



VICTOR MARQUES FERREIRA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTACA RAIZ
EMBUTIDA PARCIALMENTE EM ROCHA – ESTUDO DE CASO**

VICTOR MARQUES FERREIRA

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTACA RAIZ
EMBUTIDA PARCIALMENTE EM ROCHA – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia

Uberlândia
2022

VICTOR MARQUES FERREIRA

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTACA RAIZ
EMBUTIDA PARCIALMENTE EM ROCHA – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia
Presidente da Banca - Orientador

Prof. Dr. Michael Andrade Maedo
UFU – Membro Interno

MSc. Paula Tannús Resende
Membro externo

Victor Marques Ferreira
Orientando

Uberlândia
2022

AGRADECIMENTOS

A Deus, por não me deixar desistir e me dar forças para seguir nessa caminhada em direção aos meus sonhos e objetivos.

Aos meus pais, especialmente minha mãe, que sempre me apoiaram em minhas decisões e me deram todo suporte necessário para traçar meus planos.

Aos meus amigos, em especial meus amigos da 92ª Turma da Engenharia Civil, da Bateria Charanga, e de todos aqueles que de alguma forma fizeram parte dessa trajetória, me acompanhando e dando apoio nos momentos necessários, fazendo com que a caminhada tenha sido mais leve, agradável e marcante na minha vida.

A equipe da Construtora e Incorporadora CS Franco, em especial ao Engenheiro Diego Cordeiro por todo conhecimento transmitido e todo apoio nesse início de carreira profissional.

A Universidade Federal de Uberlândia, por me proporcionar as melhores experiências da minha vida até então, tendo a oportunidade de estudar em uma ótima universidade com mestres, recursos e pessoas incríveis.

Ao professor Jean Rodrigo Garcia, por todo conhecimento e orientação transmitido tanto nesse trabalho quanto ao longo da graduação.

RESUMO

Sabe-se que é imprescindível, o emprego de fundações em geral (estacas, tubulões ou fundações rasas) para sustentação em qualquer tipo de obra, visando garantir sua segurança e estabilidade. Durante a execução desse tipo de elemento construtivo é comum o enfrentamento de obstáculos e interferências, como por exemplo fundações de antigas construções no local ou presença de maciços rochosos, que demandam que seja necessário o embutimento das estacas em rocha, denominado também como processo de “pinagem”. Tal processo exige o emprego de determinados tipos específicos de estacas como a estaca raiz, moldada “in loco” e injetada, executada por meio da perfuração rotativa ou roto-percussiva. Nesse sentido, foi realizado neste trabalho, um estudo sobre os diferentes métodos para cálculo da capacidade de carga desse tipo de estaca, assim como efetuar a aplicação desses métodos em um caso real de obra para se avaliar a coerência dos mesmos na previsão da capacidade de carga de estacas raiz nessas condições. Assim, analisou-se por meio de um resultado de prova de carga, comparativamente aos resultados obtidos a partir de cada método analisado. Com base nos resultados das análises, constatou-se que todos os métodos analisados superestimaram a capacidade de carga da estaca embutida em rocha, e em média essa estimativa foi de 150% acima comparado com a carga de ruptura convencional. Entretanto, o método baseado nas propriedades da rocha apresentou a melhor estimativa que foi de apenas 39% acima comparado com o valor de referência obtido em prova de carga estática.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca raiz, Fundação embutida em rocha, Interação solo-fundação.

ABSTRACT

It is known that it is essential to use piles for support in any type of work, to ensure its safety and stability. During the execution of this type of constructive element, it is common to encounter obstacles and interferences, such as foundations of old constructions in the place or the presence of rock masses, which demand that it is necessary to embed the piles in rock, the rotary drilling process or embedded in rock. Such a process requires the use of certain specific types of piles, such as the root pile, bored piles, drilling “in loco” and injected, performed by means of rotary or roto-percussive drilling. In this sense, in this work, a study was carried out on the different methods for calculating the bearing capacity of this type of pile, as well as applying these methods in a real case of work to evaluate their coherence in the prediction of the bearing capacity of root pile under these conditions. Thus, it was analyzed through a load test result, compared to the results obtained from each analyzed method. Based on the results of the analyses, it was found that all the methods analyzed overestimated the bearing capacity of the pile embedded in rock, and on average this estimate was 150% higher compared to the conventional ultimate load. However, the method based on rock properties presented the best estimate which was only 39% higher compared to the reference value obtained in the static load test.

KEYWORDS: Root pile, embedded in rock, rock-foundation interaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfuratriz de Circulação Reversa tipo Wirth 408	3
Figura 2 - Esquema de execução da escavação da estaca	4
Figura 3 - Fases de execução das estacas raiz.....	5
Figura 4 - Comprimento mínimo de embutimento segundo Cabral-Antunes.....	11
Figura 5 - Equipamento de sondagem.....	14
Figura 6 - Ensaio de Prova de Carga Estática	15
Figura 7 - Relatório de sondagem mista com valores de RQD.....	17
Figura 8 - Classe de alteração das rochas.....	18
Figura 9 - Resistência lateral e de ponta	21
Figura 10 - Resultado da prova de carga.....	22
Figura 11 - Curva de carga aplicada vs reta de recalque de ruptura	23
Figura 12 - Relação entre resultado dos métodos e carga de ruptura da prova de carga	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos métodos de cálculos	20
Tabela 2 - Resultados das resistências das estacas.....	20
Tabela 3 - Cargas aplicadas e recalques obtidos	22
Tabela 4 - Relação entre resultado dos métodos e carga de ruptura da prova de carga..	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO	1
1.2	JUSTIFICATIVA	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1	FUNDAÇÕES PROFUNDAS	2
2.2	ESTACAS EMBUTIDAS PARCIALMENTE EM ROCHA	3
2.3	ESTACAS RAIZ	4
2.4	MÉTODOS DE CÁLCULO PARA ESTACAS EMBUTIDAS EM ROCHA ...	5
2.4.1	Método de Rowe e Armitage	6
2.4.1.1	Resistência lateral	6
2.4.1.2	Resistência de ponta.....	8
2.4.2	Método brasileiro de Cabral e Antunes	9
2.4.3	Cálculos em função das propriedades da rocha e resistência do concreto...	11
2.5	INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA.....	12
2.5.1	Standard Penetration Test (SPT).....	13
2.5.2	Sondagem mista.....	14
2.6	PROVA DE CARGA ESTÁTICA	15
3	ESTUDO DE CASO	16
3.1	SUBSOLO LOCAL.....	16
3.2	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO.....	18
3.3	ANÁLISE DE DADOS	20
3.4	PROVA DE CARGA	21
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
5	CONCLUSÃO	26
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27
	APÊNDICE A	28

1 INTRODUÇÃO

Toda e qualquer obra de engenharia, necessita de fundação para suportar os carregamentos oriundos da superestrutura, satisfazendo requisitos técnicos de estabilidade, segurança e economia. A fundação tem papel crucial na estabilidade de uma estrutura, ou seja, são os elementos estruturais responsáveis por receber a carga da estrutura da edificação e transferi-la adequadamente ao solo. Esse processo de transferência de carga significa remeter ao maciço de solo ou rocha, carga em forma e intensidade que não exceda as características de resistência e deformabilidade do material. No caso de maciços rochosos a capacidade de suporte e deformabilidade são superiores a grande maioria dos solos e, portanto, normalmente não apresentam problemas para absorver e dissipar os carregamentos, porém, executar fundações em solo é uma tarefa considerada mais fácil quando comparada aos casos em rocha. Entretanto, nem sempre é possível executar fundações em maciços de solo, ou seja, em alguns casos o maciço é composto por solo e rocha, restringindo o tipo de estaca de fundação que pode ser utilizada como elemento de sustentação para a estrutura. Nesse caso se destaca a estaca raiz que é referência em relação a perfuração de maciços rochosos, sendo uma estaca moldada *in loco* e injetada, integralmente armada e preenchida com argamassa de cimento e areia, sem a utilização de brita, executada por perfuração rotativa ou roto-percussiva, revestida integralmente no trecho em solo por um conjunto de tubos metálicos recuperáveis, e ao encontrar a rocha, a perfuração avança por meio de corte com coroa diamantada ou composta por *bits* cravejados de *wídea*.

Tendo em vista a comum utilização da estaca raiz em trechos dados por solo e rocha, existe ainda a necessidade de melhor compreender o desempenho desse tipo de fundação, uma vez que são raros os estudos em estacas raiz embutidas parcialmente em maciços rochosos no aspecto experimental. É comum o embutimento excessivo, “pinagem”, da estaca em rocha, ocasionando custos desnecessários ao empreendimento, ou seja, o comprimento da estaca embutido em rocha poderia ser reduzido em certos casos, possibilitando a otimização do projeto de fundação com menor consumo de recursos materiais e de equipamentos, consequentemente reduzindo a geração de carbono lançado à atmosfera.

1.1 OBJETIVO

Convencionar a capacidade de carga de uma estaca raiz embutida parcialmente em rocha, a partir do método estabelecido pela norma e por meio de diferentes métodos de cálculo,

comparando-os ao resultado da prova de carga, estática e lenta, realizada em uma estaca raiz submetida à compressão simples.

Avaliar qual a melhor proposta para estimativa da capacidade de carga de estacas embutida em rocha.

1.2 JUSTIFICATIVA

As pesquisas e estudos acerca dos métodos corretos de dimensionamento das estacas raiz são escassos, sendo assim, este trabalho poderá contribuir com os estudos de dimensionamento, a fim de evitar divergências em cálculos como o superdimensionamento, fator comumente presente em projetos, que a princípio não se enxerga como grande problema, mas que gera custos desnecessários ao empreendimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAÇÕES PROFUNDAS

Segundo a NBR 6122 (2019), a fundação profunda é aquela que transmite a carga da edificação ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste), ou por uma combinação das duas. Edificações normalmente apresentam cargas concentradas e elevadas, que necessitam ser transferidas ao maciço de solo ou rocha. Para que haja uma estabilização dos recalques em uma construção, é necessário que os elementos de fundação sejam capazes de transferir esses carregamentos de forma adequada, garantindo a estabilidade e a segurança da construção.

Os vários métodos construtivos de fundações ao fim possuem a mesma intenção, suportar a carga da edificação, e por existir grande diversidade de solos, há também tipos e métodos diferentes de execução de estacas, mas a finalidade é a mesma, pela sua base apoiando no material do solo ou rocha, ou pela resistência lateral que a fundação imponha, a finalidade é suportar toda a edificação, conseguindo assim a transferência de cargas.

Com o avanço do estudo do solo e das tecnologias acessíveis, houve ampliação da variedade de elementos de fundação disponíveis no mercado, ou seja, desde aquelas simples como sapatas para uma edificação em solo com ótimas características resistentes, até estacas de grandes dimensões que são utilizadas para suportar arranha-céus assentes em solos com variações e considerados relativamente complicados, sendo necessário nesses casos o emprego de fundações profundas.

2.2 ESTACAS EMBUTIDAS PARCIALMENTE EM ROCHA

Para estacas que sejam embutidas superficialmente sobre rocha, a NBR 6122 (2019), estabelece que para a fixação da tensão admissível ou tensão resistente de cálculo de qualquer elemento de fundação sobre rocha, deve-se considerar suas descontinuidades, como falhas, fraturas ou xistosidades por exemplo, e “no caso de superfícies inclinadas, pode-se escalonar a superfície ou utilizar chumbadores para evitar o deslizamento do elemento de fundação”.

Rochas alteradas ou em decomposição também podem ser encontradas e nesses casos devem ser considerados a natureza da rocha matriz, o seu grau de alteração ou decomposição e tratando essas descontinuidades caso se faça necessário. Em caso de calcário ou qualquer rocha cárstica, estudos devem ser solicitados pelo projetista da fundação.

Para estacas embutidas com maior profundidade em rocha, existem mais regras a se seguir, como por exemplo, por norma se estabelece que seja embutido por pelo menos uma vez o diâmetro da estaca na rocha. Dentre estacas escavadas que sejam necessárias a perfuração em rocha tem-se diversos métodos de perfuração, como por exemplo a perfuratriz tipo *Wirth*. As perfuratrizes de circulação reversa tipo *Wirth* são ideais para perfuração de grandes diâmetros em rocha e são usadas principalmente para obras marítimas ou portuárias.

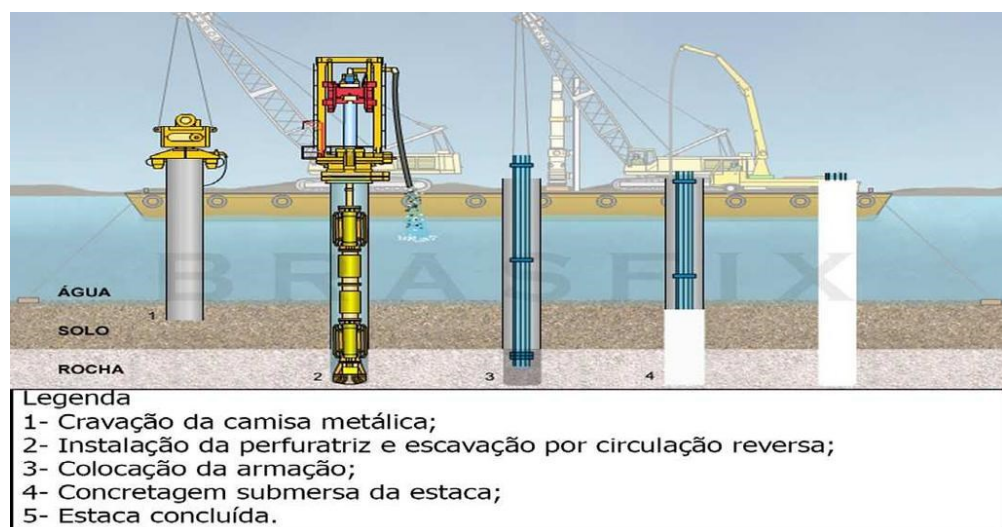
Figura 1 - Perfuratriz de Circulação Reversa tipo *Wirth* 408



Fonte: EMBRAFE (2022)

A perfuratriz em questão utiliza-se de tubos metálicos para perfurar rochas e eventualmente solo também, podendo ter brocas com roletes dentados e brocas com roletes com botões de tungstênio para perfurações em rocha de resistência à compressão simples mais elevadas. As brocas perfuram por dentro de tubos metálicos e usam do sistema de *air lift* que garante que os detritos sejam retirados do furo a partir de um procedimento de elevação por ar que funciona de acordo com o qual a água é distribuída verticalmente em tubos, ou a partir de furos de sondagem, usando como fonte de energia a injeção de ar comprimido, fazendo assim a saída de sedimentos.

Figura 2 - Esquema de execução da escavação da estaca



Fonte: Ramos, Yabusaki e Costa (2019)

2.3 ESTACAS RAIZ

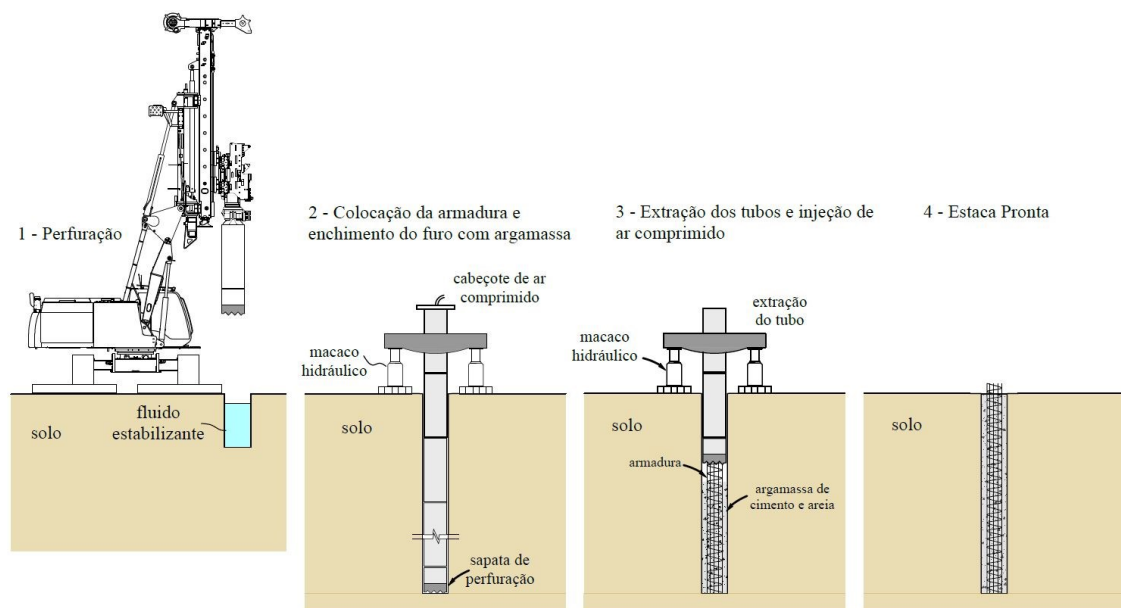
Outro método de estaca escavada para perfuração em rocha é a utilização da estaca raiz, que é um método usual de execução de fundações principalmente quando se há o obstáculo de rocha, porém ela não se limita apenas a perfuração de rochas, há casos em que apenas em solo é necessário à estaca raiz devido as suas características como difícil capacidade de perfuração. Obtendo assim duas situações distintas de utilização do método, a estaca raiz embutida em solo e a embutida em solo e rocha.

Ambas as metodologias de perfuração são executadas através de processo rotativo ou roto-percussivo sendo revestidas no trecho de solo toda por meio de um tubo metálico para garantir a estabilidade da perfuração, entretanto, devido a este processo em solo resulta em um diâmetro nominal maior que o diâmetro do revestimento. Já no caso de perfuração em rocha, ocorre uma redução do diâmetro nominal no trecho em rocha, resultado no diâmetro igual ao revestimento empregado para perfuração.

Para execução dos dois métodos tem-se execuções semelhantes, diferenciando apenas a parte final. Com uma perfuratriz realiza-se a perfuração de modo rotativo ou roto-percussivo, descendo tubos de revestimento com uma espécie de coroa dentada para ajuda na descida, podendo ainda ser utilizado brocas de três asas ou tricône para um pré-furo caso o solo esteja muito duro, plástico ou ainda para a limpeza no interior do revestimento.

Para descida do tubo também é utilizado a circulação de água ou ar comprimido até atingir a profundidade prevista e encerrando no caso de apenas solo, e em caso da continuidade da perfuração em rocha ou matacões, segundo a NBR 6122 (2019), “prossegue-se a perfuração por dentro do revestimento com o emprego de martelo de fundo ou sonda rotativa. Esta operação, necessária para atravessar o matacão ou embutir a estaca na rocha causa, usualmente, uma diminuição do diâmetro da estaca que deve ser considerada no dimensionamento.”

Figura 3 - Fases de execução das estacas raiz



Fonte: Albuquerque e Garcia (2020)

2.4 MÉTODOS DE CÁLCULO PARA ESTACAS EMBUTIDAS EM ROCHA

Haja visto a larga utilização de estacas embutidas em rocha e diversas situações distintas para aplicação desse determinado tipo de fundação, ao longo dos anos, pesquisadores desenvolveram métodos de cálculos distintos para dimensionar essas estacas, buscando a forma mais simplificada e efetiva para cada situação.

Em 1987, a partir do método dos elementos finitos, Rowe e Armitage desenvolveram uma metodologia de cálculo para projeto de estacas embutidas em rochas e tem-se também metodologia brasileira, produzida por Cabral e Antunes no ano de 2000 após visto a larga utilização de estacas embutidas em rocha no Brasil.

Para uma melhor facilidade executiva, os métodos buscam simplificar a análise do problema para que se possa obter fórmulas simples, mas que sejam capazes de representar adequadamente os fatores de resistência necessário, tanto na ponta, quanto no fuste.

2.4.1 Método de Rowe e Armitage

Baseado no método dos elementos finitos (MEF), Rowe e Armitage desenvolveram em 1987 um método para cálculo de estacas embutidas em rocha, demonstrando de forma teórica, mas também com resultados obtidos em campo que a maior parte da carga que é aplicada nas estacas é suportada pelo seu fuste com o atrito lateral.

Porém para que o método seja aplicável, os autores sugerem algumas condições:

- a) A carga é estática e de compressão axial;
- b) A carga é suportada tanto pela base quanto pelo fuste da estaca;
- c) A base da estaca está em contato direto com a rocha;
- d) As laterais do furo estão livres de qualquer contaminação capaz de diminuir a aderência na interface concreto-rocha;
- e) As laterais do furo podem estar em seu estado natural ou com rugosidades artificiais;
- f) Deve-se estimar, seja por correlações empíricas ou ensaios *in loco*, o módulo de Young e parâmetros de resistência da rocha.

2.4.1.1 Resistência lateral

Com a resistência no fuste da estaca sendo a principal fonte de resistência da fundação, Rowe e Armitage (1987) correlacionaram a resistência unitária por atrito lateral da estaca, com o módulo de deformação da rocha com a resistência à compressão simples da rocha na qual a estaca se encontra. Além disso, os autores também observaram a influência direta da rugosidade do fuste da estaca no momento de calcular sua resistência lateral. Dividindo então em quatro categorias qualitativas em relação a rugosidade do fuste da estaca, sendo eles:

- a) R1 – Linear, paredes lisas, com irregularidades cuja profundidade é inferior a 1mm
- b) R2 – Irregularidades com profundidade entre 1 e 4mm, largura superior a 2mm e espaçamento entre 50 e 200mm

- c) R3 – Irregularidades com profundidade entre 4 e 10mm, largura superior a 5mm e espaçamento entre 50 e 200mm.
- d) R4 – Irregularidades ou ondulações com profundidade superior a 10mm, largura superior a 10mm e espaçamento entre 50 e 200mm.

A partir dessas definições, é possível o cálculo de resistência lateral por duas equações, sendo a Equação 1 usada nos casos de R1 a R3.

$$\frac{\tau_{m\acute{a}x}}{P_a} = 1,41 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_c}{P_a}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\tau_{m\acute{a}x}$ = Resistência lateral unitária máxima;

σ_c = Resistência à compressão simples da rocha na qual está inserida a estaca;

P_a = Pressão atmosférica (0,101 MPa).

Já na Equação 2 é possível obter-se o cálculo da resistência lateral do fuste da estaca no caso R4, onde as irregularidades ou ondulações têm profundidade superior a 10 mm, largura superior a 10 mm e espaçamento entre 50 e 200 mm.

$$\frac{\tau_{m\acute{a}x}}{P_a} = 1,88 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_c}{P_a}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$\tau_{m\acute{a}x}$ = Resistência lateral unitária máxima;

σ_c = Resistência à compressão simples da rocha na qual está inserida a estaca;

P_a = Pressão atmosférica (0,101 MPa).

Para encontrar o valor da resistência à compressão simples da rocha na qual a estaca está inserida, é necessário o valor do módulo de deformação dessa rocha, e a partir disso obtém-se o resultado a partir da Equação 3.

$$E_{rm} = 215\sqrt{\sigma_c} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

E_{rm} = Módulo de deformação da rocha na qual está inserida a estaca;

σ_c = Resistência à compressão simples da rocha na qual está inserida a estaca.

2.4.1.2 Resistência de ponta

Haja visto que a resistência na base da estaca tem relação direta com a pressão admissível na interação entre estaca e rocha, para cálculo da resistência na ponta da estaca, os autores consideraram evitar a ocorrência de falhas no maciço rochoso. Porém para correta utilização dos cálculos nessa situação, alguns aspectos devem ser considerados:

- a) A base da estaca deve estar embutida na rocha por uma extensão de, pelo menos, um diâmetro;
- b) A rocha na base da estaca deve se encontrar sem alterações e/ou descontinuidades significativas (observando se há qualquer quebra ou fratura presente no maciço rochoso), tendo uma resistência à compressão simples média igual a σ_c ;
- c) Não pode haver cavidades ou espaços vazios na interface inferior estaca-rocha.

Partindo do pressuposto que os aspectos que devem ser considerados estejam sendo atendidos, pode-se começar os cálculos encontrando o valor da pressão admissível com a Equação 4 e da pressão máxima admitida na base estaca com a Equação 5.

$$q_{adm} = \sigma_c \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

q_{adm} = Pressão admissível na base da estaca, na interface inferior estaca-rocha;

$$q_{m\acute{a}x} = 2,5\sigma_c \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$q_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima admissível na base da estaca, na interface inferior estaca-rocha;

A fim de garantir o comportamento elástico da rocha na base da estaca, na interface estaca-rocha, a pressão atuante na base dessa estaca deve ser menor ou igual a pressão total admissível pela base da mesma.

E como mais um critério para assegurar um maior nível de segurança em relação ao limite da capacidade da estaca, ainda na interface estaca-rocha, a pressão máxima que atua na base da estaca deve ser menor ou no mínimo igual a pressão máxima admissível prevista.

Finalmente, a pressão máxima na base da estaca pode ser calculada a partir das Equações 6 e 7.

$$q_{am} = q_d - 4 \cdot FS \cdot \frac{L}{D} \quad \text{para } q_d \geq 4 \cdot FS \cdot \frac{L_e}{D} \cdot \tau \quad \text{Equação 6}$$

$$q_{am} = 0 \quad \text{para } q_d < 4 \cdot FS \cdot \frac{L_e}{D} \cdot \tau \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

q_{am} = Pressão máxima atuante na base da estaca, na interface inferior estaca-rocha;

q_d = Pressão de projeto, atuante no topo da estaca;

L_e = Comprimento da porção da estaca embutida na rocha;

D = Diâmetro da porção da estaca embutida na rocha;

FS = Fator de segurança;

τ = Resistência lateral unitária.

2.4.2 Método brasileiro de Cabral e Antunes

Cabral e Antunes, após observarem o aumento significativo da utilização de estacas embutidas em rocha no Brasil, em 2000, decidiram por desenvolver metodologia própria para cálculo e projeção da capacidade de carga em estacas desse tipo, fazendo é claro suas recomendações acerca da utilização do seu método.

Para Cabral e Antunes (2000), a capacidade de carga da estaca embutida em rocha se dá pela soma entre a resistência por atrito lateral da estaca e a resistência de ponta da mesma (Equação 8), desconsiderando a porção da estaca que passe pelo solo pelo fato de a maioria dos solos não apresentarem resistência superior as rochas, não fazendo grande diferença no momento dos cálculos. Porém em casos que o solo apresente uma resistência considerável ($N_{SPT} \geq 10$) e deformações elásticas superiores a 2% do diâmetro da estaca mais 2 mm, ele pode ser considerado em cálculo desde que se adote um fator de segurança igual a 3.

$$Q_n = r_p A_p + \tau A_l \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

Q_n = Capacidade de carga da estaca em termos nominais;

r_p = Resistência de ponta unitária;

A_p = Área da ponta da estaca;

τ = Resistência lateral unitária;

A_l = Área da superfície lateral da parcela da estaca embutida na rocha.

O cálculo da resistência de ponta unitária, é considerado em função da qualidade do maciço rochoso e da limpeza da estaca, sendo obtido com a Equação 9.

$$r_p = \beta_p \sigma_c \leq 8MPa \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

r_p = Resistência de ponta unitária;

σ_c = Resistência à compressão simples da rocha;

β_p = Coeficiente de correlação dado a seguir.

Coeficiente de correlação (β_p) em função do grau de alteração da rocha:

Rocha muito alterada – Intervalo de β_p entre 0,07 e 0,13

Rocha medianamente alterada – Intervalo de β_p entre 0,24 e 0,36

Rocha pouco alterada – Intervalo de β_p entre 0,48 e 0,64

Para o valor de resistência a compressão simples da rocha (σ_c), são considerados 3 tipos de rocha, com seus intervalos de resistência característicos, sendo elas:

- a) Tipo 1 – Rochas ígneas e metamórficas como basaltos e granitos (σ_c entre 70 e 250MPa);
- b) Tipo 2 – Rochas metamórficas foliadas como ardósias e xistos (σ_c entre 40 e 90MPa);
- c) Tipo 3 – Rochas sedimentares “bem cimentadas” como arenitos e calcários (σ_c entre 30 e 80 MPa).

Ainda segundo os autores, a resistência lateral unitária desenvolvida no fuste da estaca, deve ser equivalente de 2,5% a 3,5% da resistência de ponta unitária e satisfazer a seguinte situação:

$$\tau_{m\acute{a}x} \leq \frac{f_{ck}}{15} \leq 1,3 \text{ MPa} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 10}$$

Onde:

$\tau_{m\acute{a}x}$ = Resist\~{e}ncia lateral unit\~{a}ria m\~{a}xima;

f_{ck} = Resist\~{e}ncia caracter\~{i}stica do concreto que comp\~{o}e estaca.

Cabral e Antunes (2000), ainda imp\~{o}em um comprimento m\~{i}nimo de embutimento da estaca em rocha, embutimento esse que varia de acordo com as caracter\~{i}sticas da pr\~{o}pria rocha.

Figura 4 - Comprimento m\~{i}nimo de embutimento segundo Cabral-Antunes

Caracter\~{i}sticas da Rocha	L_e m\~{i}nimo
N\~{a}o h\~{a} d\~{u}vidas quanto \~{a} limpeza e a qualidade da rocha a partir da ponta da estaca	$L_e=0,5D$
H\~{a} possibilidade da por\c{c}\~{a}o de rocha sob a ponta da estaca ser de qualidade inferior em compara\c{c}\~{a}o \~{a} por\c{c}\~{a}o sobrejacente	$L_e=1,5D$ ($r_p > 30 \text{ MPa}$) $L_e=2,0D$ ($r_p < 30 \text{ MPa}$)
A estaca \~{e} suportada somente pelo seu fuste, por atrito lateral e outros mecanismos de ades\~{a}o	$L_e=3,0D$ ($r_p > 30 \text{ MPa}$) $L_e=4,0D$ ($r_p < 30 \text{ MPa}$)

Fonte: Scheuermann. (2016)

2.4.3 C\~{a}lculos em fun\c{c}\~{a}o das propriedades da rocha e resist\~{e}ncia do concreto

Apesar de o comportamento das rochas serem mais dificeis de se prever e avaliar, pode-se usar apenas as suas propriedades como base para estimativas e c\~{a}lculos. Tem-se como sugest\~{a}o que a rela\c{c}\~{a}o entre a tens\~{a}o lateral \~{u}ltima da estaca (q_{sf}) e a resist\~{e}ncia a compress\~{a}o simples da rocha (σ_c) varie entre 0,03 e 0,50. Onde Reese e O'Neill (1989) apresentam express\~{o}es emp\~{i}ricas para a tens\~{a}o lateral \~{u}ltima em fun\c{c}\~{a}o da resist\~{e}ncia a compress\~{a}o simples da rocha.

$$q_{sf} = 0,15\sigma_c \text{ para } \sigma_c < 2000 \text{ kPa} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 11}$$

$$q_{sf} = 6,7\sqrt{R_c} \text{ para } \sigma_c > 2000 \text{ kPa} \quad \text{Equação 12}$$

Porém, segundo Hachich et al. (1998) em seu livro Fundações Teoria e Prática, “Frequentemente a tensão lateral admissível é estabelecida em função da resistência característica do concreto”, utilizando a Equação 13.

$$q_{s_a} = (0,03 \text{ a } 0,05) f_{ck} \quad \text{Equação 13}$$

Já para o cálculo de resistência da base, alguns autores adotam que a tensão admissível da base esteja entre 1/5 e 1/8 conforme Equação 14.

$$q_b \leq \left(\frac{1}{5} \text{ a } \frac{1}{8} \right) \sigma_c \quad \text{Equação 14}$$

Lembrando também que se o maciço rochoso de apoio da estaca for muito resistente, então a resistência do concreto que poderá determinar a capacidade de carga da fundação, conforme Hachich et al. (1998), “Nestes casos deve-se utilizar uma tensão admissível menor do que 33% da resistência à compressão do concreto.”

$$q_b \leq (0,33) f_{ck} \quad \text{Equação 15}$$

Cabe ressaltar que existem ainda variados métodos de cálculo e vários autores que expõem seus diferentes modos, sendo interessante que haja o confrontamento e comparação entre as diferentes equações e metodologias usadas ao projetar uma fundação.

2.5 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

Antes do início da elaboração de projetos de uma obra, é de suma importância o conhecimento a respeito do tipo de solo de onde se deseja construir. Para isso então temos a importante etapa de investigação geotécnica do território visando entender e conhecer o comportamento do solo, como seus perfis e camadas componentes do substrato, nível de água, resistência e demais características que sejam pertinentes.

A investigação a respeito do solo pode se dar de formas diferentes, iniciando com uma análise visual para identificações básicas como tipo de solo superficialmente por exemplo, porém para a elaboração de projetos geotécnicos em geral e de fundações mais precisamente, é

obrigatório que haja um reconhecimento adequado e profundo do solo com ensaios localizados no local de obra ou em laboratório.

Existem vários métodos de campo e laboratoriais para a investigação geotécnica, e a sondagem à percussão é um exemplo comumente utilizado para esse estudo inicial de solo, sendo o “Standard Penetration Test” ou “Ensaio SPT” como é mais referido, um dos testes mais fáceis e de comum utilização. Além também da sondagem mista que é um método que conjuga a sondagem a percussão para o trecho em solo, com a sondagem rotativa para trechos em rocha, utilizada quando se faz necessário executar ensaios em trechos que necessitam de sondagem rotativa.

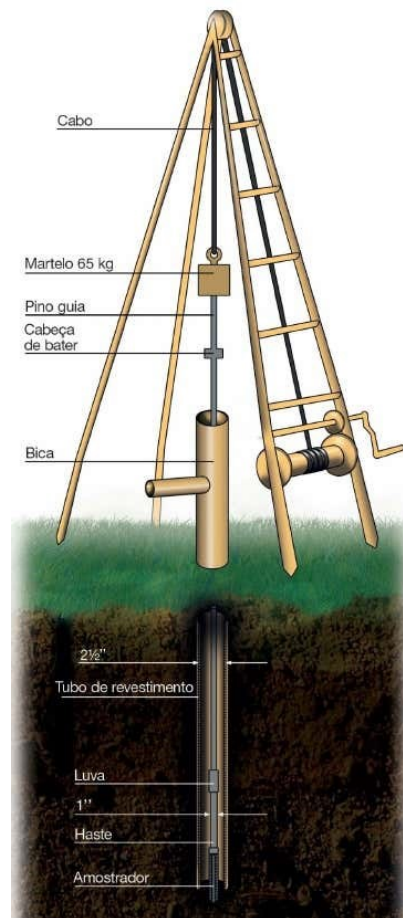
2.5.1 Standard Penetration Test (SPT)

O SPT, segundo a ABNT NBR 6122 (2019), tem como objetivo principal três informações a respeito do solo que se está sendo aplicado o teste, são eles:

- Uma amostra deformada a cada metro para que se possa saber o tipo de solo que está sendo atravessado;
- A resistência do solo a cada metro furado, indicado pelo cravamento de um amostrador padrão;
- A indicação do nível de água do terreno quando houver.

Segundo Hachich et al. (1998) em seu livro *Fundações Teoria e Prática*, o método de ensaio “Consiste basicamente na cravação de um amostrador padrão no solo, através da queda livre de um peso de 65 kg (martelo), caindo de uma altura determinada (75 cm)”, conforme Figura 5.

Figura 5 - Equipamento de sondagem



Fonte: Schnaid e Odebrecht. (2012)

2.5.2 Sondagem mista

Em alguns casos, fazer apenas uma sondagem simples percussiva não é suficiente para se determinar as características necessárias sobre um determinado subsolo. Ao encontrar um material impenetrável no solo deve-se interromper a sondagem percussiva e adotar um método rotativo, tendo então a sondagem mista, percussiva no trecho em solo com o SPT por exemplo e rotativa no trecho em rocha ou matacões, no caso de dúvida quanto ao material encontrado na sondagem, a sondagem mista também deve ser utilizada.

Segundo a ABNT NBR 6122 (2019), “Em se tratando de maciço rochoso, rocha alterada ou mesmo solo residual jovem, as amostras coletadas devem indicar suas características principais, incluindo-se eventuais descontinuidades, indicando: tipo de rocha, grau de alteração, fraturamento, coerência, xistosidade, porcentagem de recuperação e o índice de qualidade da rocha (RQD). Sempre que possível deve ser feita a determinação do N_{SPT} .”

2.6 PROVA DE CARGA ESTÁTICA

Ao concluir todas as etapas necessárias para execução da fundação da edificação, sendo elas a investigação geotécnica, projeto de fundação e execução da fundação em si, em caso de estacas é usual e normativo que ainda haja um teste final para reafirmação de que aquela estaca suportará toda a carga a qual ela foi projetada para resistir, utilizando assim o ensaio de prova de carga estática, que segundo a ABNT NBR 6122 (2019), em casos de obras que o número total de estacas raiz sejam superiores a 75, o ensaio é obrigatório. Esse ensaio é o método mais tradicional e mais indicado para medir a capacidade de carga de estaca depois de pronta, e consiste basicamente na aplicação de esforços estáticos de maneira crescente em intervalos de tempo, registrando seus deslocamentos e deformações correspondentes e avaliando o comportamento da estaca.

Para execução do teste, barras instrumentadas são concretadas junto ao eixo axial da estaca com sensores em pontos diferentes que serão responsáveis por medir e transmitir ao sistema de aquisição de dados ou transdutor, as deformações medidas no fuste da estaca. Já nas estacas de reação, são instalados tirantes que são fixados a uma viga de reação (principal e secundárias), dimensionada para tal, e, por meio de um processo de ação e reação causado por um macaco hidráulico, consegue-se exercer força na estaca que está sendo realizada o teste para medir sua capacidade por meio da determinação da curva carga vs recalque.

Figura 6 - Ensaio de Prova de Carga Estática



Fonte: Autor. (2021)

3 ESTUDO DE CASO

A fim de melhor análise acerca dos métodos de cálculo estudados, utilizando dados e informações reais sobre uma obra residencial na cidade de Uberlândia/MG com 34 pavimentos, foram feitas comparações e uma análise crítica a respeito dos métodos abordados. A obra em questão tem como projeção para depois de finalizada, ser uma das maiores em questão de altura da cidade, e com isso é possível imaginar a magnitude e dificuldade da construção do edifício.

Por ser uma obra de grande porte, exigiu-se uma fundação pesada, que após sondagens no solo da construção e profunda análise do edifício, optou-se pela utilização de estacas raiz como responsável pelo elemento de transferência de carga ao maciço.

O principal motivo pela escolha do método das estacas raiz, se dá pelo fato da grande presença de rochas e matacões no terreno, em uma profundidade relativamente rasa, sendo assim necessário que as estacas fossem embutidas parcialmente em rocha. Dessa forma, o projeto foi calculado por um projetista que optou pela utilização de estaca raiz como melhor procedimento para situação, podendo a seguir ser analisado o relatório de sondagem mista e resultado de teste de prova de carga.

3.1 SUBSOLO LOCAL

Como dito anteriormente, a investigação do solo em que se pretende construir é primordial e indispensável antes de qualquer passo, até mesmo para se decidir qual tipo de fundação será utilizado. Com isso foi realizado um estudo e relatório apresentando os resultados através de seções geológicas, indicando as características dos materiais perfurados e a posição do nível de água encontrados nos pontos de sondagens que foram realizados.

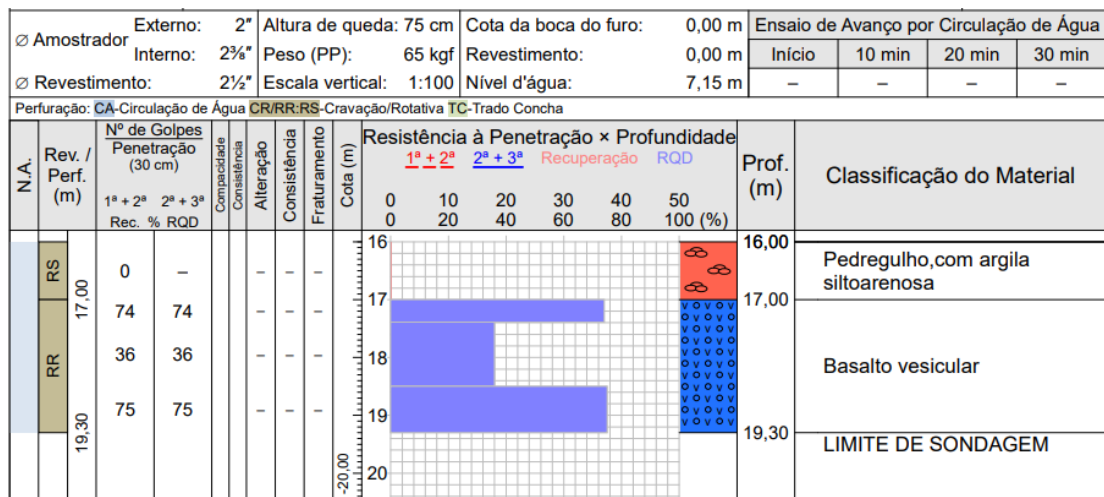
A sondagem de simples reconhecimento com SPT foi conduzida com base nos procedimentos encontrados na NBR 6484:2020.

Segundo a NBR 6484 (2020) sobre o procedimento de execução, “A sondagem deve ser iniciada com emprego do trado-concha ou cavadeira manual até a profundidade de 1 m, seguindo-se a instalação, até essa profundidade, do primeiro segmento do tubo de revestimento dotado de sapata cortante. Nas operações subsequentes de perfuração, intercaladas às de ensaio e amostragem, deve ser utilizado trado helicoidal até se atingir o nível d’água freático ou quando o avanço da perfuração com emprego do trado helicoidal for inferior a 50 mm após 10 min de operação. Neste caso, passa-se ao método de perfuração por circulação de água, também chamado de lavagem. Não é permitido que, nas operações com trado, o mesmo seja cravado dinamicamente com golpes do martelo ou por impulsão da composição de perfuração. Pode-se

utilizar outros tipos de trado para perfuração desde que seja garantida a eficiência quanto à limpeza do furo, bem como quanto à não perturbação do solo no ponto de ensaio. Não é permitido o avanço da perfuração, para a próxima cota de amostragem, com o uso do próprio amostrador-padrão. Estes casos, considerados especiais, devem ser devidamente justificados no relatório definitivo.”

Com o avanço do SPT, caso seja encontrado material impenetrável, como rochas e matacões, o procedimento de perfuração em questão deve ser substituído por perfuração rotativa, onde o equipamento de sondagem através de uma coroa diamantada em sua ponta realiza a rotação perfurando o material e retirando uma amostra cilíndrica do mesmo. Na Figura 7 pode-se observar o relatório de sondagem da obra estudada. O relatório completo está apresentado no Apêndice A.

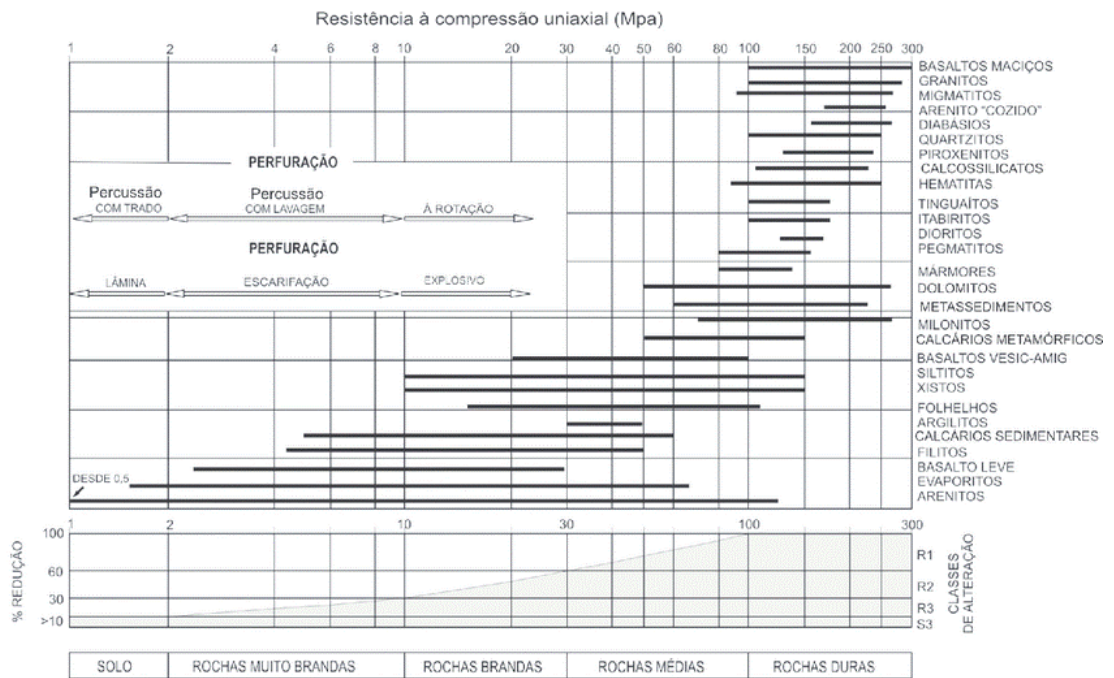
Figura 7 - Relatório de sondagem mista com valores de RQD



Fonte: Empresa de investigação. (2021)

Observando ainda pela sondagem, registrase no local que a rocha presente é o basalto vesicular (leve), e segundo Vaz (1996) é possível basear a resistência a compressão da rocha presente no local através da Figura 8, que mostra que essa resistência pode variar de 3 a 30 MPa.

Figura 8 – Resistência a compressão uniaxial dos determinados tipos de rocha



Fonte: Vaz. (1996)

3.2 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO

Ao analisar o solo e se deparar com rocha foi constatado a necessidade de uma fundação compatível com a forma do terreno, na obra em questão foi adotado as estacas-raiz embutidas parcialmente em rocha, e com isso a partir dos métodos citados ao longo do trabalho, serão apresentados os resultados obtidos para as resistências admissíveis lateralmente e na base em cada método.

Primeiramente utilizando o método de Rowe e Armitage, onde as irregularidades encontradas possuem profundidades entre 4 e 10mm, largura superior a 5mm e espaçamento entre 50 e 200mm (Caso R3), foi utilizado a Equação 1, sendo a resistência à compressão simples da rocha na qual está inserida à estaca equivalente a 8MPa devido a ser um basalto, usando de referência a Figura 8 e também segundo Hachich et al. (1998) que apresente que essa resistência varia entre 6 e 10 MPa, e a pressão atmosférica igual a 0,101 MPa, Logo:

$$\frac{\tau_{m\acute{a}x}}{0,101} = 1,41 \cdot \sqrt{\frac{8}{0,101}} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} = 1,27MPa \quad \text{Equação 16}$$

Ainda no método de Rowe e Armitage, para cálculo da pressão admissível na base da estaca, na interface inferior estaca-rocha, utiliza-se a Equação 5, já que a base da estaca em questão se encontra embutida na rocha por mais de um diâmetro de dimensão da estaca; A rocha

na base foi considerada sem alterações ou descontinuidades significativas para base de cálculos, devido à falta de divulgação das informações, e sem cavidades ou espaços vazios na interface, sendo assim, obtém-se:

$$q_{m\acute{a}x} = 2,5 \cdot 8 \rightarrow q_{m\acute{a}x} = 20MPa \quad \text{Equação 17}$$

Partindo para os métodos de cálculo dos brasileiros Cabral e Antunes, utilizando-se a Equação 10 e baseado no f_{ck} de 20MPa utilizado na estaca é possível obter o resultado de resistência lateral unitária máxima do fuste da estaca.

$$\tau_{m\acute{a}x} \leq \frac{20}{15} \leq 1,3 MPa \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} = 1,33MPa \quad \text{Equação 18}$$

Para Cabral e Antunes utiliza-se a Equação 9 para cálculo de resistência de ponta unitária, e para isso considerando a média do tipo 1 de rocha dos autores já que se tem basalto nessa determinada fundação e uma rocha muito alterada, obtém-se uma resistência a compressão simples da rocha equivalente a 8MPa e um coeficiente de correlação igual a 0,56. Sendo assim:

$$\tau_p = 0,56 \cdot 8 \leq 8MPa \rightarrow \tau_p = 4,48MPa \quad \text{Equação 19}$$

Além desses métodos de cálculos desenvolvidos por esses autores especificamente, há métodos que são adotados por diversos autores que para o cálculo das resistências sejam usados apenas as propriedades das rochas ou do concreto em si. Usando as propriedades da rocha, Reese e O'Neill por exemplo utilizam da Equação 12 para definir a tensão lateral última da estaca no caso em que a compressão simples da rocha seja superior a 2000kPa, e outros autores adotam que para a definição da resistência da base seja utilizado a Equação 14.

$$q_{sf} = 6,7 \cdot \sqrt{8000} \text{ para } 8000kPa > 2000 kPa \rightarrow q_{sf} = 0,60MPa \quad \text{Equação 20}$$

$$q_b \leq \left(\frac{1}{5} \text{ a } \frac{1}{8}\right) \cdot 8 \rightarrow q_b = 1,23MPa \quad \text{Equação 21}$$

Já se tratando dos cálculos com base na resistência do concreto, Hachich et al. (1998) utiliza a Equação 13. Para cálculo da resistência lateral unitária, como dito anteriormente, o f_{ck} da estaca em questão é de 20MPa. E para a resistência da base o autor implica que a tensão admissível deve ser menor que 33% da resistência a compressão do concreto, conforme Equação 15.

$$q_{s_a} = (0,03 \text{ a } 0,05) \cdot 20 \rightarrow q_{s_a} = 0,8MPa \quad \text{Equação 22}$$

$$q_b \leq (0,33) \cdot 20 \rightarrow q_b = 6,6MPa \quad \text{Equação 23}$$

3.3 ANÁLISE DE DADOS

A partir dos resultados obtidos com os cálculos feitos e já transformando para kN/m², foi possível obter a Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados dos métodos de cálculos

Método	Atrito lateral unitário (kN/m ²)	Tensão unitária de ponta (kN/m ²)
Rowe e Armitage	1.270	20.000
Cabral e Antunes	1.330	4480
Em função das propriedades da rocha	600	1.230
Em função das propriedades do concreto	800	6.600
Média	1.000	7.158

Fonte: Autor. (2022)

A estaca observada no estudo de caso em questão, além da proporção embutida em solo (6 metros, desconsiderados para cálculos de resistência devido a parte embutida em rocha onde a resistência é de proporção bem maior) possui também 6 metros de profundidade inseridos em rocha com um diâmetro de 40 centímetros na parte rochosa. Sendo assim, a partir da área de contato da porção embutida em rocha e os valores de atrito unitário obtidos na Tabela 1, obtêm-se a Tabela 2 com os valores de resistência da estaca segundo cada método.

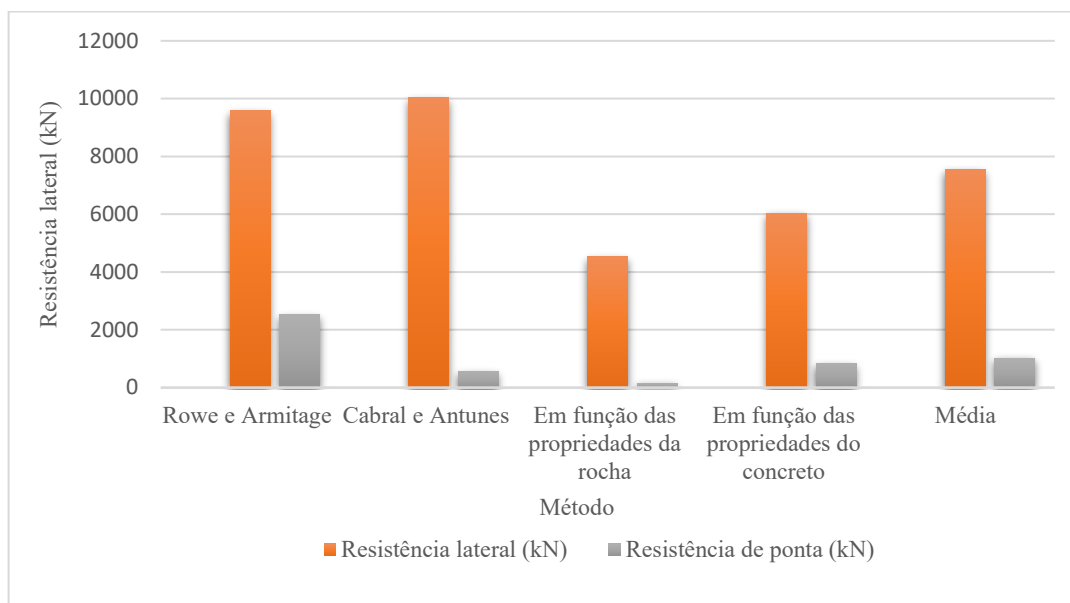
Tabela 2 - Resultados das resistências das estacas

Método	Resistência lateral (kN)	Resistência de ponta kN)	Resistência total (kN)
Rowe e Armitage	9.576	2.514	12090
Cabral e Antunes	10.028	563	10591
Em função das propriedades da rocha	4.524	155	4679
Em função das propriedades do concreto	6.032	830	6862
Média	7.540	900	8440

Fonte: Autor. (2022)

E por fim o gráfico, para melhor visualização com as resistências laterais e de ponta.

Figura 9 - Resistência lateral e de ponta



Fonte: Autor. (2022)

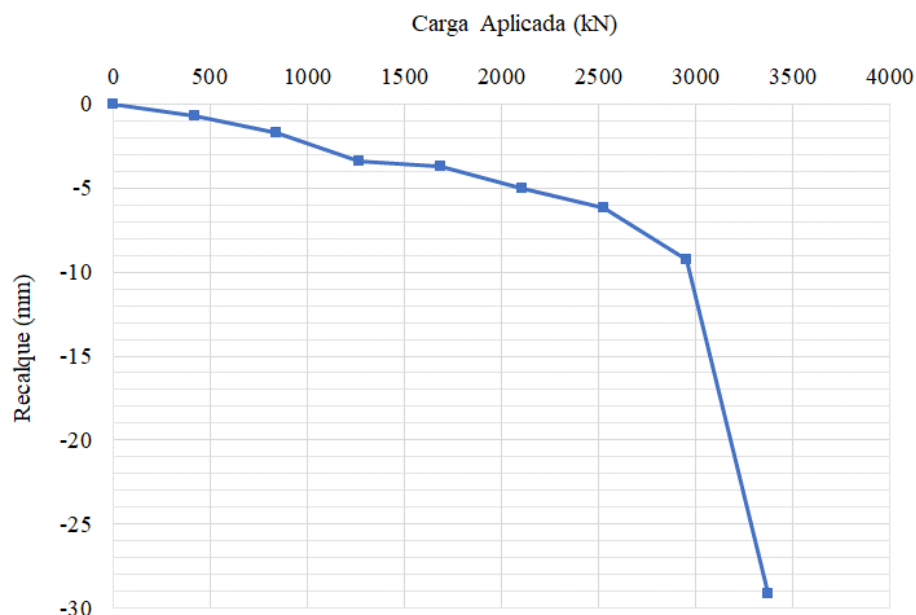
Com isso foi notado que nos métodos de cálculo de Rowe e Armitage, e Cabral e Antunes os resultados obtidos são parcialmente próximos, enquanto quando se baseia nas propriedades da rocha ou do concreto as resistências se mostram com valores inferiores, devido a estar usando apenas suas propriedades como referência e não a interação proporcionada.

3.4 PROVA DE CARGA

Toda e qualquer atitude que for em favor da segurança em uma obra deve ser tomada, esta segurança está presente em cada etapa, desde a sondagem até a execução final da estaca, e ao terminar, para garantir que o procedimento executivo e os cálculos foram feitos corretamente, é necessário fazer a prova de carga da estaca como garantia de que tudo ocorreu bem, e como o próprio nome diz, provando que sua carga está sendo resistida, a ABNT NBR 6122 (2019) inclusive impõe a obrigatoriedade em se realizar o ensaio em obras onde o número de estacas raiz seja superior a 75, sendo a quantidade de estacas a serem ensaiadas igual a 1% do total de estacas, arredondando o valor para cima. Sendo assim na obra em questão foram testadas três estacas, aplicando-se os procedimentos como pede a norma e por fim chegando aos dados mostrados no gráfico a seguir da estaca utilizada de base para realização do estudo, vale lembrar que houve uma ruptura no bloco em questão com 80% da carga prevista aplicada, que é dito no relatório emitido pela empresa responsável pela prova de carga, porém no momento de rompimento do bloco, a carga aplicada já era suficiente para assegurar a resistência

da estaca. Na tabela 3 também consta os dados da representação do gráfico, com as cargas aplicadas e o recalque médio dos extensômetros.

Figura 10 - Resultado da prova de carga



Fonte: Autor. (2022)

Tabela 3 - Cargas aplicadas e recalques obtidos

Estágio	Carga aplicada (kN)	Média de recalque dos extensômetros (mm)
0	0	0
1	422	-0,7
2	843	-1,75
3	1265	-3,38
4	1687	-3,69
5	2108	-4,99
6	2530	-6,21
7	2952	-9,28
8	3373	-29,15

Fonte: Autor. (2022)

Com os valores da prova de carga pôde-se observar que a resistência lateral da estaca foi muito superior ao necessário solicitado, com 3373kN aplicados (cerca de 40% superior ao solicitado segundo a empresa) houve ruptura do bloco de ensaio, mas a estaca em si reagindo de forma muito superior ao previsto, provavelmente pelo superdimensionamento da porção da estaca embutida em rocha.

Através da carga de ruptura apresentada na prova de carga é possível calcular qual o recalque de ruptura da estaca, obtido através da Equação 24 que se encontra na NBR 6122

(2019), e demonstrado no gráfico a seguir onde a carga de ruptura fica definida em função do recalque elástico da estaca somado a 3,33% de seu diâmetro.

$$\Delta_r = \frac{D}{30} + \frac{P*L}{E*A} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

Δ_r = Recalque de ruptura;

P = Carga de ruptura;

L = Comprimento da estaca;

A = Área da seção transversal da estaca;

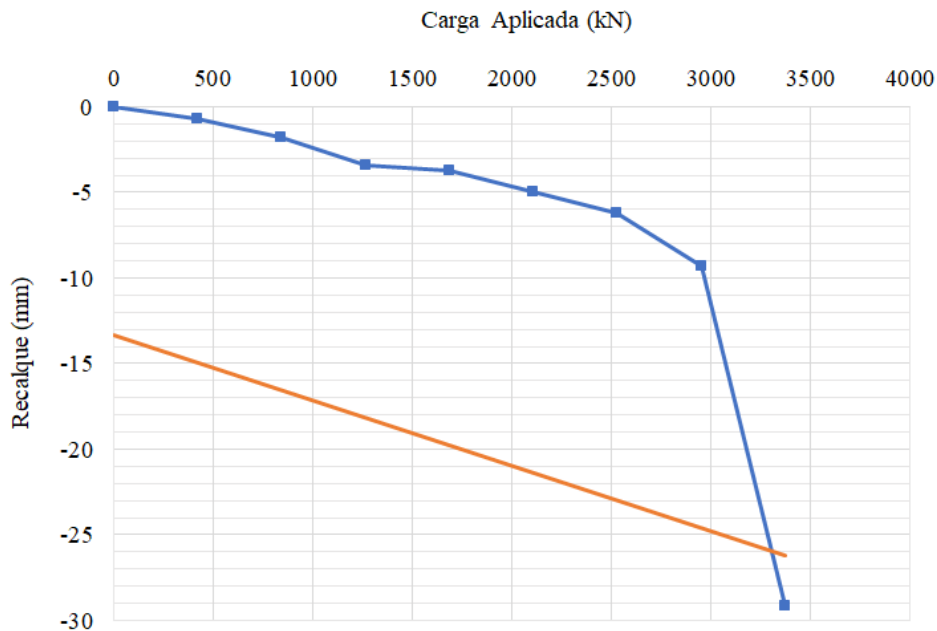
E = Módulo de elasticidade do material da estaca;

D = Diâmetro da estaca.

Sendo assim, obtém-se:

$$\Delta_r = \frac{400}{30} + \frac{3373*12*10^3}{25*(10)^6*0,1257} = 26,21\text{mm} \quad \text{Equação 25}$$

Figura 11 - Curva de carga aplicada vs reta de recalque de ruptura



Fonte: Autor. (2022)

É possível ainda fazer um comparativo entre os valores calculados por cada método e o valor de ruptura apresentado na prova de carga, analisando assim o quanto cada método está saindo do padrão do que realmente foi encontrado no teste, para isso utiliza-se os valores de cada resistência lateral somado à resistência de ponta observados na Tabela 2 dividido pela

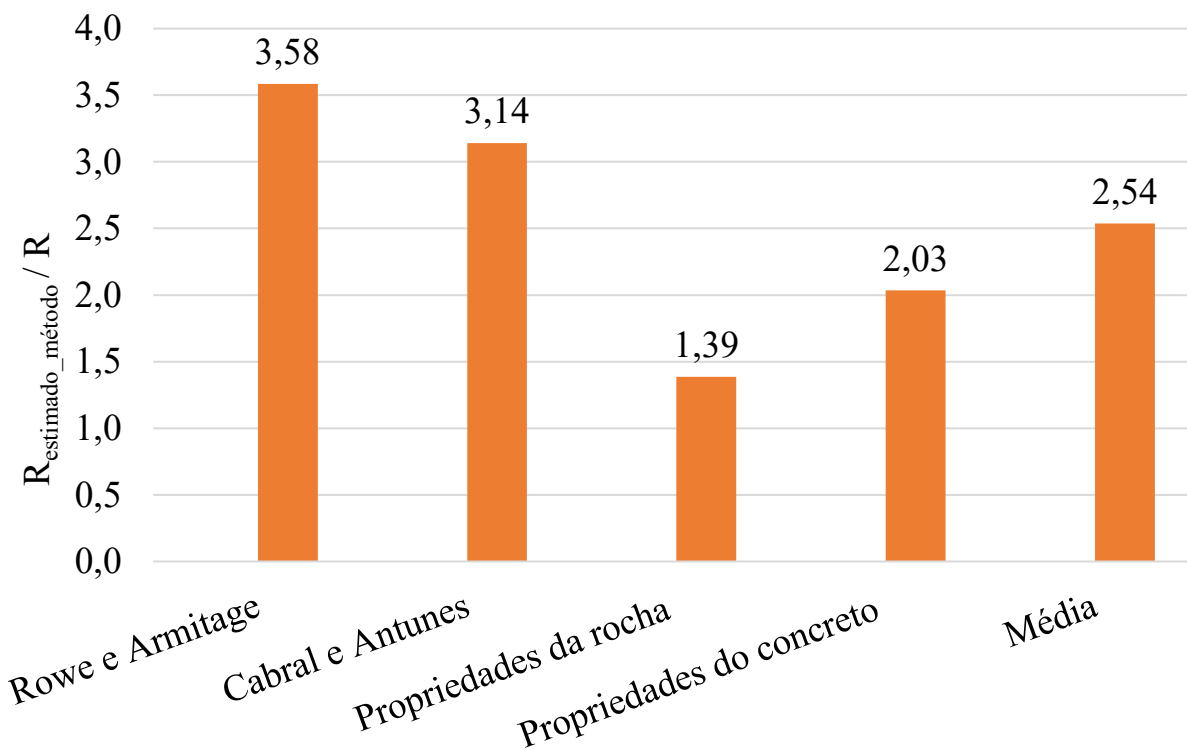
carga de ruptura na prova de carga, equivalente a 3373kN (R). Podendo assim obter a tabela e o gráfico representado a seguir.

Tabela 4 - Relação entre resultado dos métodos e carga de ruptura da prova de carga

Método	$R_{\text{estimado_método}} / R$
Rowe e Armitage	3,58
Cabral e Antunes	3,14
Em função das propriedades da rocha	1,39
Em função das propriedades do concreto	2,03
Média	2,54

Fonte: Autor. (2022)

Figura 12 - Relação entre resultado dos métodos e carga de ruptura da prova de carga



Fonte: Autor. (2022)

Ao dimensionar uma fundação é necessário que os métodos corretos sejam aplicados, adicionar métodos parecidos que não foram feitos para aquela situação não é a melhor opção e pode acarretar desde pequenas patologias até grandes desastres. Por isso cada detalhe na etapa de fundação é essencial.

Primeiro é necessário uma correta sondagem do terreno, fazendo a sondagem mista em caso de presença de rocha, que se utiliza de sondagem percussiva e rotativa e não apenas a percussiva no trecho em solo, após isso é necessário uma boa avaliação para definição de qual o melhor tipo de fundação, fazendo cálculos de dimensionamento precisos, calculando resistências, executando de maneira correta a estaca e respeitando os procedimentos impostos pela norma para maior segurança, e por fim fazendo um teste de prova de carga após a estaca estar pronta para realmente assegurar que aquela estaca esta suportando a capacidade que deveria.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Se tratando de estacas raiz, pôde-se concluir que a porção embutida em solo pode ser desprezada, visto que como a resistência da rocha nesse e na maioria dos casos é de proporção muito maior, a parte em solo se torna desprezível. Sendo assim, a estaca embutida parcialmente em rocha, tem sua carga dissipada quase que totalmente na rocha, através do atrito lateral e da base, sendo o fuste da estaca o maior responsável pela transferência da carga.

A partir dessas constatações, diferentes autores desenvolveram métodos de cálculo para avaliar a capacidade de carga dessas estacas, métodos esses utilizados no estudo de caso presente para dimensionar a capacidade de carga de uma estaca em específico de uma obra real na região.

Rowe e Armitage, assim como a dupla brasileira Cabral e Antunes, desenvolveram seus próprios métodos para esse dimensionamento, já outros autores preferem utilizar das propriedades da rocha ou do concreto para obter a capacidade de carga da estaca, fato é que ambos os métodos demonstrados no trabalho demonstram um resultado em comum, provavelmente pelo embutimento excessivo da estaca em rocha, os resultados demonstram uma capacidade de carga da estaca excessivamente alto, além do exigido pela estrutura, em questão construtiva para resistência da edificação não se nota problema a princípio, porém observando o lado do custo, o embutimento excessivo pode se tornar um grande problema, gerando custos muito maiores da fundação para quem está realizando o empreendimento.

Ao realizar o teste da prova de carga estática, mais uma vez pode-se obter a confirmação do provável embutimento excessivo, apesar de no momento de aplicação de 80% da carga o bloco de teste tenha torcido, a carga sustentada já era superior ao necessário pelo projeto.

Sendo assim, foi visto a importância do uso de análises para avaliação de uma fundação, que se estudada com dedicação pode se obter uma fundação resistente que não gere problemas estruturais, mas que ao mesmo tempo concilie-se com o financeiro de obra.

5 CONCLUSÃO

A partir dos métodos de cálculo aplicados e da prova de carga realizada em obra, foi possível atender aos objetivos do estudo em questão, havendo as devidas comparações e avaliando a melhor proposta para estimativa da capacidade de carga de uma estaca raiz, sendo assim, foi possível obter as conclusões a seguir.

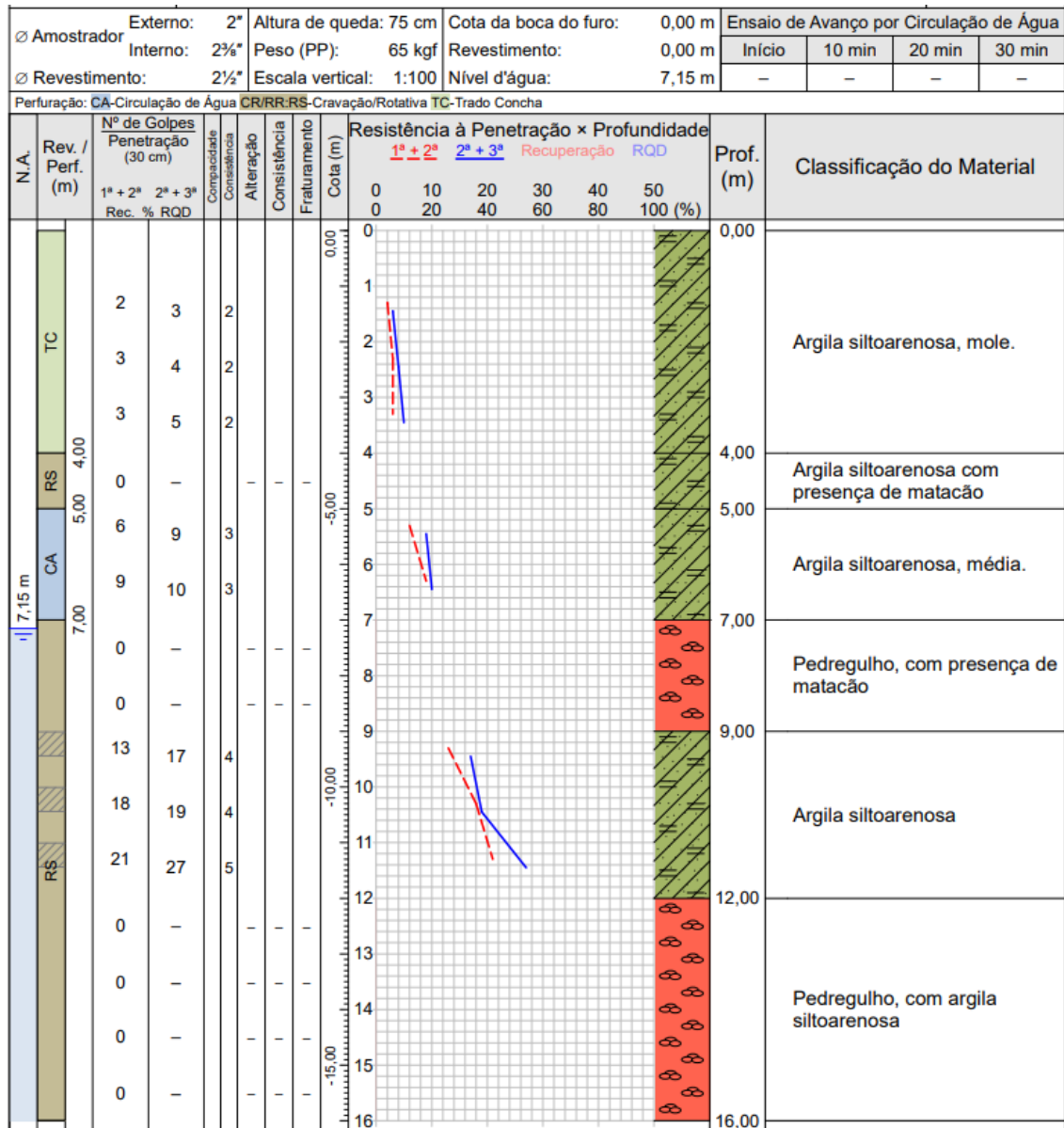
- Todos os métodos analisados superestimaram a capacidade de carga da estaca, em média a estimativa pelos métodos empregados foi de 154% acima comparado com a carga de ruptura convencional;
- O método de Rowe e Armitage apresentou a máxima discrepância estimada em 258% acima do valor fixado para a carga de ruptura convencional;
- Para estimativa de cálculos, devido a falta de informação a respeito das descontinuidades da rocha, foi considerado rocha sem ou com pouca alteração, o que pode ser um dos motivos de os valores obtidos estarem apresentando uma superestimação.
- O método que leva em consideração as propriedades da rocha para base de cálculos, foi o método que mais se aproximou do real, tendo seu resultado superior a carga de ruptura em 39%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ABNT], A. B. DE N. T. NBR 6122:2019 Projeto e execução de fundações. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, v. 3, p. 120, 2019.
- ABNT. **Abnt Nbr 6484**. [s.l: s.n.].
- ALBUQUERQUE, P. J.; GARCIA, J. R. **Engenharia de Fundações**. 1. ed. São Paulo: [s.n.].
- HACHICH, W. et al. **Fundações Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Pini LTDA, 1998.
- PEREIRA, C. Estaca Raiz: Características, Processo Executivo, Vantagens e Desvantagens. **Escola Engenharia**, 2018.
- RAMOS, L.; YABUSAKI, G.; COSTA, A. Método De Perfuração Por Circulação Reversa Com Air Lift Empregado Na Fundação Da Ponte Anita Garibaldi. p. 8–14, 2019.
- SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.
- VAZ, L. F. **Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais** Solos e Rochas, 1996.

APÊNDICE A

Relatório de sondagem mista.



Fonte: Empresa de investigação. (2021)

Relatório de sondagem mista.

⌀ Amostrador Externo: 2" Altura de queda: 75 cm Cota da boca do furo: 0,00 m Interno: 2 3/8" Peso (PP): 65 kgf Revestimento: 0,00 m		Ensaio de Avanço por Circulação de Água												
⌀ Revestimento: 2 1/2" Escala vertical: 1:100 Nível d'água: 7,15 m		Início	10 min	20 min	30 min									
		-	-	-	-									
Perfuração: CA-Circulação de Água CR/RR/RS-Cravação/Rotativa/Trado Concha														
N.A.	Rev. / Perf. (m)	Nº de Golpes Penetração (30 cm)		Comparação Consistência	Alteração	Consistência	Fraturamento	Cota (m)	Resistência à Penetração × Profundidade				Prof. (m)	Classificação do Material
		1ª + 2ª	2ª + 3ª						1ª + 2ª	2ª + 3ª	Recuperação	RQD		
									0 10 20 30 40 50					
									0 20 40 60 80 100 (%)					
	RS	0	-					16				16,00	Pedregulho, com argila siltoarenosa	
		74	74					17				17,00	Basalto vesicular	
	RR	36	36					18						
		75	75					19				19,30	LIMITE DE SONDAGEM	
								20						
								21						
								22						
								23						
								24						
								25						
								26						
								27						
								28						
								29						
								30						
								31						
								32						

Fonte: Empresa de investigação. (2021)