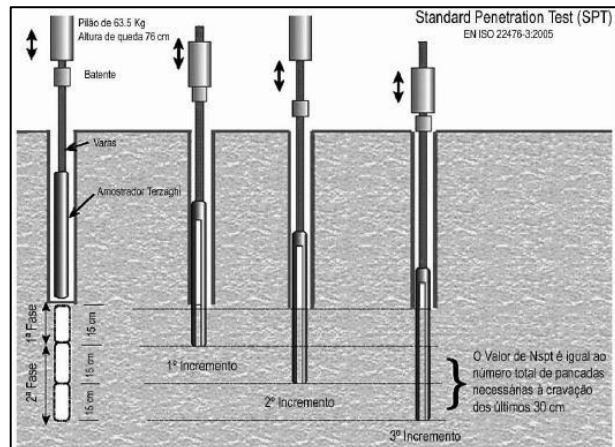
A NBR 6484 (ABNT, 2020) estipula que após a locação e identificação com piquetes dos furos para sondagem, deve-se fazer a tradagem a seco, ou seja, escavar até a profundidade de 1 m com trado e instalar um tubo de revestimento para evitar que o furo desmorone. Se no decorrer do procedimento, é observado a presença de água, a perfuração deve ser interrompida para registro do nível de água (NA) encontrado no furo de sondagem. Ao atingir o NA, a perfuração prossegue por meio de um sistema de circulação de água, constituído por hastes rosqueadas introduzidas dentro do tubo de revestimento.

Posteriormente, os detritos de solos podem ser coletados por meio da água que retorna a superfície por entre a haste e o revestimento. Deve-se anotar as profundidades das camadas de transição identificadas, seja por exame tátil-visual ou pela mudança de coloração dos materiais trazidos pelo trado ou pela circulação de água (NBR 6484, 2020).

2.1.2. Amostragem

Após a perfuração do furo de sondagem, usa-se um aparelho denominado amostrador-padrão para ser feita a coleta de parte representativa de solo (Figura 1). Esse aparelho, desce até a profundidade do furo de sondagem e deve penetrar 45 cm no solo com o auxílio de um martelo que deve cair em queda livre exercendo impactos em uma cabeça de bater. Ao atingir os 45 cm, o índice de resistência (N_{SPT}) é representado por meio da soma dos golpes dos últimos 30 cm de penetração amostras (NBR 6484, 2020).

Figura 1 - Execução do ensaio SPT



Fonte: Afonso, 2016

Conforme Cintra *et al.* (2013) aborda, para a cravação dos 45 cm em solos mais resistentes, são necessários muitos golpes, por outro lado o número de impactos diminui em solos menos resistentes como é possível observar na Figura 2. De acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2020), se durante a cravação do amostrador-padrão, qualquer um dos três segmentos ultrapassar o número de 30 golpes ou se o amostrador não avançar durante a aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo, então a cravação é interrompida.

Figura 2 - Índice de resistência a penetração de acordo com o solo

Solo	Índice de resistência a penetração N	Designação
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa
	5 a 8	Poco compacta
	9 a 18	Medianamente compacta
	19 a 40	Compacta
	> 40	Muito compacta
Areias e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média
	11 a 19	Rija
	20 a 30	Muito rija
	> 30	Dura

Fonte: Adaptada de NBR 6484:2020

Segundo a NBR 6484 (ABNT, 2020), as amostras colhidas devem ser resguardadas em recipientes herméticos de modo que suas dimensões permitam acondicionar ao menos um

cilindro de solo recolhido do bico do amostrador-padrão. Estes têm de estar bem identificados e posteriormente colocados em sacos ou caixas, de forma que não se abram ou rasguem para assim não misturar as amostras. O ensaio prossegue com etapas alternadas de perfuração e amostragem até atingir algum critério de paralisação.

2.1.3. Critérios de paralisação

O critério de paralisação da sondagem é de responsabilidade do operador ou de seu contratante, contudo, na ausência de fornecimento de critério para paralisação a sondagem deve continuar até atingir os seguintes parâmetros, de acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2020):

- a. Avanço da sondagem até a profundidade na qual tenham sido obtidos 10m de resultados consecutivos indicando N (número de golpes) iguais ou superiores a 25 golpes;
- b. Avanço da sondagem até a profundidade na qual tenham sido obtidos 8m de resultados consecutivos indicando N iguais ou superiores a 30 golpes;
- c. Avanço da sondagem até a profundidade na qual tenham sido obtidos 6m de resultados consecutivos indicando N iguais ou superiores a 35 golpes;

Ainda segundo a NBR 6484 (ABNT, 2020), um outro critério que determina a paralisação da sondagem, é quando, no ensaio de avanço da perfuração por circulação de água, os avanços obtidos forem inferiores a 50 mm em cada período de 10 minutos indicando dessa forma, que o maciço é impenetrável ao trépano/peça de lavagem¹.

Assim, após a finalização da sondagem, deve-se elaborar o relatório do ensaio de simples reconhecimento. Esse documento deve conter uma descrição tátil-visual das amostras – identificando sua granulometria principal e secundária, cor e origem – número de golpes necessários para cravação do amostrador a cada 15 cm, posição do nível de água observado, profundidade aberta do furo, bem como a posição do revestimento (NBR 6484, 2020).

2.2.Determinação da capacidade de carga: métodos semiempíricos

Capacidade de carga admissível, de acordo com Cintra *et al.*, (2010), é tida como o valor de uma força que corresponde a resistência máxima a qual um sistema solo-fundação pode oferecer. A Norma Brasileira NBR 6122 (ABNT, 1996) conceitua como a força normal aplicada a uma estaca isolada, provocando assim recalques que a construção pode suportar sem

¹ Peça de aço com largura mínima de 62±5 mm, com diâmetro nominal de 25 mm, terminada em bisel e dotada de duas saídas laterais para água. Usado para perfuração com circulação de água.

apresentar complicações e oferecendo igualmente segurança contra ruptura do solo ou do elemento da fundação.

Dessa maneira, a capacidade de carga pode ser obtida através de métodos semiempíricos, tais quais: Aoki – Velloso (1975), Décourt – Quaresma (1978) e Teixeira (1996). Estes três métodos brasileiros são importantes e destacam-se na previsão da capacidade de carga para fundação com estacas. Para realização de seus cálculos, têm-se como base ensaios *in situ* como o SPT (*Standard penetration test*), este utiliza os valores dos índices de resistência a penetração (N) para determinação da capacidade de carga (R) (Equação 1),

Equação 1 - Dedução da equação de capacidade de carga

$$R = R_p + R_l$$

Fonte: Cintra *et al.*, 2010

em que R_p é determinado por meio do índice de resistência à penetração encontrado na cota de apoio da ponta da estaca e R_l é a média dos índices de resistência à penetração na camada de solo a uma determinada espessura.

2.2.1. Método de Aoki-Velloso (1975)

A capacidade de carga calculada pelo método de Aoki-Velloso é obtida através da Equação 2.

Equação 2 - Capacidade de Carga por Aoki-Velloso

$$R = \frac{K N_p}{F_1} A_p + \frac{\pi D}{F_2} \sum_1^n \alpha K N_l \Delta l$$

Fonte: Cintra *et al.*, 2010

sendo a primeira parcela da equação referente a resistência de ponta e a segunda, resistência lateral. A equação conta com fatores de correção (Tabela 1), F_1 e F_2 , relacionados ao tipo de estaca que está sendo usada, de acordo com Cintra et al. (2010).

Tabela 1 - Fatores de correção F1 e F2

Fatores de correção F1 e F2		
Tipos de Estaca	F1	F2
Franki	2,50	2F1
Metálica	1,75	2F1
Pré-Moldada	$1 + D/0,80$	2F1
Escavada	3,00	2F1
Raiz, Hélice contínua e Ômega	2,00	2F1

Fonte: Adaptado de Cintra *et al.*, 2010

Parâmetros como N_P e N_L são, por essa ordem, índice de resistência à penetração na cota de apoio da ponta da estaca e o índice de resistência a penetração médio na camada de solo (CINTRA *et al.*, 2010). Já o coeficiente K e a razão de atrito α irão variar de acordo com o tipo de solo a ser estudado, como ilustra a Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficiente K e razão de atrito α

Coeficiente K e razão de atrito α		
Solo	K (MPa)	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: Adaptado de Cintra *et al.*, 2010

2.2.2. Método de Décourt-Quaresma (1978)

O método de Décourt – Quaresma, apresentado na Equação 3 abaixo, introduz nas parcelas de resistência de ponta e lateral os fatores α e β (Tabela 3), respectivamente, além de

levar em consideração o coeficiente característico do solo (C) (Tabela 4). A Equação 3 conta ainda com a área da ponta da estaca (A_p), correlações (U) entre π e o diâmetro da estaca bem como a espessura (L) da camada analisada.

Equação 3 - Capacidade de carga por Décourt - Quaresma

$$R = \alpha C N_p A_p + \beta 10 \left(\frac{Nl}{3} + 1 \right) UL$$

Fonte: Cintra *et al.*, 2010

Tabela 3 - Valores de α e β em função do tipo de estaca e solo

Valores do 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	0,60	0,60	0,3*	0,6*	1,0*
Areias	0,50	0,50	0,3*	0,3*	1,0*
Valores do fator β					
Tipo de Solo	Tipo de Estaca				
	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	0,80	0,90	1,0*	1,5*	3,0*
Solos intermediários	0,65*	0,75*	1,0*	1,5*	3,0*
Areias	0,50	0,60	1,0*	1,5*	3,0*

Fonte: Adaptada de Cintra *et al.*, 2010

Tabela 4 - Coeficiente característico do solo C

Coeficientes C	
Tipo de Solo	C (KPa)
Argila	120,00
Silte argiloso	200,00
Silte arenoso	250,00
Areia	400,00

Fonte: Adaptada de Cintra *et al.*, 2010

2.2.3. Método Teixeira (1996)

Com base nos métodos de Aoki-Velloso e Dècourt-Quaresma, Teixeira apresentou o que seria uma espécie de equação unificada (Equação 4) em função dos parâmetros α e β .

Equação 4 - Capacidade de carga por Teixeira.

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

Fonte: Cintra *et al.*, 2010

O parâmetro α , apresentado na Tabela 5, relacionado a resistência de ponta é em função do solo e do tipo da estaca. Já β , apresentado na Tabela 6, relacionado a resistência lateral é em função do tipo de estaca e não depende da variabilidade do solo.

Tabela 5 - Valores do parâmetro α

Valores do parâmetro α				
Solo(4 < NSPT < 40)	Tipo de estaca - α (KPa)			
	Pré - Moldada e perfil metálico	Franki	Escavada a céu aberto	Raiz
Argila siltosa	100	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: Adaptada de Cintra *et al.*, 2010

Tabela 6 - Valores do parâmetro β

Valores do parâmetro β	
Tipo de estaca	β (KPa)
Pré - Moldada e perfil metálico	4,00
Franki	5,00
Escavada a céu aberto	4,00
Raiz	6,00

Fonte: Adaptada de Cintra *et al.*, 2010

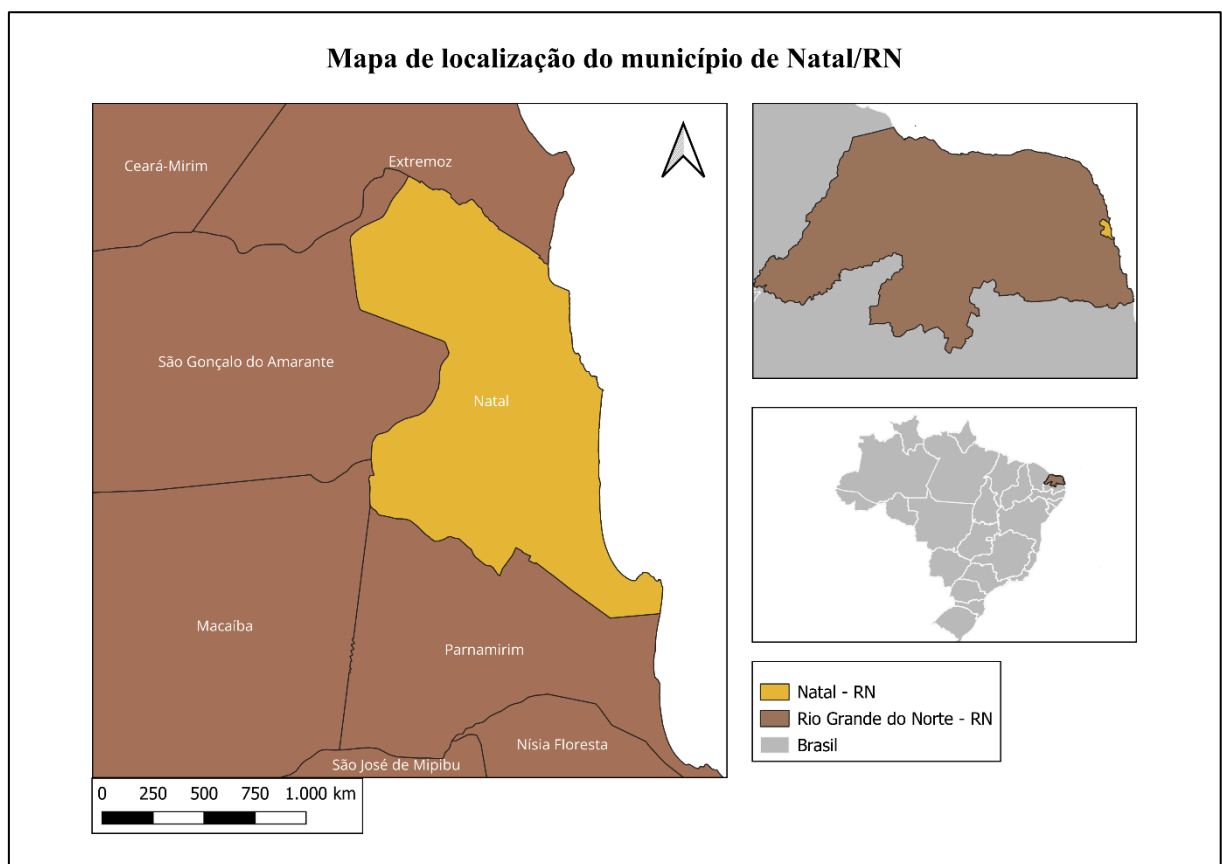
3. METODOLOGIA

A seguir serão apresentados os materiais e métodos utilizados, assim a localização da obra em que se executou os ensaios SPT para as duas campanhas.

3.1. Local da sondagem analisada

O presente trabalho é baseado nos relatórios de duas campanhas de sondagem SPT realizadas no bairro de Capim Macio, Município de Natal/RN (Figura 3).

Figura 3 - Localização do município de Natal/RN



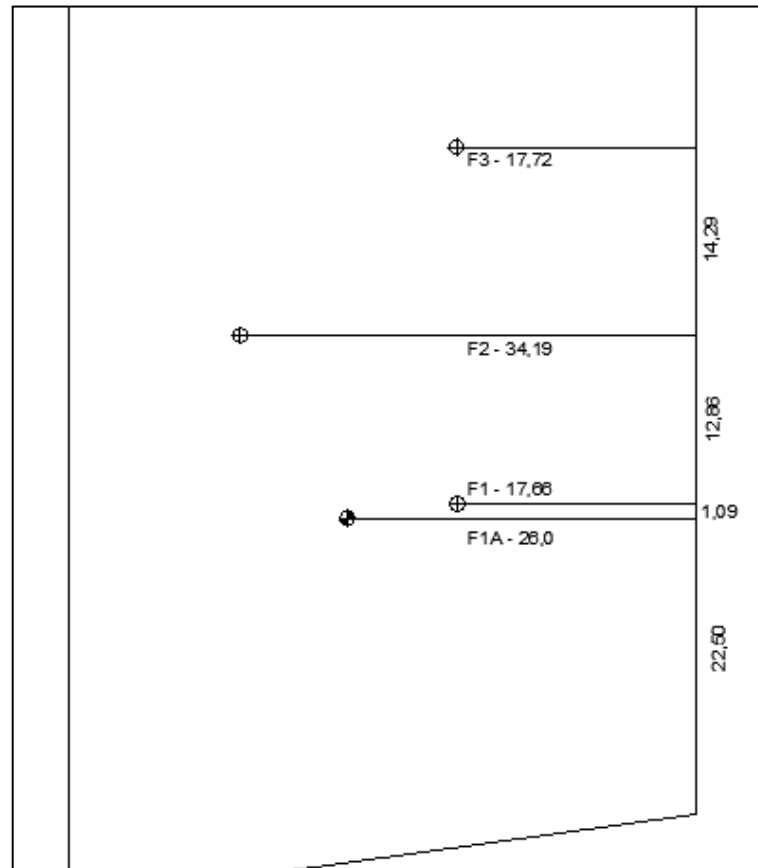
Fonte: Autoria própria, 2023

3.2. Aspectos geotécnicos do terreno analisado

Os aspectos geotécnicos do subsolo analisado foram definidos segundo a execução de sondagens de simples reconhecimento, com medidas de resistência a penetração dinâmica do Amostrador Padrão (SPT). Foram realizadas duas campanhas de sondagem, uma em 2019 e outra em 2022. Na primeira campanha, foram efetuados 3 furos (F1, F2 e F3) em um nível de referência X (NR-X) do terreno, e na segunda campanha foi efetuado apenas um furo (F1A) no

nível de referência Y (NR-Y), localizado a cinco metros abaixo do NR-X, como ilustrado na Figura 5. Os furos estudados nesse trabalho serão o F1 e o F1A, uma vez que se localizam próximos um do outro, como ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Locação dos furos no terreno



Fonte: Adaptado pelo autor, 2023

O perfil do solo encontrado em ambos os furos (F1 e F1A), em geral, são compostos inicialmente por camada de areia fina e média, seguida por camada de siltoargilosa. Seguinte a essas têm-se, camada de areia siltosa, logo após tem uma camada de areia argilosa e uma outra de argila arenosa. Durante a primeira campanha de sondagem, para o ponto F1, foi encontrado nível de água a aproximadamente 20 m de profundidade. Já, em F1A não foi identificado nível de água.

Figura 5 - Perfil do solo identificados nos furos F1 e F2

NR - X				NR - Y				
N.A	NSPT	PROFUNDIDADE	SOLO	N.A	NSPT	PROFUNDIDADE	SOLO	
			0	NÃO FOI ENCONTRADO N.A				
	2		1					
	2		2		Areia fina e média			
	1		3					
	4		4					
	2		5					
	4		6					
	6		7		Areia siltoargilosa			
	7		8		Areia siltosa			
	8		9					
	11		10					
	10		11					
	14		12					
	15		13		Areia Argilosa			
	19		14					
	18		15					
	20		16					
	24		17		Argila arenosa			
	20		18					
	20		19					
	17		20					
	50		21					
50		22						

			0					
2			1	Areia siltoargilosa				
2			2					
4			3		Areia siltosa			
4			4					
9			5					
10			6					
11			7					
15			8	Areia argilosa				
19			9					
18			10	Argila arenosa				
19			11					
20			12					
21			13					
22			14					
23			15					
24			16					
50			17					

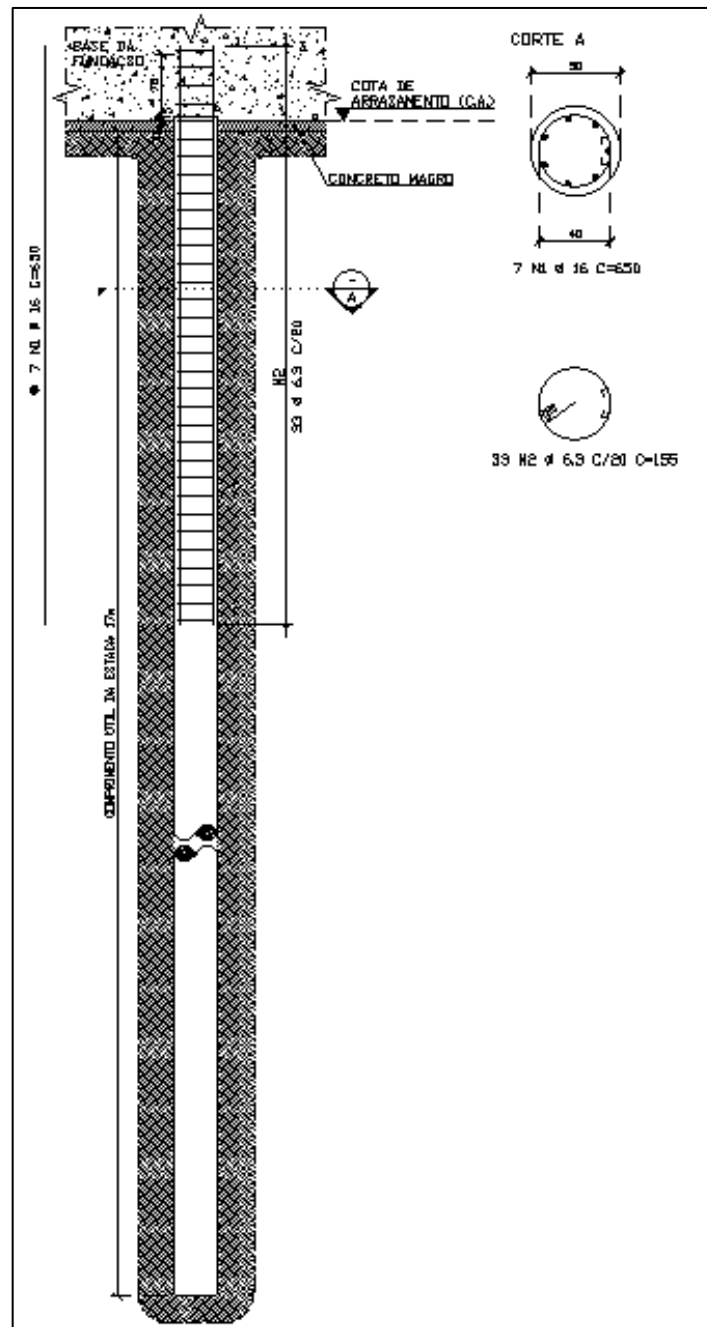
Legenda ----- Profundidade onde se inicia a análise

Fonte: Autoria própria, 2023

3.3.Características das estacas

Para a realização desse trabalho foi utilizada uma estaca (Estaca A) prevista em projeto, do tipo escavada mecanicamente, com f_{ck} de 25 MPa, aço CA -50 e diâmetro de 0,5 m e comprimento (L) de 17 m, como ilustra o detalhamento da Figura 6 abaixo.

Figura 6 - Detalhamento da Estaca A



Fonte: Adaptado pelo autor, 2023

Para efeito de comparação, considerou-se também Estacas B, C e D com as mesmas características da Estaca A, porém com comprimento (L) de 10m, 8m e 5m respectivamente.

Dessa maneira, o Tabela 7 abaixo apresenta as características das duas estacas utilizadas para execução dos cálculos de capacidade de resistência lateral.

Tabela 7 - Características das estacas usadas

ESTACAS				
Descrição	Tipo	Aço	Diâmetro (m)	Comprimento (m)
Estaca A	Escavada mecanicamente, fck 25 Mpa	CA – 50	0,5	17
Estaca B	Escavada mecanicamente, fck 25 Mpa	CA – 50	0,5	10
Estaca C	Escavada mecanicamente, fck 25 Mpa	CA – 50	0,5	8
Estaca D	Escavada mecanicamente, fck 25 Mpa	CA – 50	0,5	5

Fonte: Autoria própria, 2023

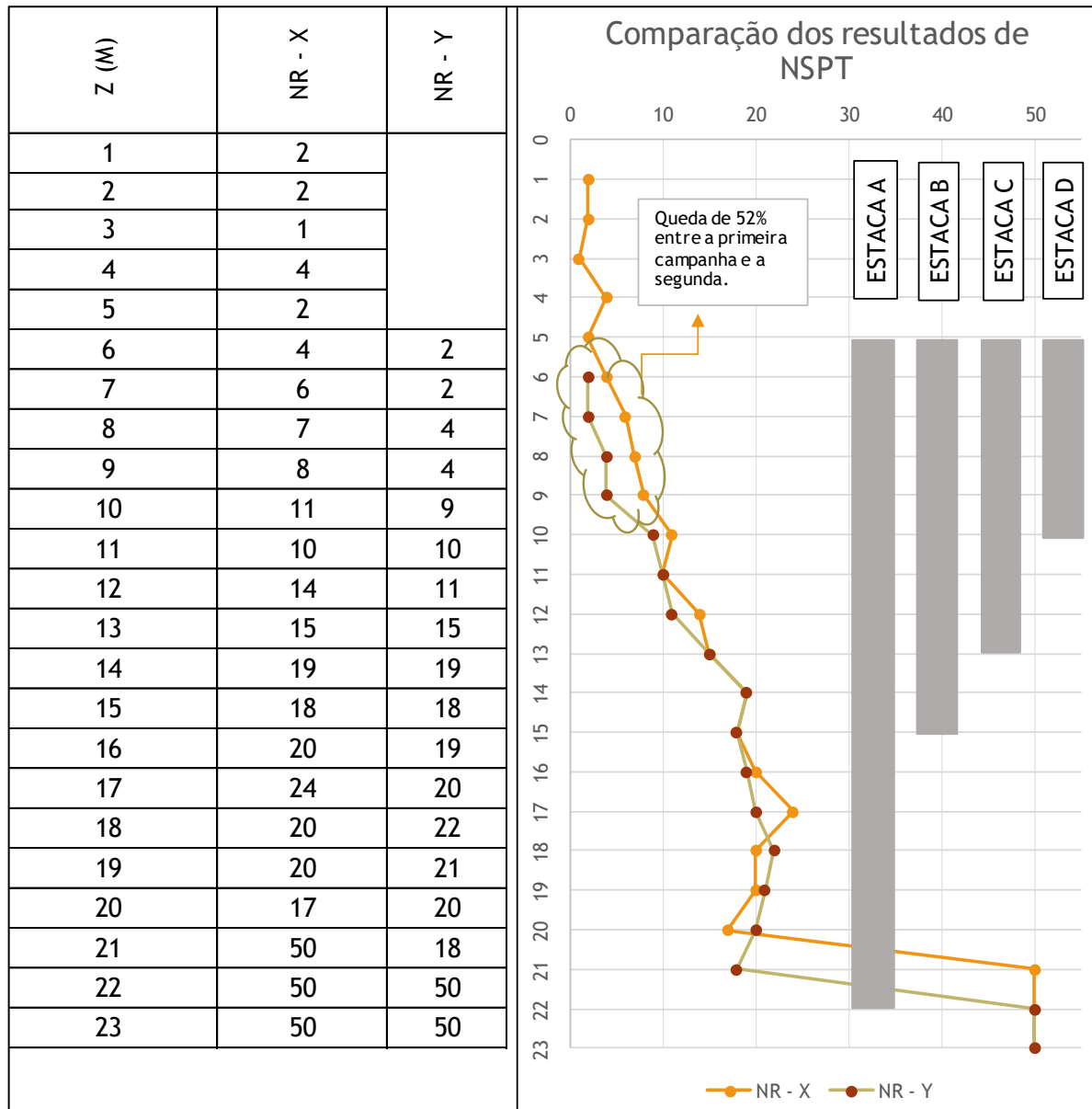
4. RESULTADOS E ANÁLISES

Abaixo serão apresentados os resultados obtidos através da comparação entre as duas campanhas de sondagem analisadas, bem como os cálculos de capacidade de carga realizados através dos métodos semiempíricos, Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996).

4.1. Comparação entre as sondagens

Com base nos resultados apresentados no boletim das campanhas 1 e 2, foi observado que devido o alívio de tensões, em decorrência do desconfinamento do solo, os valores de resistência a penetração das primeiras camadas ensaiadas diminuem em 52%. Na sondagem 2, apenas após a profundidade igual a 5 m, que a resistência a penetração, N_{spt} , se torna semelhante aos valores da sondagem 1 (Figura 7).

Figura 7 - Comparação entre NSPT



Fonte: Autoria própria, 2023

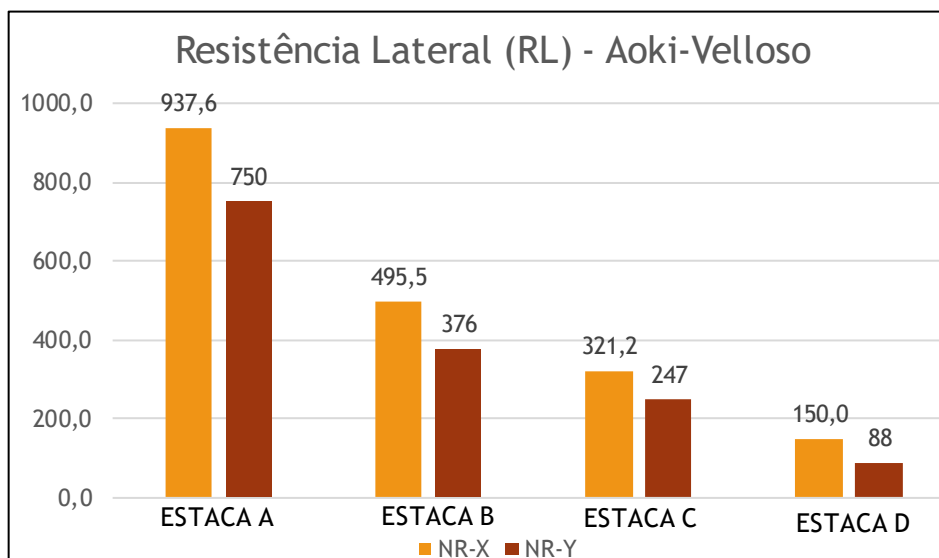
4.2.Cálculos de capacidade de carga

Abaixo serão apresentados os resultados dos cálculos da capacidade de carga utilizando os métodos de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996). Nesse trabalho não foi considerado o resultado da resistência de ponta dos métodos. Além disso, como houve o desconfinamento de 5 (cinco) metros do maciço, para a realização dos cálculos, adotou-se profundidades Z (m) convergentes entre as campanhas, possibilitando a comparação entre os resultados.

4.2.1. Aoki – Velloso (1975)

Com base nos valores obtidos dos boletins de sondagem (Figura 7) e as Tabelas 1 e 2, calculou-se a resistência lateral (R_L) para as Estacas A, B, C e D (Figura 8).

Figura 8 - Comparação por Aoki-Velloso (1975) entre R_L s das Estacas A, B, C e D



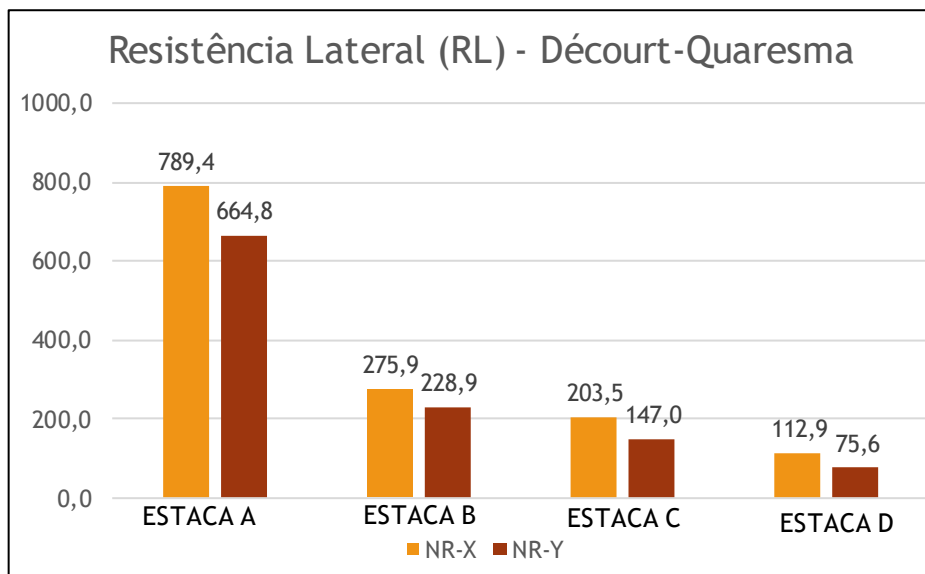
Fonte: Autoria Própria, 2023

Percebe-se que para o NR-X a resistência lateral encontrada nas Estacas A, B, C e D possuem valores maiores que para o NR-Y, com uma porcentagem de variação de 20%, 24%, 23% e 41%, respectivamente. Assim, tais resultados estão em concordância com o que foi observado nos boletins de sondagem, no qual, devido o alívio de tensões há uma queda nos índices de resistência a penetração (N) e isso reflete na capacidade de resistência lateral entre o fuste da estaca e o solo.

4.2.2. Décourt – Quaresma (1978)

Assim como calculado para Aoki-Velloso (1975), com base nos valores obtidos dos boletins de sondagem (Figura 7) e as Tabelas 3 e 4, calculou-se a resistência lateral (R_L) para as Estacas A, B, C e D (Figura 9).

Figura 9 - Comparação por Décourt-Quaresma (1978) entre RLs das Estacas A, B, C e D



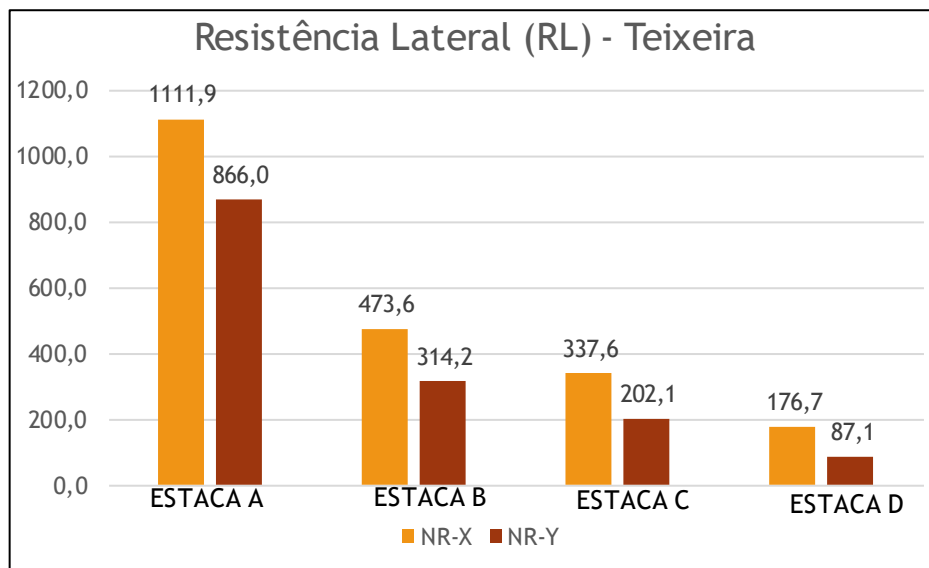
Fonte: Autoria Própria, 2023

Através do método de Décourt-Quaresma (1978), percebe-se que em ambas as estacas os valores de R_L são maiores em NR-X, apresentando uma porcentagem de variação de 16%, 17%, 28% e 33% (Estaca A, B, C e D) entre os níveis de referência analisados. Dessa forma, tais resultados estão em concordância com o que foi observado nos boletins de sondagem, no qual, devido o alívio de tensões há uma queda nos índices de resistência a penetração (N) e isso reflete na capacidade de resistência lateral entre o fuste da estaca e o solo.

4.2.3. Teixeira (1996)

Usando ainda como base nos valores obtidos dos boletins de sondagem (Figura 7) e os Quadros 5 e 6, calculou-se a resistência lateral (R_L) para as estacas A, B, C e D (Figura 10).

Figura 10 - Comparação por Décourt-Quaresma (1978) entre RLs das Estacas A, B, C e D



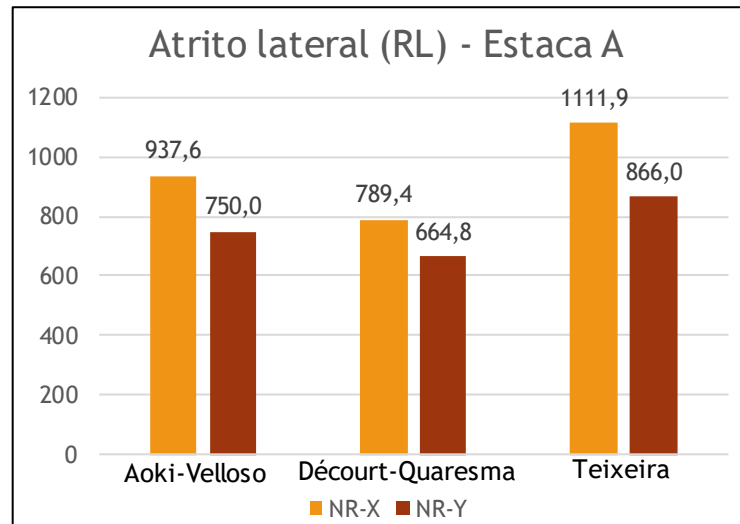
Fonte: Autoria Própria, 2023

Através do método de Teixeira (1996), a resistência lateral R_L são maiores em NR-X e menores em NR-Y, apresentando uma porcentagem de variação de 22%, 34%, 40% e 51% (Estaca A, B, C e D). Tais resultados estão em concordância com o que foi observado nos boletins de sondagem, no qual, devido o alívio de tensões há uma queda nos índices de resistência a penetração (N) e isso reflete na capacidade de resistência lateral entre o fuste da estaca e o solo.

4.2.4. Comparação entre os métodos

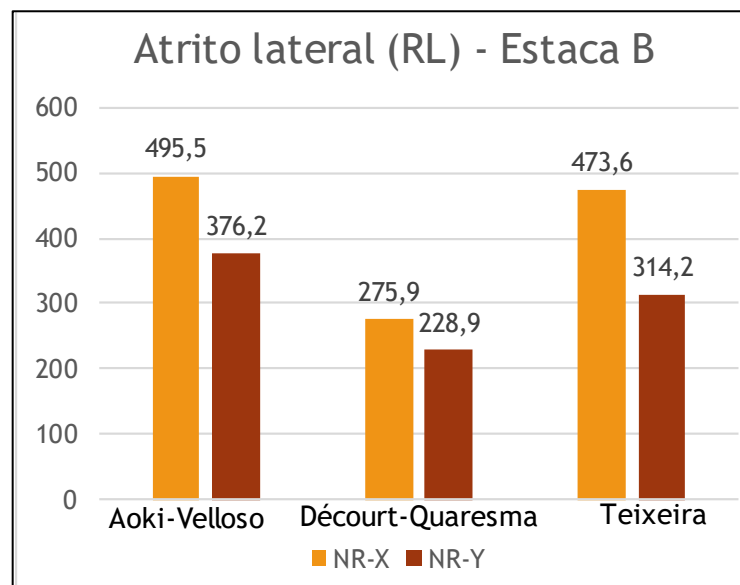
De acordo com os resultados colhidos por meio de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996), foi observado que em ambos os métodos a resistência lateral para as estacas em NR-X apresentaram valores maiores que em NR-Y, como é demonstrado nas Figuras 11, 12, 13 e 14.

Figura 11 - Resistência lateral (RL) na Estaca A



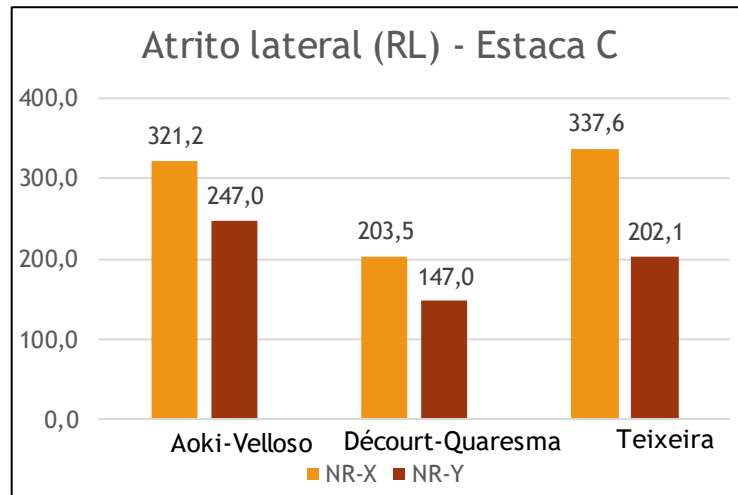
Fonte: Autoria Própria, 2023

Figura 12 - Resistência lateral (RL) para Estaca B



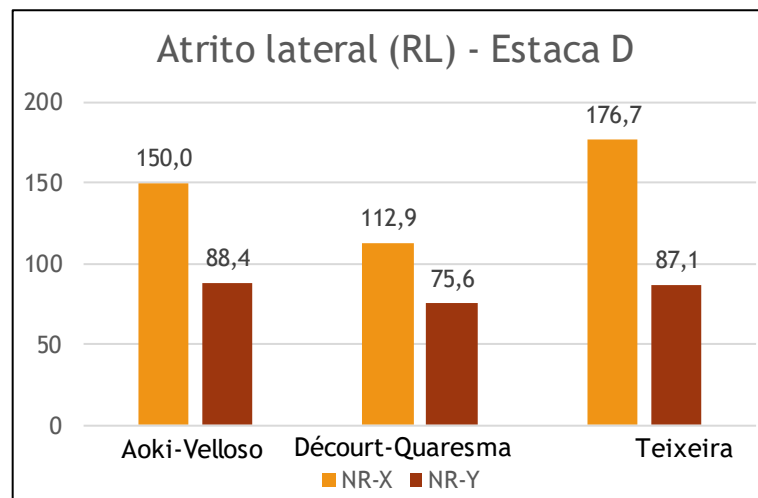
Fonte: Autoria Própria, 2023

Figura 13 - Resistência lateral (RL) para Estaca C



Fonte: Autoria Própria, 2023

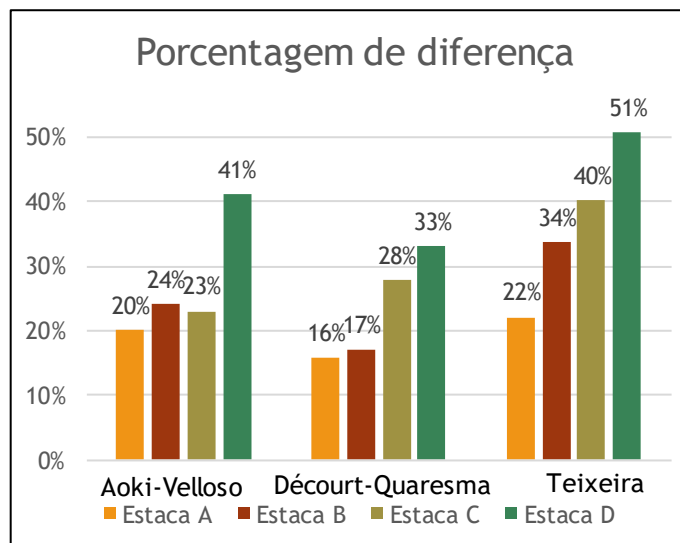
Figura 14 - Resistência lateral (RL) para Estaca D



Fonte: Autoria Própria, 2023

Observa-se que a resistência lateral calculada na Estaca D, dentre as quatro estacas estudadas, foi a que apresentou maiores porcentagens de diferença em relação aos níveis de referência analisados. Assim, enquanto na Estaca A (17m) os valores encontrados foram 20%, 16% e 22% para Aoki-Velloso, Décourt-Quaresma e Teixeira, respectivamente, na Estaca D (5m) têm-se 41%, 33% e 51%, respectivamente. Já as demais estacas, B e C, apresentam os seguintes valores percentuais: 24%, 17% e 34% para estaca B e 23%, 28% e 40% para Estaca C. Com base na figura 15, é possível perceber que há uma evolução do aumento percentual à medida que o comprimento da estaca diminui.

Figura 15 - Diferença percentual entre R_L para as estacas A, B, C e D



Fonte: Autoria própria, 2023

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos através da comparação entre as sondagens, foi observado que existe diferença nos índices de resistência a penetração (N_{SPT}) entre ensaios realizadas a nível natural do terreno e os que foram realizados a nível de fundação. Assim, ao comparar os boletins de sondagem verificou-se que o desconfinamento do solo provocou uma diminuição de 52% nos valores de N_{SPT} para as primeiras camadas ensaiadas, cujo motivo se dá devido o alívio de tensões naquela região.

Dessa forma, a diminuição no índice de resistência (N_{SPT}) influência nos cálculos de resistência lateral (R_L) e consequentemente nos de capacidade de carga solo-estaca, como observado nas equações dos métodos semiempíricos aqui utilizados. Assim, considerando estacas de um mesmo tamanho (17 m) sob as condições da sondagem 1, a resistência lateral (R_L) é maior que para as estacas de igual tamanho sob as condições de sondagem 2. Em termos de porcentagem, foi observado uma diferença de 20%, 16% e 22% para Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996).

Além disso, constatou-se que a divergência entre as capacidades de carga calculada a nível natural do terreno e a calculada a nível de fundação aumenta com a diminuição do elemento estrutural. Dessa maneira, segundo os resultados coletados, para as estacas de 10m o percentual de redução evoluiu de 20%, 16% e 22% para 24%, 17% e 34% de acordo com os métodos semiempíricos aqui analisados. Já nas estacas de 8m e 5m chegou-se aos seguintes

resultados respectivamente, para Aoki-Velloso (1975): 23% e 41%; para Décourt-Quaresma: 28% e 33%; e para Teixeira: 40% e 51%.

Por fim, pode-se concluir que quanto mais curta for a estaca, maior será a influência da redução de resistência do N_{spt} , no cálculo da capacidade de carga.

REFERÊNCIAS

AFONSO, André Filipe Gonçalves. CORRELAÇÕES ENTRE RESULTADOS DE ENSAIOS IN SITU DE PENETRAÇÃO DINÂMICA DP COM O ENSAIO STANDARD PENETRATION TEST. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Construção, Escola Superior de Tecnologia e Gestão Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2016. Cap. 5. Disponível em: https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/14068/1/Afonso_André.pdf. Acesso em: 10 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro: Abnt, 2019. Disponível em: https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/resultado_avancado.asp. Acesso em: 27 ago. 2023

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 6484:2020: Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de Ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2020. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR – 12131 Estacas – Prova de carga estática, Rio de Janeiro, 2006.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. Fundações por Estacas – Projeto Geotécnico. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson; TSUHA, Cristina de H. C.; GIACHETI, Heraldo L.. Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

GALVÃO, Bianca Borba et al. IMPORTÂNCIA DA SONDAGEM SPT NA CONSTRUÇÃO CIVIL: TIPOS DESONDAGENS, SEUS MÉTODOS E UTILIDADES. 2019. Disponível em: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/683/719>. Acesso em: 10 jul. 2023.

PROTENDIDOS DYWIDAG LTDA. Sistemas de Protensão com Barras DYWIDAG - Aplicações Estruturais. São Paulo: Protendidos Dywidag Ltda, 2008. 12 p. Disponível em: <https://www.feb.unesp.br/pbastos/Protendido/DYWIDAG-Brasil.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.

SOUSA, Álvaro André de; VENDER, Karolina; MARQUES, Amanda Rodrigues; FURQUIM, Gustavo Oliveira; ARAÚJO JUNIOR, José Luiz de. DISCUTINDO O CONCEITO DE FUNDAÇÕES. 2018. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi__5jci4WAAxV5pZUCHZq4AHEQFnoECCsQAQ&url=https%3A%2F%2Fpublicacoes.unifimes.edu.br%2Findex.php%2Fcoloquio%2Farticle%2Fview%2F398%2F476&usg=AOvVaw1OfstCUVNd0LXGp4au9G42&opi=89978449. Acesso em: 10 jul. 2023.