

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

MARIA EDUARDA DECICCO KUHN

CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS ESTÁTICOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE  
DE CARGA E OS NÍVEIS DE TORQUE EXIGIDOS PARA A EXECUÇÃO DE  
ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA

Joinville

2022

MARIA EDUARDA DECICCO KUHN

CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS ESTÁTICOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE  
DE CARGA E OS NÍVEIS DE TORQUE EXIGIDOS PARA A EXECUÇÃO DE  
ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel no Curso de  
Graduação em Engenharia Civil de  
Infraestrutura do Centro Tecnológico de  
Joinville da Universidade Federal de Santa  
Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Heidemann.

Joinville

2022

MARIA EDUARDA DECICCO KUHN

CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS ESTÁTICOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE  
DE CARGA E OS NÍVEIS DE TORQUE EXIGIDOS PARA A EXECUÇÃO DE  
ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 29 de julho de 2022.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Marcelo Heidemann  
Orientador/Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Daniel Hastenpflug  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Thayara Monteiro Orandes da Graça  
Membro  
Batessolo e Fundata Engenharia

---

Dr. Ricardo Bergan Born  
Membro  
BornSales Engenharia

Dedico este trabalho a meus amados pais, Yolanda e  
Wanderley Kuhn, que nunca desistiram de mim,  
Ao companheirismo de meus amigos e colegas de faculdade,  
A toda dedicação dos excelentes professores da graduação,  
E a Deus por sempre me dar força e motivação para continuar.

## **AGRADECIMENTOS**

Tantas pessoas cruzaram meu caminho durante estes anos de faculdade, difícil conseguir retribuir toda a ajuda, acolhimento e parceria que me proporcionaram nos últimos anos. Me apoiaram, me deram força, não me deixaram desistir porque sabiam que eu era capaz. E graças a Deus, eu nunca desisti, resolvi vencer cada pequeno obstáculo e hoje estou aqui, entregando o meu trabalho de conclusão de curso. Realmente passa um filme na cabeça, lembrando das lutas diárias, das madrugadas de estudos, das festas com os amigos, dos dias de laboratório, tudo valeu a pena, cada esforço!

Vou começar agradecendo os professores da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Joinville, sem exceção, sem vocês não teríamos crescido e amadurecido tanto, horas dedicadas a nós, alunos, cada aula programada com todo o carinho do mundo, cada prova difícil, cada puxão de orelha na turma, vocês nos tornaram quem somos hoje, profissionais de excelência, que encaram qualquer desafio, vocês nos tornaram fortes. Claro que meu agradecimento especial vai ao meu orientador Marcelo Heidemann, que nunca mediu esforços para me atender de noite, finais de semana, me transmitiu muito conhecimento, me orientou da melhor maneira, você é demais professor! Um profissional maravilhoso, grata por dividir essa experiência contigo.

Meus amigos, nossa como vocês foram importantes neste processo, quando eu achava que não podia mais vocês estavam ao meu lado, lutando comigo. Aqui eu agradeço a todos que me acompanharam nestes anos, aos que convivi no início do curso e aos que permanecem ao meu lado até hoje. Nathalia, Bruna, Carol Moresca, Thayse, Samanta, Carol Matos, eu amo vocês meninas, vocês são as principais de um grupo de imenso de pessoas.

Por fim e não menos importante, bem pelo contrário, os mais importantes, minha família. Mãe, pai, irmão, tia Telma, tio Vita e vó, os que mais acreditam em mim e me dão suporte para as ideias mais loucas. Que bom poder dividir a vida com vocês. Demorou, mas hoje estou aqui e sei que estão orgulhosos! Obrigada por TUDO, este trabalho é para vocês.

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação conseguimos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho”.

(DALAI LAMA).

## RESUMO

Este trabalho apresenta um comparativo entre o torque exercido por uma perfuratriz para a execução de estacas do tipo hélice contínua, e as estimativas de capacidade de carga obtidas através do método estático e semiempírico de Aoki e Velloso (1975). Os dados coletados para análise foram retirados de uma obra do tipo predial, executada na cidade de Balneário Piçarras (SC). Foram efetuadas três perfurações para realização do ensaio tipo cone penetration test (CPT) e mais um furo para sondagem do tipo standard penetration test (SPT), com a intenção de realizar a investigação geotécnica do terreno em questão. Com base nos dois ensaios de campo foi possível determinar as previsões de capacidade de carga das estacas. De posse desses dados um conjunto de análises estatísticas univariadas foi realizado, com o intuito de obter uma correlação entre as variáveis torque e os parâmetros gerados na previsão de capacidade de carga. Não tendo grande sucesso nestas análises, fez-se a investigação de modelos multivariados. O que melhor estimou a resistência admissível foi o que continha como variáveis explicativas o torque, profundidade e  $q_c$ , e com limitação da resistência de ponta nos dados de entrada, gerando um coeficiente de determinação de 0,79, mas como  $q_c$  é utilizado para estimar também a carga admissível o modelo é pouco interessante do ponto de vista dos pressupostos estatísticos aplicáveis à situação. Um segundo modelo com coeficiente de correlação ligeiramente menor se mostrou o mais interessante, já que faz uso apenas do torque e profundidade para estimativa de carga geotécnica admissível, este modelo tem melhor resultado considerando os pressupostos estatísticos adotados como balizadores da qualidade dos mesmos. Foi possível concluir que o torque não é uma variável tão significativa na determinação da resistência admissível quanto a profundidade.

**Palavras-chave:** Fundações profundas. Estacas hélice contínua. Capacidade de carga. Monitoramento de estacas. Modelos univariados, modelos multivariados.

## ABSTRACT

This study presents a comparison between the torque exerted by a drill for the execution of continuous flight augering, and the load capacity estimates obtained through the static and semi-empirical method of Aoki and Velloso (1975). The data collected for analysis were taken from a building-type construction carried out in the city of Balneário Piçarras (SC). Three boreholes were drilled due to the cone penetration tests (CPT) and one more borehole was drilled due to standard penetration test (SPT) type, in order to carry out the geotechnical investigation of the terrain in question. Based on the two field tests, it was possible to predict the load capacity of the piles. With these data, a set of univariate statistical analysis was performed, in order to obtain correlations between the torque variables and the parameters generated in the load capacity forecast. As these analyses turned out to be unsuccessful, the investigation of multivariate models was carried out. The best estimation of the allowable resistance was the one that contained torque, depth and  $q_c$  as explanatory variables, also considering the limitation of the tip resistance from the input data, generating a determination coefficient of 0.79. However, as  $q_c$  is also used to estimate the allowable load, the model presents limited importance in regards to the statistical assumptions applicable to the situation. A second model with a slightly lower correlation coefficient proved to be the most interesting, as it only uses torque and depth to estimate the allowable geotechnical load. This model has better results considering the statistical assumptions adopted as indicators of their quality. It was possible to conclude that the torque is not as significant a variable in the determination of the allowable resistance as the depth.

**Keywords:** Deep foundations. Continuous flight augering. Bearing capacity. Piles monitoring. Univariate models, multivariate models.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Perfuratriz para execução de estacas hélice contínua .....                      | 18 |
| Figura 2 – Disposição dos sensores na perfuratriz .....                                    | 19 |
| Figura 3 – Aparelho de monitoramento .....   | 21 |
| Figura 4 – Folha controle de uma EHC .....   | 21 |
| Figura 5 – Mecanismos de capacidade de carga em estacas .....                              | 24 |
| Figura 6 – Etapas de execução do SPT Manual .....  | 32 |
| Figura 7 – Tabela do estado de compacidade e consistência atualizada .....                 | 33 |
| Figura 8 – Laudo de um ensaio SPT .....  | 34 |
| Figura 9 – Equipamento utilizado no SPT Mecanizado .....                                   | 35 |
| Figura 10 – Ponteiras do cone mecânico e elétrico .....                                    | 36 |
| Figura 11 – Relação entre razão de atrito, resistência de ponta e tipo de solo .....       | 37 |
| Figura 12 – Resultado de um ensaio CPT .....   | 38 |
| Figura 13 – Localização do estudo de caso .....  | 39 |
| Figura 14 – Recorte do mapa geológico de Santa Catarina .....                              | 40 |
| Figura 15 – Localização das sondagens SPT e CPT .....                                      | 41 |
| Figura 16 – Resultado da sondagem CPT 1 .....  | 42 |
| Figura 17 – Resultado da sondagem CPT 1 .....  | 43 |
| Figura 18 – Resultado da sondagem CPT 2 .....  | 44 |
| Figura 19 – Resultado da sondagem CPT 2 .....  | 45 |
| Figura 20 – Resultado da sondagem CPT 3 .....  | 46 |
| Figura 21 – Resultado da sondagem CPT 3 .....  | 47 |
| Figura 22 – Resultado da sondagem SPT .....  | 48 |
| Figura 23 – Fluxograma das etapas realizadas .....   | 50 |
| Figura 24 – Bloco mais próximo ao SPT e CPT 3 .....  | 51 |
| Figura 25 – Bloco mais próximo ao CPT 2 .....  | 51 |
| Figura 26 – Bloco mais próximo ao CPT 1 .....  | 52 |
| Figura 27 – Gráfico de dispersão entre $N_{SPT}$ e pressão para geração de Torque .....    | 62 |
| Figura 28 – Gráfico de dispersão entre Profundidade e pressão para geração de Torque ..... | 63 |
| Figura 29 – Gráfico de dispersão entre $R_p$ e pressão para geração de Torque .....        | 63 |
| Figura 30 – Gráfico de dispersão entre $R_l$ e pressão para geração de Torque .....        | 63 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 31 – Gráfico de dispersão entre RI acumulado e pressão para geração de Torque .....                | 64 |
| Figura 32 – Gráfico de dispersão entre Radm e pressão para geração de Torque...64                         | 64 |
| Figura 33 – Gráfico de dispersão entre Profundidade e pressão para geração de Torque (CPT 1, 2 e 3) ..... | 65 |
| Figura 34 – Gráfico de dispersão entre Rp e pressão para geração de Torque (CPT 1, 2 e 3) .....           | 65 |
| Figura 35 – Gráfico de dispersão entre RI e pressão para geração de Torque (CPT 1, 2 e 3) .....           | 65 |
| Figura 36 – Gráfico de dispersão entre RI acumulado e pressão para geração de Torque (CPT 1, 2 e 3) ..... | 66 |
| Figura 37 – Gráfico de dispersão entre Radm e pressão para geração de Torque (CPT 1, 2 e 3).....          | 66 |
| Figura 38 – Resíduos do modelo F6 comparados a normal.....  | 70 |
| Figura 39 – Resíduos do modelo F7 comparados a normal.....  | 70 |
| Figura 40 - Resíduos do modelo E6 comparados a normal .....   | 72 |
| Figura 41 - Resíduos do modelo E7 comparados a normal .....   | 72 |
| Figura 42 – Previsão do modelo E7, calculado x estimado .....   | 74 |
| Figura 43 – Previsão do modelo F7, calculado x estimado .....   | 74 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 – Resumo dos modelos utilizados .....       | 56 |
| Quadro 2 – Pressupostos do modelo de regressão ..... | 57 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Coeficientes $\alpha$ e K propostos por Aoki e Velloso (1975) ..... | 26 |
| Tabela 2 – Fatores característicos do solo.....                                | 27 |
| Tabela 3 – Valores de $\alpha$ em função do tipo de solo e estaca .....        | 28 |
| Tabela 4 – Valores de $\beta$ em função do tipo de solo e estaca .....         | 28 |
| Tabela 5 – Coeficientes propostos para o método .....                          | 29 |
| Tabela 6 – Estacas utilizadas para as análises univariadas .....               | 54 |
| Tabela 7 – Resultado capacidade de carga pelo método de Aoki e Velloso .....   | 61 |
| Tabela 8 – Resumo dos modelos A e B .....                                      | 67 |
| Tabela 9 – Resumo dos modelos D e E.....                                       | 68 |
| Tabela 10 – Resumo dos modelos F e G .....                                     | 69 |
| Tabela 11 – VIF dos modelos F6 e F7 .....                                      | 71 |
| Tabela 12 – Resumo do teste de homocedasticidade.....                          | 71 |
| Tabela 13 – VIF dos modelos E6 e E7 .....                                      | 73 |
| Tabela 14 – Resumo do teste de homocedasticidade.....                          | 73 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

SPT – Standard penetration test

CPT – Cone penetration test

ELU – Estado limite último

ELS – Estado limite de serviço

$R_f$  – Razão de atrito

$q_c$  – Resistência de ponta do cone

$f_s$  – Atrito lateral do cone

ASMT – American Society for Testing and Materials

$N_{spt}$  – Índice de resistência a penetração do solo

$N_{60}$  – Índice de resistência a penetração do solo padronizado

$N_p$  –  $N_{spt}$  médio na ponta da estaca

EHC – Estaca hélice contínua

$R_p$  – Resistência de ponta

RI – Atrito lateral

$R_{rup}$  – Carga de ruptura

$R_{adm}$  – Carga admissível de projeto

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

$r^2$  – Coeficiente de determinação

$SQ_t$  – Soma dos quadrados totais

$SQ_{res}$  – Soma dos quadrados dos resíduos

Im – Linear model

VIF – Fator de inflação da variância

MSE – Erro médio quadrático

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>  | <b>14</b> |
| 1.1. OBJETIVOS  | 16        |
| <b>1.1.1. Objetivo Geral</b>  | <b>16</b> |
| <b>1.1.2. Objetivos Específicos</b>                                       | <b>16</b> |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>   | <b>17</b> |
| 2.1. ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA  | 17        |
| <b>2.1.1 Monitoramento</b>  | <b>20</b> |
| <b>2.1.2 Torque</b>   | <b>22</b> |
| 2.2. MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA ESTÁTICOS E SEMIEMPÍRICOS | 23        |
| <b>2.2.1 Método de Aoki e Velloso</b>                                     | <b>24</b> |
| <b>2.2.2 Método de Décourt e Quaresma e posterior modificação</b>         | <b>26</b> |
| <b>2.2.3 Método de Antunes e Cabral</b>                                   | <b>28</b> |
| 2.3. ENSAIOS DE CAMPO   | 30        |
| <b>2.3.1 SPT</b>  | <b>30</b> |
| <u>2.3.1.1 SPT MANUAL</u>   | <u>31</u> |
| <u>2.3.1.2 SPT MECANIZADO</u>   | <u>34</u> |
| <b>2.3.2 CPT</b>  | <b>35</b> |
| <b>3. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO</b>                                | <b>39</b> |
| 3.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO                     | 39        |
| 3.2 DADOS E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO TERRENO                          | 40        |
| <b>4. METODOLOGIA</b>   | <b>50</b> |
| 4.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS  | 50        |
| 4.2 PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA VIA SPT E CPT                         | 52        |
| 4.3 INVESTIGAÇÃO DE CORRELAÇÕES UNIVARIADAS                               | 54        |
| 4.4 INVESTIGAÇÃO DE MODELOS MULTIVARIADOS                                 | 55        |
| 4.5 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS  | 59        |
| 4.6 VALIDAÇÃO DO MODELO ESCOLHIDO   | 59        |
| <b>5. ANÁLISE DE RESULTADOS</b>   | <b>61</b> |
| 5.1 PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA VIA SPT E CPT                         | 61        |
| 5.2 INVESTIGAÇÃO DE CORRELAÇÕES UNIVARIADAS                               | 62        |
| 5.3 INVESTIGAÇÃO DE MODELOS MULTIVARIADOS                                 | 67        |
| 5.4 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS  | 69        |
| 5.5 VALIDAÇÃO DO MODELO ESCOLHIDO   | 73        |
| <b>6. CONCLUSÃO</b>   | <b>76</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b>  | <b>78</b> |
| <b>ANEXO A – DADOS FORNECIDOS</b>   | <b>82</b> |

**ANEXO B – PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA**

**88**

**ANEXO C – CÓDIGOS**

**94**

## 1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é fundamental para o desenvolvimento econômico e para a qualidade de vida da população de um país (TEIXEIRA e CARVALHO, 2005). Com o aumento significativo de habitantes nas cidades e com o avanço da tecnologia, as inovações e contribuições da engenharia civil vem crescendo gradativamente, edifícios cada vez mais altos e sofisticados são projetados, pontes e viadutos mais imponentes, e a grande maioria privilegia um visual marcante, o que acaba os tornando verdadeiros pontos de destaque e referência nas cidades (CAVALCANTE, 2020).

Esse avanço traz consigo desafios, já que estruturas maiores e robustas geram carregamentos mais elevados e, conseqüentemente, sobrecarregam o solo e as fundações, sendo imprescindível o correto dimensionamento visando a segurança. A NBR 6122:2019, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especifica os requisitos acerca do projeto e execução de fundações no Brasil, destacando que “A grandeza fundamental para o projeto de fundações profundas por estacas é a *carga admissível [...]*” (p. 25), a qual deve “[...] satisfazer simultaneamente aos estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS), para cada elemento isolado de fundação, bem como para o conjunto” (p. 26).

Para atender a ABNT NBR 6122:2019, é necessário verificar a segurança em relação à perda da capacidade de carga das estacas, que segundo Velloso e Lopes (2010), é um dos principais modos de colapso em fundações profundas. Esse é um dos grandes desafios da geotecnia já que se torna necessário estimar as propriedades do solo, as quais serão modificadas com a inserção da fundação. Também se torna fundamental conhecer o mecanismo de interação entre o solo e estaca, e sua reprodução analítica e numérica é difícil de ser reproduzida, fazendo com que correlações empíricas sejam utilizadas (LOBO, 2005).

Os atuais métodos de capacidade de carga são os ditos estáticos e, neste trabalho é apresentada uma análise dos métodos semiempíricos, a partir de ensaios de campo como Standard penetration test (SPT) e Cone penetration test (CPT). Em tais ensaios o solo é prospectado a fim de se estimar sua resistência, mas sabe-se que existe uma grande heterogeneidade presente que não é observada nas



sondagens (WINTER, 2011), por isso fatores de segurança são utilizados para não comprometer o resultado da capacidade de carga e que acabam muitas vezes superdimensionando as estruturas (CERQUEIRA DA SILVA, 2018).

Nas estacas cravadas existe um parâmetro conhecido como nega, que é tomado como critério de parada, controle na cravação das estacas pré-moldadas. No início do trabalho, os golpes do martelo são facilitados, visto que o terreno não apresenta muita resistência na superfície. Com o ganho de profundidade e/ou ao encontrar materiais mais competentes a energia necessária à cravação precisa ser maior, sendo o deslocamento da estaca por conta da ação do martelo correlacionável com a resistência oferecida pelo solo. Desta forma tem-se um indicativo da possibilidade de encerramento da cravação. Este limite é a nega, que nada mais é do que o deslocamento da estaca nos últimos dez golpes do martelo (MAIA et al, 2019).

Nas estacas do tipo hélice contínua, pode-se fazer uma correlação com o torque imposto pelas perfuratrizes para escavação do terreno. Da mesma forma que nas estacas cravadas, estas tendem a ter o trabalho facilitado no início da perfuração, havendo um aumento do esforço necessário para tal com o aumento da profundidade e em solos de maior resistência. Estudos publicados Silva e Carvalho (2018) dão conta da validade de correlações entre a capacidade de carga do solo e o torque. Entretanto ainda é reduzida a quantidade de evidências que tornem consistente esse tipo de relação. Por isso, este foi o parâmetro escolhido como base para as investigações no presente trabalho.

As análises realizadas neste estudo são baseadas nos resultados de ensaio de campo de uma obra localizada na cidade de Balneário Piçarras (SC), que será edificada utilizando estacas do tipo hélice contínua. A perfuração das estacas consiste na introdução de um trado helicoidal no terreno, que, com certo torque, chega até a profundidade projetada. Esse torque é medido e seu registro pode ser útil na estimativa do comportamento dos solos.

O principal objetivo deste trabalho é então, procurar estabelecer uma relação entre o torque medido pelas perfuratrizes e os resultados obtidos na previsão da capacidade de carga determinada pelos ensaios de campo. Segundo Almeida (2002), a utilização de dados de monitoração correlacionados com o tipo de solo, poderia tornar-se um valioso parâmetro de controle executivo e, de acordo com Bustamante (2003), as informações fornecidas pelo sistema de monitoramento e as obtidas pelas

provas de carga são complementares. Ou seja, a finalidade é atingir o máximo desempenho e qualidade nas etapas de execução das estacas do tipo hélice contínua.

## 1.1. OBJETIVOS

A fim de tentar estabelecer uma relação entre os resultados de previsão de capacidade de carga e o nível de torque exigido para a execução de estacas hélice contínua, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

### 1.1.1. Objetivo Geral

Buscar estabelecer uma correlação uni ou multivariada entre o nível de torque exigido para a execução das estacas do tipo hélice contínua e as variáveis determinadas na análise de previsão de capacidade de carga.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Estimar a capacidade de carga das estacas hélice pelo método estático e semiempírico de Aoki e Velloso, baseado em ensaios de campo CPT e SPT;
- Definir se há relação univariada ou multivariada entre os resultados obtidos na previsão de capacidade de carga com os níveis de torque exigidos para a execução das estacas e construir modelos utilizando uma amostra de dados de treino;
- Testar os modelos produzidos utilizando uma amostra de dados de teste;
- Discutir a relevância entre as variáveis e determinar o melhor modelo estatístico que descreva a resistência admissível utilizando o torque como uma variável explicativa.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo foram abordados os principais temas referentes ao trabalho, essenciais para a compreensão do mesmo. Primeiramente, foram destacadas as vantagens de utilização das estacas do tipo hélice contínua, juntamente com informações sobre a sua execução, projeto e desempenho. Posteriormente, explicados os métodos de previsão de capacidade de carga, métodos estáticos e semiempíricos e também o que já se sabe sobre as correlações entre capacidade de carga e torque das perfuratrizes, e, para finalizar o capítulo, breve explicação sobre os dois ensaios de solo presentes neste trabalho, SPT e CPT.

### 2.1. ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA

Segundo Velloso e Lopes (2010), as estacas tipo hélice contínua foram inseridas no Brasil ao final da década de 1980. Utilizadas nos Estados Unidos desde 1970, tem como principais vantagens: o baixo nível de vibração e elevada produtividade, com isso obtiveram uma grande aceitação no mercado. O tempo médio para a execução de uma estaca é de cerca de 10 minutos e por não apresentar acentuada vibração no processo de cravação, não causa tantos danos às estruturas adjacentes à obra. De acordo com Antunes e Tarozzo (1998), sua principal desvantagem está relacionada ao porte do equipamento, que necessita de espaço e um terreno plano para locomoção, outra seria a necessidade de se ter uma central de concreto por perto, já que exige alta produtividade e conseqüentemente alto consumo.

Essas estacas são de concreto, moldadas in loco com auxílio de um trado helicoidal contínuo, que é inserido no terreno por rotação e, após atingir a cota de projeto, injeta concreto pela haste central, com certa pressão que deve garantir o preenchimento de todos os vazios deixados pela hélice, simultaneamente à sua retirada. A armadura em formato de gaiola é colocada logo após este processo de perfuração e concretagem, possuindo geralmente 4 metros, abaixo da cota de arrasamento, isto quando as estacas são submetidas a esforços de compressão. Caso sejam submetidas a esforços transversais ou de tração, a armadura pode ser maior, conforme Hachich (1998).

Vale ressaltar que o equipamento que realiza tal procedimento é denominado perfuratriz, Figura 1, e deve apresentar as mínimas características estabelecidas pelo projetista e pelo executor, segundo a NBR 6122:2019 as especificações pré-determinadas têm o objetivo de “[...] minimizar o desconfinamento do solo durante a perfuração, assegurando a resistência geotécnica prevista em projeto para a estaca”. (p. 89).

Figura 1 – Perfuratriz para execução de estacas hélice contínua

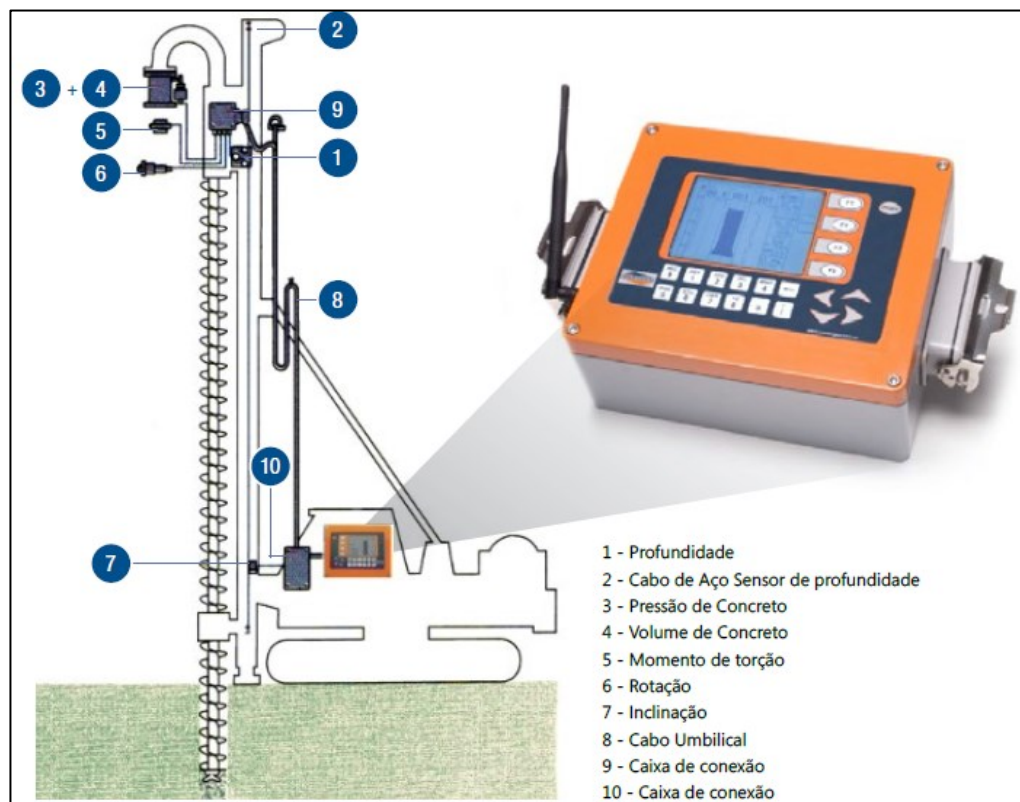


Fonte: Autora (2021).

Ligado a essa máquina é imprescindível ter um aparelho para monitoramento da execução, que deve registrar informações como: profundidade, inclinação da torre, velocidade de rotação do trado, velocidade de avanço e a pressão do torque durante a perfuração, e na concretagem deve-se monitorar a velocidade de subida do trado, a

pressão de injeção do concreto e o volume bombeado. Todas essas grandezas são monitoradas através de sensores, que ficam localizados na cabeça de perfuração, diretamente na torre, na linha de óleo hidráulico do motor e na linha de bombeamento do concreto, próximo ao topo, como pode ser observado na Figura 2. Através de um computador instalado na cabine de comando é possível obter informações sobre todo o processo, já que este é alimentado por todos os sensores presentes. Segundo Magalhães (2005), essa é uma ferramenta que traz grande confiabilidade à qualidade da estaca.

Figura 2 – Disposição dos sensores na perfuratriz



Fonte: Geofix (2015).

Apesar do monitoramento alguns problemas de execução também já foram constatados durante a execução das estacas do tipo hélice contínua. Os que mais requerem destaque são relacionados ao desconfinamento do solo, onde há alívio das tensões horizontais, devido a excessiva retirada de material. A capacidade da perfuratriz também é um fator importante, onde empresas oferecem equipamentos sem a capacidade de torque necessário, gerando o desconfinamento do solo e consequentemente a perda de resistência lateral da estaca. Na fase de inicializar a

concretagem, caso o operador erga a haste além do necessário, pode acabar por comprometer o contato da ponta da estaca com o terreno, comprometendo a resistência de ponta das estacas (GONZÁLES, 2018). Portanto, é de extrema importância a competência e habilidade do operador e a qualificação da máquina que será utilizada na obra em questão.

### **2.1.1 Monitoramento**

As máquinas perfuratrizes de estacas do tipo hélice contínua (EHC), como já mencionado anteriormente, são equipadas com um sistema de monitoramento de execução de estacas. A introdução do dispositivo aumentou o número de implementações deste tipo de fundação, já que traz mais confiança aos procedimentos realizados (CAPUTO; MANRUBIA, 1996). Com o equipamento é possível detectar anormalidades de execução, ele capta e traduz os aspectos executivos, sejam eles bons ou ruins para o desempenho da estaca.

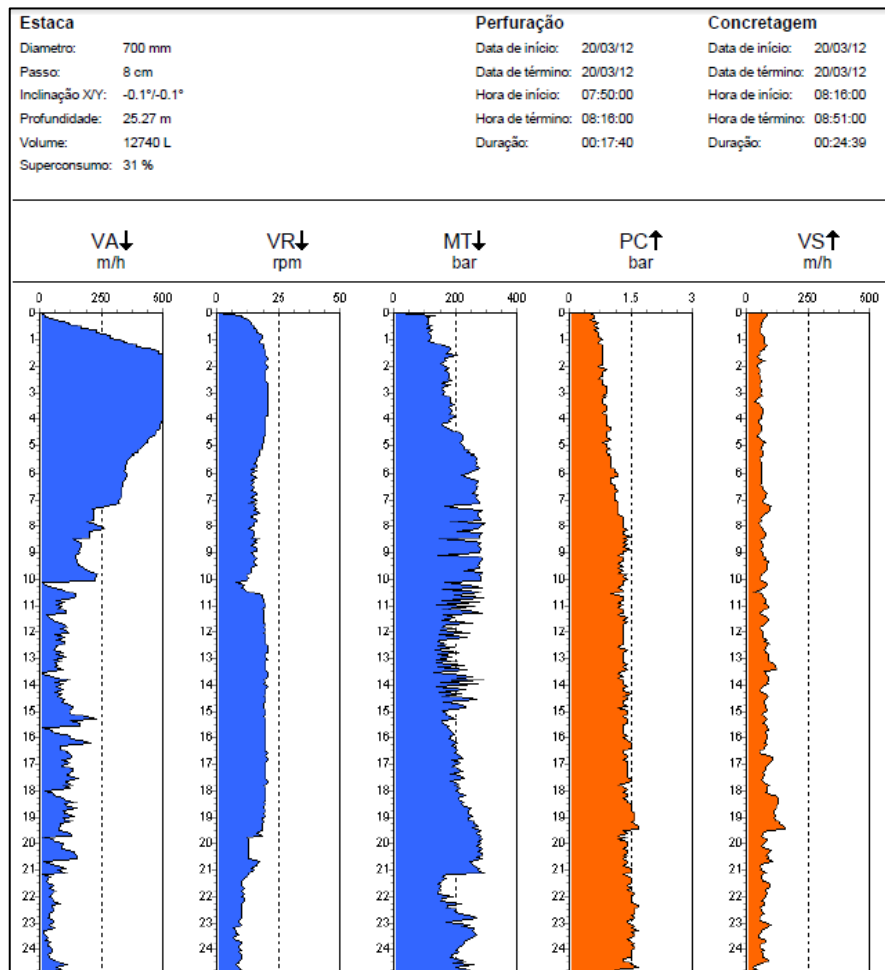
De acordo com Alledi (2013), “O sistema de monitoramento das EHCs, basicamente, é composto por um computador e sensores instalados na perfuratriz, cuja aquisição de dados, tratamento e controle da execução são realizados em *software* específico” (p. 21). Todos os parâmetros citados no item 2.1 são obtidos pelos sensores, que ficam conectados por cabos e links bluetooth, e acompanhados em tempo real pelo operador da perfuratriz no interior da cabine, através de um monitor, como mostrado na Figura 3, à medida que a estaca vai sendo executada. Posteriormente, os dados são gravados em um cartão de memória e transferidos para um computador, gerando uma folha de controle, como a apresentada na Figura 4. Em sistemas mais modernos ainda é possível acompanhar os dados em tempo real e obtê-los a partir da nuvem.

Figura 3 – Aparelho de monitoramento



Fonte: Autora (2021).

Figura 4 – Folha controle de uma EHC



Fonte: Geofix (2015).

No Brasil, os fabricantes de instrumentação eletrônica para procedimentos em fundações e sondagens são: Compugeo, Geodigitus e Jean Lutz. O sistema SACI, da Geodigitus, será abordado neste trabalho. Conforme o site da empresa, a terceira geração do seu sistema utiliza tecnologia de ponta, associada a um equipamento robusto, que consegue trabalhar nos ambientes mais hostis.

Todos os parâmetros registrados pelo SACI 3 (aparelho de monitoramento), são armazenados e transmitidos para um servidor em nuvem, interligado ao programa, software SOFTSACI, capaz de gerar documentos para impressão de relatórios e resultados gráficos, podendo ser acessado através de qualquer dispositivo eletrônico. O SOFTSACI permite também o rastreamento GPS e o monitoramento remoto do equipamento instalado na perfuratriz. (GEODIGITUS, 2022).

### **2.1.2 Torque**

O torque é classificado como uma grandeza vetorial que de acordo com a física, define-se como o movimento de rotação de um corpo após a aplicação de determinada força sobre ele. Nas perfuratrizes, o torque é aplicado por meio de uma caixa rotativa situada na hélice, fazendo-a girar. Essa hélice é cravada ao terreno aos poucos e deve ser capaz de vencer a resistência do solo. Quanto maior a capacidade de torque da perfuratriz, solos mais resistentes podem ser penetrados.

O sensor responsável pela medição desse parâmetro fica localizado na linha de óleo hidráulico do motor da mesa de rotação, fornecendo a pressão de óleo que será necessária para girar a cabeça de rotação, na unidade bar. É importante destacar “[...] que o sistema não informa diretamente o torque, sendo necessário converter a pressão de óleo (bar) medida no sistema, em torque (N.m)” (SILVA; CARVALHO, 2018, p. 4). Por conta disso, é necessário conhecer algumas especificações da máquina ou simplesmente se correlaciona o torque com a pressão através de um gráfico fornecido pelo fabricante do equipamento.

Algumas pesquisas mostram a relação direta entre o torque e a resistência do solo, comparando o parâmetro com resultados obtidos em ensaios SPT. Faz sentido considerar que quanto maior o valor do torque obtido, maior será a dificuldade de o trado penetrar no terreno. Como citado por Tavares (2009), “Pode-se associar o valor do torque com a profundidade escavada, para se ter uma ideia do tipo e da resistência



do terreno em determinada profundidade”. (p.54). Velloso (2000) sugere que na interpretação da folha de controle haja ênfase na relação entre torque e avanço do trado, contribuindo para atingir o máximo desempenho e qualidade das estacas.

Costa et al. (2008), apresentam um estudo entre o  $N_{SPT}$  e o torque durante a escavação de 70 EHCs com diâmetro nominal de 30cm e profundidade de 15m, chegando então à conclusão que existe sim uma correlação entre ambos os parâmetros. No ano seguinte, Stracke (2009) chegou ao mesmo resultado, reiterando que o torque confirma os resultados obtidos na sondagem, aumentando sua confiabilidade. Araujo et al (2009), notaram que sob condições controladas, o torque acumulado, o SPT médio ao longo da estaca e a capacidade de carga são dependentes entre si e proporcionais (SILVA; CARVALHO, 2018).

Por outro lado, correlações com ensaios CPT são menos usuais. Dois dos grandes motivadores são o custo, mais elevado do que no ensaio SPT devido à complexidade do equipamento, sendo necessário operadores mais especializados. Além disso, trata-se de um equipamento menos robusto que o SPT e seu uso em solos residuais, por exemplo, com presença de matacões, pedregulhos ou camadas muito densas pode impor danos ao equipamento.

## 2.2. MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA ESTÁTICOS E SEMIEMPÍRICOS

Quando um projeto de fundações é executado, umas das principais premissas existentes é em relação à capacidade de carga do solo, esse não deve romper sob a carga da estaca. Desta forma, uma etapa primordial é a estimativa da capacidade de carga do solo em questão. Os métodos ditos estáticos, determinam a capacidade de carga por formulação, mobilizando toda a resistência ao cisalhamento estática do solo, obtida em ensaios laboratoriais ou em campo (VELLOSO e LOPES, 2010).

Ainda segundo Velloso e Lopes (2010) os métodos estáticos podem ser divididos em três grupos: racionais, semiempíricos e empíricos. Este último quase não utilizado devido ao fato de fornecer uma estimativa grosseira da capacidade carga, baseado apenas nas classificações das camadas penetradas.

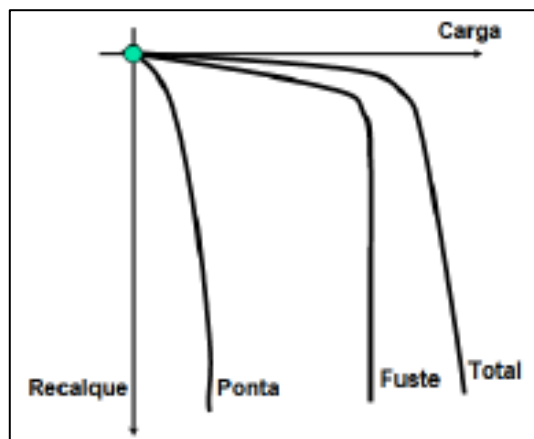
Os métodos racionais (ou teóricos) se utilizam de características do solo e soluções apenas teóricas. As formulações são determinadas a partir do conhecimento

prévio do tipo de ruptura que o solo poderá sofrer, dependendo das condições de carregamento, resistência ao cisalhamento e compressibilidade do solo. As primeiras formulações remontam ao início do século XX e as que se destacam são dos autores: Terzaghi (1943), Skempton (1951), Meyerhof (1951), Vesic (1963) e Berezantzav (1965).

Os métodos semiempíricos complementam as formulações teóricas baseados em ensaios in situ, como CPT e SPT e estabelecem, através dos resultados obtidos em campo, tensões máximas de atrito lateral e de ponta (Amann, 2000). Esse será o conjunto de métodos abordado no presente trabalho e métodos que utilizam um dos dois principais ensaios de investigação serão discutidos a seguir.

É importante destacar que as fundações profundas transmitem carga ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste ou lateral) ou por combinação de ambas, sendo essa segunda de maior destaque em estacas. Não é possível mobilizar, ao mesmo tempo, a máxima resistência dos dois parâmetros, a ponta necessita de deformações muito altas, que comprometem o desempenho da estaca e fariam a superfície lateral romper primeiro.

Figura 5 – Mecanismos de capacidade de carga em estacas



Fonte: Velloso e Lopes (2019) APUD Burland e Cooke (1974).

### 2.2.1 Método de Aoki e Velloso

Em 1975, Aoki e Velloso publicaram um método capaz de estimar a capacidade de carga em estacas, baseado inicialmente em ensaios do tipo CPT, visto que o ensaio de cone representa uma estaca sendo introduzida ao terreno. Logo em

seguida, adaptações também foram feitas para utilização do SPT. Nesta metodologia, a carga de ruptura ( $R_{rup}$ ), ou seja, a resistência do conjunto solo-estaca, é dada pela soma das parcelas de resistência de ponta ( $R_p$ ) e atrito lateral ( $R_l$ ).

$$R_{rup} = R_p + R_l \quad (1)$$

No qual as resistências de ponta e atrito são dadas por:

$$R_p = \frac{q_c * A_p}{F_1} = \frac{K * N * A_p}{F_1} \quad (2)$$

$$R_l = \frac{f_c * U * \Delta l}{F_2} = \frac{\alpha * q_c * U * \Delta l}{F_2} = \frac{U}{F_2} \sum_1^n (\alpha * K * N_l * \Delta l) \quad (3)$$

Onde:

$q_c$  = Resistência de ponta do ensaio de cone;

$A_p$  = Área da seção transversal da ponta da estaca;

$F_1$  e  $F_2$  = Fator de transformação que engloba o tipo de estaca (protótipo) e o efeito de escala entre a estaca e o cone do CPT (modelo);

$K$  = Fator de correção para ensaios SPT, tabela 1;

$N$  = Índice de resistência à penetração ( $N_{spt}$ );

$f_c$  = Atrito lateral medido no ensaio de cone;

$U$  = Perímetro da estaca;

$N_l$  = Índice de resistência à penetração ( $N_{spt}$ ), no metro analisado;

$\Delta l$  = Metro analisado;

$\alpha$  = Fator que correlaciona o atrito lateral do cone ( $f_s$ ) com a resistência de ponta do cone ( $q_c$ ), Tabela 1.

Os valores de  $F_1$  e  $F_2$  para o método proposto por Aoki e Velloso (1975) são, respectivamente: 2,0 e 4,0 para estacas do tipo hélice. Já os fatores de correção  $K$  e  $\alpha$ , podem ser determinados pela tabela a seguir.

Tabela 1 – Coeficientes  $\alpha$  e K propostos por Aoki e Velloso (1975)

| <b>Tipo de solo</b>  | <b>K (Mpa)</b> | <b><math>\alpha</math> (%)</b> |
|----------------------|----------------|--------------------------------|
| Areia                | 1,00           | 1,4                            |
| Areia siltosa        | 0,80           | 2,0                            |
| Areia silto-argilosa | 0,70           | 2,4                            |
| Areia argilosa       | 0,60           | 3,0                            |
| Areia argilo-siltosa | 0,50           | 2,8                            |
| Silte                | 0,40           | 3,0                            |
| Silte arenoso        | 0,55           | 2,2                            |
| Silte areno-argiloso | 0,45           | 2,8                            |
| Silte argiloso       | 0,23           | 3,4                            |
| Silte argilo-arenoso | 0,25           | 3,0                            |
| Argila               | 0,20           | 6,0                            |
| Argila arenosa       | 0,35           | 2,4                            |
| Argila areno-siltosa | 0,30           | 2,8                            |
| Argila siltosa       | 0,22           | 4,0                            |
| Argila silto-arenosa | 0,33           | 3,0                            |

Fonte: Velloso e Lopes (2010, p. 311).

Como não se almeja atingir a resistência de ruptura, visto as grandes deformações que isso geraria, um fator de segurança é aplicado, resultando na carga admissível de projeto ( $R_{adm}$ ). Por sugestão dos autores e se baseando na norma NBR 6122:2019, o fator utilizado será da ordem de 2.

$$R_{adm} = \frac{R_p + R_l}{2} \quad (4)$$

### 2.2.2 Método de Décourt e Quaresma e posterior modificação

Décourt e Quaresma, em 1978, propuseram um método inicialmente baseado nos ensaios do tipo SPT e em análises de provas de carga realizadas em estacas de deslocamento. Utilizando o mesmo princípio de Aoki e Velloso (1975), a carga de ruptura também se dá pela soma da resistência de ponta e atrito lateral. Já na carga admissível, são inseridos fatores de segurança parciais, adotando-se 4 para a parcela da ponta e 1,5 para a lateral (Equação 5).

$$R_{adm} = \frac{R_p}{4} + \frac{R_l}{1,5} \quad (5)$$

Nesse método, o valor da resistência de ponta é expresso pela Equação 6.

$$R_p = C * N_p * A_p \quad (6)$$

Onde:

C = Fator característico do solo, Quadro 1;

$N_p$  = Média entre o valor correspondente à ponta da estaca, o imediatamente inferior e o imediatamente superior;

$A_p$  = Área da seção transversal da ponta da estaca.

Tabela 2 – Fatores característicos do solo

| <b>Tipo de Solo</b>            | <b>C (kPa)</b> |
|--------------------------------|----------------|
| Argilas                        | 120            |
| Silte Argiloso (solo residual) | 200            |
| Silte Arenoso (solo residual)  | 250            |
| Areia                          | 400            |

Fonte: Joppert (2007).

A carga por atrito lateral é dada por:

$$R_l = U \sum_{L=1}^{L=L} (r_l * \Delta l) \quad (7)$$

Em que:

$$r_l = 10 * \left( \frac{N_l}{3} + 1 \right) \quad (8)$$

Onde:

U = Perímetro da estaca;

L = Profundidade de análise;

$N_l$  = Resistência à penetração SPT na lateral da estaca no trecho analisado;

$\Delta l$  = Comprimento do trecho analisado

Quanto aos valores de  $N_{spt}$  fornecidos pelo ensaio, os autores consideram uma faixa aceitável entre 3 e 50. Caso seja menor, assume-se 3, caso maior, assume-se 50. Essa consideração também é válida para o método de Aoki e Velloso (1975).

Posteriormente, Décourt (1996) introduziu dois coeficientes às fórmulas,  $\alpha$  e  $\beta$ , permitindo a utilização dos métodos não apenas para as estacas cravadas, mas também para outros tipos de estacas. Multiplica-se  $\alpha$  na resistência de ponta e  $\beta$  no atrito lateral. Seus valores típicos podem ser observados nas tabelas a seguir.

Tabela 3 – Valores de  $\alpha$  em função do tipo de solo e estaca

| Tipo de solo         | Tipos de Estacas  |                      |                 |       |                             |
|----------------------|-------------------|----------------------|-----------------|-------|-----------------------------|
|                      | Escavada em geral | Escavada (bentonita) | Hélice contínua | Raiz  | Injetada sob altas pressões |
| Argilas              | 0,85              | 0,85                 | 1,0*            | 1,5*  | 1,0*                        |
| Solos intermediários | 0,60              | 0,60                 | 0,30*           | 0,60* | 1,0*                        |
| Areias               | 0,50              | 0,50                 | 0,30*           | 0,50* | 1,0*                        |

\* valores obtidos a partir de reduzidos números de casos.

Fonte: Décourt et al (1996).

Tabela 4 – Valores de  $\beta$  em função do tipo de solo e estaca

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

\* valores obtidos a partir de reduzido número de casos.

Fonte: Décourt et al (1996).

### 2.2.3 Método de Antunes e Cabral

Os dois métodos anteriores podem ser considerados os mais difundidos pelo mundo, no ramo da geotecnia. Já a presente metodologia, foi publicada em 1996, no Seminário de Fundações Especiais e Geotecnia (SEFE III), sendo específico para estacas do tipo hélice contínua e “[...] correlaciona o  $N_{SPT}$  à carga de ruptura das estacas, extrapolada pelo método de Van der Veen (1953)” (OLIVEIRA, P.E.S., 2013, p. 42).

Assim como nos outros métodos, a carga de ruptura é escrita como função da soma da resistência por atrito lateral e de ponta. Essas podem ser observadas nas Equações 9 e 10 abaixo, respectivamente.

$$Rl = \pi * d * \sum (Nf * \beta 1) * \Delta l \quad (9)$$

Onde:

$d$  = Diâmetro da estaca;

$N_f$  = Índice  $N_{spt}$  de fuste;

$\beta_1$  = Coeficiente que varia em função do solo, Tabela 5;

$\Delta l$  = Comprimento da estaca.

$$R_p = N_p * \beta_2 * A_p; \text{ sendo } N_p \cdot \beta_2 \leq 40 \text{kgf/cm}^2 \quad (10)$$

Onde:

$N_p$  = Índice  $N_{spt}$  de ponta;

$\beta_2$  = Coeficiente que varia em função do solo, Tabela 5;

$A_p$  = Área de ponta da estaca.

Tabela 5 – Coeficientes propostos para o método

| <b>Solo</b> | <b><math>\beta_1</math> (kPa)</b> | <b><math>\beta_2</math> (kPa)</b> |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Areia       | 400 a 500                         | 200 a 250                         |
| Silte       | 250 a 350                         | 100 a 200                         |
| Argila      | 200 a 350                         | 100 a 150                         |

Fonte: Adaptado de Antunes de Cabral (1996).

Para o cálculo da carga admissível, o método considera o fator de segurança igual a dois, caso não haja prova de carga. Esse fator pode ser reduzido até 1,6 se ocorrer a execução do ensaio e for de acordo com as premissas adotadas pelo projetista. Os autores ainda ressaltam que caso a carga admissível resulte em um valor menor ou igual a 125% da carga referente à parcela de atrito lateral, deve-se calcular da seguinte maneira, Equação 11. “Sendo assim, a carga admissível deve ser de no máximo 1,25 vez a resistência do atrito lateral calculada na ruptura”. (FERRARI DE CAMPOS, 2018, p. 43).

$$R_{adm} \leq \frac{R_l}{8} \quad (11)$$

## 2.3. ENSAIOS DE CAMPO

Um pré-requisito fundamental e de grande importância para projetos geotécnicos e de fundações, é o conhecimento das condições do subsolo. Este reconhecimento garante obras mais seguras e econômicas (CAPUTO, 1988), visto que a principal causa de problemas em fundações é devido à má investigação das características do solo (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2008).

Através de ensaios de campo, in situ, é possível então obter amostras para identificação e classificação dos solos, medida que segundo Schnaid e Odebrecht (2012) permite “[..] uma definição satisfatória da estratigrafia do subsolo e uma estimativa realista das propriedades de comportamento dos materiais envolvidos”. (p.13).

Ainda é importante destacar que de acordo com Velloso e Lopes (2010) para uma investigação adequada é necessário definir um programa, com três etapas: investigação preliminar, investigação complementar e investigação para fase de execução. Sendo que na primeira são executadas apenas sondagens a percussão, a fim de definir as principais características do solo, como ensaios SPT, posteriormente podendo ser complementado com outros ensaios caso seja necessário.

### 2.3.1 SPT

O Standard Penetration Test (SPT) é o ensaio in situ mais famoso e utilizado no Brasil. Como grande vantagem possui baixo custo e fácil execução, podendo ser utilizado em solos coesivos e não coesivos e em rochas brandas. De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012) é também a ferramenta de investigação geotécnica mais popular em todo o mundo. Normatizado no Brasil pela NBR 6484:2020, tem como principais objetivos identificar o índice de resistência à penetração (N) oferecido pelo solo a cada metro, determinar a posição do nível de água e identificar os tipos de solos ali presentes, através da retirada de amostras deformadas a cada metro (QUARESMA et al., 2019). A norma supracitada também estabelece os critérios de parada do ensaio.

Como em qualquer outra sondagem, o SPT é influenciado por fatores externos, desde interferência humana até do próprio equipamento empregado.



Diversos autores como Fletcher (1965), Mohr (1966) e Teixeira (1977) discorrem sobre o assunto e relatam que pode haver variações nas dimensões e capacidade do instrumento, deficiência de manutenção, desatualização e despreparo da equipe responsável, condições do solo prospectado podem influenciar.

Devido a todos esses motivos, um dos pontos falhos do ensaio é a falta de padronização do mesmo, muito discutida por pesquisadores e engenheiros. A primeira norma definitiva foi publicada em 1967, pela American Society for Testing and Materials (ASMT), nos Estados Unidos. Já no Brasil, foi o engenheiro Alberto Henrique Teixeira quem apresentou a primeira proposta, que foi reconhecida e publicada em 1979, com mudança posterior na numeração para NBR 6484:1980.

Da mesma maneira que o Brasil, outros países fizeram questão de ter sua própria normatização, Canadá, Japão e Austrália podem ser citados. Existem correlações empíricas, com o objetivo de uniformizar o índice de todas as regiões para a eficiência padrão de 60%, conforme recomendação de Skempton (1986). No Brasil, essa conversão é feita multiplicando-se o número de golpes obtido no ensaio SPT pela energia transmitida ao martelo em relação a energia teórica, e divide-se por 0,6. A média de eficiência no país é de 72% (DÉCOURT; BELINCANTA; QUARESMA, 1989).

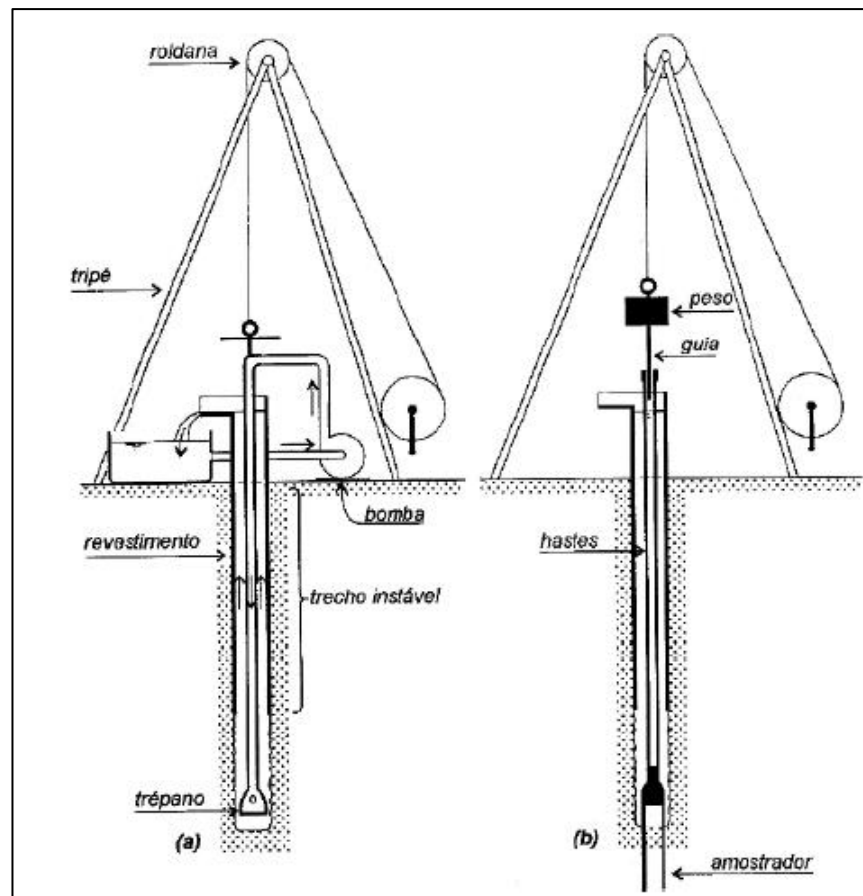
Até o início do ano de 2020, a norma brasileira tratava apenas da sondagem à percussão de forma manual, quando então houve uma atualização. Nessa revisão foi incluído o ensaio de forma mecanizada, ocorreu a incorporação de nova faixa de consistência para solos argilosos, atualização dos critérios de paralisação, isenção sobre a quantidade e a locação dos furos necessários, que deve ser determinada pelo contratante e recomendação de fechamento dos furos, após realização da sondagem (NBR 6484, 2020).

#### 2.3.1.1 SPT MANUAL

A perfuração de forma manual é realizada por um trépano, que desagrega o solo e faz a lavagem do furo para a retirada do material, através da circulação de água. Nesta primeira etapa já é possível realizar uma análise tátil-visual, observando por exemplo, quando há mudança das características do subsolo. Posteriormente, é feito a cada metro, a medida da resistência à penetração (N) de um amostrador padrão

(Raymond-Terzaghi). O amostrador é cravado por meio de golpes, realizados por um peso de 65 kgf caindo de uma altura de 75 cm, através de um gatilho, em que a elevação é manual. Anota-se então a quantidade de golpes necessários para cravar 15 cm do amostrador, em três conjuntos consecutivos, totalizando 45 cm de cravação. O resultado do ensaio é a soma dos golpes para cravar os 30 cm finais (VELLOSO; LOPES, 2010). A Figura 6 esquematiza os equipamentos utilizados no ensaio.

Figura 6 – Etapas de execução do SPT Manual



Fonte: Velloso e Lopes (2010, p. 38).

O critério de paralisação do ensaio deve ser estabelecido por parte do contratante ou de seu representante. Caso não seja fornecido, a sondagem deve avançar até que seja atingido um dos critérios seguintes, presentes na norma NBR 6484:2020:

- Avanço da sondagem até a profundidade na qual tenham sido obtidos 10 m de resultados consecutivos indicando  $N$  iguais ou superiores a 25 golpes;

- Avanço da sondagem até a profundidade na qual tenham sido obtidos 8 m de resultados consecutivos indicando  $N$  iguais ou superiores a 30 golpes;
- Avanço da sondagem até a profundidade na qual tenham sido obtidos 6 m de resultados consecutivos indicando  $N$  iguais ou superiores a 35 golpes.

Com a finalização do ensaio, de posse do número de golpes realizados e consequentemente do índice de resistência à penetração, é possível classificar os solos quanto a sua compactidade, no caso das areias, ou quanto a sua consistência, no caso das argilas. Segue a Figura 7 com as identificações e também uma demonstração do laudo da sondagem SPT, conforme Figura 8.

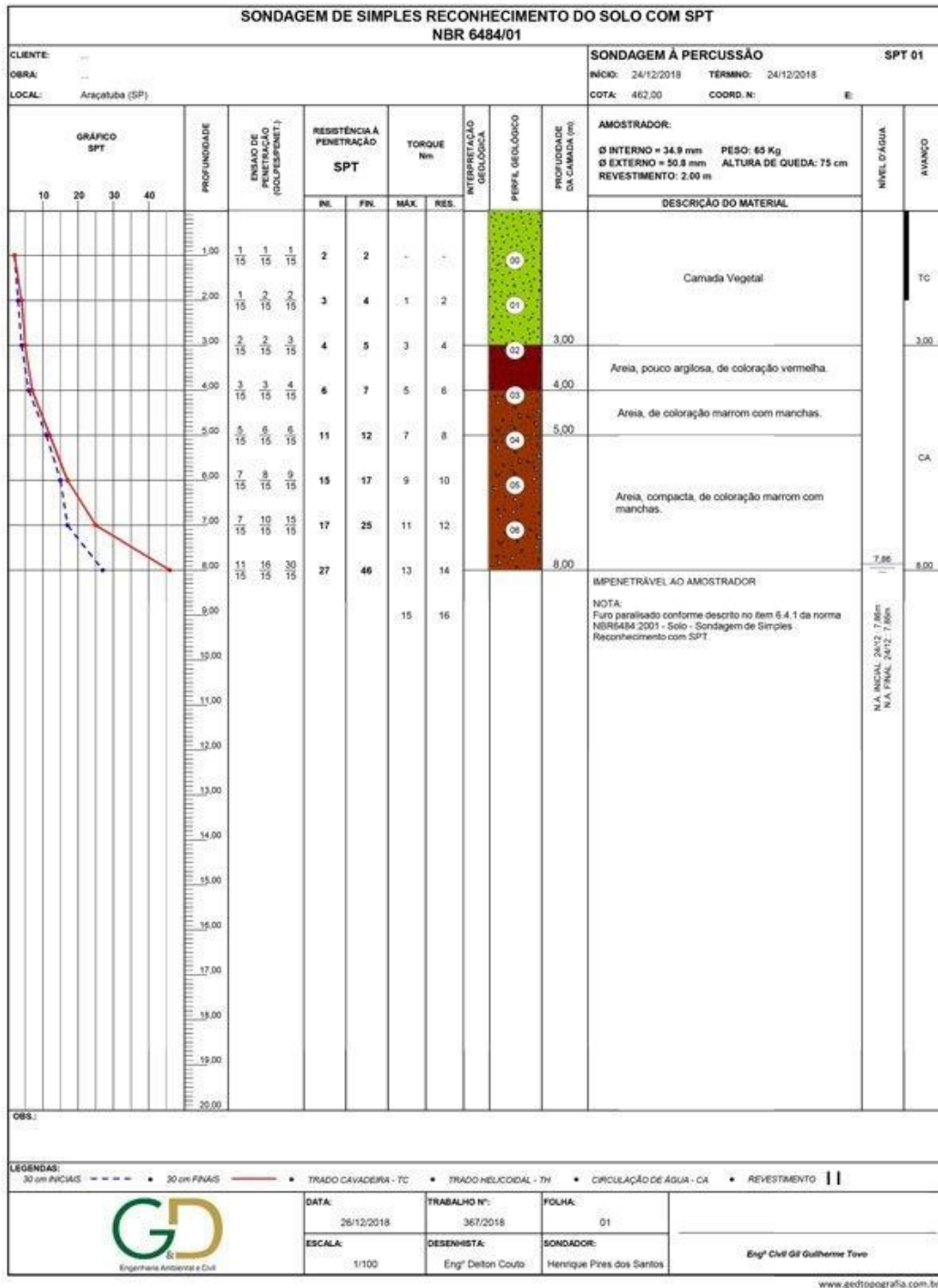
Figura 7 – Tabela do estado de compactidade e consistência atualizada

| Solo                       | Índice de resistência à penetração<br>$N$ | Designação <sup>a</sup>  |
|----------------------------|---|--------------------------|
| Areias e siltes arenosos   | $\leq 4$                                  | Fofa(o)                  |
|                            | 5 a 8                                     | Pouco compacta(o)        |
|                            | 9 a 18                                    | Medianamente compacta(o) |
|                            | 19 a 40                                   | Compacta(o)              |
|                            | $> 40$                                    | Muito compacta(o)        |
| Argilas e siltes argilosos | $\leq 2$                                  | Muito mole               |
|                            | 3 a 5                                     | Mole                     |
|                            | 6 a 10                                    | Média(o)                 |
|                            | 11 a 19                                   | Rija(o)                  |
|                            | 20 a 30                                   | Muito rija(o)            |
|                            | $> 30$                                    | Dura(o)                  |

<sup>a</sup> As expressões empregadas para a designação da compactidade das areias (fofa, compacta etc.) são referências à deformabilidade e à resistência destes solos, sob o ponto de vista de fundações, e não podem ser confundidas com as mesmas denominações empregadas para a designação da compactidade relativa das areias ou para a situação perante o índice de vazios críticos, definidos na mecânica dos solos.

Fonte: NBR 6484:2020.

Figura 8 – Laudo de um ensaio SPT



Fonte: GD Engenharia (2018).

2.3.1.2 SPT MECANIZADO

Como já mencionado, todos os procedimentos citados anteriormente, eram realizados de forma totalmente manual, acarretando erros. Não existia a garantia que

o martelo realmente cairia de uma altura de 75 cm, devido ao cansaço do operador, por exemplo. Hoje, o ensaio já é realizado de forma mecanizada, com acionamento elétrico do martelo através de um guincho autopropelido, ou seja, ele realmente tem uma queda garantida e padronizada (Figura 9). Deve ser fixada uma frequência mínima de dez golpes por minuto e máxima de quarenta golpes por minuto. Além do ganho de produtividade e segurança dos operadores a confiabilidade do resultado é muito maior (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Todos os outros procedimentos e determinações são realizados da mesma maneira.

Figura 9 – Equipamento utilizado no SPT Mecanizado



Fonte: CRISTOFERI; BERGMANN; LORENZI (2018).

### 2.3.2 CPT

Os primeiros registros sobre o ensaio de cone (CPT) remontam a década de 1930, na Holanda, especificamente no Laboratório de Mecânica dos Solos na cidade de Delft. Já no Brasil, houve uma expressiva e crescente utilização apenas a partir da década de 1990 (QUARESMA et al, 2019). Até o ano de 2015, o ensaio era regido

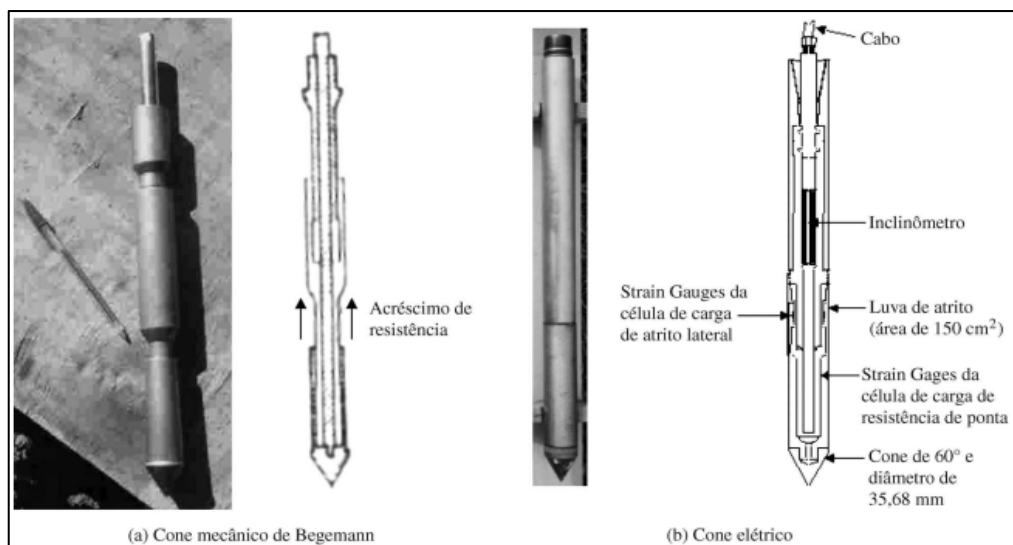
pela norma NBR 12069:1991, que foi cancelada por não se adequar aos equipamentos mais modernos, hoje é possível basear-se na norma americana ASTM D3441:2016 (Standard test method for deep quasi-static, cone and friction-cone penetration tests of soils).

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), o CPT é uma das mais relevantes ferramentas de prospecção geotécnica, tem o objetivo de determinar a estratigrafia de perfis de solos, características dos materiais presentes e realizar a previsão de capacidade de carga de fundações. Suas características predominantes são: agilidade na execução, independente do operador, reduzidas perturbações no solo, alta precisão em condições que outras técnicas se mostram inadequadas, e realização do registro contínuo da resistência a penetração do solo.

A execução do ensaio é bastante simples, a partir da cravação de uma haste com ponta cônica, de forma lenta e constante, é possível medir a resistência encontrada tanto na ponta ( $q_c$ ) como na lateral ( $f_s$ ) do equipamento.

O ensaio tem velocidade de penetração padronizada, em 2 cm/s, área da ponta do cone de 10 cm<sup>2</sup> e um cone com ângulo de 60° (LUNNE et al, 1997). Ao contrário dos procedimentos, a tecnologia de aquisição de dados dos cones ainda não é padronizada, podendo ser do tipo mecânico ou elétrico. A diferença entre eles é que o primeiro realiza as medidas pela superfície e o segundo diretamente na ponteira, já que os sinais são transmitidos através de cabos no interior da haste.

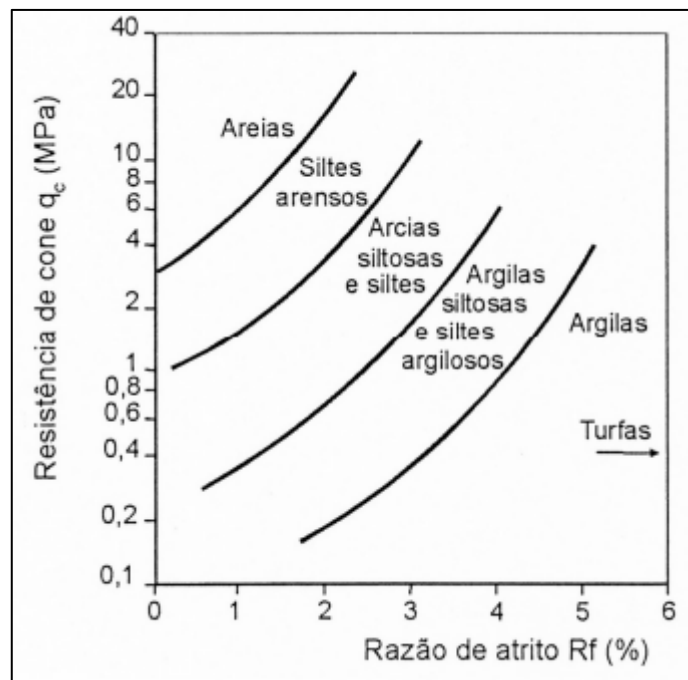
Figura 10 – Ponteiras do cone mecânico e elétrico



Fonte: Adaptado de QUARESMA et al. (1996) e de DAVIES & CAMPANELLA (1995).

A razão entre o atrito lateral e a resistência de ponta é conhecida como razão de atrito ( $R_f$ ), que também é uma forma de identificar o solo. O pioneiro neste assunto foi Begemann em 1953. Posteriormente, estudos mais recentes de Robertson e Campanella em 1983, resultaram no ábaco da Figura 11, que apresenta a relação entre a razão de atrito ( $R_f$ ), resistência de ponta do cone ( $q_c$ ) e o tipo de solo.

Figura 11 – Relação entre razão de atrito, resistência de ponta e tipo de solo

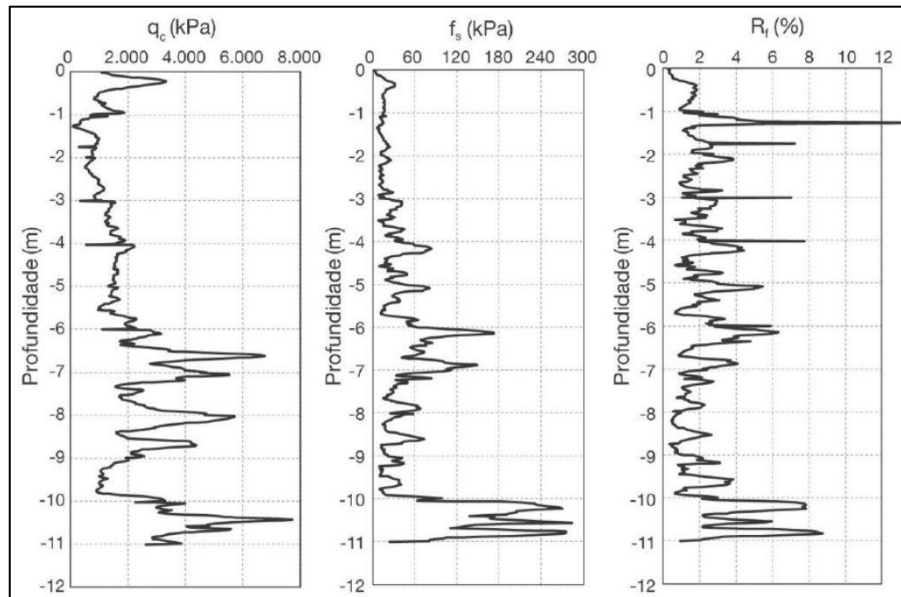


Fonte: Robertson e Campanella (1983).

Um detalhe importante deste ensaio, considerado como desvantagem, é a não retirada de amostras de solo, ou seja, não é possível realizar uma análise tátil-visual como no ensaio SPT. Também é mais oneroso, devido à certa complexidade do equipamento. Pode-se dizer que são complementares e é aconselhável realizar uma sondagem a percussão associada (MAYNE, 2000). Vale ressaltar que o CPT não consegue penetrar em camadas muito densas e com presença de pedregulhos e matacões.

Na Figura 12 é possível observar o resultado de um ensaio CPT.

Figura 12 – Resultado de um ensaio CPT



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).



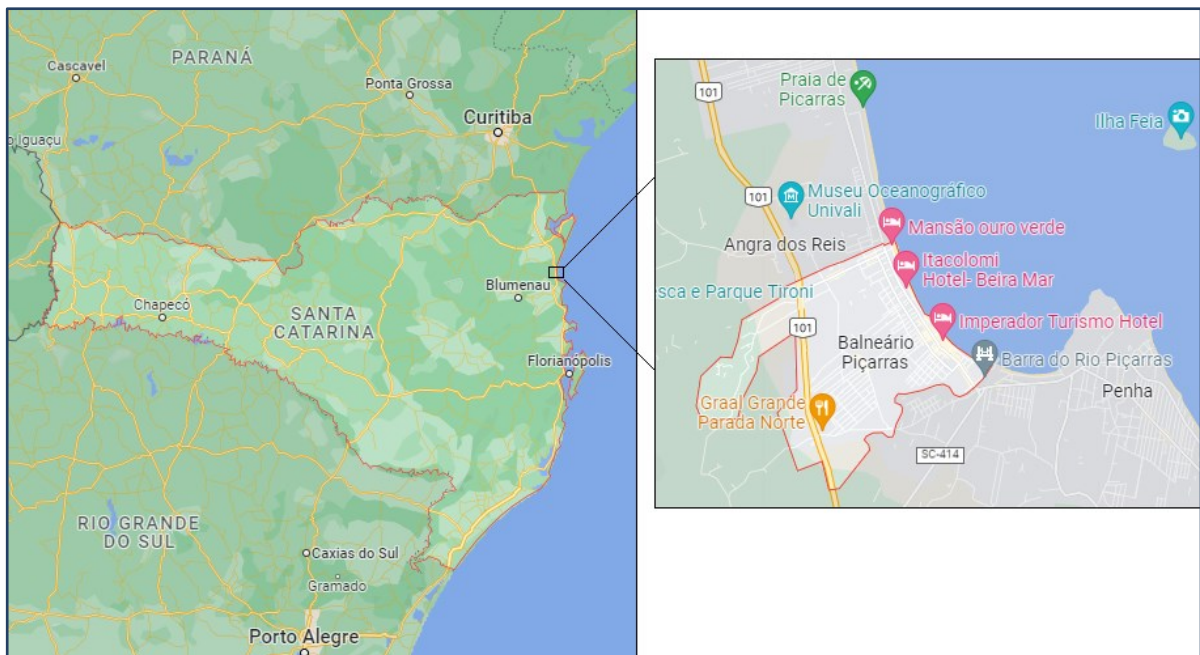
### 3. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O presente capítulo irá abordar a natureza da coleta de dados, mostrará o exato local onde as sondagens foram realizadas, bem como todas as informações coletadas e compartilhadas pelas empresas e utilizadas para a realização do trabalho.

#### 3.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO

O terreno em que os dados foram coletados fica localizado na cidade de Balneário Piçarras, no estado de Santa Catarina, mais especificamente na esquina da Avenida Manuel Pinto com a Rua 1360.

Figura 13 – Localização do estudo de caso

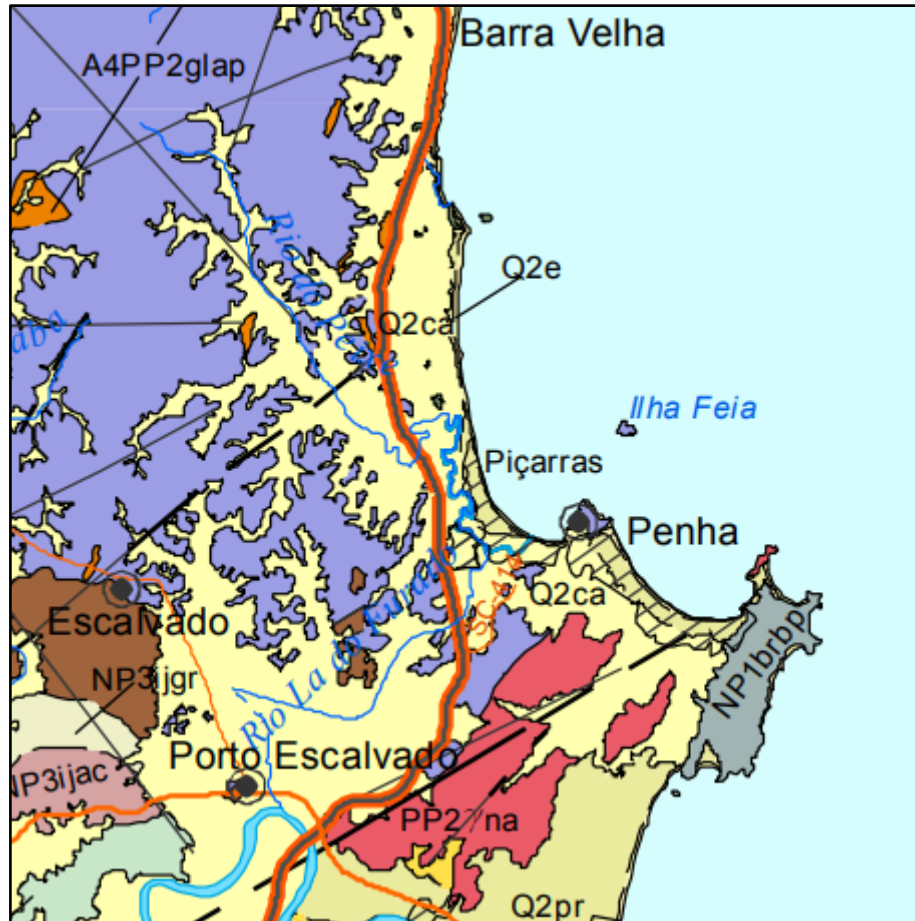


Fonte: Adaptado Google Maps (2022).

De acordo com o mapa disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), mostrado na Figura 14, a cidade de Balneário Piçarras se encontra em uma área formada na Era Cenozóica, no período Quaternário e na época Holoceno. Com grande predominância de depósitos Colúvio-Aluvionares e presença de Charnockito Postem (rochas ígneas de alta grau metamórfico). O solo da região é formado então

por conglomerados, areias finas e grossas, cascalho e sedimentos siltico-argilosos que recobrem vertentes e encostas (CPRM, 2014).

Figura 14 – Recorte do mapa geológico de Santa Catarina

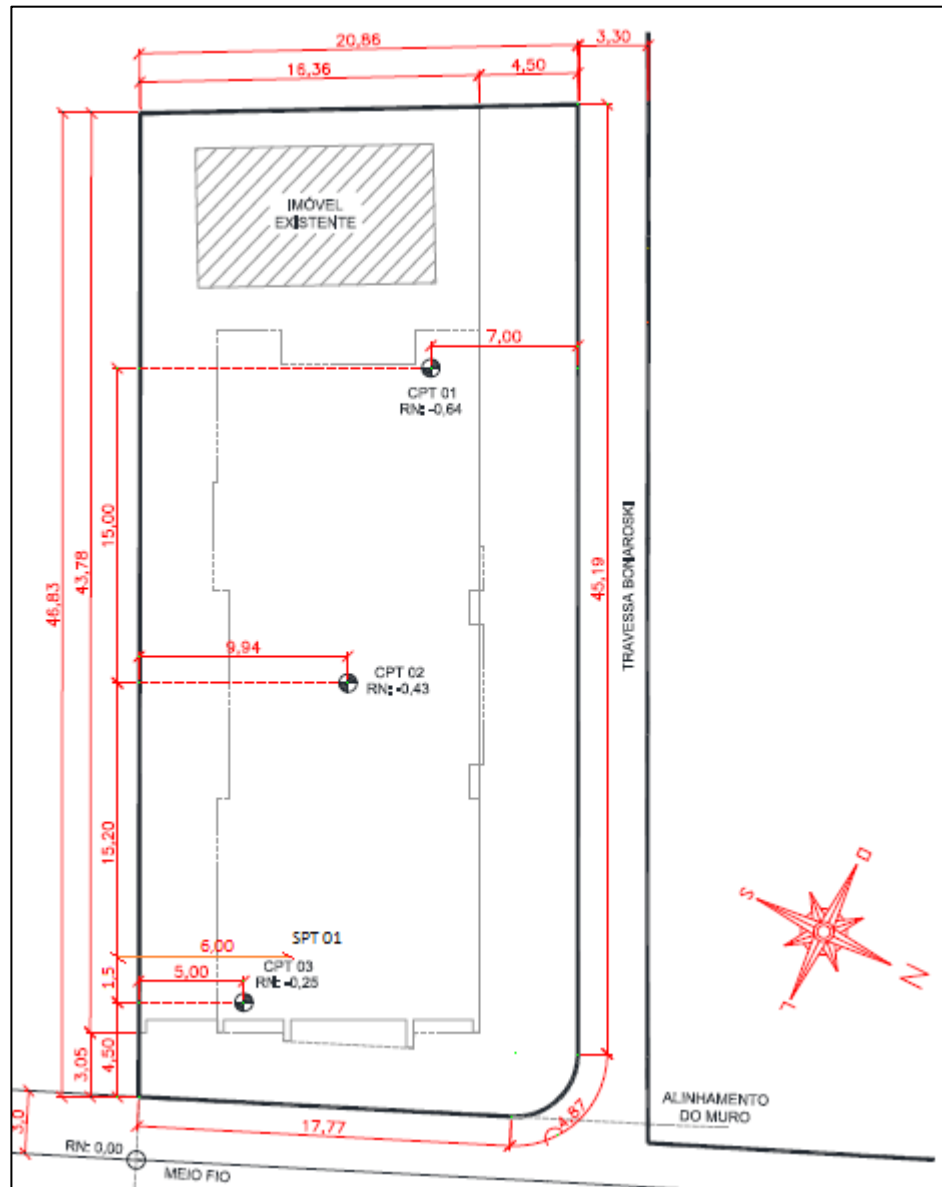


Fonte: Adaptado CPRM (2014).

### 3.2 DADOS E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO TERRENO

Para a construção de um empreendimento vertical e residencial, foram realizadas três sondagens do tipo CPT, denominadas como CPT 01, CPT 02 e CPT 03 e uma do tipo SPT, nominada como SPT 01, totalizando 90,4 m lineares de perfuração. A Figura 15 mostra a disposição dos ensaios no terreno.

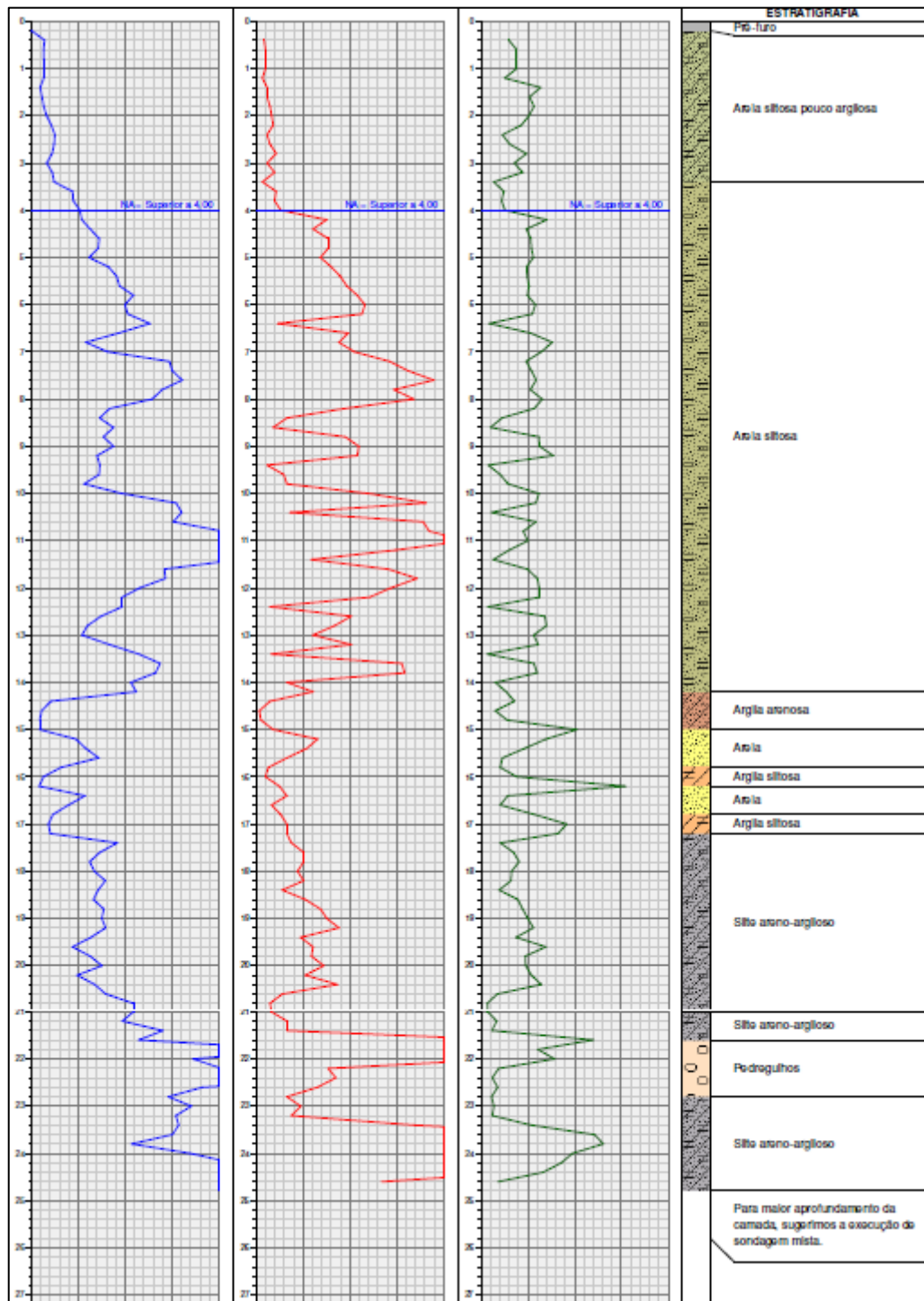
Figura 15 – Localização das sondagens SPT e CPT



Fonte: Adaptado de Empresa executora (2021).

Os boletins de sondagem completos podem ser visualizados nas Figuras 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 22, neles é possível observar grandezas como: resistência de ponta do cone ( $q_c$ ), atrito lateral do cone ( $f_s$ ), razão de atrito ( $Fr$ ), resistência a penetração e a estratigrafia do solo.

Figura 16 – Resultado da sondagem CPT 1



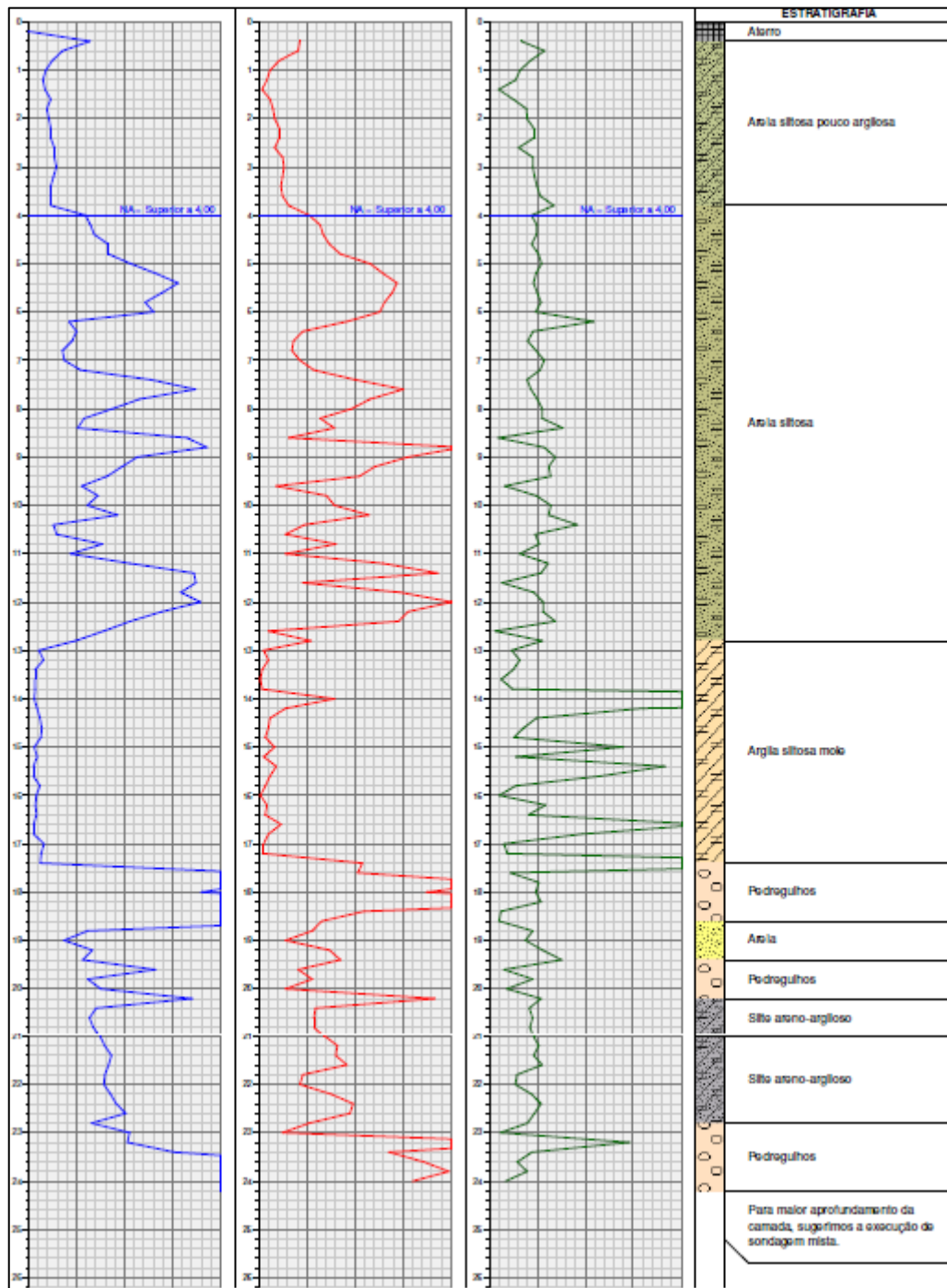
Fonte: Empresa executora (2020).

Figura 17 – Resultado da sondagem CPT 1

| PROF. | MPa   | KPa    | Fr(%) | PROF. | MPa   | KPa    | Fr(%) | PROF. | MPa   | KPa     | Fr(%) |
|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|-------|
| 0,20  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 10,20 | 15,43 | 725,94 | 0,05  | 20,20 | 4,87  | 209,28  | 0,04  |
| 0,40  | 1,38  | 32,70  | 0,02  | 10,40 | 16,02 | 143,88 | 0,01  | 20,40 | 6,73  | 346,62  | 0,05  |
| 0,60  | 1,28  | 39,24  | 0,03  | 10,60 | 15,14 | 712,86 | 0,05  | 20,60 | 7,91  | 111,18  | 0,01  |
| 0,80  | 1,29  | 39,24  | 0,03  | 10,80 | 20,44 | 739,02 | 0,04  | 20,80 | 10,86 | 58,86   | 0,01  |
| 1,00  | 1,29  | 39,24  | 0,03  | 11,00 | 22,51 | 902,52 | 0,04  | 21,00 | 10,86 | 65,40   | 0,01  |
| 1,20  | 1,29  | 26,16  | 0,02  | 11,20 | 24,57 | 595,14 | 0,02  | 21,20 | 9,69  | 130,80  | 0,01  |
| 1,40  | 0,90  | 45,78  | 0,05  | 11,40 | 22,12 | 235,44 | 0,01  | 21,40 | 14,01 | 130,80  | 0,01  |
| 1,60  | 1,10  | 45,78  | 0,04  | 11,60 | 14,18 | 562,44 | 0,04  | 21,60 | 11,46 | 1098,72 | 0,10  |
| 1,80  | 1,30  | 58,86  | 0,05  | 11,80 | 14,28 | 686,70 | 0,05  | 21,80 | 28,73 | 1399,56 | 0,05  |
| 2,00  | 1,60  | 65,40  | 0,04  | 12,00 | 11,53 | 575,52 | 0,05  | 22,00 | 17,25 | 1085,64 | 0,06  |
| 2,20  | 2,09  | 71,94  | 0,03  | 12,20 | 9,67  | 483,96 | 0,05  | 22,20 | 20,30 | 307,38  | 0,02  |
| 2,40  | 2,48  | 45,78  | 0,02  | 12,40 | 9,67  | 58,86  | 0,01  | 22,40 | 34,72 | 340,08  | 0,01  |
| 2,60  | 2,39  | 58,86  | 0,02  | 12,60 | 7,42  | 405,48 | 0,05  | 22,60 | 18,24 | 261,60  | 0,01  |
| 2,80  | 2,19  | 85,02  | 0,04  | 12,80 | 5,95  | 333,54 | 0,06  | 22,80 | 14,61 | 130,80  | 0,01  |
| 3,00  | 1,61  | 45,78  | 0,03  | 13,00 | 5,37  | 241,98 | 0,05  | 23,00 | 17,07 | 189,66  | 0,01  |
| 3,20  | 2,20  | 78,48  | 0,04  | 13,20 | 8,31  | 405,48 | 0,05  | 23,20 | 15,40 | 150,42  | 0,01  |
| 3,40  | 2,40  | 26,16  | 0,01  | 13,40 | 11,45 | 65,40  | 0,01  | 23,40 | 15,70 | 673,62  | 0,04  |
| 3,60  | 4,36  | 85,02  | 0,02  | 13,60 | 13,71 | 621,30 | 0,05  | 23,60 | 15,02 | 1468,42 | 0,10  |
| 3,80  | 4,46  | 78,48  | 0,02  | 13,80 | 13,22 | 634,38 | 0,05  | 23,80 | 10,70 | 1118,34 | 0,10  |
| 4,00  | 5,15  | 104,64 | 0,02  | 14,00 | 10,58 | 130,80 | 0,01  | 24,00 | 16,98 | 1327,62 | 0,08  |
| 4,20  | 5,35  | 300,84 | 0,06  | 14,20 | 11,17 | 241,98 | 0,02  | 24,20 | 21,50 | 1478,04 | 0,07  |
| 4,40  | 6,24  | 241,98 | 0,04  | 14,40 | 2,05  | 58,86  | 0,03  | 24,40 | 21,50 | 1144,50 | 0,05  |
| 4,60  | 7,22  | 307,38 | 0,04  | 14,60 | 1,07  | 13,08  | 0,01  | 24,60 | 36,41 | 536,28  | 0,01  |
| 4,80  | 7,12  | 307,38 | 0,04  | 14,80 | 0,88  | 19,62  | 0,02  | 24,80 | 47,99 | 0,00    | 0,00  |
| 5,00  | 6,15  | 274,68 | 0,04  | 15,00 | 0,88  | 71,94  | 0,08  |       |       |         |       |
| 5,20  | 8,21  | 320,46 | 0,04  | 15,20 | 4,71  | 261,60 | 0,06  |       |       |         |       |
| 5,40  | 9,09  | 359,70 | 0,04  | 15,40 | 5,79  | 215,82 | 0,04  |       |       |         |       |
| 5,60  | 9,39  | 385,86 | 0,04  | 15,60 | 7,16  | 130,80 | 0,02  |       |       |         |       |
| 5,80  | 10,86 | 431,64 | 0,04  | 15,80 | 3,14  | 52,32  | 0,02  |       |       |         |       |
| 6,00  | 9,98  | 464,34 | 0,05  | 16,00 | 1,28  | 39,24  | 0,03  |       |       |         |       |
| 6,20  | 10,28 | 451,26 | 0,04  | 16,20 | 0,80  | 98,10  | 0,12  |       |       |         |       |
| 6,40  | 12,64 | 91,56  | 0,01  | 16,40 | 5,70  | 130,80 | 0,02  |       |       |         |       |
| 6,60  | 9,31  | 392,40 | 0,04  | 16,60 | 3,94  | 65,40  | 0,02  |       |       |         |       |
| 6,80  | 5,78  | 353,16 | 0,06  | 16,80 | 2,27  | 104,64 | 0,05  |       |       |         |       |
| 7,00  | 8,13  | 418,56 | 0,05  | 17,00 | 1,79  | 130,80 | 0,07  |       |       |         |       |
| 7,20  | 14,71 | 568,98 | 0,04  | 17,20 | 1,99  | 130,80 | 0,07  |       |       |         |       |
| 7,40  | 15,01 | 647,46 | 0,04  | 17,40 | 9,15  | 150,42 | 0,02  |       |       |         |       |
| 7,60  | 16,09 | 758,64 | 0,05  | 17,60 | 7,29  | 202,74 | 0,03  |       |       |         |       |
| 7,80  | 13,93 | 588,60 | 0,04  | 17,80 | 6,21  | 202,74 | 0,03  |       |       |         |       |
| 8,00  | 12,86 | 673,62 | 0,05  | 18,00 | 6,70  | 176,58 | 0,03  |       |       |         |       |
| 8,20  | 8,34  | 379,32 | 0,05  | 18,20 | 7,88  | 202,74 | 0,03  |       |       |         |       |
| 8,40  | 7,27  | 130,80 | 0,02  | 18,40 | 7,10  | 111,18 | 0,02  |       |       |         |       |
| 8,60  | 8,74  | 71,94  | 0,01  | 18,60 | 6,61  | 209,28 | 0,03  |       |       |         |       |
| 8,80  | 7,67  | 379,32 | 0,05  | 18,80 | 7,70  | 274,68 | 0,04  |       |       |         |       |
| 9,00  | 8,75  | 438,18 | 0,05  | 19,00 | 7,50  | 300,84 | 0,04  |       |       |         |       |
| 9,20  | 6,98  | 431,64 | 0,06  | 19,20 | 7,90  | 353,16 | 0,04  |       |       |         |       |
| 9,40  | 7,28  | 45,78  | 0,01  | 19,40 | 6,33  | 189,66 | 0,03  |       |       |         |       |
| 9,60  | 7,19  | 117,72 | 0,02  | 19,60 | 4,37  | 241,98 | 0,06  |       |       |         |       |
| 9,80  | 5,62  | 130,80 | 0,02  | 19,80 | 6,24  | 235,44 | 0,04  |       |       |         |       |
| 10,00 | 9,64  | 477,42 | 0,05  | 20,00 | 7,51  | 287,76 | 0,04  |       |       |         |       |

Fonte: Empresa executora (2020).

Figura 18 – Resultado da sondagem CPT 2



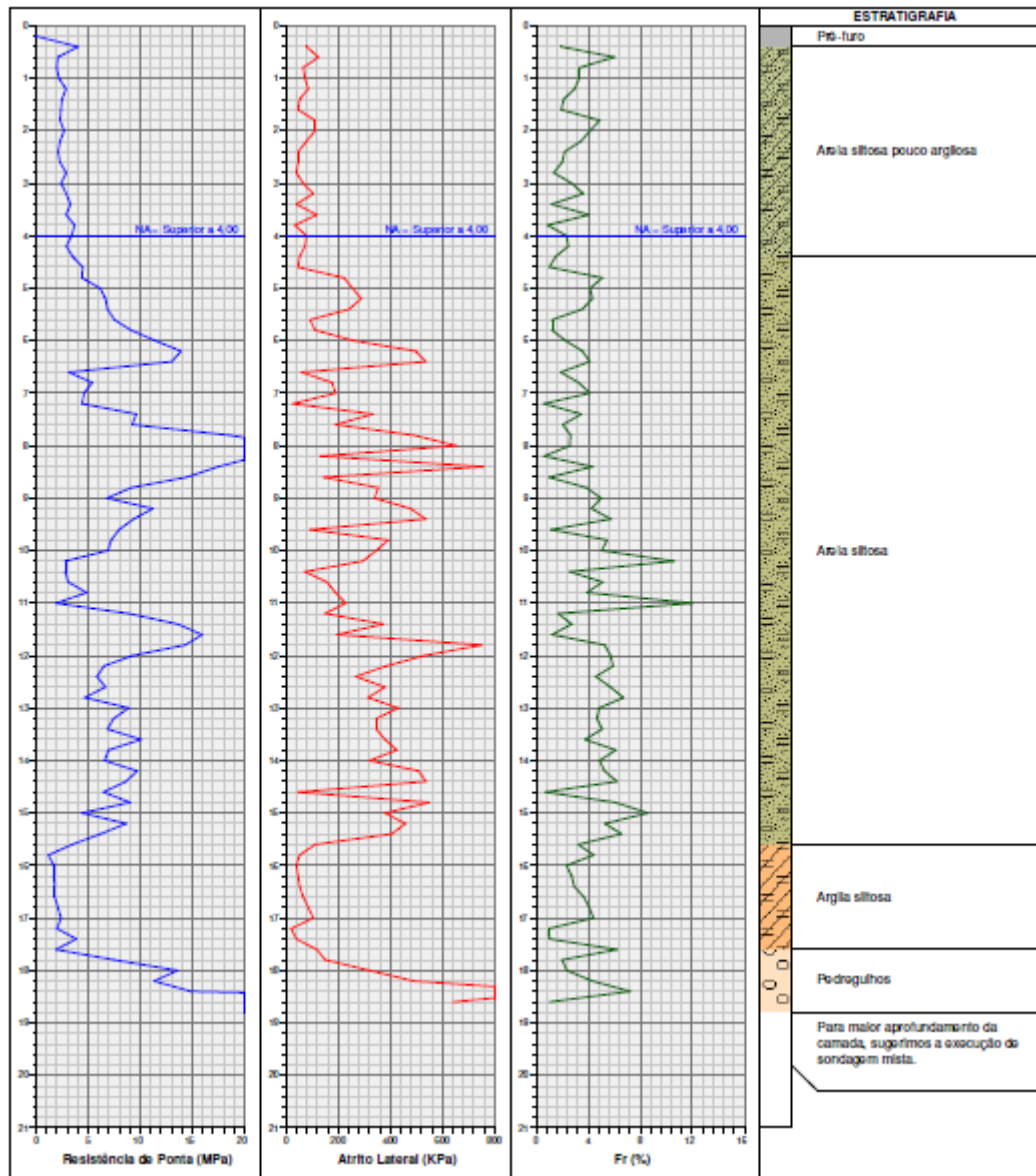
Fonte: Empresa executora (2020).

Figura 19 – Resultado da sondagem CPT 2

| PROF. | MPa   | KPa    | Fr(%) | PROF. | MPa   | KPa     | Fr(%) | PROF. | MPa   | KPa     | Fr(%) |
|-------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|
| 0,20  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 10,20 | 9,25  | 457,80  | 0,05  | 20,20 | 17,03 | 732,48  | 0,04  |
| 0,40  | 6,38  | 170,04 | 0,03  | 10,40 | 2,59  | 189,66  | 0,07  | 20,40 | 7,03  | 295,44  | 0,03  |
| 0,60  | 3,54  | 163,50 | 0,05  | 10,60 | 2,90  | 111,18  | 0,04  | 20,60 | 6,34  | 228,90  | 0,04  |
| 0,80  | 2,46  | 85,02  | 0,03  | 10,80 | 7,69  | 320,46  | 0,04  | 20,80 | 6,74  | 228,90  | 0,03  |
| 1,00  | 1,78  | 45,78  | 0,03  | 11,00 | 4,36  | 111,18  | 0,03  | 21,00 | 7,43  | 274,68  | 0,04  |
| 1,20  | 1,49  | 32,70  | 0,02  | 11,20 | 10,54 | 516,66  | 0,05  | 21,20 | 7,92  | 327,00  | 0,04  |
| 1,40  | 1,60  | 13,08  | 0,01  | 11,40 | 17,21 | 745,56  | 0,04  | 21,40 | 8,61  | 320,46  | 0,04  |
| 1,60  | 2,28  | 45,78  | 0,02  | 11,60 | 17,41 | 183,12  | 0,01  | 21,60 | 8,32  | 366,24  | 0,04  |
| 1,80  | 1,89  | 58,86  | 0,03  | 11,80 | 15,85 | 588,60  | 0,04  | 21,80 | 7,93  | 183,12  | 0,02  |
| 2,00  | 2,09  | 65,40  | 0,03  | 12,00 | 17,91 | 804,42  | 0,04  | 22,00 | 7,83  | 170,04  | 0,02  |
| 2,20  | 2,28  | 85,02  | 0,04  | 12,20 | 13,89 | 621,30  | 0,04  | 22,20 | 8,52  | 300,84  | 0,04  |
| 2,40  | 2,29  | 85,02  | 0,04  | 12,40 | 10,56 | 582,06  | 0,06  | 22,40 | 9,11  | 392,40  | 0,04  |
| 2,60  | 2,68  | 65,40  | 0,02  | 12,60 | 7,81  | 39,24   | 0,01  | 22,60 | 10,10 | 379,32  | 0,04  |
| 2,80  | 2,68  | 98,10  | 0,04  | 12,80 | 4,87  | 215,82  | 0,04  | 22,80 | 6,57  | 209,28  | 0,03  |
| 3,00  | 2,88  | 104,64 | 0,04  | 13,00 | 1,05  | 19,62   | 0,02  | 23,00 | 10,50 | 98,10   | 0,01  |
| 3,20  | 2,59  | 98,10  | 0,04  | 13,20 | 1,54  | 39,24   | 0,03  | 23,20 | 10,30 | 1203,36 | 0,12  |
| 3,40  | 2,30  | 91,56  | 0,04  | 13,40 | 0,66  | 13,08   | 0,02  | 23,40 | 15,21 | 542,82  | 0,04  |
| 3,60  | 2,30  | 98,10  | 0,04  | 13,60 | 0,66  | 6,54    | 0,01  | 23,60 | 29,24 | 686,70  | 0,02  |
| 3,80  | 2,30  | 124,26 | 0,05  | 13,80 | 0,67  | 13,08   | 0,02  | 23,80 | 25,12 | 791,34  | 0,03  |
| 4,00  | 5,94  | 209,28 | 0,04  | 14,00 | 0,57  | 313,92  | 0,55  | 24,00 | 46,51 | 640,92  | 0,01  |
| 4,20  | 6,43  | 255,06 | 0,04  | 14,20 | 0,87  | 111,18  | 0,13  | 24,20 | 58,87 | 0,00    | 0,00  |
| 4,40  | 6,83  | 268,14 | 0,04  | 14,40 | 1,16  | 45,78   | 0,04  |       |       |         |       |
| 4,60  | 8,30  | 294,30 | 0,04  | 14,60 | 1,36  | 39,24   | 0,03  |       |       |         |       |
| 4,80  | 8,30  | 340,08 | 0,04  | 14,80 | 1,27  | 26,16   | 0,02  |       |       |         |       |
| 5,00  | 10,66 | 464,34 | 0,04  | 15,00 | 0,58  | 65,40   | 0,11  |       |       |         |       |
| 5,20  | 13,21 | 516,66 | 0,04  | 15,20 | 0,88  | 19,62   | 0,02  |       |       |         |       |
| 5,40  | 15,57 | 575,52 | 0,04  | 15,40 | 0,49  | 71,94   | 0,15  |       |       |         |       |
| 5,60  | 13,90 | 555,90 | 0,04  | 15,60 | 0,49  | 45,78   | 0,09  |       |       |         |       |
| 5,80  | 12,14 | 523,20 | 0,04  | 15,80 | 1,18  | 26,16   | 0,02  |       |       |         |       |
| 6,00  | 13,03 | 503,58 | 0,04  | 16,00 | 0,79  | 6,54    | 0,01  |       |       |         |       |
| 6,20  | 4,20  | 366,24 | 0,09  | 16,20 | 0,70  | 32,70   | 0,05  |       |       |         |       |
| 6,40  | 4,99  | 183,12 | 0,04  | 16,40 | 0,80  | 26,16   | 0,03  |       |       |         |       |
| 6,60  | 4,50  | 143,88 | 0,03  | 16,60 | 0,51  | 91,56   | 0,18  |       |       |         |       |
| 6,80  | 3,52  | 137,34 | 0,04  | 16,80 | 0,51  | 39,24   | 0,08  |       |       |         |       |
| 7,00  | 3,72  | 170,04 | 0,05  | 17,00 | 1,59  | 19,62   | 0,01  |       |       |         |       |
| 7,20  | 5,39  | 228,90 | 0,04  | 17,20 | 1,30  | 19,62   | 0,02  |       |       |         |       |
| 7,40  | 12,65 | 398,94 | 0,03  | 17,40 | 1,20  | 431,64  | 0,36  |       |       |         |       |
| 7,60  | 17,36 | 601,68 | 0,03  | 17,60 | 23,47 | 412,02  | 0,02  |       |       |         |       |
| 7,80  | 11,58 | 464,34 | 0,04  | 17,80 | 24,46 | 1007,16 | 0,04  |       |       |         |       |
| 8,00  | 8,73  | 385,86 | 0,04  | 18,00 | 17,99 | 699,78  | 0,04  |       |       |         |       |
| 8,20  | 5,79  | 255,06 | 0,04  | 18,20 | 33,49 | 1438,80 | 0,04  |       |       |         |       |
| 8,40  | 5,11  | 313,92 | 0,06  | 18,40 | 45,36 | 438,18  | 0,01  |       |       |         |       |
| 8,60  | 16,49 | 124,26 | 0,01  | 18,60 | 31,92 | 261,60  | 0,01  |       |       |         |       |
| 8,80  | 18,56 | 850,20 | 0,05  | 18,80 | 6,13  | 222,36  | 0,04  |       |       |         |       |
| 9,00  | 11,30 | 621,30 | 0,06  | 19,00 | 3,68  | 111,18  | 0,03  |       |       |         |       |
| 9,20  | 9,73  | 483,96 | 0,05  | 19,20 | 6,62  | 294,30  | 0,04  |       |       |         |       |
| 9,40  | 8,16  | 418,56 | 0,05  | 19,40 | 5,64  | 340,08  | 0,06  |       |       |         |       |
| 9,60  | 5,52  | 71,94  | 0,01  | 19,60 | 13,20 | 163,50  | 0,01  |       |       |         |       |
| 9,80  | 7,19  | 281,22 | 0,04  | 19,80 | 6,14  | 222,36  | 0,04  |       |       |         |       |
| 10,00 | 6,11  | 313,92 | 0,05  | 20,00 | 7,51  | 111,18  | 0,01  |       |       |         |       |

Fonte: Empresa executora (2020).

Figura 20 – Resultado da sondagem CPT 3



Fonte: Empresa executora (2020).

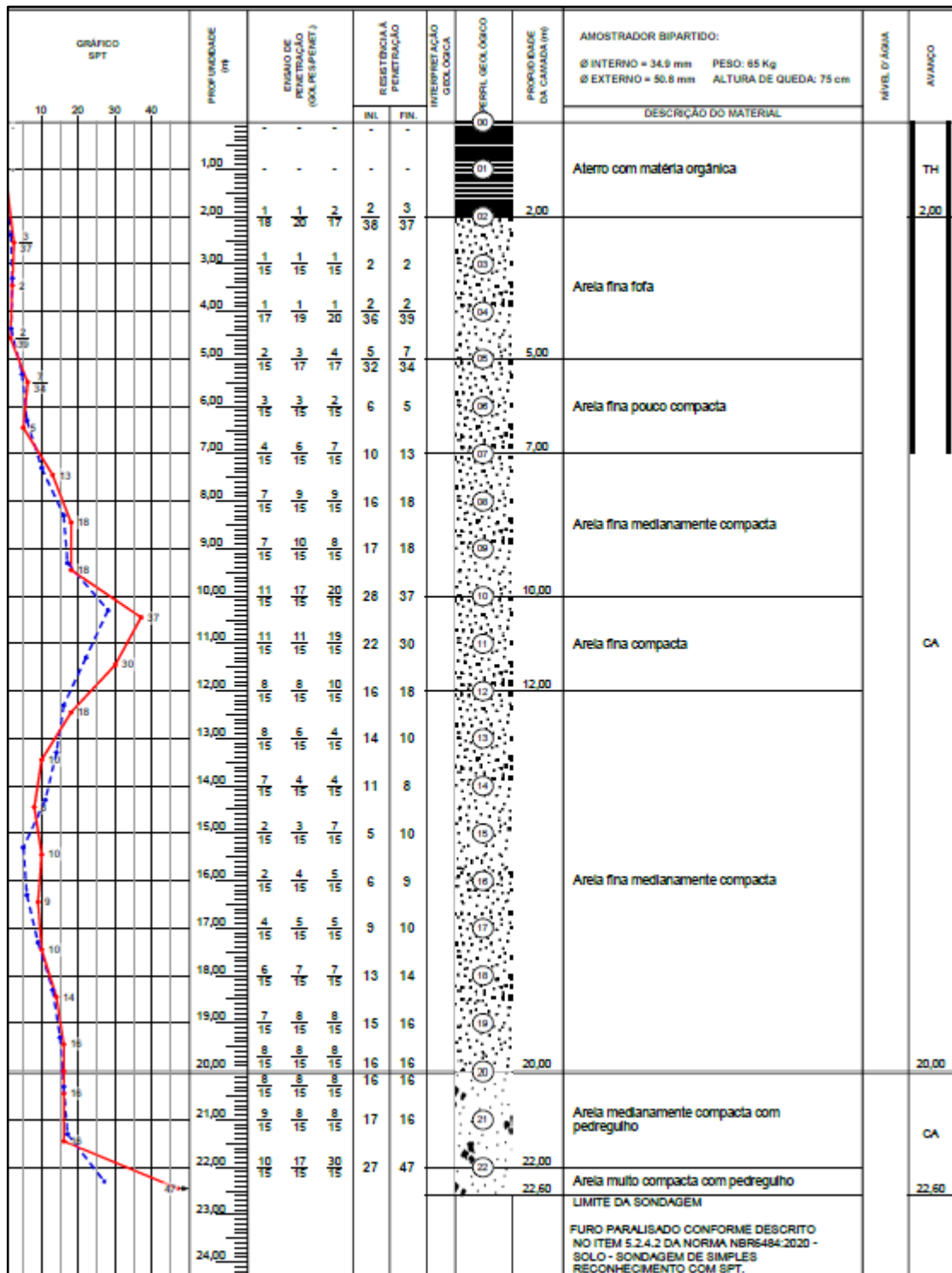


Figura 21 – Resultado da sondagem CPT 3

| PROF. | MPa   | KPa    | Fr(%) | PROF. | MPa   | KPa     | Fr(%) |
|-------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|-------|
| 0,20  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 10,20 | 2,78  | 294,30  | 0,11  |
| 0,40  | 4,03  | 78,48  | 0,02  | 10,40 | 2,78  | 71,94   | 0,03  |
| 0,60  | 2,07  | 134,25 | 0,06  | 10,60 | 3,08  | 156,96  | 0,05  |
| 0,80  | 1,97  | 65,40  | 0,03  | 10,80 | 4,85  | 189,66  | 0,04  |
| 1,00  | 2,17  | 71,94  | 0,03  | 11,00 | 1,91  | 228,90  | 0,12  |
| 1,20  | 2,86  | 85,02  | 0,03  | 11,20 | 8,87  | 150,42  | 0,02  |
| 1,40  | 2,47  | 52,32  | 0,02  | 11,40 | 13,59 | 372,78  | 0,03  |
| 1,60  | 2,37  | 45,78  | 0,02  | 11,60 | 15,94 | 196,20  | 0,01  |
| 1,80  | 2,28  | 111,18 | 0,05  | 11,80 | 14,28 | 752,10  | 0,05  |
| 2,00  | 2,67  | 111,18 | 0,04  | 12,00 | 9,28  | 529,74  | 0,06  |
| 2,20  | 2,28  | 78,48  | 0,03  | 12,20 | 6,53  | 385,86  | 0,06  |
| 2,40  | 2,09  | 45,78  | 0,02  | 12,40 | 5,85  | 268,14  | 0,05  |
| 2,60  | 2,29  | 45,78  | 0,02  | 12,60 | 6,64  | 379,32  | 0,06  |
| 2,80  | 2,88  | 39,24  | 0,01  | 12,80 | 4,68  | 313,92  | 0,07  |
| 3,00  | 2,39  | 65,40  | 0,03  | 13,00 | 8,90  | 431,64  | 0,05  |
| 3,20  | 2,89  | 104,64 | 0,04  | 13,20 | 7,43  | 346,62  | 0,05  |
| 3,40  | 3,28  | 39,24  | 0,01  | 13,40 | 6,84  | 346,62  | 0,05  |
| 3,60  | 2,89  | 117,72 | 0,04  | 13,60 | 10,08 | 379,32  | 0,04  |
| 3,80  | 3,68  | 32,70  | 0,01  | 13,80 | 6,94  | 425,10  | 0,06  |
| 4,00  | 3,39  | 78,48  | 0,02  | 14,00 | 6,56  | 320,46  | 0,05  |
| 4,20  | 2,90  | 71,94  | 0,02  | 14,20 | 9,79  | 510,12  | 0,05  |
| 4,40  | 3,49  | 52,32  | 0,02  | 14,40 | 8,62  | 536,28  | 0,06  |
| 4,60  | 4,47  | 45,78  | 0,01  | 14,60 | 6,46  | 45,78   | 0,01  |
| 4,80  | 4,38  | 222,36 | 0,05  | 14,80 | 9,02  | 549,36  | 0,06  |
| 5,00  | 6,15  | 255,06 | 0,04  | 15,00 | 4,41  | 379,32  | 0,09  |
| 5,20  | 6,64  | 287,76 | 0,04  | 15,20 | 8,63  | 457,80  | 0,05  |
| 5,40  | 6,84  | 241,98 | 0,04  | 15,40 | 6,18  | 405,48  | 0,07  |
| 5,60  | 7,53  | 91,56  | 0,01  | 15,60 | 3,44  | 111,18  | 0,03  |
| 5,80  | 9,10  | 111,18 | 0,01  | 15,80 | 1,18  | 52,32   | 0,04  |
| 6,00  | 11,46 | 261,60 | 0,02  | 16,00 | 1,68  | 39,24   | 0,02  |
| 6,20  | 13,91 | 497,04 | 0,04  | 16,20 | 1,68  | 45,78   | 0,03  |
| 6,40  | 13,03 | 536,28 | 0,04  | 16,40 | 1,78  | 52,32   | 0,03  |
| 6,60  | 3,13  | 58,86  | 0,02  | 16,60 | 1,78  | 65,40   | 0,04  |
| 6,80  | 5,38  | 175,58 | 0,03  | 16,80 | 2,08  | 85,02   | 0,04  |
| 7,00  | 4,60  | 189,66 | 0,04  | 17,00 | 2,38  | 104,64  | 0,04  |
| 7,20  | 4,41  | 26,16  | 0,01  | 17,20 | 1,99  | 19,62   | 0,01  |
| 7,40  | 9,61  | 333,54 | 0,03  | 17,40 | 3,85  | 39,24   | 0,01  |
| 7,60  | 9,22  | 189,66 | 0,02  | 17,60 | 1,89  | 117,72  | 0,06  |
| 7,80  | 18,54 | 490,50 | 0,03  | 17,80 | 7,49  | 150,42  | 0,02  |
| 8,00  | 25,12 | 654,00 | 0,03  | 18,00 | 13,57 | 320,46  | 0,02  |
| 8,20  | 21,39 | 130,80 | 0,01  | 18,20 | 11,32 | 490,50  | 0,04  |
| 8,40  | 17,47 | 758,64 | 0,04  | 18,40 | 14,85 | 1072,56 | 0,07  |
| 8,60  | 14,43 | 143,88 | 0,01  | 18,60 | 61,84 | 640,92  | 0,01  |
| 8,80  | 9,14  | 363,16 | 0,04  | 18,80 | 81,66 | 0,00    | 0,00  |
| 9,00  | 6,79  | 340,08 | 0,05  |       |       |         |       |
| 9,20  | 11,20 | 477,42 | 0,04  |       |       |         |       |
| 9,40  | 9,34  | 536,28 | 0,06  |       |       |         |       |
| 9,60  | 7,97  | 91,56  | 0,01  |       |       |         |       |
| 9,80  | 7,19  | 392,40 | 0,05  |       |       |         |       |
| 10,00 | 6,90  | 346,62 | 0,05  |       |       |         |       |

Fonte: Empresa executora (2020).

Figura 22 – Resultado da sondagem SPT



Fonte: Fundata Engenharia (2021).

Fazendo uma sucinta análise dos ensaios, nota-se a grande e predominante presença de solos arenosos, de variadas compacidades, onde as resistências nestas

camadas são maiores. Um fato muito importante a ser observado é que no ensaio SPT, as lâminas de solos argilosos não aparecem, visto que no ensaio a amostragem de solo ocorre apenas de metro em metro. Apesar deste ponto, o ensaio continua sendo muito importante para reconhecimento do solo nas obras. Nos ensaios CPT essas camadas podem ser observadas, visto que é um ensaio contínuo, e nelas as resistências caem drasticamente, ressaltando a importância deste tipo de ensaio em terrenos como este.

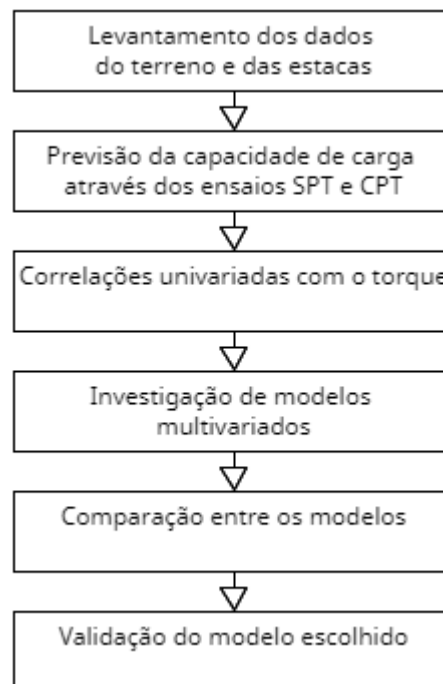
É possível estabelecer uma relação entre os dois ensaios, observa-se que no CPT 02, entre os metros 13 e 18 aproximadamente, uma argila siltosa mole é encontrada e no SPT uma areia medianamente compacta, onde a resistência nestes mesmos metros também cai consideravelmente.

Também foram disponibilizados pela empresa a planta de locação das fundações com estacas e pilares e o diário de cravação com o acompanhamento da execução das estacas hélice contínua, contendo diâmetro, profundidade, torque, hora de início e fim e volume de concreto de cada implementação. Essas informações estão presentes no Anexo A.

## 4. METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os procedimentos executados, com a finalidade de atingir os objetivos do trabalho. O fluxograma abaixo demonstra as etapas realizadas e que serão mais bem detalhadas nos subitens deste capítulo.

Figura 23 – Fluxograma das etapas realizadas



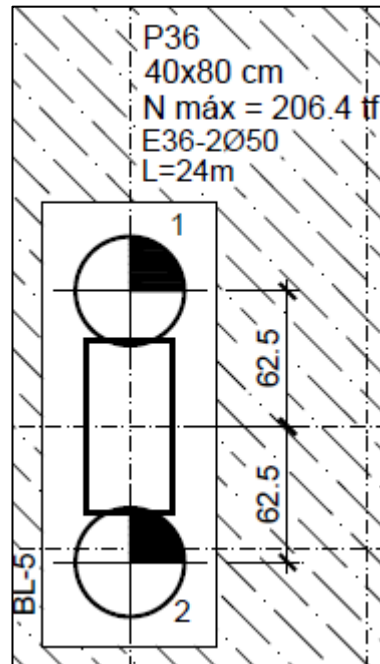
Fonte: Autora (2022).

### 4.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS

Com posse de todos os ensaios geotécnicos realizados e de sua locação no terreno, um comparativo com o projeto de fundações foi realizado. Para a análise da previsão da capacidade de carga, utilizou-se os blocos de estacas mais próximos aos ensaios realizados.

Para os ensaios SPT e CPT 3, fez-se a análise do pilar 36 (P36 no projeto), carregado com 206,4 tf de esforços a compressão. O bloco projetado para esse pilar é o BL-5 que foi dimensionado com duas estacas de 50 cm de diâmetro cada, conforme Figura 24.

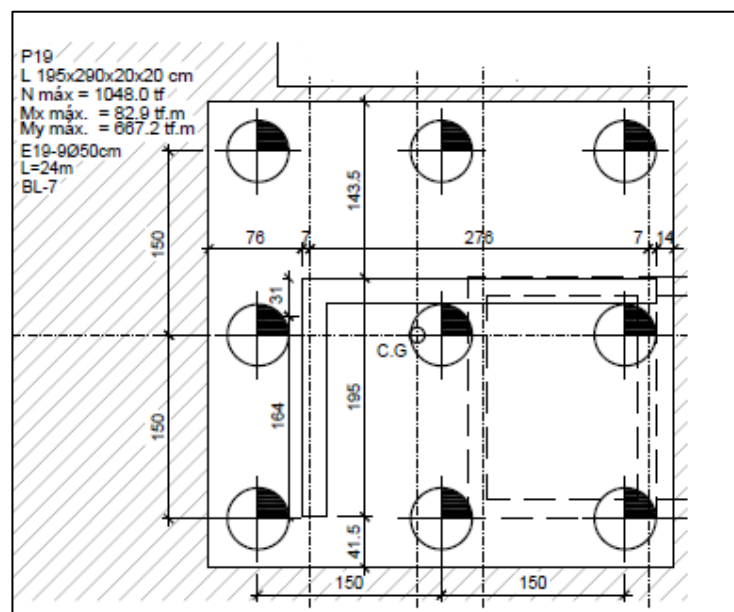
Figura 24 – Bloco mais próximo ao SPT e CPT 3



Fonte: Empresa executora, 2022.

Para o CPT 2, o pilar número 19 (P19) foi escolhido, carregado com 1048 tf de esforços a compressão e momentos máximos de 82,9 tf.m e 667,2 tf.m em X e Y, respectivamente. Bloco projetado para este pilar foi o número sete (BL-7) com nove estacas de 50 cm (Figura 25).

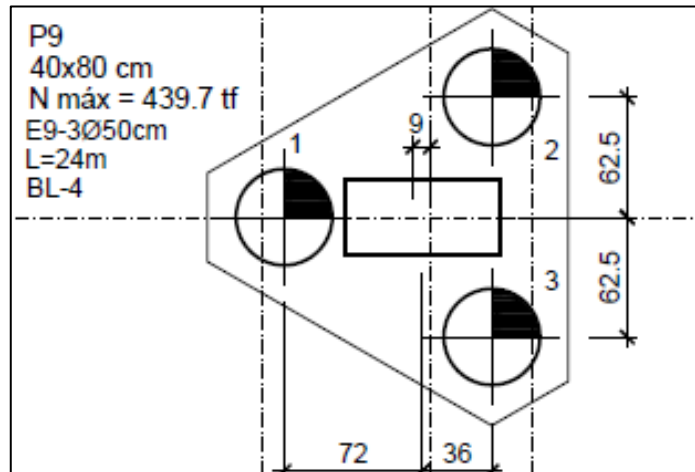
Figura 25 – Bloco mais próximo ao CPT 2



Fonte: Empresa executora, 2022.

Já para o ensaio CPT 1, o pilar mais próximo era o número 9 (P9), transmitindo uma carga de 439,7 tf para o bloco número quatro (BL-4), projetado com três estacas de 50 cm (Figura 26).

Figura 26 – Bloco mais próximo ao CPT 1



Fonte: Empresa executora, 2022.

#### 4.2 PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA VIA SPT E CPT

A partir da determinação das estacas/bloco que seriam analisadas, uma planilha foi elaborada (Anexo B) para determinação da capacidade de carga de cada ensaio. Baseado nos boletins de sondagem (SPT e CPT) e nas fórmulas e informações previamente citadas no item 2.2.1 os dados foram inseridos. Apenas o modelo de Aoki e Velloso foi utilizado, visto que pode ser aplicado tanto para ensaios do tipo SPT como para CPT. A resistência admissível foi calculada para as camadas utilizando a fórmula abaixo, já citada.

$$R_{adm} = \frac{R_p + R_l}{2} \quad (12)$$

No processo de definição da capacidade de carga das estacas alguns pontos devem ser destacados: fator de segurança da ordem de 2, a resistência de ponta foi limitada à resistência lateral, conforme recomendado no item 8.1.2.1 da norma NBR 6122:2019. Assim, na verificação do ELU (estado limite último) a resistência da ponta terá como limite superior o valor da resistência de atrito lateral, o que só pode ser

considerado quando o contato entre a ponta da estaca e o solo é efetivo. Tal condição ocorre neste estudo. Os valores de  $N_{SPT}$  foram restringidos a uma faixa entre 3 e 50, conforme também indicado pelos autores Aoki e Velloso (1975).

Com relação ao único ponto SPT, as informações da sondagem foram inseridas na planilha. Neste tipo de ensaio foi utilizado o  $N_p$  (N médio na ponta da estaca) para o cálculo da resistência de ponta, ao invés do  $N_{SPT}$ . O  $N_p$  é a média entre o índice de resistência à penetração do solo no metro estudado, no metro acima e no abaixo. Esse procedimento é realizado devido à incerteza na transição das camadas que o ensaio traz, por ser realizado apenas de metro em metro.

Dessa forma a planilha é construída, contendo informações sobre a resistência de ponta, resistência lateral, resistência lateral acumulada, resistência à ruptura e por fim, a resistência admissível, em todos os metros das camadas. Os cálculos se encerram na profundidade em que o ensaio foi finalizado. Segundo a empresa responsável pelo ensaio SPT, o critério de paralisação utilizado foi o 5.2.4.2 da norma NBR 6484, ou seja, um dos três itens foram atingidos:

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

A capacidade de carga se dá então, na profundidade em que a resistência admissível, carga que é possível transmitir ao solo com segurança, for maior que a carga que a estaca terá que suportar e transferir ao terreno.

Já nos três ensaios CPT, os cálculos são mais diretos, visto que o método foi projetado para sua utilização. Não é necessário informar ao modelo qual o tipo de solo, por exemplo. As mesmas considerações citadas para o SPT foram empregadas: fator de segurança da ordem de 2 e a restrição da resistência de ponta ser menor ou igual à resistência por atrito lateral. No boletim dos ensaios já são determinadas as resistências de ponta e lateral unitárias do cone, o que simplifica o cálculo das resistências finais.

Por ser contínuo, os resultados são a cada 0,2 m, na profundidade em que a resistência admissível for maior que a carga que a estaca terá que suportar (por alguns metros consecutivos), tem-se a capacidade de carga determinada. Vale ressaltar que os ensaios foram finalizados por atingirem uma camada de alta resistência, a partir daquela profundidade seria necessário utilizar uma sondagem mista para não danificar o instrumento.

#### 4.3 INVESTIGAÇÃO DE CORRELAÇÕES UNIVARIADAS

Depois de finalizadas as análises da previsão de capacidade de carga, iniciou-se as investigações das correlações univariadas com o parâmetro torque. Foram ponderados os dados recebidos pelos sensores no monitoramento da execução das estacas hélice contínua, onde um dos controles é a pressão na bomba de óleo que aciona o mecanismo que promove a penetração do trado. **Ou seja, não se tratará de correlações com o torque, propriamente, mas sim com a pressão na bomba de óleo.**

Os dados oriundos do SPT e CPT 3 são comparados à estaca número um do bloco cinco, o CPT 2 à estaca número um do bloco sete e para o CPT 1 à estaca número três do bloco quatro, segue resumo na Tabela 6. Foram tomados dos boletins de execução dos ensaios as pressões necessárias para sua execução, a cada 0,08 m. Gráficos de dispersão foram plotados para visualizar se alguma das variáveis guardava correlação clara com a pressão na bomba, que produz o torque. Todos os gráficos gerados estarão expostos no próximo capítulo.

Tabela 6 – Estacas utilizadas para as análises univariadas

| Ensaio | Pilar | Bloco | Estaca |
|--------|-------|-------|--------|
| SPT    | P36   | BL-5  | 1      |
| CPT 1  | P9    | BL-4  | 3      |
| CPT 2  | P19   | BL-7  | 1      |
| CPT 3  | P36   | BL-5  | 1      |

Fonte: Autora (2022).

Por meio da linha de tendência gerada nos gráficos e conseqüentemente do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), que é uma medida estatística de quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada, foi possível verificar se alguma variável



guardava correlação direta com torque. O  $r^2$  pode variar de 0 a 1 e quanto mais próximo de 1 melhor aquele modelo se ajusta aos dados. O coeficiente é calculado de acordo com a Fórmula 12: a diferença entre a soma dos quadrados totais (SQ<sub>t</sub>) e a soma dos quadrados dos resíduos (SQ<sub>res</sub>), dividido pela soma dos quadrados totais.

$$r^2 = \frac{SQ_t - SQ_{res}}{SQ_t} \quad (12)$$

Onde:

SQ<sub>t</sub> = Soma dos quadrados totais;

SQ<sub>res</sub> = Soma dos quadrados dos resíduos.

A soma dos quadrados totais é a soma de todos os erros em relação à média daquele parâmetro, a variância. A soma dos quadrados dos resíduos é a soma dos erros em relação ao modelo criado, aquele que se adequa melhor aos dados. Ou seja, o coeficiente de determinação explica quão melhor o modelo criado é em relação a simplesmente tirar a média de todos os dados.

Através do ensaio SPT foi avaliada a correlação entre a pressão na bomba de óleo e o N<sub>SPT</sub>, a profundidade, a resistência de ponta, a resistência por atrito lateral, resistência lateral acumulada e resistência admissível. Os dados de torque também foram comparados às grandezas previamente descritas, mas obtidas via ensaio CPT foram utilizados todos os citados menos o N<sub>SPT</sub>. Neste caso, utilizou-se qc.

#### 4.4 INVESTIGAÇÃO DE MODELOS MULTIVARIADOS

Já adiantando os baixos coeficientes de determinação nas relações univariadas, o trabalho foi ampliado para a investigação de modelos com múltiplas variáveis dependentes, os multivariados. Entende-se que não há grande propósito em tentar estimar o torque através de medidas feitas em ensaios SPT e CPT, mas sim tentando correlacionar a resistência admissível levando sempre o torque, a grandeza principal deste trabalho, como uma das variáveis explicativas. A ferramenta escolhida para as análises foi o software RStudio, que utiliza a linguagem R para a análise de dados.

Seis modelos foram testados: A, B, D, E, F e G. Os lineares são A e B, o primeiro leva apenas o torque como dado de entrada, no segundo é inserida também a profundidade. Para os demais modelos uma transformação é utilizada, tornando a variável dependente, tensão admissível, não linear. Os modelos D e E seguem a ideia dos primeiros (A e B), porém não são lineares devido a transformação. E por fim, os modelos F e G, onde F utiliza como variáveis explicativas o torque, profundidade e qc, e G que considera variáveis explicativas apenas a profundidade e qc. No Quadro 01 há um resumo das condições adotadas para a construção dos modelos.

Quadro 1 – Resumo dos modelos utilizados

| <b>Modelos</b> | <b>Transformação não linear na variável dependente</b> | <b>Variáveis explicativas</b> |
|----------------|--|-------------------------------|
| A              | Não  | Torque                        |
| B              | Não  | Torque e profundidade         |
| D              | Sim  | Torque                        |
| E              | Sim  | Torque e profundidade         |
| F              | Sim  | Torque, profundidade e qc     |
| G              | Sim  | Profundidade e qc             |

Fonte: Autora (2022).

Para avaliação do desempenho dos modelos, adotou-se como referência um índice de confiança de 95%, resultando em p-values de 0,05.

Funções mais complexas requerem o uso de pacotes dentro do R, apenas as mais comuns já vêm configuradas. A construção dos modelos foi realizada a partir do pacote “linear model” (lm), responsável por criar um modelo de regressão linear entre a variável dependente e as variáveis independentes. Depois de constatar que os dados não possuíam uma distribuição normal, a transformação de Box-Cox foi implementada nos quatro últimos modelos com o objetivo de estabilizar os dados e consequentemente a variância.

A transformação de Box-Cox foi citada na literatura em 1964 para resolver problemas de estimação de regressões não lineares, sugerindo o melhor lambda ( $\lambda$ ) a ser utilizado no modelo transformado. Dentro do software R a transformação de Box-Cox está inserida no pacote “car”, através da função “powerTransform ()”, calculada de acordo com a Fórmula 13.

$$y^\lambda = \frac{(y^\lambda - 1)}{\lambda} \quad (13)$$

Apenas o coeficiente de determinação não é suficiente para avaliar a representatividade estatística das variáveis explicativas, é necessário ponderar também os erros, resíduos, que podem ocorrer devido a algumas razões já conhecidas e que precisam ser consideradas e analisadas. Os modelos de regressão devem atender aos quatro pressupostos estabelecidos no Quadro 02, sendo verificados através de testes estatísticos: teste de Shapiro-Francia, fator de inflação da variância (VIF), teste de Breusch-Pagan e teste de Durbin-Watson. Como o modelo estudado não é temporal, o último pressuposto não será analisado.

Quadro 2 – Pressupostos do modelo de regressão

| <b>Pressupostos</b>  | <b>Violação</b>                                    | <b>Verificação do pressuposto</b> |
|--|--|-----------------------------------|
| Os resíduos apresentam distribuição normal.  | Valor-P dos testes t e do teste F não são válidos  | Teste de Shapiro-Francia          |
| Não existem correlações elevadas entre as variáveis explicativas e existem mais observações do que variáveis explicativas. | Multicolinearidade                                 | VIF                               |
| Os resíduos não apresentam correlação com qualquer variável X.   | Heterocedasticidade                                | Teste de Breusch-Pagan            |
| Os resíduos são aleatórios e independentes.  | Autocorrelação dos resíduos para modelos temporais | Teste de Durbin-Watson            |

Fonte: FÁVERO; BELFIORE (2017).

O teste de Shapiro-Francia (1972) é uma forma de estabelecer se os resíduos do modelo seguem a distribuição normal. Caso não sigam, este é um forte indício de que o modelo foi escolhido erroneamente. O teste trabalha com duas hipóteses:

1. H0: os dados seguem uma distribuição normal;
2. H1: os dados não seguem uma distribuição normal.

Através da biblioteca “nortest” e da função “sf.test()” o programa fornece o p-value, a probabilidade de significância. Caso p-value seja menor que 0,05 se tem evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula, de normalidade dos dados, pois possui menos de 95% de significância e é irrelevante.

O diagnóstico de multicolinearidade avalia se no modelo não há variáveis explicativas com correlações elevadas, interferindo na outra, de certa forma redundantes e que poderiam ser retiradas. Um diagnóstico altamente positivo eleva o

erro padrão dos coeficientes, devido à variância, tornando-os instáveis. (SOARES, 2021).

Uma forma de realizar a verificação é pelo fator de inflação da variância (VIF), contido no pacote “olsrr” e gerado pela função “ols\_vif\_tol()” no R. Segundo a literatura, se o VIF for igual a 1 não existe multicolinearidade, caso seja maior as variáveis podem estar correlacionadas. É problemático o fator chegar na ordem de 10, onde os coeficientes de regressão estarão mal estimados devido à multicolinearidade (MINITAB, 2019).

A heterocedasticidade ocorre quando a dispersão da variância ao longo da variável explicativa é heterogênea, não constante, quando a variância do erro se altera de acordo com as observações, com os valores da variável explicativa. Isso pode ocorrer devido a uma deficiência na especificação do modelo, onde se tem omissão de variáveis importantes, produzindo estimadores ineficientes, uma variância má estimada e tornando os intervalos de confiança não válidos. (SOARES, 2021).

O diagnóstico de heterocedasticidade pode ser obtido pelo teste de Breusch-Pagan, que utiliza como hipótese nula os erros homocedásticos, com a variância dos termos de erro constantes e como hipótese alternativa os erros heterocedásticos, os termos do erro se apresentam como função de uma ou mais variáveis explicativas. No software R está inserido no pacote “olsrr” com a função “ols\_test\_breusch\_pagan()”. E como no teste de Shapiro-Francia descarta-se a hipótese nula caso p-value seja menor que 0,05.

Conhecidos os pressupostos a amostra foi dividida em duas: uma de treino e uma de teste. A de treino foi alimentada com os dados provenientes dos ensaios CPT 2 e 3, onde os modelos foram testados e comparados a fim de determinar o melhor dentre eles, nestes casos o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi o que definiu o sucesso ou não das relações, além das análises dos pressupostos. Já a de teste foi determinada com dados do ensaio CPT 1 com o objetivo de validação, melhor descrito no item 4.6.

Os seis modelos mencionados no Quadro 01 foram testados utilizando as resistências admissíveis calculadas de duas formas: não limitando a resistência de ponta (Script 6), ou seja, a tensão admissível foi determinada somando a resistência lateral acumulada e a de ponta, e limitando a resistência de ponta (Script 7), onde essa poderia ser no máximo igual a resistência de fuste, caso fosse maior era corrigida

e substituída pela de atrito lateral, fazendo com que a tensão admissível fosse duas vezes a resistência lateral acumulada.

#### 4.5 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS

Além do comparativo entre os dois códigos, com e sem limitação da resistência de ponta, dentro de cada Script também houve a confrontação entre os modelos. Foram analisados A em relação a D e B em relação ao E, visto que utilizam as mesmas variáveis explicativas, mudando apenas o formato da variável dependente, linear e não linear.

Os modelos F e G também foram comparados, com o objetivo de entender qual a importância e participação do torque, dado pela pressão na bomba de óleo, na determinação da tensão admissível. Até então apenas o coeficiente de determinação era avaliado para a tomada de decisão.

Após este processo e definidos os melhores, foram testados também os pressupostos dos modelos de regressão, avaliando a representatividade estatística das variáveis explicativas, já que o objetivo é obter o modelo que melhor defina a resistência admissível utilizando o torque como um dos dados de entrada.

#### 4.6 VALIDAÇÃO DO MODELO ESCOLHIDO

Depois de definido o melhor modelo, aquele que dispunha do mais alto coeficiente de determinação e/ou o que melhor se adequava aos pressupostos, ocorreu a validação do mesmo. Foram utilizados como dados de alimentação os do ensaio de campo, CPT número 1, o qual não foi inserido para realização dos treinos. Através da função "predict()" contida no R, houve a previsão dos modelos.

Um comparativo entre a resistência admissível calculada por Aoki e Velloso e a resistência estimada gerada pelos modelos é realizada. Para facilitar a visualização os modelos são plotados em gráficos, contendo na ordenada os valores estimados e na abcissa os valores calculados. Fica assim mais clara a análise da variância e seus resíduos gerados.

Com a finalidade de avaliar a precisão do modelo escolhido, os erros nele contidos, o método do erro médio quadrático (MSE) é inserido ao programa, muitos

autores julgam ser interessante para demonstrar a imprecisão. Neste método os erros que estão mais longe da média ficam evidenciados, visto que são elevados ao quadrado, mostrando assim os erros mais grosseiros. Quanto menor o somatório final, melhor, mais perto o valor estimado está da realidade.

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta e analisa os resultados de cada uma das etapas descritas na metodologia deste trabalho.

### 5.1 PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA VIA SPT E CPT

A Tabela 6 resume os resultados das previsões de capacidade de carga referente aos ensaios geotécnicos realizados, trazendo a resistência de ponta, resistência de atrito lateral acumulada e a resistência admissível na profundidade em que a resistência admissível é superior ao carregamento por estaca, profundidade de assentamento, onde essas poderão ser apoiadas sem que a transmissão de carga ao terreno rompa o solo. Os memoriais de cálculo completos encontram-se nas Tabelas do Anexo B.

Tabela 7 – Resultado capacidade de carga pelo método de Aoki e Velloso

| <b>Sondagem</b> | <b>Assentamento (m)</b> | <b>Radm (kN)</b> | <b>RI acumulado (kN)</b> | <b>Rp (kN)</b> |
|-----------------|-------------------------|------------------|--------------------------|----------------|
| SPT             | 18                      | 1204             | 1204                     | 1309           |
| CPT 1           | 21,4                    | 1757             | 2138                     | 1375           |
| CPT 2           | 19,6                    | 1639             | 1983                     | 1295           |
| CPT 3           | 17,8                    | 1155             | 1575                     | 735            |

Fonte: Autora (2022).

As duas estacas 36 são submetidas à esforços de magnitude de 2064 kN, impostos pelo pilar 36, e requerem comprimento de 18 m segundo o ensaio SPT (que ocorre de metro em metro) e de 17,8 m segundo o ensaio CPT 3 (que ocorre a cada 0,20 m) para suportar o carregamento. Nesta profundidade se atinge resistência de ruptura (resistência de ponta mais atrito lateral acumulado) de 2408 e 2311,2 kN, respectivamente, e por se utilizar fator de segurança da ordem de 2, uma resistência admissível de 1204 e 1155,6. Ressaltando que a resistência admissível, carga que o solo consegue suportar, precisa ser maior que a carga que cada estaca transmite ao terreno (carga do pilar majorada e dividida pelo número de estacas).

Igualmente para as três estacas 9, submetidas à um esforço de 4397 kN. O comprimento obtido para tal carregamento foi de 21,4 m com resistência admissível

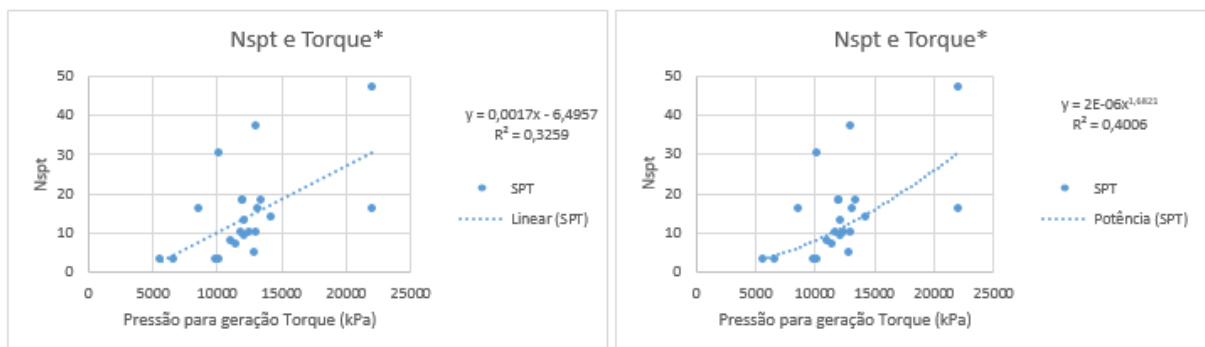
de 1757,1 kN, sendo que a carga por estaca é de 1612,23 kN. Já as nove estacas 19, precisam suportar um esforço de 10480 kN com profundidade de assentamento de 19,6 m, carga admissível de 1639,56 Kn e carga por estaca de 1280,89 kN.

## 5.2 INVESTIGAÇÃO DE CORRELAÇÕES UNIVARIADAS

Concluídas as previsões de capacidade de carga e de posse de todos os parâmetros ao longo da profundidade, os gráficos de dispersão foram gerados, com o objetivo de avaliar se alguma variável guardava correlação direta com o torque. A linha de tendência junto com o coeficiente de determinação que demonstraram o sucesso ou não das relações.

Iniciando com a análise do ensaio SPT, as Figuras 24, 25, 26, 27, 28 e 29 mostram os gráficos gerados com o dado torque em relação ao  $N_{SPT}$ , profundidade, resistência de ponta, resistência por atrito lateral, resistência por atrito lateral acumulado e resistência admissível, respectivamente. Os gráficos apresentam as linhas de tendência linear e a que melhor se adequa aos dados.

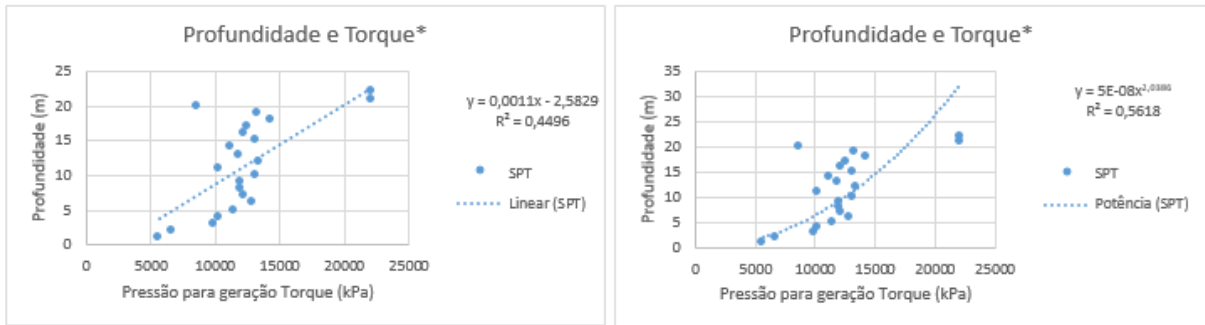
Figura 27 – Gráfico de dispersão entre  $N_{SPT}$  e pressão para geração de Torque



Fonte: Autora (2022).

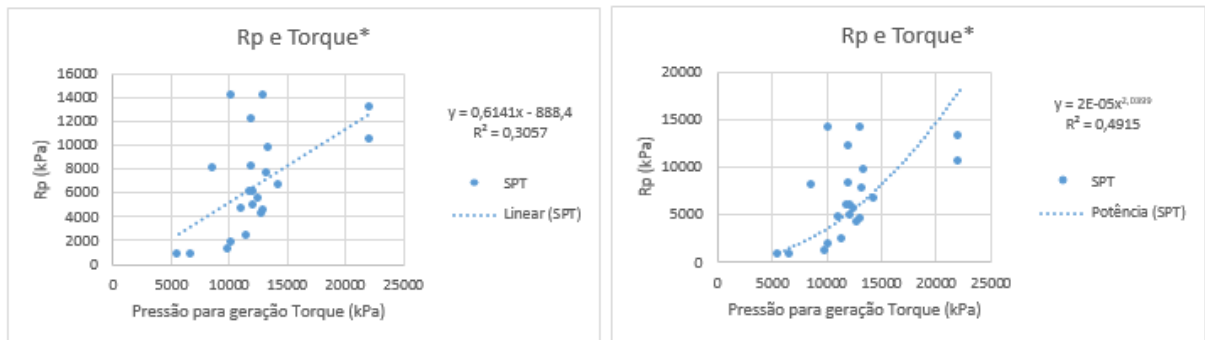


Figura 28 – Gráfico de dispersão entre Profundidade e pressão para geração de Torque



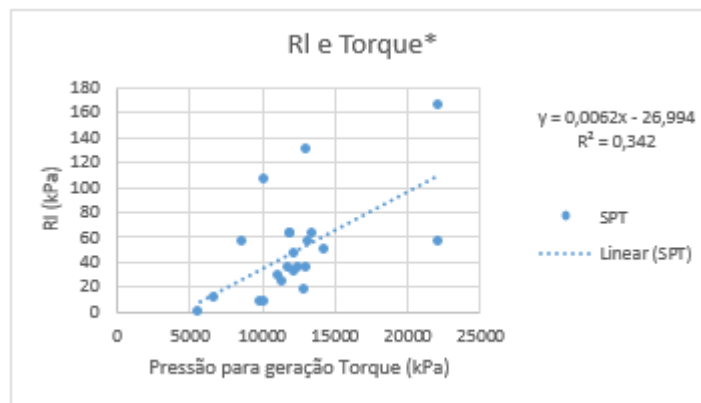
Fonte: Autora (2022).

Figura 29 – Gráfico de dispersão entre Rp e pressão para geração de Torque



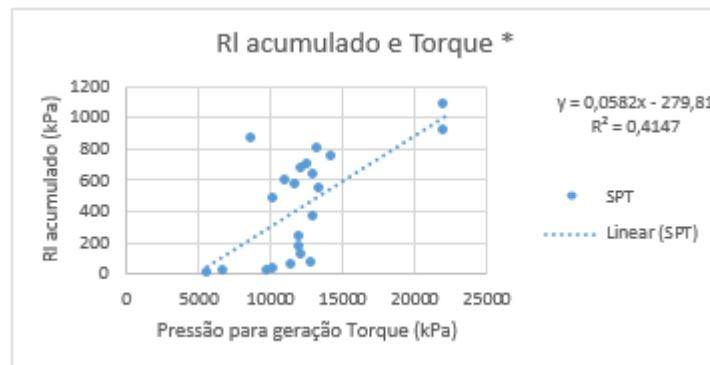
Fonte: Autora (2022).

Figura 30 – Gráfico de dispersão entre RI e pressão para geração de Torque



Fonte: Autora (2022).

Figura 31 – Gráfico de dispersão entre RI acumulado e pressão para geração de Torque



Fonte: Autora (2022).

Figura 32 – Gráfico de dispersão entre Radm e pressão para geração de Torque



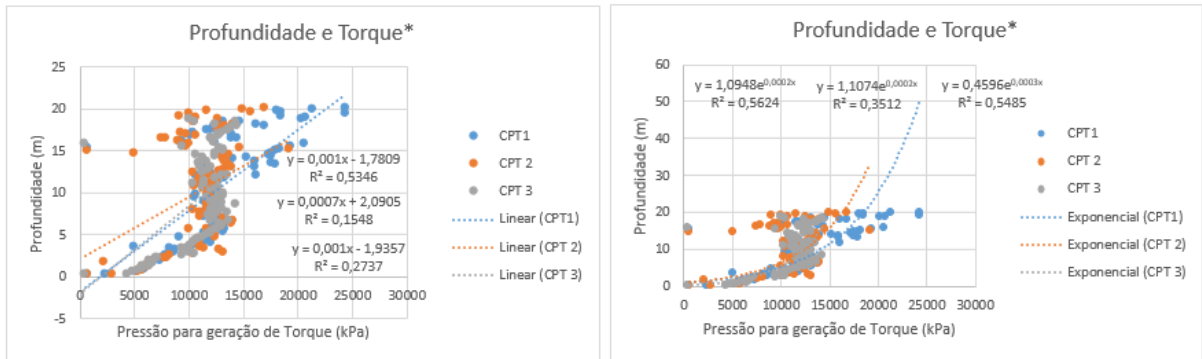
Fonte: Autora (2022).

Com exceção da resistência lateral e da resistência lateral acumulada, que se ajustaram a reta, todas se comportaram melhor de forma potencial. Fica evidente que os parâmetros tendem a aumentar em proporções cada vez maiores, provavelmente isso seja explicado pelo fato do ensaio SPT ocorrer apenas de metro em metro, não identificando as lâminas de argila presentes entre as camadas de areia, onde as resistências decaem significativamente.

Conclui-se que os modelos lineares não são os mais recomendados para uso e destaca-se o coeficiente de determinação do torque em relação a profundidade, demonstrando que possivelmente existe uma forte relação.

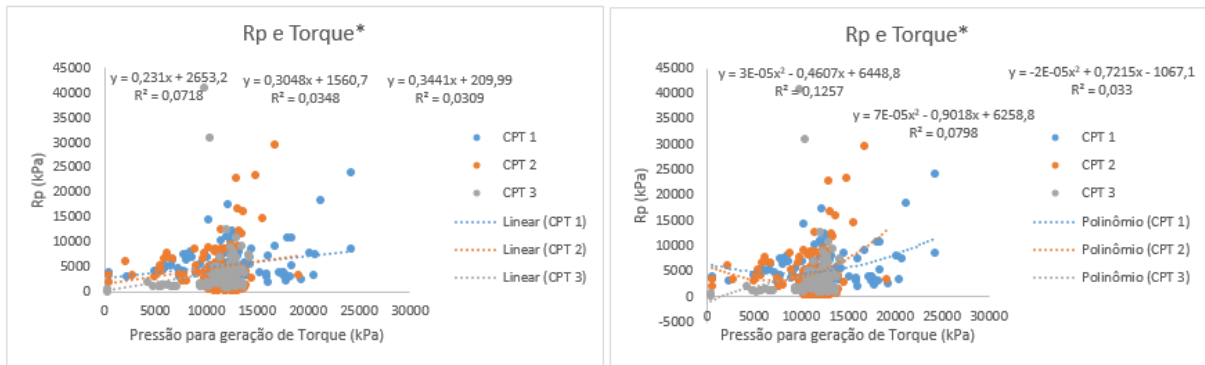
Para os três ensaios CPT também foram gerados os mesmos gráficos de dispersão.

Figura 33 – Gráfico de dispersão entre Profundidade e pressão para geração de Torque (CPT 1, 2 e 3)



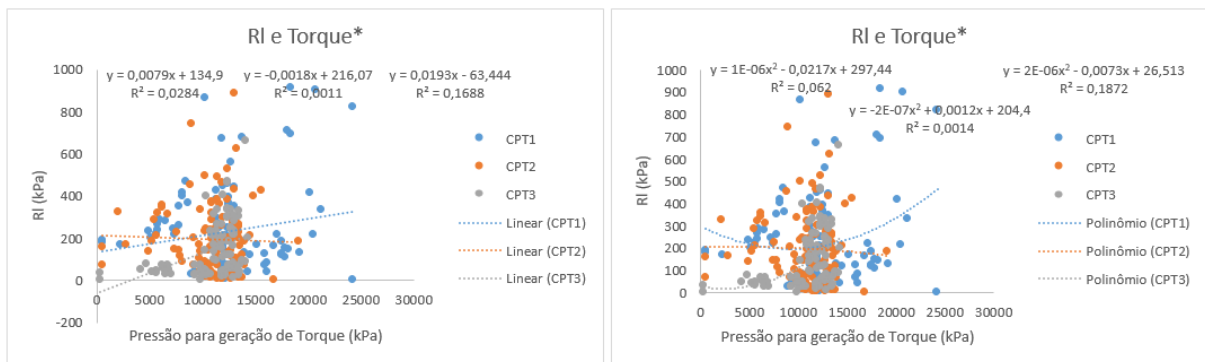
Fonte: Autora (2022).

Figura 34 – Gráfico de dispersão entre Rp e pressão para geração de Torque (CPT 1, 2 e 3)



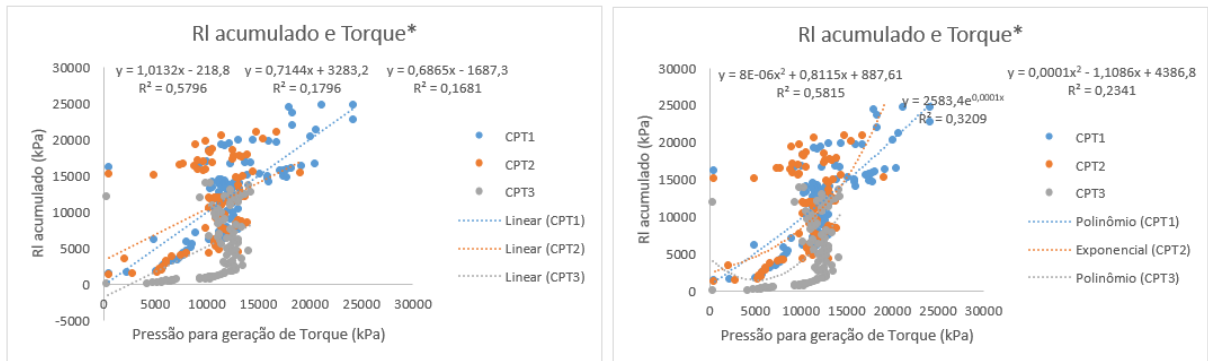
Fonte: Autora (2022).

Figura 35 – Gráfico de dispersão entre RI e pressão para geração de Torque (CPT 1, 2 e 3)



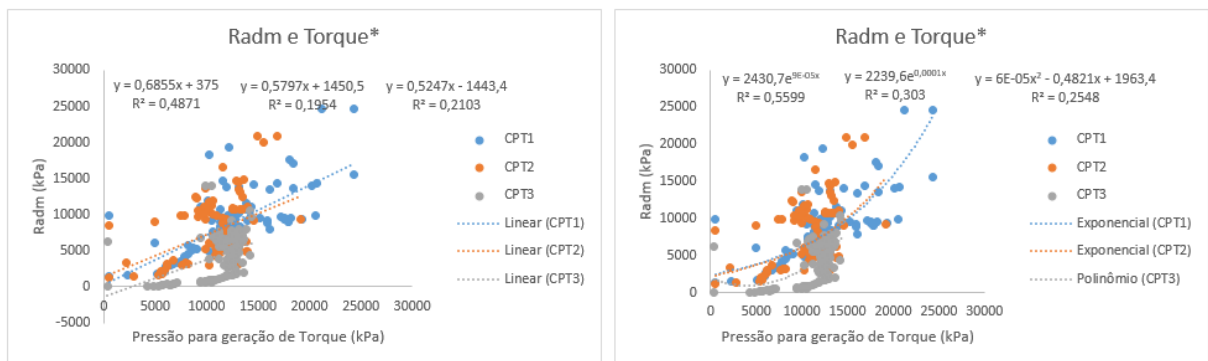
Fonte: Autora (2022).

Figura 36 – Gráfico de dispersão entre RI acumulado e pressão para geração de Torque (CPT 1, 2 e 3)



Fonte: Autora (2022).

Figura 37 – Gráfico de dispersão entre Radm e pressão para geração de Torque (CPT 1, 2 e 3)



Fonte: Autora (2022).

As linhas que mais se adequaram aos ensaios CPT foram a exponencial e polinomial. Os dados acabam fluando levemente, visto que a resistência aumenta e depois decresce, explicadas pelas lâminas de argila presentes por todo o perfil, que agora consegue ser identificada.

Através das análises univariadas, é possível concluir que nenhum parâmetro guarda uma forte correlação direta com o torque. Os dois modelos que demonstraram as correlações mais relevantes, com o maior coeficiente de determinação, foram a profundidade e a resistência lateral acumulada. Isto faz sentido na medida em que se acumulam e levam em conta as tensões geostáticas existentes.

Como os resultados não foram considerados satisfatórios passou-se à modelagem dos dados multivariados. O próximo item detalha o seguimento do trabalho e apenas os dados dos ensaios CPT foram utilizados nos modelos, visto que

apenas uma sondagem SPT foi realizada e não teria como validar, inclusive fica como sugestão de trabalho futuro.

### 5.3 INVESTIGAÇÃO DE MODELOS MULTIVARIADOS

Com o auxílio do software RStudio iniciou-se os testes dos modelos multivariados introduzindo o torque como uma das variáveis explicativas. Vale ressaltar que muitos modelos foram testados, porém aqui estarão expostos os mais relevantes.

O primeiro modelo de regressão linear (A) contou apenas com o torque como variável independente, para poder avaliar qual seria sua importância na determinação da resistência admissível. No segundo (B), a profundidade foi acrescentada, visto que nas análises univariadas se mostrou um parâmetro de destaque.

Na Tabela 7 é possível visualizar a equação dos modelos, a significância de cada coeficiente baseada no p-value do teste t e o coeficiente de determinação do modelo. Sempre que p-value for menor 0,05 neste teste, o coeficiente será representativo para um nível de confiança de 95% ou nível de significância de 5%.

Lembrando que no Script 6 não foi limitada a resistência de ponta ao valor do atrito lateral acumulado e no Script 7 houve esta limitação.

Tabela 8 – Resumo dos modelos A e B

| Modelo    | Equação                                     | P-value do teste t   | R <sup>2</sup> |
|-----------|---|--|----------------|
| <b>A6</b> | $R_{adm} = 123,316 + 0,076 * T$             | Intercepto = 0,478<br>Torque = $1,24 * e^{-16}$                      | 0,12           |
| <b>A7</b> | $R_{adm} = 21,389 + 0,073 * T$              | Intercepto = 0,883<br>Torque = $3,36 * e^{-8}$                       | 0,15           |
| <b>B6</b> | $R_{adm} = 102,39 + 0,013 * T + 72,552 * P$ | Intercepto = 0,458<br>Torque = 0,325<br>Profundidade = $2 * e^{-16}$ | 0,45           |
| <b>B7</b> | $R_{adm} = -1,074 + 0,006 * T + 77,882 * P$ | Intercepto = 0,991<br>Torque = 0,515<br>Profundidade = $2 * e^{-16}$ | 0,67           |

Fonte: Autora (2022).

Mais uma vez é confirmada a ideia de que a profundidade é um parâmetro muito significativo para determinação da resistência admissível, muito mais que o torque como se pode observar pelo coeficiente de determinação e pela significância

nos modelos descritos. No modelo A o torque obviamente é uma variável significativa, por ser a única explicativa, mas quando a profundidade é inserida ela assume um papel muito menos relevante.

Os modelos lineares parecem não ser os melhores para explicar e determinar a resistência admissível, visto os baixos valores de  $r^2$  obtidos. Como forma de buscar um melhor ajuste dos modelos, a transformação de Box-Cox, de potência, é aplicada a variável dependente, tornando-a não linear. Os valores de lambda determinados são da ordem de 0,33 quando não há limitação da ponta e igual a 0,57 quando há limitação. Depois de inserido na base de dados os modelos são gerados novamente, conforme a Tabela 8.

Tabela 9 – Resumo dos modelos D e E

| Modelo    | Equação  | P-value do teste t   | R <sup>2</sup> |
|-----------|--|--|----------------|
| <b>D6</b> | $\frac{Radm^{0,33} - 1}{0,33} = 1,544 * e^1 + 8,955 * e^{-4} * T$                          | Intercepto = $2 * e^{-16}$<br>Torque = $4,38 * e^{-9}$                       | 0,17           |
| <b>D7</b> | $\frac{Radm^{0,57} - 1}{0,57} = 1,954 * e^1 + 4,851 * e^{-3} * T$                          | Intercepto = 0,0176<br>Torque = $1,79 * e^{-10}$                             | 0,19           |
| <b>E6</b> | $\frac{Radm^{0,33} - 1}{0,33} = 1,522 * e^1 + 2,303 * e^{-4} * T$<br>$+ 7,63 * e^{-1} * P$ | Intercepto = $2 * e^{-16}$<br>Torque = 0,056<br>Profundidade = $2 * e^{-16}$ | 0,55           |
| <b>E7</b> | $\frac{Radm^{0,57} - 1}{0,57} = 1,825 * e^1 + 9,753 * e^{-4} * T$<br>$+ 4,445 * e^0 * P$   | Intercepto = 0,0003<br>Torque = 0,046<br>Profundidade = $2 * e^{-16}$        | 0,70           |

Fonte: Autora (2022).

Depois de realizada a transformação houve um aumento em todos os coeficientes de determinação, demonstrando que os modelos se adequam melhor aos dados desta forma potencial. A profundidade segue como variável mais significativa.

Em um contexto geral, o **Modelo E7** é o mais interessante dentre os obtidos neste trabalho. Este considera apenas o torque e a profundidade como variáveis explicativas e apresenta um valor de  $r^2$  interessante. Apesar de menor que o dos modelos adiante explicados, não apresenta as deficiências estatísticas dos modelos F e G, utiliza menor número de parâmetros e atende de forma mais adequada aos pressupostos adotados como indicadores da qualidade dos modelos.

Como os modelos não lineares demonstraram ser mais eficientes, os dois últimos construídos, F e G, também adotam a não linearidade. Ambos contam com a

inclusão da variável explicativa qc, porém em G o torque foi retirado a fim de avaliar sua contribuição.

Tabela 10 – Resumo dos modelos F e G

| Modelo    | Equação   | P-value do teste t  | R <sup>2</sup> |
|-----------|---|---|----------------|
| <b>F6</b> | $\frac{Radm^{0,33} - 1}{0,33} = 1,481 * e^1 + 7,14 * e^{-5} * T$<br>$+ 6,493 * e^{-1} * P + 3,834$<br>$* e^{-4} * qc$ | Intercepto = $2 * e^{-16}$<br>Torque = 0,336<br>Profundidade = $2 * e^{-16}$<br>qc = $2 * e^{-16}$      | 0,83           |
| <b>F7</b> | $\frac{Radm^{0,57} - 1}{0,57} = 1,713 * e^1 + 5,396 * e^{-4} * T$<br>$+ 4,133 * e^0 * P + 1,051 * e^{-3}$<br>$* qc$   | Intercepto = $6,73 * e^{-5}$<br>Torque = 0,195<br>Profundidade = $2 * e^{-16}$<br>qc = $1,64 * e^{-15}$ | 0,79           |
| <b>G6</b> | $\frac{Radm^{0,33} - 1}{0,33} = 1,542 * e^1 + 6,642 * e^{-1} * P$<br>$+ 3,859 * e^{-4} * qc$                          | Intercepto = $2 * e^{-16}$<br>Profundidade = $2 * e^{-16}$<br>qc = $2 * e^{-16}$                        | 0,82           |
| <b>G7</b> | $\frac{Radm^{0,57} - 1}{0,57} = 2,179 * e^1 + 4,246 * e^0 * P$<br>$+ 1,070 * e^{-3} * qc$                             | Intercepto = $2 * e^{-16}$<br>Profundidade = $2 * e^{-16}$<br>qc = $4,34 * e^{-16}$                     | 0,79           |

Fonte: Autora (2022).

Como já discutido, nestes modelos encontram-se os maiores coeficientes de determinação. Porém, visto que utilizam a variável qc como explicativa, se tornam menos interessantes pelo fato dessa variável ser utilizada para determinação da resistência admissível, trazendo aos modelos deficiência estatística que serão melhor explicadas e demonstradas no próximo tópico.

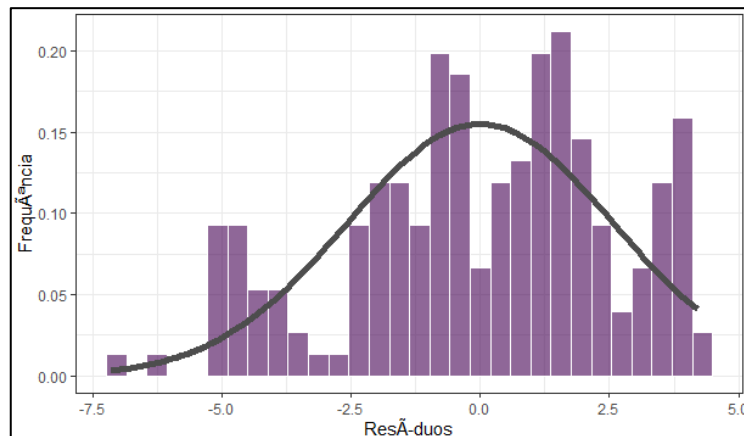
#### 5.4 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS

Comparando os modelos expostos nas Tabelas 7, 8 e 9 destaca-se os melhores, em função do r<sup>2</sup>, como sendo F e G. Estes resultados tem como problema o fato de qc, adotado como variável explicativa, ser também usado como variável para cálculo da resistência admissível. Por isso, trata-se de um modelo com r<sup>2</sup> elevado, mas com problemas do ponto de vista do rigor estatístico. Ainda assim, o modelo mostra a fraca relação do torque com a resistência admissível se qc for incluído como variável explicativa, já que qc é fortemente correlacional com a resistência admissível.

As análises dos pressupostos estatísticos serão detalhadas a fim de verificar a quantos ele atende, serão realizadas para os dois Scripts e não incluirão o modelo G, visto que o torque não é uma das variáveis explicativas.

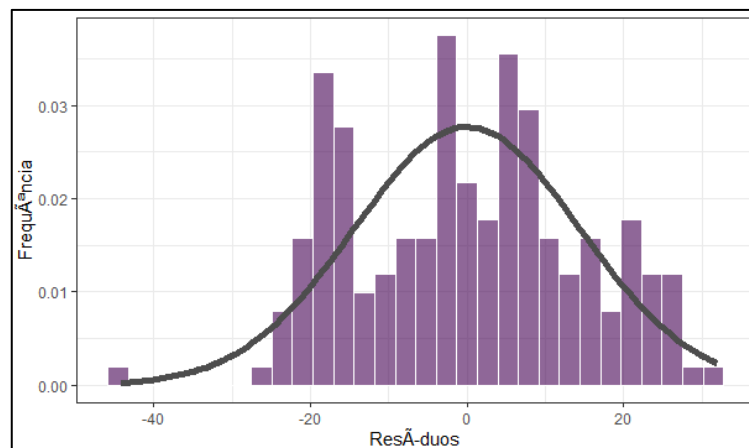
Considerando o modelo F, o primeiro pressuposto afirma que os resíduos devem seguir a distribuição normal, verificado pelo teste de Shapiro-Francia. No Script 6 tem-se  $p\text{-value} = 0,00058$  e no Script 7  $p\text{-value} = 0,0071$ , ambos descartam a hipótese nula, dos dados seguirem a distribuição normal, porém onde há limitação da ponta os resíduos ficam mais próximos da normalidade. As Figuras 35 e 36 mostram a diferença. O resultado deste teste demonstra que alguma variável explicativa importante está omitida do modelo ou que o modelo deveria seguir um outro formato, sendo um ponto de alerta para pesquisas futuras.

Figura 38 – Resíduos do modelo F6 comparados a normal



Fonte: Autora (2022).

Figura 39 – Resíduos do modelo F7 comparados a normal



Fonte: Autora (2022).



O segundo pressuposto relata que não deve haver presença de multicolinearidade acentuada, ou seja, não devem existir correlações elevadas entre as variáveis explicativas. Tal critério é avaliado pelo fator de inflação da variância (VIF), em ambos os códigos o resultado é o mesmo, há presença de uma leve multicolinearidade, porém que não afeta os coeficientes de regressão, visto que estão bem longe do fator 10, considerado grave.

Tabela 11 – VIF dos modelos F6 e F7

| <b>Modelo</b> | <b>VIF Profundidade</b> | <b>VIF Torque</b> | <b>VIF qc</b> |
|---------------|-------------------------|-------------------|---------------|
| <b>F6</b>     | 1,28                    | 1,26              | 1,08          |
| <b>F7</b>     | 1,28                    | 1,26              | 1,08          |

Fonte: Autora (2022).

A terceira teoria diz respeito ao conceito de homocedasticidade, onde os resíduos não devem apresentar correlação com qualquer variável X. É avaliado através do teste de Breusch-Pagan e caso P-value seja menor que 0,05 é um indício de que há heterocedasticidade no sistema, e alguma variável importante esteja sendo omitida. Os dados obtidos indicam a ocorrência de heterocedasticidade, apesar de relativamente leve. Trata-se de um ponto de atenção.

Tabela 12 – Resumo do teste de homocedasticidade

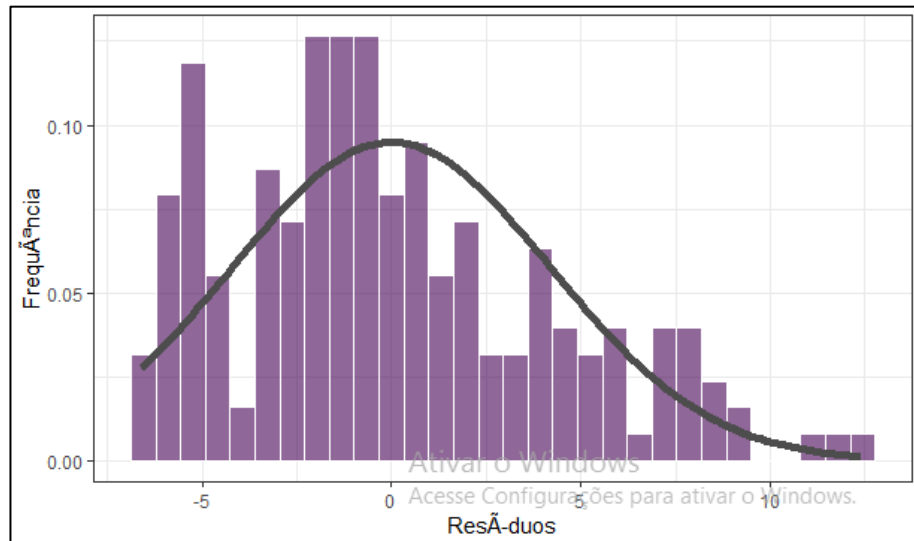
| <b>Modelo</b> | <b>P-value</b> |
|---------------|----------------|
| <b>F6</b>     | 0,02           |
| <b>F7</b>     | 0,04           |

Fonte: Autora (2022).

Por mais que o coeficiente de determinação do modelo F6 seja maior, o que melhor atende e se adequa aos pressupostos estatísticos é o **modelo F7**, devido ao menor diagnóstico de heterocedasticidade, portanto ele é o escolhido para ser validado através dos dados de teste e seus resultados estão presentes no próximo item.

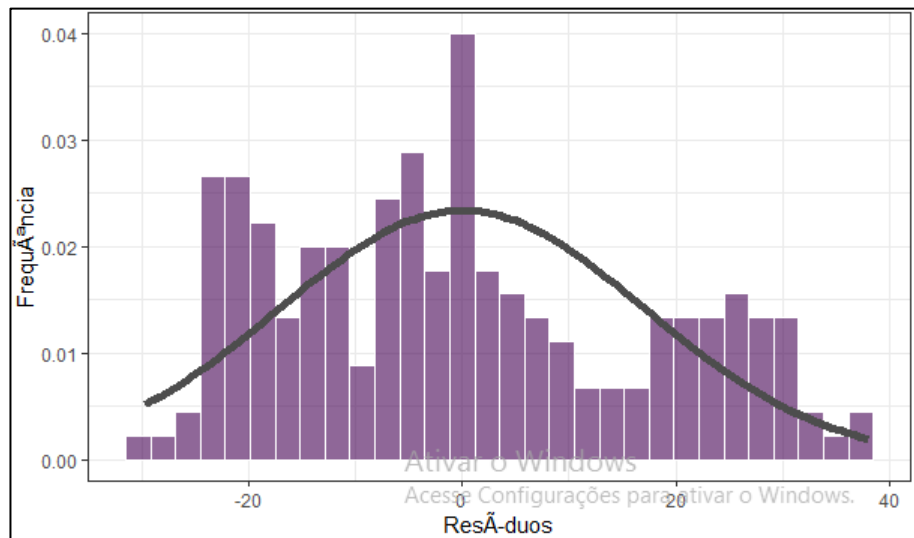
Realizando as mesmas análises para os modelos E6 e E7, a fim de validar que atendem melhor aos pressupostos por não incluírem a variável qc, inicia-se com o teste de Shapiro-Francia. Os p-value determinados são 0,0000558 e 0,00004068, respectivamente. Bem baixos, demonstrando que os resíduos também não se adequam a normal.

Figura 40 - Resíduos do modelo E6 comparados a normal



Fonte: Autora (2022).

Figura 41 - Resíduos do modelo E7 comparados a normal



Fonte: Autora (2022).

O teste de multicolinearidade verificado pelo VIF demonstra uma pequena melhora, as variáveis explicativas têm ainda menos correlação. Pelos baixos valores apresentados na Tabela 12, a mínima presença de multicolinearidade não afeta os coeficientes de regressão.

Tabela 13 – VIF dos modelos E6 e E7

| <b>Modelo</b> | <b>VIF Profundidade</b> | <b>VIF Torque</b> |
|---------------|-------------------------|-------------------|
| <b>E6</b>     | 1,24                    | 1,24              |
| <b>E7</b>     | 1,24                    | 1,24              |

Fonte: Autora (2022).

No último teste uma grande melhora é observada. Pode-se dizer que os resíduos destes modelos não apresentam heterocedasticidade, ou seja, não apresentam correlação com qualquer variável X.

Tabela 14 – Resumo do teste de homocedasticidade

| <b>Modelo</b> | <b>P-value</b> |
|---------------|----------------|
| <b>E6</b>     | 0,09           |
| <b>E7</b>     | 0,048          |

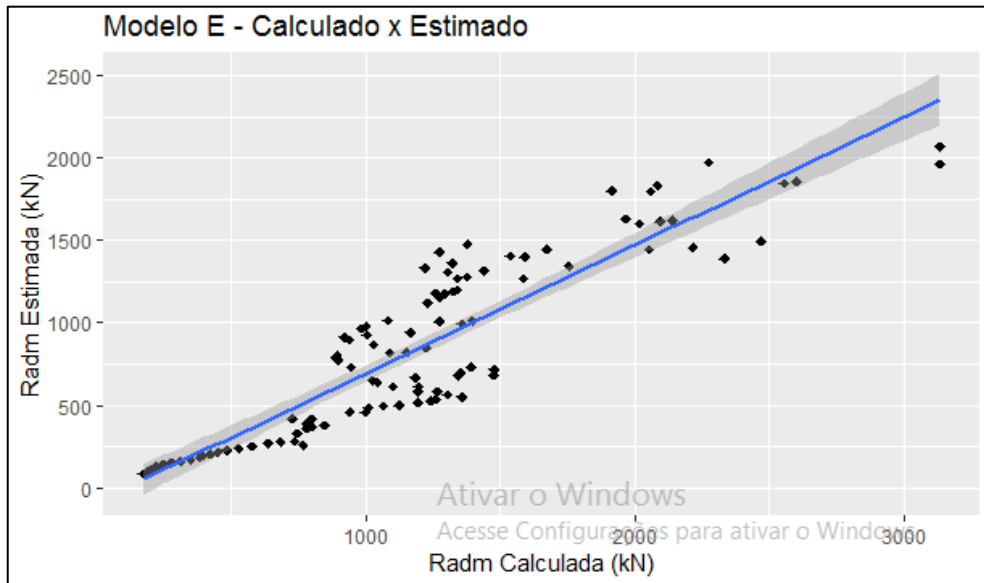
Fonte: Autora (2022).

Como os modelos E6 e E7 demonstraram um comportamento bem parecido diante das análises dos pressupostos, o escolhido para validação é o **modelo E7**, que possui um coeficiente de determinação mais elevado, se adequando melhor aos dados.

## 5.5 VALIDAÇÃO DO MODELO ESCOLHIDO

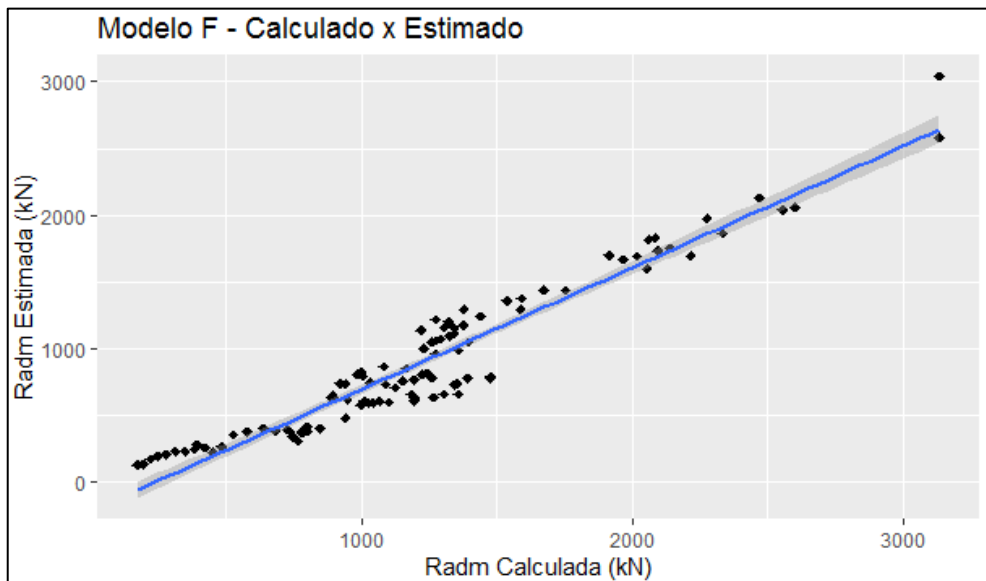
A validação foi realizada comparando os resultados obtidos pelo método de Aoki e Velloso com os estimados através do modelo escolhido. Nas Figuras 39 e 40 é possível observar o gráfico gerado com as resistências admissíveis estimadas (pelos modelos E7 e F7) e as calculadas (pelo método de Aoki e Velloso).

Figura 42 – Previsão do modelo E7, calculado x estimado



Fonte: Autora (2022).

Figura 43 – Previsão do modelo F7, calculado x estimado



Fonte: Autora (2022).

É possível analisar que os modelos de regressão explicam boa parte da variância, já que os dados estão próximos da linha ajustada. A zona de maior divergência se encontra entre 1000 e 1500 kN, onde os dados estão mais distantes da reta. Para avaliar melhor a precisão dos modelos o método do erro médio quadrático é aplicado, a soma do MSE é igual a 200.352,2 e 132.4451,6,

respectivamente. O menor somatório é do modelo F7, tendo a melhor precisão perante ao E7, como já esperado pelo alto coeficiente de determinação.

## 6. CONCLUSÃO

Baseado nos boletins de sondagem CPT e SPT fornecidos pela empresa responsável por realizar a investigação geotécnica do terreno onde um prédio residencial seria construído, na cidade de Balneário Piçarras (SC), as previsões de capacidade de carga foram geradas pelo método estático e semiempírico de Aoki e Velloso, devido sua metodologia compreender os dois ensaios de campo disponibilizados.

A partir dos resultados e conseqüentemente dos parâmetros contidos, uma análise das possíveis correlações univariadas envolvendo o torque, pressão na bomba de óleo, foram investigadas por meio de gráficos de dispersão. Neles foram inseridos a linha de tendência e o coeficiente de determinação, responsável por avaliar o sucesso ou insucesso das relações.

Em relação aos ensaios, o SPT foi o que apresentou os maiores coeficientes, porém não pôde ser utilizado nas investigações multivariadas por ter apenas um ensaio e desta forma não seria possível validar os modelos posteriormente. Fica de sugestão para pesquisas futuras averiguar modelos multivariados que utilizem como dados de entrada os parâmetros da capacidade de carga de um ensaio do tipo SPT.

Os coeficientes de determinação relacionados com os ensaios CPT foram bem baixos, mas também forneceram um norte para os próximos passos, os mais altos estavam atrelados a profundidade (0,56) e ao atrito lateral acumulado (0,58), o que confirma o resultado exposto em algumas pesquisas já realizadas. Uma vez que os índices não foram satisfatórios iniciou-se a investigação dos modelos com múltiplas variáveis explicativas.

Dois códigos foram gerados, um foi alimentado com dados que não continham limitação da resistência de ponta (Script 6) e o outro que limitava a ponta ao atrito lateral acumulado (Script 7). Vários modelos foram testados e avaliados, mas apenas os seis mais relevantes foram evidenciados na pesquisa. Os modelos lineares não se adequaram, foi necessário realizar a transformação de Box-Cox tornando a variável dependente, tensão admissível, não linear.

O modelo selecionado como melhor, continha como variáveis explicativas o torque e a profundidade, que se mostrou muito significativa nas análises, onde os

dados de alimentação contavam com a limitação da resistência de ponta. Seu coeficiente de determinação é de 0,70 e atendeu a dois dos três pressupostos estatísticos, não passando apenas pelo primeiro, teste de Shapiro-Francia, afirmando que os resíduos não possuem uma distribuição normal.

A validação ocorreu através do comparativo entre as resistências admissíveis calculadas pelo método de Aoki e Velloso e as estimadas pelo modelo de regressão. O método do erro médio quadrático foi aplicado e a soma resultou em 200.352,2.

É pertinente destacar que o modelo proposto traz resultados interessantes, reforçando que o torque e a profundidade têm forte relação, que a profundidade é muito significativa na hora de determinar a resistência admissível e que o torque perante a profundidade se torna praticamente irrelevante. É um bom início para despertar o interesse em pesquisas relacionadas ao tema, além de introduzir o ensaio SPT aos dados de entrada, tentar buscar a variável que provavelmente está omitida no presente modelo de regressão e testar outros modelos onde os resíduos sigam a distribuição normal.

## REFERÊNCIAS

- ALLEDI, C. T. D. B. Load Transfer of Continuous Flight Auger Piles Instrumented in Depth. 2013. 294 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- ALMEIDA NETO, J.A.N. **Análise do desempenho de estacas hélice contínua e ômega: Aspectos executivos.** São Paulo. 2002. Dissertação para mestrado (Curso de engenharia de solos) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.
- AMANN, K. A. P. **Avaliação crítica dos métodos semi-empíricos de estimativa da carga de ruptura, aplicados à estaca raiz.** 2000. 230 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- ANTUNES, W.R.; TAROZZO, H. **Fundações: teoria e prática.** 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.
- ARAÚJO, G. S.; SILVA, C. M.; CAMAPUM de Carvalho, J.; PAOLUCCI, H. V. N. (2009). **Capacidade de Carga em Estaca Hélice Contínua em Função do Torque Obtido Durante a Execução.** I Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região do Centro-Oeste, I Geocentro, Goiânia-GO, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122.** Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484.** Sondagens de simples reconhecimento com SPT. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- BEGEMANN, H. K. S. P. **Improved method of determining resistance to adhesion by sounding through a loose sleeve placed behind the cone.** In: International conference on soil mechanics and foundation engineering, 3. Zurich. 1953.
- BUSTAMANTE, M. Auger and bored pile construction monitoring and testing. In: International geotechnical seminar on deep foundations on bored and auger piles, 4., 2003, Ghent-Belgium. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema, p. 27-41. 2003.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: volume 1 fundamentos.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.
- CAPUTO, A.N.; MANRUBIA, H.A. A estaca hélice contínua com monitoração eletrônica. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA – SEFE III, 3º, 1996, **Anais...** São Paulo: ABMS, 1996, v.2, p.133-140.
- CAVALCANTE, M. Z. **Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança.** 2020. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) - Campus de Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.



CERQUEIRA DA SILVA, R. R. Previsão da capacidade de carga em estacas raiz através de métodos semi-empíricos associados a análises estatísticas. 2018. **Revista CIATEC**, São Paulo, v. 10, p. 102-114, 2018.

CPRM. **Serviço Geológico do Brasil**. 2014. Disponível em <<http://www.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 2022.

CRISTOFERI, R.A.; BERGMANN, A.C.; LORENZI, V. **Comparativo entre ensaio de sondagem à percussão manual e mecânica**: um estudo de caso na região oeste do Paraná. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Campus de Toledo, Universidade Paranaense, Toledo, 2018, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS, 2008, v.1, p. 297-311.

COSTA, C.M.C. et al. **Análise comparativa entre o Nspt e o torque obtido no monitoramento de estacas hélice contínua**. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA (SEFE). 6., 2018

DAVIES, M.P.; CAMPANELLA, R.G. Piezocone technology: downhole geophysics for the geoenvironmental characterization of soil. **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems**, Florida, USA, v. 1, p. 171-180. 1995.

DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. **Anais**. Rio de Janeiro, 1978.

DÉCOURT, L.; BELINCANTA, A.; QUARESMA FILHO, A.R. **Brazilian experience on SPT**. XII International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Supplement, Contributions by the Brazilian Society for Soil Mechanics. Rio de Janeiro: ABMS/ISSMGE, p. 49-54. 1989.

DECÓURT, L. **Fundações teoria e prática**. São Paulo: Pini, 1998. Cap 8. 2ed. International Edition, 1996.

FÁVERO, L.P.; BELFIORE, P. **Análise de dados**: estatística e modelagem multivariada com Excel, SPSS e STATA. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 1ed. 2017.

FERRARI DE CAMPOS, D. J. (2018). **Energia de execução de estacas hélice contínua como ferramenta de avaliação da competência do terreno**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 307/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 126p.

FLETCHER, G.F.A. Standard Penetration Test: its uses and abuses. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, v. 91, n. SM4, p. 67-77, julho.1965.

GEODIGITUS. **SACI3**. 2022. Disponível em: < <https://geodigitus.com/produto/saci/> >. Acesso em: 07 mar. 2022.

GEOFIX. Catálogo: **Serviços especiais de fundações**. 2015. Disponível em: <[http://www.geofix.com.br/biblioteca/catalogo\\_geofix.pdf](http://www.geofix.com.br/biblioteca/catalogo_geofix.pdf)>. Acesso em: 07 mar. 2022.

GONZALES, F. **Os principais problemas na execução de fundações em estacas hélice contínua**. São Paulo: Solidifica engenharia geotécnica, 2018.

HACHICH, W. (ed.) et al. **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

JOPPERT JÚNIOR, Ivan de Oliveira. **Fundações e contenções de edifícios**. Pini, São Paulo, 2007.

LOBO, B. O. **Método de previsão de capacidade de carga de estacas: aplicação dos conceitos de energia do ensaio SPT**. 2005. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Campus Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K. & POWELL, J.J.M. **Cone Penetration Testing**. Londres: Blackie Academic & Professional. 1997.

MAGALHÃES, P. H. **Avaliação dos métodos de capacidade de carga e recalque de estacas hélice contínua via provas de carga**. 2005. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

MAIA, C.M.M. et al. **Fundações: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de textos, 2019. Cap 9. 3ed. 2019.

MAYNE, P.W. **Enhanced geotechnical site characterization by seismic piezocone penetration tests**. In: International geotechnical conference, 4. Cairo. 2000. Cairo University, p. 95-120. 2000.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N.; SCHNAID, F. **Patologia das Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

MINITAB. **Lidando com a multicolinearidade na análise de regressão**. 2019. Disponível em: < <https://blog.minitab.com/pt/basta-lidando-com-a-multicolinearidade-na-analise-de-regressao>> Acesso em: 28 jun. 2022.

MOHR, H.A. Discussion of "Standard penetration tests: its uses and abuses". **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, v. 92, n. SM1, p. 196-199, jan. 1966.

OLIVEIRA, P. E. S. (2013). **Análise de provas de carga e confiabilidade para edifício comercial na região metropolitana do Recife**. Dissertação de Pós-Graduação, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, PE.

QUARESMA, A.R.; DÉCOURT, L.; QUARESMA Filho, A.R.; AIMEIDA, M.S.S. & Danziger, F. **Investigações Geotécnicas**. Fundações - Teoria e Prática, 3. ed., cap. 3, p. 134-150. São Paulo: Editora Pini, 2019.

QUARESMA, A.R.; DÉCOURT, L.; QUARESMA Filho, A.R.; ALMEIDA, M.S.S. & Danziger, F. **Investigações Geotécnicas**. Fundações - Teoria e Prática, 2a. ed. Editora Pini, São Paulo, 1996, cap. 2, p. 119-162.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G. **Interpretation of cone penetration tests.** Canadian Geotechnical Journal, v.20, n.4, 1983.

SCHNAID F.; ODEBRECHT E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012, p 41. Cap 2; Cap 3. 2. ed.

SILVA, C.M.; CARVALHO, J.C. **Metodologia para o controle de qualidade dos estaqueamentos tipo hélice contínua – A rotina SCCAP.** 2018. Brasília, 2018.

SKEMPTON, A. W. Standard penetration test procedures and effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and over consolidation. **Geotechnique**, v. 36, n. 3, p. 425-447. 1986.

SOARES, T.C. **O que é heterocedasticidade.** 2021. Disponível em: < [https://youtu.be/i-fLov\\_lm0Y](https://youtu.be/i-fLov_lm0Y) >. Acesso em: 29 jun. 2022.

STRACKE, F. **Estacas hélice contínua: monitoramento em obra.** 2009. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

TAVARES, C. A. A. **Elaboração e aplicação de uma metodologia de controle de qualidade para o processo executivo de estacas hélice contínua monitoradas.** 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

TEIXEIRA, A.H. Sondagens. Prospecção do Subsolo, Recife. Anais, ABMS-NE, v. único, p. 39-61. 1977.

Teixeira, L. P.; Carvalho, F.M.A. **A construção civil como instrumento do desenvolvimento da economia brasileira.** 2005. Revista Paranaense de Desenvolvimento, No. 109, pp. 9-26.

VELLOSO, D.A.; ALONSO, U.R. **Previsão, controle e desempenho de fundações.** In: NEGRO JÚNIOR et al. Previsão de desempenho x comportamento real. São Paulo: ABMS/NRSP, 2000. p. 95-139.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações:** volume completo. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

WINTER, D. **Dispersão da capacidade de carga calculada:** avaliação em função da heterogeneidade do solo. 2011. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.



## Monitoramento das estacas

| CPT 1     |         |                   | CPT 2     |         |                   | CPT 3 e SPT |         |                   |
|-----------|---------|-------------------|-----------|---------|-------------------|-------------|---------|-------------------|
| estNumero | medProf | medTorqueConcreto | estNumero | medProf | medTorqueConcreto | estNumero   | medProf | medTorqueConcreto |
| P9 3      | 0,08    | 1,76              | P19 1     | 0,08    | 1,76              | P36 1       | 0,08    | 1,76              |
| P9 3      | 0,16    | 5,3               | P19 1     | 0,16    | 5,3               | P36 1       | 0,16    | 3,53              |
| P9 3      | 0,24    | 5,3               | P19 1     | 0,24    | 5,3               | P36 1       | 0,24    | 28,31             |
| P9 3      | 0,32    | 15,92             | P19 1     | 0,32    | 5,3               | P36 1       | 0,32    | 38,93             |
| P9 3      | 0,40    | 23                | P19 1     | 0,40    | 28,31             | P36 1       | 0,40    | 42,47             |
| P9 3      | 0,48    | 51,32             | P19 1     | 0,48    | 46,01             | P36 1       | 0,48    | 44,24             |
| P9 3      | 0,56    | 51,32             | P19 1     | 0,56    | 53,09             | P36 1       | 0,56    | 47,78             |
| P9 3      | 0,64    | 54,86             | P19 1     | 0,64    | 49,55             | P36 1       | 0,64    | 49,55             |
| P9 3      | 0,72    | 58,4              | P19 1     | 0,72    | 53,09             | P36 1       | 0,72    | 54,86             |
| P9 3      | 0,80    | 56,63             | P19 1     | 0,80    | 56,63             | P36 1       | 0,80    | 53,09             |
| P9 3      | 0,88    | 58,4              | P19 1     | 0,88    | 56,63             | P36 1       | 0,88    | 56,63             |
| P9 3      | 0,96    | 58,4              | P19 1     | 0,96    | 54,86             | P36 1       | 0,96    | 56,63             |
| P9 3      | 1,04    | 58,4              | P19 1     | 1,04    | 58,4              | P36 1       | 1,04    | 60,17             |
| P9 3      | 1,12    | 60,17             | P19 1     | 1,12    | 54,86             | P36 1       | 1,12    | 61,94             |
| P9 3      | 1,20    | 58,4              | P19 1     | 1,20    | 58,4              | P36 1       | 1,20    | 63,71             |
| P9 3      | 1,28    | 60,17             | P19 1     | 1,28    | 61,94             | P36 1       | 1,28    | 60,17             |
| P9 3      | 1,36    | 60,17             | P19 1     | 1,36    | 61,94             | P36 1       | 1,36    | 56,63             |
| P9 3      | 1,44    | 58,4              | P19 1     | 1,44    | 61,94             | P36 1       | 1,44    | 63,71             |
| P9 3      | 1,52    | 65,48             | P19 1     | 1,52    | 61,94             | P36 1       | 1,52    | 65,48             |
| P9 3      | 1,60    | 61,94             | P19 1     | 1,60    | 63,71             | P36 1       | 1,60    | 65,48             |
| P9 3      | 1,68    | 65,48             | P19 1     | 1,68    | 61,94             | P36 1       | 1,68    | 67,25             |
| P9 3      | 1,76    | 67,25             | P19 1     | 1,76    | 21,23             | P36 1       | 1,76    | 67,25             |
| P9 3      | 1,84    | 67,25             | P19 1     | 1,84    | 70,79             | P36 1       | 1,84    | 69,02             |
| P9 3      | 1,92    | 72,56             | P19 1     | 1,92    | 67,25             | P36 1       | 1,92    | 61,94             |
| P9 3      | 2,00    | 72,56             | P19 1     | 2,00    | 76,1              | P36 1       | 2,00    | 67,25             |
| P9 3      | 2,08    | 74,33             | P19 1     | 2,08    | 76,1              | P36 1       | 2,08    | 67,25             |
| P9 3      | 2,16    | 74,33             | P19 1     | 2,16    | 76,1              | P36 1       | 2,16    | 69,02             |
| P9 3      | 2,24    | 76,1              | P19 1     | 2,24    | 77,87             | P36 1       | 2,24    | 69,02             |
| P9 3      | 2,32    | 81,41             | P19 1     | 2,32    | 77,87             | P36 1       | 2,32    | 70,79             |
| P9 3      | 2,40    | 77,87             | P19 1     | 2,40    | 79,64             | P36 1       | 2,40    | 70,79             |
| P9 3      | 2,48    | 77,87             | P19 1     | 2,48    | 77,87             | P36 1       | 2,48    | 76,1              |
| P9 3      | 2,56    | 77,87             | P19 1     | 2,56    | 81,41             | P36 1       | 2,56    | 93,8              |
| P9 3      | 2,64    | 79,64             | P19 1     | 2,64    | 79,64             | P36 1       | 2,64    | 107,96            |
| P9 3      | 2,72    | 81,41             | P19 1     | 2,72    | 83,18             | P36 1       | 2,72    | 106,19            |
| P9 3      | 2,80    | 81,41             | P19 1     | 2,80    | 102,65            | P36 1       | 2,80    | 104,42            |
| P9 3      | 2,88    | 88,49             | P19 1     | 2,88    | 130,96            | P36 1       | 2,88    | 104,42            |
| P9 3      | 2,96    | 84,95             | P19 1     | 2,96    | 130,96            | P36 1       | 2,96    | 99,11             |
| P9 3      | 3,04    | 86,72             | P19 1     | 3,04    | 129,19            | P36 1       | 3,04    | 100,88            |
| P9 3      | 3,12    | 88,49             | P19 1     | 3,12    | 130,96            | P36 1       | 3,12    | 102,65            |
| P9 3      | 3,20    | 86,72             | P19 1     | 3,20    | 127,42            | P36 1       | 3,20    | 99,11             |
| P9 3      | 3,28    | 88,49             | P19 1     | 3,28    | 107,96            | P36 1       | 3,28    | 100,88            |
| P9 3      | 3,36    | 81,41             | P19 1     | 3,36    | 113,27            | P36 1       | 3,36    | 93,8              |
| P9 3      | 3,44    | 83,18             | P19 1     | 3,44    | 113,27            | P36 1       | 3,44    | 102,65            |
| P9 3      | 3,52    | 83,18             | P19 1     | 3,52    | 115,04            | P36 1       | 3,52    | 100,88            |
| P9 3      | 3,60    | 49,55             | P19 1     | 3,60    | 109,73            | P36 1       | 3,60    | 99,11             |
| P9 3      | 3,68    | 84,95             | P19 1     | 3,68    | 106,19            | P36 1       | 3,68    | 99,11             |
| P9 3      | 3,76    | 102,65            | P19 1     | 3,76    | 109,73            | P36 1       | 3,76    | 100,88            |
| P9 3      | 3,84    | 120,35            | P19 1     | 3,84    | 109,73            | P36 1       | 3,84    | 102,65            |
| P9 3      | 3,92    | 116,81            | P19 1     | 3,92    | 109,73            | P36 1       | 3,92    | 102,65            |
| P9 3      | 4,00    | 118,58            | P19 1     | 4,00    | 107,96            | P36 1       | 4,00    | 102,65            |
| P9 3      | 4,08    | 118,58            | P19 1     | 4,08    | 107,96            | P36 1       | 4,08    | 102,65            |
| P9 3      | 4,16    | 113,27            | P19 1     | 4,16    | 107,96            | P36 1       | 4,16    | 104,42            |
| P9 3      | 4,24    | 99,11             | P19 1     | 4,24    | 107,96            | P36 1       | 4,24    | 104,42            |
| P9 3      | 4,32    | 100,88            | P19 1     | 4,32    | 100,88            | P36 1       | 4,32    | 106,19            |
| P9 3      | 4,40    | 115,04            | P19 1     | 4,40    | 109,73            | P36 1       | 4,40    | 106,19            |

|      |      |        |       |      |        |       |      |        |
|------|------|--------|-------|------|--------|-------|------|--------|
| P9 3 | 4,48 | 113,27 | P19 1 | 4,48 | 111,5  | P36 1 | 4,48 | 107,96 |
| P9 3 | 4,56 | 115,04 | P19 1 | 4,56 | 107,96 | P36 1 | 4,56 | 107,96 |
| P9 3 | 4,64 | 113,27 | P19 1 | 4,64 | 123,89 | P36 1 | 4,64 | 107,96 |
| P9 3 | 4,72 | 102,65 | P19 1 | 4,72 | 127,42 | P36 1 | 4,72 | 109,73 |
| P9 3 | 4,80 | 90,26  | P19 1 | 4,80 | 123,89 | P36 1 | 4,80 | 111,5  |
| P9 3 | 4,88 | 116,81 | P19 1 | 4,88 | 125,65 | P36 1 | 4,88 | 115,04 |
| P9 3 | 4,96 | 116,81 | P19 1 | 4,96 | 123,89 | P36 1 | 4,96 | 115,04 |
| P9 3 | 5,04 | 122,12 | P19 1 | 5,04 | 111,5  | P36 1 | 5,04 | 115,04 |
| P9 3 | 5,12 | 125,65 | P19 1 | 5,12 | 122,12 | P36 1 | 5,12 | 120,35 |
| P9 3 | 5,20 | 113,27 | P19 1 | 5,20 | 120,35 | P36 1 | 5,20 | 118,58 |
| P9 3 | 5,28 | 123,89 | P19 1 | 5,28 | 118,58 | P36 1 | 5,28 | 118,58 |
| P9 3 | 5,36 | 130,96 | P19 1 | 5,36 | 118,58 | P36 1 | 5,36 | 118,58 |
| P9 3 | 5,44 | 125,65 | P19 1 | 5,44 | 116,81 | P36 1 | 5,44 | 118,58 |
| P9 3 | 5,52 | 125,65 | P19 1 | 5,52 | 111,5  | P36 1 | 5,52 | 122,12 |
| P9 3 | 5,60 | 120,35 | P19 1 | 5,60 | 99,11  | P36 1 | 5,60 | 123,89 |
| P9 3 | 5,68 | 106,19 | P19 1 | 5,68 | 104,42 | P36 1 | 5,68 | 127,42 |
| P9 3 | 5,76 | 132,73 | P19 1 | 5,76 | 115,04 | P36 1 | 5,76 | 125,65 |
| P9 3 | 5,84 | 129,19 | P19 1 | 5,84 | 116,81 | P36 1 | 5,84 | 127,42 |
| P9 3 | 5,92 | 132,73 | P19 1 | 5,92 | 120,35 | P36 1 | 5,92 | 127,42 |
| P9 3 | 6,00 | 130,96 | P19 1 | 6,00 | 129,19 | P36 1 | 6,00 | 129,19 |
| P9 3 | 6,08 | 109,73 | P19 1 | 6,08 | 127,42 | P36 1 | 6,08 | 130,96 |
| P9 3 | 6,16 | 123,89 | P19 1 | 6,16 | 129,19 | P36 1 | 6,16 | 129,19 |
| P9 3 | 6,24 | 127,42 | P19 1 | 6,24 | 100,88 | P36 1 | 6,24 | 129,19 |
| P9 3 | 6,32 | 127,42 | P19 1 | 6,32 | 109,73 | P36 1 | 6,32 | 127,42 |
| P9 3 | 6,40 | 127,42 | P19 1 | 6,40 | 138,04 | P36 1 | 6,40 | 127,42 |
| P9 3 | 6,48 | 111,5  | P19 1 | 6,48 | 139,81 | P36 1 | 6,48 | 129,19 |
| P9 3 | 6,56 | 125,65 | P19 1 | 6,56 | 139,81 | P36 1 | 6,56 | 136,27 |
| P9 3 | 6,64 | 125,65 | P19 1 | 6,64 | 127,42 | P36 1 | 6,64 | 134,5  |
| P9 3 | 6,72 | 123,89 | P19 1 | 6,72 | 130,96 | P36 1 | 6,72 | 136,27 |
| P9 3 | 6,80 | 120,35 | P19 1 | 6,80 | 134,5  | P36 1 | 6,80 | 120,35 |
| P9 3 | 6,88 | 130,96 | P19 1 | 6,88 | 130,96 | P36 1 | 6,88 | 127,42 |
| P9 3 | 6,96 | 130,96 | P19 1 | 6,96 | 130,96 | P36 1 | 6,96 | 122,12 |
| P9 3 | 7,04 | 130,96 | P19 1 | 7,04 | 125,65 | P36 1 | 7,04 | 125,65 |
| P9 3 | 7,12 | 130,96 | P19 1 | 7,12 | 102,65 | P36 1 | 7,12 | 120,35 |
| P9 3 | 7,20 | 113,27 | P19 1 | 7,20 | 109,73 | P36 1 | 7,20 | 118,58 |
| P9 3 | 7,28 | 120,35 | P19 1 | 7,28 | 102,65 | P36 1 | 7,28 | 118,58 |
| P9 3 | 7,36 | 125,65 | P19 1 | 7,36 | 118,58 | P36 1 | 7,36 | 116,81 |
| P9 3 | 7,44 | 125,65 | P19 1 | 7,44 | 113,27 | P36 1 | 7,44 | 116,81 |
| P9 3 | 7,52 | 122,12 | P19 1 | 7,52 | 115,04 | P36 1 | 7,52 | 122,12 |
| P9 3 | 7,60 | 113,27 | P19 1 | 7,60 | 115,04 | P36 1 | 7,60 | 125,65 |
| P9 3 | 7,68 | 113,27 | P19 1 | 7,68 | 115,04 | P36 1 | 7,68 | 125,65 |
| P9 3 | 7,76 | 125,65 | P19 1 | 7,76 | 109,73 | P36 1 | 7,76 | 134,5  |
| P9 3 | 7,84 | 123,89 | P19 1 | 7,84 | 127,42 | P36 1 | 7,84 | 109,73 |
| P9 3 | 7,92 | 129,19 | P19 1 | 7,92 | 125,65 | P36 1 | 7,92 | 81,41  |
| P9 3 | 8,00 | 116,81 | P19 1 | 8,00 | 102,65 | P36 1 | 8,00 | 120,35 |
| P9 3 | 8,08 | 109,73 | P19 1 | 8,08 | 111,5  | P36 1 | 8,08 | 127,42 |
| P9 3 | 8,16 | 123,89 | P19 1 | 8,16 | 115,04 | P36 1 | 8,16 | 129,19 |
| P9 3 | 8,24 | 129,19 | P19 1 | 8,24 | 99,11  | P36 1 | 8,24 | 130,96 |
| P9 3 | 8,32 | 130,96 | P19 1 | 8,32 | 115,04 | P36 1 | 8,32 | 132,73 |
| P9 3 | 8,40 | 120,35 | P19 1 | 8,40 | 116,81 | P36 1 | 8,40 | 123,89 |
| P9 3 | 8,48 | 97,34  | P19 1 | 8,48 | 116,81 | P36 1 | 8,48 | 134,5  |
| P9 3 | 8,56 | 123,89 | P19 1 | 8,56 | 116,81 | P36 1 | 8,56 | 141,58 |
| P9 3 | 8,64 | 127,42 | P19 1 | 8,64 | 106,19 | P36 1 | 8,64 | 146,89 |
| P9 3 | 8,72 | 127,42 | P19 1 | 8,72 | 107,96 | P36 1 | 8,72 | 152,2  |
| P9 3 | 8,80 | 120,35 | P19 1 | 8,80 | 115,04 | P36 1 | 8,80 | 129,19 |
| P9 3 | 8,88 | 115,04 | P19 1 | 8,88 | 116,81 | P36 1 | 8,88 | 99,11  |
| P9 3 | 8,96 | 113,27 | P19 1 | 8,96 | 120,35 | P36 1 | 8,96 | 120,35 |
| P9 3 | 9,04 | 123,89 | P19 1 | 9,04 | 120,35 | P36 1 | 9,04 | 115,04 |

|      |       |        |       |       |        |       |       |        |
|------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| P9 3 | 9,12  | 123,89 | P19 1 | 9,12  | 120,35 | P36 1 | 9,12  | 127,42 |
| P9 3 | 9,20  | 125,65 | P19 1 | 9,20  | 120,35 | P36 1 | 9,20  | 123,89 |
| P9 3 | 9,28  | 120,35 | P19 1 | 9,28  | 118,58 | P36 1 | 9,28  | 122,12 |
| P9 3 | 9,36  | 104,42 | P19 1 | 9,36  | 118,58 | P36 1 | 9,36  | 115,04 |
| P9 3 | 9,44  | 118,58 | P19 1 | 9,44  | 118,58 | P36 1 | 9,44  | 130,96 |
| P9 3 | 9,52  | 116,81 | P19 1 | 9,52  | 107,96 | P36 1 | 9,52  | 129,19 |
| P9 3 | 9,60  | 116,81 | P19 1 | 9,60  | 127,42 | P36 1 | 9,60  | 130,96 |
| P9 3 | 9,68  | 115,04 | P19 1 | 9,68  | 120,35 | P36 1 | 9,68  | 130,96 |
| P9 3 | 9,76  | 106,19 | P19 1 | 9,76  | 118,58 | P36 1 | 9,76  | 127,42 |
| P9 3 | 9,84  | 115,04 | P19 1 | 9,84  | 129,19 | P36 1 | 9,84  | 129,19 |
| P9 3 | 9,92  | 122,12 | P19 1 | 9,92  | 125,65 | P36 1 | 9,92  | 134,5  |
| P9 3 | 10,00 | 122,12 | P19 1 | 10,00 | 123,89 | P36 1 | 10,00 | 130,96 |
| P9 3 | 10,08 | 120,35 | P19 1 | 10,08 | 120,35 | P36 1 | 10,08 | 129,19 |
| P9 3 | 10,16 | 120,35 | P19 1 | 10,16 | 115,04 | P36 1 | 10,16 | 125,65 |
| P9 3 | 10,24 | 120,35 | P19 1 | 10,24 | 104,42 | P36 1 | 10,24 | 104,42 |
| P9 3 | 10,32 | 122,12 | P19 1 | 10,32 | 97,34  | P36 1 | 10,32 | 129,19 |
| P9 3 | 10,40 | 120,35 | P19 1 | 10,40 | 125,65 | P36 1 | 10,40 | 120,35 |
| P9 3 | 10,48 | 122,12 | P19 1 | 10,48 | 118,58 | P36 1 | 10,48 | 116,81 |
| P9 3 | 10,56 | 120,35 | P19 1 | 10,56 | 116,81 | P36 1 | 10,56 | 111,5  |
| P9 3 | 10,64 | 116,81 | P19 1 | 10,64 | 120,35 | P36 1 | 10,64 | 118,58 |
| P9 3 | 10,72 | 113,27 | P19 1 | 10,72 | 111,5  | P36 1 | 10,72 | 123,89 |
| P9 3 | 10,80 | 113,27 | P19 1 | 10,80 | 104,42 | P36 1 | 10,80 | 125,65 |
| P9 3 | 10,88 | 104,42 | P19 1 | 10,88 | 120,35 | P36 1 | 10,88 | 118,58 |
| P9 3 | 10,96 | 120,35 | P19 1 | 10,96 | 118,58 | P36 1 | 10,96 | 102,65 |
| P9 3 | 11,04 | 116,81 | P19 1 | 11,04 | 113,27 | P36 1 | 11,04 | 120,35 |
| P9 3 | 11,12 | 116,81 | P19 1 | 11,12 | 109,73 | P36 1 | 11,12 | 116,81 |
| P9 3 | 11,20 | 120,35 | P19 1 | 11,20 | 107,96 | P36 1 | 11,20 | 113,27 |
| P9 3 | 11,28 | 127,42 | P19 1 | 11,28 | 92,03  | P36 1 | 11,28 | 113,27 |
| P9 3 | 11,36 | 127,42 | P19 1 | 11,36 | 107,96 | P36 1 | 11,36 | 113,27 |
| P9 3 | 11,44 | 127,42 | P19 1 | 11,44 | 111,5  | P36 1 | 11,44 | 125,65 |
| P9 3 | 11,52 | 116,81 | P19 1 | 11,52 | 111,5  | P36 1 | 11,52 | 125,65 |
| P9 3 | 11,60 | 127,42 | P19 1 | 11,60 | 111,5  | P36 1 | 11,60 | 127,42 |
| P9 3 | 11,68 | 130,96 | P19 1 | 11,68 | 113,27 | P36 1 | 11,68 | 127,42 |
| P9 3 | 11,76 | 132,73 | P19 1 | 11,76 | 109,73 | P36 1 | 11,76 | 123,89 |
| P9 3 | 11,84 | 138,04 | P19 1 | 11,84 | 100,88 | P36 1 | 11,84 | 123,89 |
| P9 3 | 11,92 | 145,12 | P19 1 | 11,92 | 100,88 | P36 1 | 11,92 | 118,58 |
| P9 3 | 12,00 | 161,05 | P19 1 | 12,00 | 115,04 | P36 1 | 12,00 | 134,5  |
| P9 3 | 12,08 | 123,89 | P19 1 | 12,08 | 118,58 | P36 1 | 12,08 | 130,96 |
| P9 3 | 12,16 | 106,19 | P19 1 | 12,16 | 118,58 | P36 1 | 12,16 | 129,19 |
| P9 3 | 12,24 | 115,04 | P19 1 | 12,24 | 122,12 | P36 1 | 12,24 | 122,12 |
| P9 3 | 12,32 | 116,81 | P19 1 | 12,32 | 118,58 | P36 1 | 12,32 | 115,04 |
| P9 3 | 12,40 | 118,58 | P19 1 | 12,40 | 102,65 | P36 1 | 12,40 | 111,5  |
| P9 3 | 12,48 | 118,58 | P19 1 | 12,48 | 123,89 | P36 1 | 12,48 | 113,27 |
| P9 3 | 12,56 | 115,04 | P19 1 | 12,56 | 127,42 | P36 1 | 12,56 | 113,27 |
| P9 3 | 12,64 | 113,27 | P19 1 | 12,64 | 127,42 | P36 1 | 12,64 | 115,04 |
| P9 3 | 12,72 | 116,81 | P19 1 | 12,72 | 129,19 | P36 1 | 12,72 | 116,81 |
| P9 3 | 12,80 | 115,04 | P19 1 | 12,80 | 130,96 | P36 1 | 12,80 | 116,81 |
| P9 3 | 12,88 | 118,58 | P19 1 | 12,88 | 134,5  | P36 1 | 12,88 | 113,27 |
| P9 3 | 12,96 | 113,27 | P19 1 | 12,96 | 134,5  | P36 1 | 12,96 | 118,58 |
| P9 3 | 13,04 | 129,19 | P19 1 | 13,04 | 136,27 | P36 1 | 13,04 | 113,27 |
| P9 3 | 13,12 | 161,05 | P19 1 | 13,12 | 136,27 | P36 1 | 13,12 | 113,27 |
| P9 3 | 13,20 | 159,28 | P19 1 | 13,20 | 138,04 | P36 1 | 13,20 | 109,73 |
| P9 3 | 13,28 | 169,9  | P19 1 | 13,28 | 136,27 | P36 1 | 13,28 | 113,27 |
| P9 3 | 13,36 | 178,75 | P19 1 | 13,36 | 134,5  | P36 1 | 13,36 | 109,73 |
| P9 3 | 13,44 | 168,13 | P19 1 | 13,44 | 129,19 | P36 1 | 13,44 | 109,73 |
| P9 3 | 13,52 | 169,9  | P19 1 | 13,52 | 129,19 | P36 1 | 13,52 | 109,73 |
| P9 3 | 13,60 | 175,21 | P19 1 | 13,60 | 134,5  | P36 1 | 13,60 | 107,96 |
| P9 3 | 13,68 | 166,36 | P19 1 | 13,68 | 132,73 | P36 1 | 13,68 | 113,27 |

|      |       |        |       |       |        |       |       |        |
|------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| P9 3 | 13,76 | 159,28 | P19 1 | 13,76 | 132,73 | P36 1 | 13,76 | 115,04 |
| P9 3 | 13,84 | 146,89 | P19 1 | 13,84 | 130,96 | P36 1 | 13,84 | 115,04 |
| P9 3 | 13,92 | 141,58 | P19 1 | 13,92 | 130,96 | P36 1 | 13,92 | 113,27 |
| P9 3 | 14,00 | 139,81 | P19 1 | 14,00 | 130,96 | P36 1 | 14,00 | 111,5  |
| P9 3 | 14,08 | 145,12 | P19 1 | 14,08 | 129,19 | P36 1 | 14,08 | 111,5  |
| P9 3 | 14,16 | 152,2  | P19 1 | 14,16 | 130,96 | P36 1 | 14,16 | 111,5  |
| P9 3 | 14,24 | 161,05 | P19 1 | 14,24 | 129,19 | P36 1 | 14,24 | 127,42 |
| P9 3 | 14,32 | 168,13 | P19 1 | 14,32 | 129,19 | P36 1 | 14,32 | 134,5  |
| P9 3 | 14,40 | 175,21 | P19 1 | 14,40 | 129,19 | P36 1 | 14,40 | 123,89 |
| P9 3 | 14,48 | 176,98 | P19 1 | 14,48 | 130,96 | P36 1 | 14,48 | 109,73 |
| P9 3 | 14,56 | 171,67 | P19 1 | 14,56 | 136,27 | P36 1 | 14,56 | 106,19 |
| P9 3 | 14,64 | 162,82 | P19 1 | 14,64 | 146,89 | P36 1 | 14,64 | 111,5  |
| P9 3 | 14,72 | 159,28 | P19 1 | 14,72 | 143,35 | P36 1 | 14,72 | 122,12 |
| P9 3 | 14,80 | 175,21 | P19 1 | 14,80 | 49,55  | P36 1 | 14,80 | 123,89 |
| P9 3 | 14,88 | 184,06 | P19 1 | 14,88 | 109,73 | P36 1 | 14,88 | 122,12 |
| P9 3 | 14,96 | 178,75 | P19 1 | 14,96 | 5,3    | P36 1 | 14,96 | 130,96 |
| P9 3 | 15,04 | 178,75 | P19 1 | 15,04 | 217,69 | P36 1 | 15,04 | 127,42 |
| P9 3 | 15,12 | 194,68 | P19 1 | 15,12 | 208,84 | P36 1 | 15,12 | 134,5  |
| P9 3 | 15,20 | 182,29 | P19 1 | 15,20 | 191,14 | P36 1 | 15,20 | 130,96 |
| P9 3 | 15,28 | 132,73 | P19 1 | 15,28 | 196,45 | P36 1 | 15,28 | 120,35 |
| P9 3 | 15,36 | 5,3    | P19 1 | 15,36 | 145,12 | P36 1 | 15,36 | 127,42 |
| P9 3 | 15,44 | 5,3    | P19 1 | 15,44 | 102,65 | P36 1 | 15,44 | 132,73 |
| P9 3 | 15,52 | 159,28 | P19 1 | 15,52 | 97,34  | P36 1 | 15,52 | 127,42 |
| P9 3 | 15,60 | 192,91 | P19 1 | 15,60 | 97,34  | P36 1 | 15,60 | 93,8   |
| P9 3 | 15,68 | 223    | P19 1 | 15,68 | 76,1   | P36 1 | 15,68 | 5,3    |
| P9 3 | 15,76 | 205,3  | P19 1 | 15,76 | 99,11  | P36 1 | 15,76 | 3,53   |
| P9 3 | 15,84 | 168,13 | P19 1 | 15,84 | 72,56  | P36 1 | 15,84 | 3,53   |
| P9 3 | 15,92 | 113,27 | P19 1 | 15,92 | 88,49  | P36 1 | 15,92 | 134,5  |
| P9 3 | 16,00 | 123,89 | P19 1 | 16,00 | 92,03  | P36 1 | 16,00 | 122,12 |
| P9 3 | 16,08 | 113,27 | P19 1 | 16,08 | 88,49  | P36 1 | 16,08 | 146,89 |
| P9 3 | 16,16 | 93,8   | P19 1 | 16,16 | 88,49  | P36 1 | 16,16 | 122,12 |
| P9 3 | 16,24 | 127,42 | P19 1 | 16,24 | 74,33  | P36 1 | 16,24 | 116,81 |
| P9 3 | 16,32 | 104,42 | P19 1 | 16,32 | 99,11  | P36 1 | 16,32 | 150,43 |
| P9 3 | 16,40 | 143,35 | P19 1 | 16,40 | 74,33  | P36 1 | 16,40 | 118,58 |
| P9 3 | 16,48 | 106,19 | P19 1 | 16,48 | 97,34  | P36 1 | 16,48 | 145,12 |
| P9 3 | 16,56 | 138,04 | P19 1 | 16,56 | 77,87  | P36 1 | 16,56 | 118,58 |
| P9 3 | 16,64 | 95,57  | P19 1 | 16,64 | 97,34  | P36 1 | 16,64 | 115,04 |
| P9 3 | 16,72 | 130,96 | P19 1 | 16,72 | 83,18  | P36 1 | 16,72 | 141,58 |
| P9 3 | 16,80 | 100,88 | P19 1 | 16,80 | 106,19 | P36 1 | 16,80 | 127,42 |
| P9 3 | 16,88 | 93,8   | P19 1 | 16,88 | 109,73 | P36 1 | 16,88 | 127,42 |
| P9 3 | 16,96 | 138,04 | P19 1 | 16,96 | 97,34  | P36 1 | 16,96 | 125,65 |
| P9 3 | 17,04 | 107,96 | P19 1 | 17,04 | 107,96 | P36 1 | 17,04 | 102,65 |
| P9 3 | 17,12 | 143,35 | P19 1 | 17,12 | 113,27 | P36 1 | 17,12 | 130,96 |
| P9 3 | 17,20 | 102,65 | P19 1 | 17,20 | 92,03  | P36 1 | 17,20 | 129,19 |
| P9 3 | 17,28 | 145,12 | P19 1 | 17,28 | 123,89 | P36 1 | 17,28 | 109,73 |
| P9 3 | 17,36 | 118,58 | P19 1 | 17,36 | 125,65 | P36 1 | 17,36 | 134,5  |
| P9 3 | 17,44 | 143,35 | P19 1 | 17,44 | 123,89 | P36 1 | 17,44 | 138,04 |
| P9 3 | 17,52 | 116,81 | P19 1 | 17,52 | 107,96 | P36 1 | 17,52 | 122,12 |
| P9 3 | 17,60 | 115,04 | P19 1 | 17,60 | 134,5  | P36 1 | 17,60 | 136,27 |
| P9 3 | 17,68 | 99,11  | P19 1 | 17,68 | 113,27 | P36 1 | 17,68 | 145,12 |
| P9 3 | 17,76 | 122,12 | P19 1 | 17,76 | 127,42 | P36 1 | 17,76 | 138,04 |
| P9 3 | 17,84 | 166,36 | P19 1 | 17,84 | 127,42 | P36 1 | 17,84 | 136,27 |
| P9 3 | 17,92 | 132,73 | P19 1 | 17,92 | 113,27 | P36 1 | 17,92 | 123,89 |
| P9 3 | 18,00 | 168,13 | P19 1 | 18,00 | 132,73 | P36 1 | 18,00 | 143,35 |
| P9 3 | 18,08 | 132,73 | P19 1 | 18,08 | 115,04 | P36 1 | 18,08 | 81,41  |
| P9 3 | 18,16 | 161,05 | P19 1 | 18,16 | 139,81 | P36 1 | 18,16 | 123,89 |
| P9 3 | 18,24 | 102,65 | P19 1 | 18,24 | 107,96 | P36 1 | 18,24 | 148,66 |
| P9 3 | 18,32 | 155,74 | P19 1 | 18,32 | 127,42 | P36 1 | 18,32 | 129,19 |



|      |       |        |       |       |        |       |       |        |
|------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| P9 3 | 18,40 | 145,12 | P19 1 | 18,40 | 104,42 | P36 1 | 18,40 | 141,58 |
| P9 3 | 18,48 | 185,83 | P19 1 | 18,48 | 125,65 | P36 1 | 18,48 | 116,81 |
| P9 3 | 18,56 | 130,96 | P19 1 | 18,56 | 102,65 | P36 1 | 18,56 | 104,42 |
| P9 3 | 18,64 | 180,52 | P19 1 | 18,64 | 129,19 | P36 1 | 18,64 | 102,65 |
| P9 3 | 18,72 | 145,12 | P19 1 | 18,72 | 100,88 | P36 1 | 18,72 | 100,88 |
| P9 3 | 18,80 | 201,76 | P19 1 | 18,80 | 125,65 | P36 1 | 18,80 | 99,11  |
| P9 3 | 18,88 | 152,2  | P19 1 | 18,88 | 127,42 | P36 1 | 18,88 | 99,11  |
| P9 3 | 18,96 | 207,07 | P19 1 | 18,96 | 106,19 | P36 1 | 18,96 | 132,73 |
| P9 3 | 19,04 | 161,05 | P19 1 | 19,04 | 95,57  | P36 1 | 19,04 | 113,27 |
| P9 3 | 19,12 | 196,45 | P19 1 | 19,12 | 136,27 | P36 1 | 19,12 | 143,35 |
| P9 3 | 19,20 | 184,06 | P19 1 | 19,20 | 90,26  | P36 1 | 19,20 | 127,42 |
| P9 3 | 19,28 | 210,61 | P19 1 | 19,28 | 104,42 | P36 1 | 19,28 | 150,43 |
| P9 3 | 19,36 | 242,47 | P19 1 | 19,36 | 99,11  | P36 1 | 19,36 | 175,21 |
| P9 3 | 19,44 | 182,29 | P19 1 | 19,44 | 146,89 | P36 1 | 19,44 | 198,22 |
| P9 3 | 19,52 | 185,83 | P19 1 | 19,52 | 111,5  | P36 1 | 19,52 | 201,76 |
| P9 3 | 19,60 | 184,06 | P19 1 | 19,60 | 155,74 | P36 1 | 19,60 | 120,35 |
| P9 3 | 19,68 | 166,36 | P19 1 | 19,68 | 129,19 | P36 1 | 19,68 | 145,12 |
| P9 3 | 19,76 | 180,52 | P19 1 | 19,76 | 115,04 | P36 1 | 19,76 | 83,18  |
| P9 3 | 19,84 | 199,99 | P19 1 | 19,84 | 171,67 | P36 1 | 19,84 | 111,5  |
| P9 3 | 19,92 | 207,07 | P19 1 | 19,92 | 152,2  | P36 1 | 19,92 | 100,88 |
| P9 3 | 20,00 | 212,38 | P19 1 | 20,00 | 148,66 | P36 1 | 20,00 | 86,72  |
| P9 3 | 20,08 | 242,47 | P19 1 | 20,08 | 168,13 | P36 1 | 20,08 | 123,89 |
| P9 3 | 20,08 | 0      | P19 1 | 20,08 | 0      | P36 1 | 20,16 | 93,8   |
| P9 3 | 20,00 | 0      | P19 1 | 20,00 | 5      | P36 1 | 20,24 | 111,5  |
| P9 3 | 19,92 | 7      | P19 1 | 19,92 | 1      | P36 1 | 20,32 | 148,66 |
| P9 3 | 19,84 | 1      | P19 1 | 19,84 | 1      | P36 1 | 20,40 | 123,89 |
| P9 3 | 19,76 | 1      | P19 1 | 19,76 | 1      | P36 1 | 20,48 | 157,51 |
| P9 3 | 19,68 | 1      | P19 1 | 19,68 | 1      | P36 1 | 20,56 | 221,23 |
| P9 3 | 19,60 | 1      | P19 1 | 19,60 | 1      | P36 1 | 20,56 | 3      |
| P9 3 | 19,52 | 0      | P19 1 | 19,52 | 0      | P36 1 | 20,48 | 1      |
| P9 3 | 19,44 | 0      | P19 1 | 19,44 | 0      | P36 1 | 20,40 | 1      |
| P9 3 | 19,36 | 0      | P19 1 | 19,36 | 0      | P36 1 | 20,32 | 2      |
| P9 3 | 19,28 | 1      | P19 1 | 19,28 | 1      | P36 1 | 20,24 | 3      |
| P9 3 | 19,20 | 1      | P19 1 | 19,20 | 0      | P36 1 | 20,16 | 0      |
| P9 3 | 19,12 | 0      | P19 1 | 19,12 | 1      | P36 1 | 20,08 | 1      |
| P9 3 | 19,04 | 1      | P19 1 | 19,04 | 0      | P36 1 | 20,00 | 0      |
| P9 3 | 18,96 | 1      | P19 1 | 18,96 | 1      | P36 1 | 19,92 | 1      |
| P9 3 | 18,88 | 0      | P19 1 | 18,88 | 0      | P36 1 | 19,84 | 0      |
| P9 3 | 18,80 | 0      | P19 1 | 18,80 | 1      | P36 1 | 19,76 | 1      |
| P9 3 | 18,72 | 0      | P19 1 | 18,72 | 0      | P36 1 | 19,68 | 0      |
| P9 3 | 18,64 | 10     | P19 1 | 18,64 | 1      | P36 1 | 19,60 | 0      |
| P9 3 | 18,56 | 0      | P19 1 | 18,56 | 0      | P36 1 | 19,52 | 1      |
| P9 3 | 18,48 | 1      | P19 1 | 18,48 | 1      | P36 1 | 19,44 | 0      |
| P9 3 | 18,40 | 1      | P19 1 | 18,40 | 0      | P36 1 | 19,36 | 0      |
| P9 3 | 18,32 | 1      | P19 1 | 18,32 | 1      | P36 1 | 19,28 | 0      |
| P9 3 | 18,24 | 2      | P19 1 | 18,24 | 0      | P36 1 | 19,20 | 0      |
| P9 3 | 18,16 | 1      | P19 1 | 18,16 | 0      | P36 1 | 19,12 | 1      |
| P9 3 | 18,08 | 0      | P19 1 | 18,08 | 1      | P36 1 | 19,04 | 0      |
| P9 3 | 18,00 | 1      | P19 1 | 18,00 | 0      | P36 1 | 18,96 | 0      |
| P9 3 | 17,92 | 1      | P19 1 | 17,92 | 1      | P36 1 | 18,88 | 0      |
| P9 3 | 17,84 | 1      | P19 1 | 17,84 | 0      | P36 1 | 18,80 | 1      |
| P9 3 | 17,76 | 1      | P19 1 | 17,76 | 1      | P36 1 | 18,72 | 0      |
| P9 3 | 17,68 | 2      | P19 1 | 17,68 | 0      | P36 1 | 18,64 | 0      |
| P9 3 | 17,60 | 1      | P19 1 | 17,60 | 2      | P36 1 | 18,56 | 0      |
| P9 3 | 17,52 | 1      | P19 1 | 17,52 | 0      | P36 1 | 18,48 | 1      |
| P9 3 | 17,44 | 0      | P19 1 | 17,44 | 1      | P36 1 | 18,40 | 0      |
| P9 3 | 17,36 | 1      | P19 1 | 17,36 | 1      | P36 1 | 18,32 | 0      |
| P9 3 | 17,28 | 0      | P19 1 | 17,28 | 1      | P36 1 | 18,24 | 1      |

## ANEXO B – Previsão da capacidade de carga

### SPT

| Prof. (m) | NSPT | Tipo de solo | Np    | K (kPa) | $\alpha$ (%) | Rp (kN) | RI (kN) | RI acumulado (kN) | Rrup (kN) | Radm (kN) | Assentamento |
|-----------|------|--------------|-------|---------|--------------|---------|---------|-------------------|-----------|-----------|--------------|
| 1         | 3    | Areia        | 3     | 1000    | 0,014        | 294,52  | 16,49   | 16,49             | 32,99     | 16,49     | Não suporta! |
| 2         | 3    | Areia        | 3,00  | 1000    | 0,014        | 294,52  | 16,49   | 32,99             | 65,97     | 32,99     | Não suporta! |
| 3         | 3    | Areia        | 3,00  | 1000    | 0,014        | 294,52  | 16,49   | 49,48             | 98,96     | 49,48     | Não suporta! |
| 4         | 3    | Areia        | 4,33  | 1000    | 0,014        | 425,42  | 16,49   | 65,97             | 131,95    | 65,97     | Não suporta! |
| 5         | 7    | Areia        | 5,00  | 1000    | 0,014        | 490,87  | 38,48   | 104,46            | 208,92    | 104,46    | Não suporta! |
| 6         | 5    | Areia        | 8,33  | 1000    | 0,014        | 818,12  | 27,49   | 131,95            | 263,89    | 131,95    | Não suporta! |
| 7         | 13   | Areia        | 12,00 | 1000    | 0,014        | 1178,10 | 71,47   | 203,42            | 406,84    | 203,42    | Não suporta! |
| 8         | 18   | Areia        | 16,33 | 1000    | 0,014        | 1603,52 | 98,96   | 302,38            | 604,76    | 302,38    | Não suporta! |
| 9         | 18   | Areia        | 24,33 | 1000    | 0,014        | 2388,92 | 98,96   | 401,34            | 802,68    | 401,34    | Não suporta! |
| 10        | 37   | Areia        | 28,33 | 1000    | 0,014        | 2781,62 | 203,42  | 604,76            | 1209,51   | 604,76    | Não suporta! |
| 11        | 30   | Areia        | 28,33 | 1000    | 0,014        | 2781,62 | 164,93  | 769,69            | 1539,38   | 769,69    | Não suporta! |
| 12        | 18   | Areia        | 19,33 | 1000    | 0,014        | 1898,05 | 98,96   | 868,65            | 1737,30   | 868,65    | Não suporta! |
| 13        | 10   | Areia        | 12,00 | 1000    | 0,014        | 1178,10 | 54,98   | 923,63            | 1847,26   | 923,63    | Não suporta! |
| 14        | 8    | Areia        | 9,33  | 1000    | 0,014        | 916,30  | 43,98   | 967,61            | 1883,91   | 941,95    | Não suporta! |
| 15        | 10   | Areia        | 9,00  | 1000    | 0,014        | 883,57  | 54,98   | 1022,59           | 1906,16   | 953,08    | Não suporta! |
| 16        | 9    | Areia        | 9,67  | 1000    | 0,014        | 949,02  | 49,48   | 1072,07           | 2021,09   | 1010,55   | Não suporta! |
| 17        | 10   | Areia        | 11,00 | 1000    | 0,014        | 1079,92 | 54,98   | 1127,05           | 2206,97   | 1103,48   | Não suporta! |
| 18        | 14   | Areia        | 13,33 | 1000    | 0,014        | 1309,00 | 76,97   | 1204,02           | 2408,03   | 1204,02   | Suporta!     |
| 19        | 16   | Areia        | 15,33 | 1000    | 0,014        | 1505,35 | 87,96   | 1291,98           | 2583,96   | 1291,98   | Suporta!     |
| 20        | 16   | Areia        | 16,00 | 1000    | 0,014        | 1570,80 | 87,96   | 1379,94           | 2759,89   | 1379,94   | Suporta!     |
| 21        | 16   | Areia        | 26,33 | 1000    | 0,014        | 2585,27 | 87,96   | 1467,91           | 2935,82   | 1467,91   | Suporta!     |
| 22        | 47   | Areia        | 21,00 | 1000    | 0,014        | 2061,67 | 258,40  | 1726,31           | 3452,61   | 1726,31   | Suporta!     |

### CPT1

| Prof. (m) | Tipo de solo         | qc (Mpa) | qc (Kpa) | fs (Kpa) | Rp (kN) | RI (kN) | RI acumulado (kN) | Rrup (kN) | Radm (kN) | Assentamento |
|-----------|----------------------|----------|----------|----------|---------|---------|-------------------|-----------|-----------|--------------|
| 0,2       | Areia silto-argilosa | 0        | 0        | 0        | 0,00    | 0,00    | 0,00              | 0,00      | 0,00      | Não suporta! |
| 0,4       | Areia silto-argilosa | 1,38     | 1380     | 32,7     | 135,48  | 2,57    | 2,57              | 5,14      | 2,57      | Não suporta! |
| 0,6       | Areia silto-argilosa | 1,28     | 1280     | 39,24    | 125,66  | 3,08    | 5,65              | 11,30     | 5,65      | Não suporta! |
| 0,8       | Areia silto-argilosa | 1,29     | 1290     | 39,24    | 126,65  | 3,08    | 8,73              | 17,46     | 8,73      | Não suporta! |
| 1         | Areia silto-argilosa | 1,29     | 1290     | 39,24    | 126,65  | 3,08    | 11,81             | 23,63     | 11,81     | Não suporta! |
| 1,2       | Areia silto-argilosa | 1,29     | 1290     | 26,16    | 126,65  | 2,05    | 13,87             | 27,74     | 13,87     | Não suporta! |
| 1,4       | Areia silto-argilosa | 0,90     | 900      | 45,78    | 88,36   | 3,60    | 17,46             | 34,93     | 17,46     | Não suporta! |
| 1,6       | Areia silto-argilosa | 1,10     | 1100     | 45,78    | 107,99  | 3,60    | 21,06             | 42,12     | 21,06     | Não suporta! |
| 1,8       | Areia silto-argilosa | 1,30     | 1300     | 58,86    | 127,63  | 4,62    | 25,68             | 51,37     | 25,68     | Não suporta! |
| 2         | Areia silto-argilosa | 1,60     | 1600     | 65,4     | 157,08  | 5,14    | 30,82             | 61,64     | 30,82     | Não suporta! |
| 2,2       | Areia silto-argilosa | 2,09     | 2090     | 71,94    | 205,19  | 5,65    | 36,47             | 72,94     | 36,47     | Não suporta! |
| 2,4       | Areia silto-argilosa | 2,48     | 2480     | 45,78    | 243,47  | 3,60    | 40,06             | 80,13     | 40,06     | Não suporta! |
| 2,6       | Areia silto-argilosa | 2,39     | 2390     | 58,86    | 234,64  | 4,62    | 44,69             | 89,38     | 44,69     | Não suporta! |
| 2,8       | Areia silto-argilosa | 2,19     | 2190     | 85,02    | 215,00  | 6,68    | 51,37             | 102,73    | 51,37     | Não suporta! |
| 3         | Areia silto-argilosa | 1,61     | 1610     | 45,78    | 158,06  | 3,60    | 54,96             | 109,92    | 54,96     | Não suporta! |
| 3,2       | Areia silto-argilosa | 2,20     | 2200     | 78,48    | 215,98  | 6,16    | 61,12             | 122,25    | 61,12     | Não suporta! |
| 3,4       | Areia siltosa        | 2,40     | 2400     | 26,16    | 235,62  | 2,05    | 63,18             | 126,36    | 63,18     | Não suporta! |
| 3,6       | Areia siltosa        | 4,36     | 4360     | 85,02    | 428,04  | 6,68    | 69,86             | 139,71    | 69,86     | Não suporta! |
| 3,8       | Areia siltosa        | 4,46     | 4460     | 78,48    | 437,86  | 6,16    | 76,02             | 152,04    | 76,02     | Não suporta! |
| 4         | Areia siltosa        | 5,15     | 5150     | 104,64   | 505,60  | 8,22    | 84,24             | 168,48    | 84,24     | Não suporta! |
| 4,2       | Areia siltosa        | 5,35     | 5350     | 300,84   | 525,24  | 23,63   | 107,87            | 215,73    | 107,87    | Não suporta! |
| 4,4       | Areia siltosa        | 6,24     | 6240     | 241,98   | 612,61  | 19,01   | 126,87            | 253,74    | 126,87    | Não suporta! |
| 4,6       | Areia siltosa        | 7,22     | 7220     | 307,38   | 708,82  | 24,14   | 151,01            | 302,03    | 151,01    | Não suporta! |
| 4,8       | Areia siltosa        | 7,12     | 7120     | 307,38   | 699,00  | 24,14   | 175,15            | 350,31    | 175,15    | Não suporta! |
| 5         | Areia siltosa        | 6,15     | 6150     | 274,68   | 603,77  | 21,57   | 196,73            | 393,46    | 196,73    | Não suporta! |
| 5,2       | Areia siltosa        | 8,21     | 8210     | 320,46   | 806,01  | 25,17   | 221,90            | 443,79    | 221,90    | Não suporta! |
| 5,4       | Areia siltosa        | 9,09     | 9090     | 359,7    | 892,41  | 28,25   | 250,15            | 500,30    | 250,15    | Não suporta! |
| 5,6       | Areia siltosa        | 9,39     | 9390     | 385,86   | 921,86  | 30,31   | 280,45            | 560,91    | 280,45    | Não suporta! |
| 5,8       | Areia siltosa        | 10,86    | 10860    | 431,64   | 1066,18 | 33,90   | 314,35            | 628,71    | 314,35    | Não suporta! |

|      |                |       |       |        |         |       |         |         |         |              |
|------|----------------|-------|-------|--------|---------|-------|---------|---------|---------|--------------|
| 6    | Areia siltosa  | 9,98  | 9980  | 464,34 | 979,78  | 36,47 | 350,82  | 701,65  | 350,82  | Não suporta! |
| 6,2  | Areia siltosa  | 10,28 | 10280 | 451,26 | 1009,24 | 35,44 | 386,27  | 772,53  | 386,27  | Não suporta! |
| 6,4  | Areia siltosa  | 12,64 | 12640 | 91,56  | 1240,93 | 7,19  | 393,46  | 786,91  | 393,46  | Não suporta! |
| 6,6  | Areia siltosa  | 9,31  | 9310  | 392,4  | 914,01  | 30,82 | 424,28  | 848,55  | 424,28  | Não suporta! |
| 6,8  | Areia siltosa  | 5,78  | 5780  | 353,16 | 567,45  | 27,74 | 452,01  | 904,02  | 452,01  | Não suporta! |
| 7    | Areia siltosa  | 8,13  | 8130  | 418,56 | 798,16  | 32,87 | 484,89  | 969,77  | 484,89  | Não suporta! |
| 7,2  | Areia siltosa  | 14,71 | 14710 | 568,98 | 1444,15 | 44,69 | 529,57  | 1059,15 | 529,57  | Não suporta! |
| 7,4  | Areia siltosa  | 15,01 | 15010 | 647,46 | 1473,60 | 50,85 | 580,42  | 1160,85 | 580,42  | Não suporta! |
| 7,6  | Areia siltosa  | 16,09 | 16090 | 758,64 | 1579,63 | 59,58 | 640,01  | 1280,02 | 640,01  | Não suporta! |
| 7,8  | Areia siltosa  | 13,93 | 13930 | 588,6  | 1367,57 | 46,23 | 686,24  | 1372,47 | 686,24  | Não suporta! |
| 8    | Areia siltosa  | 12,86 | 12860 | 673,62 | 1262,53 | 52,91 | 739,14  | 1478,29 | 739,14  | Não suporta! |
| 8,2  | Areia siltosa  | 8,34  | 8340  | 379,32 | 818,78  | 29,79 | 768,93  | 1537,87 | 768,93  | Não suporta! |
| 8,4  | Areia siltosa  | 7,27  | 7270  | 130,8  | 713,73  | 10,27 | 779,21  | 1492,94 | 746,47  | Não suporta! |
| 8,6  | Areia siltosa  | 8,74  | 8740  | 71,94  | 858,05  | 5,65  | 784,86  | 1569,72 | 784,86  | Não suporta! |
| 8,8  | Areia siltosa  | 7,67  | 7670  | 379,32 | 753,00  | 29,79 | 814,65  | 1567,65 | 783,83  | Não suporta! |
| 9    | Areia siltosa  | 8,75  | 8750  | 438,18 | 859,03  | 34,41 | 849,06  | 1698,13 | 849,06  | Não suporta! |
| 9,2  | Areia siltosa  | 6,98  | 6980  | 431,64 | 685,26  | 33,90 | 882,97  | 1568,22 | 784,11  | Não suporta! |
| 9,4  | Areia siltosa  | 7,28  | 7280  | 45,78  | 714,71  | 3,60  | 886,56  | 1601,27 | 800,64  | Não suporta! |
| 9,6  | Areia siltosa  | 7,19  | 7190  | 117,72 | 705,88  | 9,25  | 895,81  | 1601,68 | 800,84  | Não suporta! |
| 9,8  | Areia siltosa  | 5,62  | 5620  | 130,8  | 551,74  | 10,27 | 906,08  | 1457,82 | 728,91  | Não suporta! |
| 10   | Areia siltosa  | 9,64  | 9640  | 477,42 | 946,40  | 37,50 | 943,58  | 1887,15 | 943,58  | Não suporta! |
| 10,2 | Areia siltosa  | 15,43 | 15430 | 725,94 | 1514,84 | 57,02 | 1000,59 | 2001,18 | 1000,59 | Não suporta! |
| 10,4 | Areia siltosa  | 16,02 | 16020 | 143,88 | 1572,76 | 11,30 | 1011,89 | 2023,78 | 1011,89 | Não suporta! |
| 10,6 | Areia siltosa  | 15,14 | 15140 | 712,86 | 1486,37 | 55,99 | 1067,88 | 2135,76 | 1067,88 | Não suporta! |
| 10,8 | Areia siltosa  | 20,44 | 20440 | 739,02 | 2006,69 | 58,04 | 1125,92 | 2251,84 | 1125,92 | Não suporta! |
| 11   | Areia siltosa  | 22,51 | 22510 | 902,52 | 2209,91 | 70,88 | 1196,81 | 2393,61 | 1196,81 | Não suporta! |
| 11,2 | Areia siltosa  | 24,57 | 24570 | 595,14 | 2412,15 | 46,74 | 1243,55 | 2487,10 | 1243,55 | Não suporta! |
| 11,4 | Areia siltosa  | 22,12 | 22120 | 235,44 | 2171,63 | 18,49 | 1262,04 | 2524,08 | 1262,04 | Não suporta! |
| 11,6 | Areia siltosa  | 14,18 | 14180 | 562,44 | 1392,12 | 44,17 | 1306,21 | 2612,43 | 1306,21 | Não suporta! |
| 11,8 | Areia siltosa  | 14,28 | 14280 | 686,7  | 1401,94 | 53,93 | 1360,15 | 2720,29 | 1360,15 | Não suporta! |
| 12   | Areia siltosa  | 11,53 | 11530 | 575,52 | 1131,96 | 45,20 | 1405,35 | 2537,30 | 1268,65 | Não suporta! |
| 12,2 | Areia siltosa  | 9,67  | 9670  | 483,96 | 949,35  | 38,01 | 1443,36 | 2392,71 | 1196,35 | Não suporta! |
| 12,4 | Areia siltosa  | 9,67  | 9670  | 58,86  | 949,35  | 4,62  | 1447,98 | 2397,33 | 1198,67 | Não suporta! |
| 12,6 | Areia siltosa  | 7,42  | 7420  | 405,48 | 728,46  | 31,85 | 1479,83 | 2208,28 | 1104,14 | Não suporta! |
| 12,8 | Areia siltosa  | 5,95  | 5950  | 333,54 | 584,14  | 26,20 | 1506,02 | 2090,16 | 1045,08 | Não suporta! |
| 13   | Areia siltosa  | 5,37  | 5370  | 241,98 | 527,20  | 19,01 | 1525,03 | 2052,23 | 1026,11 | Não suporta! |
| 13,2 | Areia siltosa  | 8,31  | 8310  | 405,48 | 815,83  | 31,85 | 1556,87 | 2372,71 | 1186,35 | Não suporta! |
| 13,4 | Areia siltosa  | 11,45 | 11450 | 65,4   | 1124,10 | 5,14  | 1562,01 | 2686,11 | 1343,06 | Não suporta! |
| 13,6 | Areia siltosa  | 13,71 | 13710 | 621,3  | 1345,98 | 48,80 | 1610,81 | 2956,78 | 1478,39 | Não suporta! |
| 13,8 | Areia siltosa  | 13,22 | 13220 | 634,38 | 1297,87 | 49,82 | 1660,63 | 2958,50 | 1479,25 | Não suporta! |
| 14   | Areia siltosa  | 10,58 | 10580 | 130,8  | 1038,69 | 10,27 | 1670,90 | 2709,59 | 1354,80 | Não suporta! |
| 14,2 | Argila arenosa | 11,17 | 11170 | 241,98 | 1096,61 | 19,01 | 1689,91 | 2786,52 | 1393,26 | Não suporta! |
| 14,4 | Argila arenosa | 2,05  | 2050  | 58,86  | 201,26  | 4,62  | 1694,53 | 1895,79 | 947,90  | Não suporta! |
| 14,6 | Argila arenosa | 1,07  | 1070  | 13,08  | 105,05  | 1,03  | 1695,56 | 1800,61 | 900,30  | Não suporta! |
| 14,8 | Argila arenosa | 0,88  | 880   | 19,62  | 86,39   | 1,54  | 1697,10 | 1783,49 | 891,75  | Não suporta! |
| 15   | Areia          | 0,88  | 880   | 71,94  | 86,39   | 5,65  | 1702,75 | 1789,14 | 894,57  | Não suporta! |
| 15,2 | Areia          | 4,71  | 4710  | 261,6  | 462,40  | 20,55 | 1723,30 | 2185,70 | 1092,85 | Não suporta! |
| 15,4 | Areia          | 5,79  | 5790  | 215,82 | 568,43  | 16,95 | 1740,25 | 2308,68 | 1154,34 | Não suporta! |
| 15,6 | Areia          | 7,16  | 7160  | 130,8  | 702,93  | 10,27 | 1750,52 | 2453,45 | 1226,73 | Não suporta! |
| 15,8 | Argila siltosa | 3,14  | 3140  | 52,32  | 308,27  | 4,11  | 1754,63 | 2062,90 | 1031,45 | Não suporta! |
| 16   | Argila siltosa | 1,28  | 1280  | 39,24  | 125,66  | 3,08  | 1757,71 | 1883,38 | 941,69  | Não suporta! |
| 16,2 | Areia          | 0,8   | 800   | 98,1   | 78,54   | 7,70  | 1765,42 | 1843,96 | 921,98  | Não suporta! |
| 16,4 | Areia          | 5,7   | 5700  | 130,8  | 559,60  | 10,27 | 1775,69 | 2335,29 | 1167,64 | Não suporta! |

|      |                      |       |       |         |         |        |         |         |         |               |
|------|----------------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------------|
| 16,6 | Areia                | 3,94  | 3940  | 65,4    | 386,81  | 5,14   | 1780,83 | 2167,63 | 1083,82 | Não suportar! |
| 16,8 | Argila siltosa       | 2,27  | 2270  | 104,64  | 222,86  | 8,22   | 1789,04 | 2011,90 | 1005,95 | Não suportar! |
| 17   | Argila siltosa       | 1,79  | 1790  | 130,8   | 175,73  | 10,27  | 1799,32 | 1975,05 | 987,53  | Não suportar! |
| 17,2 | Silte areno-argiloso | 1,99  | 1990  | 130,8   | 195,37  | 10,27  | 1809,59 | 2004,96 | 1002,48 | Não suportar! |
| 17,4 | Silte areno-argiloso | 9,15  | 9150  | 150,42  | 898,30  | 11,81  | 1821,40 | 2719,70 | 1359,85 | Não suportar! |
| 17,6 | Silte areno-argiloso | 7,29  | 7290  | 202,74  | 715,69  | 15,92  | 1837,33 | 2553,02 | 1276,51 | Não suportar! |
| 17,8 | Silte areno-argiloso | 6,21  | 6210  | 202,74  | 609,67  | 15,92  | 1853,25 | 2462,92 | 1231,46 | Não suportar! |
| 18   | Silte areno-argiloso | 6,7   | 6700  | 176,58  | 657,77  | 13,87  | 1867,12 | 2524,89 | 1262,45 | Não suportar! |
| 18,2 | Silte areno-argiloso | 7,88  | 7880  | 202,74  | 773,62  | 15,92  | 1883,04 | 2656,66 | 1328,33 | Não suportar! |
| 18,4 | Silte areno-argiloso | 7,1   | 7100  | 111,18  | 697,04  | 8,73   | 1891,77 | 2588,82 | 1294,41 | Não suportar! |
| 18,6 | Silte areno-argiloso | 6,61  | 6610  | 209,28  | 648,94  | 16,44  | 1908,21 | 2557,15 | 1278,57 | Não suportar! |
| 18,8 | Silte areno-argiloso | 7,7   | 7700  | 274,68  | 755,95  | 21,57  | 1929,78 | 2685,73 | 1342,87 | Não suportar! |
| 19   | Silte areno-argiloso | 7,5   | 7500  | 300,84  | 736,31  | 23,63  | 1953,41 | 2689,72 | 1344,86 | Não suportar! |
| 19,2 | Silte areno-argiloso | 7,9   | 7900  | 353,16  | 775,58  | 27,74  | 1981,15 | 2756,73 | 1378,37 | Não suportar! |
| 19,4 | Silte areno-argiloso | 6,33  | 6330  | 189,66  | 621,45  | 14,90  | 1996,05 | 2617,49 | 1308,75 | Não suportar! |
| 19,6 | Silte areno-argiloso | 4,37  | 4370  | 241,98  | 429,02  | 19,01  | 2015,05 | 2444,07 | 1222,04 | Não suportar! |
| 19,8 | Silte areno-argiloso | 6,24  | 6240  | 235,44  | 612,61  | 18,49  | 2033,54 | 2646,15 | 1323,08 | Não suportar! |
| 20   | Silte areno-argiloso | 7,51  | 7510  | 287,76  | 737,29  | 22,60  | 2056,14 | 2793,44 | 1396,72 | Não suportar! |
| 20,2 | Silte areno-argiloso | 4,87  | 4870  | 209,28  | 478,11  | 16,44  | 2072,58 | 2550,69 | 1275,35 | Não suportar! |
| 20,4 | Silte areno-argiloso | 6,73  | 6730  | 346,62  | 660,72  | 27,22  | 2099,80 | 2760,52 | 1380,26 | Não suportar! |
| 20,6 | Silte areno-argiloso | 7,91  | 7910  | 111,18  | 776,56  | 8,73   | 2108,53 | 2885,10 | 1442,55 | Não suportar! |
| 20,8 | Silte areno-argiloso | 10,86 | 10860 | 58,86   | 1066,18 | 4,62   | 2113,16 | 3179,34 | 1589,67 | Não suportar! |
| 21   | Silte areno-argiloso | 10,86 | 10860 | 65,4    | 1066,18 | 5,14   | 2118,29 | 3184,47 | 1592,24 | Não suportar! |
| 21,2 | Silte areno-argiloso | 9,69  | 9690  | 130,8   | 951,31  | 10,27  | 2128,57 | 3079,88 | 1539,94 | Não suportar! |
| 21,4 | Silte areno-argiloso | 14,01 | 14010 | 130,8   | 1375,43 | 10,27  | 2138,84 | 3514,27 | 1757,13 | Suportar!     |
| 21,6 | Silte areno-argiloso | 11,46 | 11460 | 1098,72 | 1125,08 | 86,29  | 2225,13 | 3350,22 | 1675,11 | Suportar!     |
| 21,8 | Silte areno-argiloso | 28,73 | 28730 | 1399,56 | 2820,56 | 109,92 | 2335,05 | 4670,11 | 2335,05 | Suportar!     |

## CPT 2

| Prof. (m) | Tipo de solo         | qc (Mpa) | qc (Kpa) | fs (Kpa) | Rp (kN) | RI (kN) | RI acumulado (kN) | Rrup (kN) | Radm (kN) | Assentamento  |
|-----------|----------------------|----------|----------|----------|---------|---------|-------------------|-----------|-----------|---------------|
| 0,2       | Areia silto-argilosa | 0        | 0        | 0        | 0,00    | 0,00    | 0,00              | 0,00      | 0,00      | Não suportar! |
| 0,4       | Areia silto-argilosa | 6,38     | 6380     | 170,04   | 626,36  | 13,35   | 13,35             | 26,71     | 13,35     | Não suportar! |
| 0,6       | Areia silto-argilosa | 3,54     | 3540     | 163,5    | 347,54  | 12,84   | 26,20             | 52,39     | 26,20     | Não suportar! |
| 0,8       | Areia silto-argilosa | 2,46     | 2460     | 85,02    | 241,51  | 6,68    | 32,87             | 65,75     | 32,87     | Não suportar! |
| 1         | Areia silto-argilosa | 1,78     | 1780     | 45,78    | 174,75  | 3,60    | 36,47             | 72,94     | 36,47     | Não suportar! |
| 1,2       | Areia silto-argilosa | 1,49     | 1490     | 32,7     | 146,28  | 2,57    | 39,04             | 78,07     | 39,04     | Não suportar! |
| 1,4       | Areia silto-argilosa | 1,69     | 1690     | 13,08    | 165,92  | 1,03    | 40,06             | 80,13     | 40,06     | Não suportar! |
| 1,6       | Areia silto-argilosa | 2,28     | 2280     | 45,78    | 223,84  | 3,60    | 43,66             | 87,32     | 43,66     | Não suportar! |
| 1,8       | Areia silto-argilosa | 1,89     | 1890     | 58,86    | 185,55  | 4,62    | 48,28             | 96,57     | 48,28     | Não suportar! |
| 2         | Areia silto-argilosa | 2,09     | 2090     | 65,4     | 205,19  | 5,14    | 53,42             | 106,84    | 53,42     | Não suportar! |
| 2,2       | Areia silto-argilosa | 2,28     | 2280     | 85,02    | 223,84  | 6,68    | 60,10             | 120,19    | 60,10     | Não suportar! |
| 2,4       | Areia silto-argilosa | 2,29     | 2290     | 85,02    | 224,82  | 6,68    | 66,77             | 133,55    | 66,77     | Não suportar! |
| 2,6       | Areia silto-argilosa | 2,68     | 2680     | 65,4     | 263,11  | 5,14    | 71,91             | 143,82    | 71,91     | Não suportar! |
| 2,8       | Areia silto-argilosa | 2,68     | 2680     | 98,1     | 263,11  | 7,70    | 79,62             | 159,23    | 79,62     | Não suportar! |
| 3         | Areia silto-argilosa | 2,88     | 2880     | 104,64   | 282,74  | 8,22    | 87,83             | 175,67    | 87,83     | Não suportar! |
| 3,2       | Areia silto-argilosa | 2,59     | 2590     | 98,1     | 254,27  | 7,70    | 95,54             | 191,08    | 95,54     | Não suportar! |
| 3,4       | Areia silto-argilosa | 2,30     | 2300     | 91,56    | 225,80  | 7,19    | 102,73            | 205,46    | 102,73    | Não suportar! |
| 3,6       | Areia silto-argilosa | 2,30     | 2300     | 98,1     | 225,80  | 7,70    | 110,43            | 220,87    | 110,43    | Não suportar! |
| 3,8       | Areia siltosa        | 2,30     | 2300     | 124,26   | 225,80  | 9,76    | 120,19            | 240,39    | 120,19    | Não suportar! |
| 4         | Areia siltosa        | 5,94     | 5940     | 209,28   | 583,16  | 16,44   | 136,63            | 273,26    | 136,63    | Não suportar! |
| 4,2       | Areia siltosa        | 6,43     | 6430     | 255,06   | 631,26  | 20,03   | 156,66            | 313,33    | 156,66    | Não suportar! |
| 4,4       | Areia siltosa        | 6,83     | 6830     | 268,14   | 670,53  | 21,06   | 177,72            | 355,45    | 177,72    | Não suportar! |
| 4,6       | Areia siltosa        | 8,30     | 8300     | 294,3    | 814,85  | 23,11   | 200,84            | 401,67    | 200,84    | Não suportar! |
| 4,8       | Areia siltosa        | 8,30     | 8300     | 340,08   | 814,85  | 26,71   | 227,55            | 455,09    | 227,55    | Não suportar! |
| 5         | Areia siltosa        | 10,66    | 10660    | 464,34   | 1046,54 | 36,47   | 264,02            | 528,03    | 264,02    | Não suportar! |
| 5,2       | Areia siltosa        | 13,21    | 13210    | 516,66   | 1296,89 | 40,58   | 304,59            | 609,19    | 304,59    | Não suportar! |
| 5,4       | Areia siltosa        | 15,57    | 15570    | 575,52   | 1528,58 | 45,20   | 349,80            | 699,59    | 349,80    | Não suportar! |
| 5,6       | Areia siltosa        | 13,90    | 13900    | 555,9    | 1364,63 | 43,66   | 393,46            | 786,91    | 393,46    | Não suportar! |
| 5,8       | Areia siltosa        | 12,14    | 12140    | 523,2    | 1191,84 | 41,09   | 434,55            | 869,10    | 434,55    | Não suportar! |
| 6         | Areia siltosa        | 13,03    | 13030    | 503,58   | 1279,22 | 39,55   | 474,10            | 948,20    | 474,10    | Não suportar! |
| 6,2       | Areia siltosa        | 4,2      | 4200     | 366,24   | 412,33  | 28,76   | 502,86            | 915,20    | 457,60    | Não suportar! |
| 6,4       | Areia siltosa        | 4,99     | 4990     | 183,12   | 489,89  | 14,38   | 517,25            | 1007,14   | 503,57    | Não suportar! |
| 6,6       | Areia siltosa        | 4,5      | 4500     | 143,88   | 441,79  | 11,30   | 528,55            | 970,33    | 485,17    | Não suportar! |
| 6,8       | Areia siltosa        | 3,52     | 3520     | 137,34   | 345,58  | 10,79   | 539,33            | 884,91    | 442,45    | Não suportar! |

|      |                |       |       |         |         |        |         |         |         |              |
|------|----------------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------------|
| 7    | Areia siltosa  | 3,72  | 3720  | 170,04  | 365,21  | 13,35  | 552,69  | 917,90  | 458,95  | Não suportal |
| 7,2  | Areia siltosa  | 5,39  | 5390  | 228,9   | 529,16  | 17,98  | 570,67  | 1099,83 | 549,91  | Não suportal |
| 7,4  | Areia siltosa  | 12,65 | 12650 | 398,94  | 1241,91 | 31,33  | 602,00  | 1204,00 | 602,00  | Não suportal |
| 7,6  | Areia siltosa  | 17,36 | 17360 | 601,68  | 1704,31 | 47,26  | 649,25  | 1298,51 | 649,25  | Não suportal |
| 7,8  | Areia siltosa  | 11,58 | 11580 | 464,34  | 1136,86 | 36,47  | 685,72  | 1371,45 | 685,72  | Não suportal |
| 8    | Areia siltosa  | 8,73  | 8730  | 385,86  | 857,07  | 30,31  | 716,03  | 1432,06 | 716,03  | Não suportal |
| 8,2  | Areia siltosa  | 5,79  | 5790  | 255,06  | 568,43  | 20,03  | 736,06  | 1304,49 | 652,25  | Não suportal |
| 8,4  | Areia siltosa  | 5,11  | 5110  | 313,92  | 501,67  | 24,66  | 760,72  | 1262,39 | 631,19  | Não suportal |
| 8,6  | Areia siltosa  | 16,49 | 16490 | 124,26  | 1618,90 | 9,76   | 770,48  | 1540,95 | 770,48  | Não suportal |
| 8,8  | Areia siltosa  | 18,56 | 18560 | 850,2   | 1822,12 | 66,77  | 837,25  | 1674,50 | 837,25  | Não suportal |
| 9    | Areia siltosa  | 11,3  | 11300 | 621,3   | 1109,37 | 48,80  | 886,05  | 1772,09 | 886,05  | Não suportal |
| 9,2  | Areia siltosa  | 9,73  | 9730  | 483,96  | 955,24  | 38,01  | 924,06  | 1848,11 | 924,06  | Não suportal |
| 9,4  | Areia siltosa  | 8,16  | 8160  | 418,56  | 801,11  | 32,87  | 956,93  | 1758,04 | 879,02  | Não suportal |
| 9,6  | Areia siltosa  | 5,52  | 5520  | 71,94   | 541,92  | 5,65   | 962,58  | 1504,51 | 752,25  | Não suportal |
| 9,8  | Areia siltosa  | 7,19  | 7190  | 281,22  | 705,88  | 22,09  | 984,67  | 1690,54 | 845,27  | Não suportal |
| 10   | Areia siltosa  | 6,11  | 6110  | 313,92  | 599,85  | 24,66  | 1009,32 | 1609,17 | 804,59  | Não suportal |
| 10,2 | Areia siltosa  | 9,25  | 9250  | 457,8   | 908,12  | 35,96  | 1045,28 | 1953,40 | 976,70  | Não suportal |
| 10,4 | Areia siltosa  | 2,59  | 2590  | 189,66  | 254,27  | 14,90  | 1060,17 | 1314,45 | 657,22  | Não suportal |
| 10,6 | Areia siltosa  | 2,9   | 2900  | 111,18  | 284,71  | 8,73   | 1068,91 | 1353,61 | 676,81  | Não suportal |
| 10,8 | Areia siltosa  | 7,69  | 7690  | 320,46  | 754,96  | 25,17  | 1094,08 | 1849,04 | 924,52  | Não suportal |
| 11   | Areia siltosa  | 4,36  | 4360  | 111,18  | 428,04  | 8,73   | 1102,81 | 1530,85 | 765,42  | Não suportal |
| 11,2 | Areia siltosa  | 10,54 | 10540 | 516,66  | 1034,76 | 40,58  | 1143,39 | 2178,15 | 1089,07 | Não suportal |
| 11,4 | Areia siltosa  | 17,21 | 17210 | 745,56  | 1689,59 | 58,56  | 1201,94 | 2403,88 | 1201,94 | Não suportal |
| 11,6 | Areia siltosa  | 17,41 | 17410 | 183,12  | 1709,22 | 14,38  | 1216,32 | 2432,65 | 1216,32 | Não suportal |
| 11,8 | Areia siltosa  | 15,85 | 15850 | 588,6   | 1556,07 | 46,23  | 1262,55 | 2525,11 | 1262,55 | Não suportal |
| 12   | Areia siltosa  | 17,91 | 17910 | 804,42  | 1758,31 | 63,18  | 1325,73 | 2651,46 | 1325,73 | Suportal     |
| 12,2 | Areia siltosa  | 13,89 | 13890 | 621,3   | 1363,65 | 48,80  | 1374,53 | 2738,18 | 1369,09 | Suportal     |
| 12,4 | Areia siltosa  | 10,56 | 10560 | 582,06  | 1036,73 | 45,71  | 1420,24 | 2456,97 | 1228,48 | Não suportal |
| 12,6 | Areia siltosa  | 7,81  | 7810  | 39,24   | 766,74  | 3,08   | 1423,33 | 2190,07 | 1095,04 | Não suportal |
| 12,8 | Argila siltosa | 4,87  | 4870  | 215,82  | 478,11  | 16,95  | 1440,28 | 1918,39 | 959,19  | Não suportal |
| 13   | Argila siltosa | 1,05  | 1050  | 19,62   | 103,08  | 1,54   | 1441,82 | 1544,90 | 772,45  | Não suportal |
| 13,2 | Argila siltosa | 1,54  | 1540  | 39,24   | 151,19  | 3,08   | 1444,90 | 1596,09 | 798,04  | Não suportal |
| 13,4 | Argila siltosa | 0,66  | 660   | 13,08   | 64,80   | 1,03   | 1445,93 | 1510,72 | 755,36  | Não suportal |
| 13,6 | Argila siltosa | 0,66  | 660   | 6,54    | 64,80   | 0,51   | 1446,44 | 1511,23 | 755,62  | Não suportal |
| 13,8 | Argila siltosa | 0,67  | 670   | 13,08   | 65,78   | 1,03   | 1447,47 | 1513,24 | 756,62  | Não suportal |
| 14   | Argila siltosa | 0,57  | 570   | 313,92  | 55,96   | 24,66  | 1472,12 | 1528,08 | 764,04  | Não suportal |
| 14,2 | Argila siltosa | 0,87  | 870   | 111,18  | 85,41   | 8,73   | 1480,85 | 1566,27 | 783,13  | Não suportal |
| 14,4 | Argila siltosa | 1,16  | 1160  | 45,78   | 113,88  | 3,60   | 1484,45 | 1598,33 | 799,17  | Não suportal |
| 14,6 | Argila siltosa | 1,36  | 1360  | 39,24   | 133,52  | 3,08   | 1487,53 | 1621,05 | 810,52  | Não suportal |
| 14,8 | Argila siltosa | 1,27  | 1270  | 26,16   | 124,68  | 2,05   | 1489,59 | 1614,27 | 807,13  | Não suportal |
| 15   | Argila siltosa | 0,58  | 580   | 65,4    | 56,94   | 5,14   | 1494,72 | 1551,66 | 775,83  | Não suportal |
| 15,2 | Argila siltosa | 0,88  | 880   | 19,62   | 86,39   | 1,54   | 1496,26 | 1582,66 | 791,33  | Não suportal |
| 15,4 | Argila siltosa | 0,49  | 490   | 71,94   | 48,11   | 5,65   | 1501,91 | 1550,02 | 775,01  | Não suportal |
| 15,6 | Argila siltosa | 0,49  | 490   | 45,78   | 48,11   | 3,60   | 1505,51 | 1553,61 | 776,81  | Não suportal |
| 15,8 | Argila siltosa | 1,18  | 1180  | 26,16   | 115,85  | 2,05   | 1507,56 | 1623,41 | 811,71  | Não suportal |
| 16   | Argila siltosa | 0,79  | 790   | 6,54    | 77,56   | 0,51   | 1508,08 | 1585,64 | 792,82  | Não suportal |
| 16,2 | Argila siltosa | 0,7   | 700   | 32,7    | 68,72   | 2,57   | 1510,65 | 1579,37 | 789,68  | Não suportal |
| 16,4 | Argila siltosa | 0,8   | 800   | 26,16   | 78,54   | 2,05   | 1512,70 | 1591,24 | 795,62  | Não suportal |
| 16,6 | Argila siltosa | 0,51  | 510   | 91,56   | 50,07   | 7,19   | 1519,89 | 1569,96 | 784,98  | Não suportal |
| 16,8 | Argila siltosa | 0,51  | 510   | 39,24   | 50,07   | 3,08   | 1522,97 | 1573,04 | 786,52  | Não suportal |
| 17   | Argila siltosa | 1,59  | 1590  | 19,62   | 156,10  | 1,54   | 1524,51 | 1680,61 | 840,31  | Não suportal |
| 17,2 | Argila siltosa | 1,3   | 1300  | 19,62   | 127,63  | 1,54   | 1526,06 | 1653,68 | 826,84  | Não suportal |
| 17,4 | Argila siltosa | 1,2   | 1200  | 431,64  | 117,81  | 33,90  | 1559,96 | 1677,77 | 838,88  | Não suportal |
| 17,6 | Argila siltosa | 23,47 | 23470 | 412,02  | 2304,16 | 32,36  | 1592,32 | 3184,63 | 1592,32 | Suportal     |
| 17,8 | Argila siltosa | 24,46 | 24460 | 1007,16 | 2401,35 | 79,10  | 1671,42 | 3342,84 | 1671,42 | Suportal     |
| 18   | Argila siltosa | 17,99 | 17990 | 699,78  | 1766,16 | 54,96  | 1726,38 | 3452,76 | 1726,38 | Suportal     |
| 18,2 | Argila siltosa | 33,49 | 33490 | 1438,8  | 3287,87 | 113,00 | 1839,38 | 3678,76 | 1839,38 | Suportal     |
| 18,4 | Argila siltosa | 45,36 | 45360 | 438,18  | 4453,21 | 34,41  | 1873,80 | 3747,59 | 1873,80 | Suportal     |
| 18,6 | Areia          | 31,92 | 31920 | 261,6   | 3133,74 | 20,55  | 1894,34 | 3788,69 | 1894,34 | Suportal     |
| 18,8 | Areia          | 6,13  | 6130  | 222,36  | 601,81  | 17,46  | 1911,81 | 2513,62 | 1256,81 | Não suportal |
| 19   | Areia          | 3,68  | 3680  | 111,18  | 361,28  | 8,73   | 1920,54 | 2281,82 | 1140,91 | Não suportal |

|      |                      |       |       |         |         |       |         |         |         |              |
|------|----------------------|-------|-------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|--------------|
| 19,2 | Areia                | 6,62  | 6620  | 294,3   | 649,92  | 23,11 | 1943,65 | 2593,57 | 1296,79 | Suporta!     |
| 19,4 | Areia                | 5,64  | 5640  | 340,08  | 553,71  | 26,71 | 1970,36 | 2524,07 | 1262,03 | Não suporta! |
| 19,6 | Areia                | 13,2  | 13200 | 163,5   | 1295,91 | 12,84 | 1983,20 | 3279,11 | 1639,56 | Suporta!     |
| 19,8 | Areia                | 6,14  | 6140  | 222,36  | 602,79  | 17,46 | 2000,67 | 2603,46 | 1301,73 | Suporta!     |
| 20   | Areia                | 7,51  | 7510  | 111,18  | 737,29  | 8,73  | 2009,40 | 2746,69 | 1373,35 | Suporta!     |
| 20,2 | Silte areno-argiloso | 17,03 | 17030 | 732,48  | 1671,92 | 57,53 | 2066,93 | 3738,85 | 1869,42 | Suporta!     |
| 20,4 | Silte areno-argiloso | 7,03  | 7030  | 235,44  | 690,17  | 18,49 | 2085,42 | 2775,59 | 1387,79 | Suporta!     |
| 20,6 | Silte areno-argiloso | 6,34  | 6340  | 228,9   | 622,43  | 17,98 | 2103,40 | 2725,83 | 1362,91 | Suporta!     |
| 20,8 | Silte areno-argiloso | 6,74  | 6740  | 228,9   | 661,70  | 17,98 | 2121,38 | 2783,07 | 1391,54 | Suporta!     |
| 21   | Silte areno-argiloso | 7,43  | 7430  | 274,68  | 729,44  | 21,57 | 2142,95 | 2872,39 | 1436,19 | Suporta!     |
| 21,2 | Silte areno-argiloso | 7,92  | 7920  | 327     | 777,54  | 25,68 | 2168,63 | 2946,18 | 1473,09 | Suporta!     |
| 21,4 | Silte areno-argiloso | 8,61  | 8610  | 320,46  | 845,28  | 25,17 | 2193,80 | 3039,09 | 1519,54 | Suporta!     |
| 21,6 | Silte areno-argiloso | 8,32  | 8320  | 366,24  | 816,81  | 28,76 | 2222,57 | 3039,38 | 1519,69 | Suporta!     |
| 21,8 | Silte areno-argiloso | 7,93  | 7930  | 183,12  | 778,53  | 14,38 | 2236,95 | 3015,47 | 1507,74 | Suporta!     |
| 22   | Silte areno-argiloso | 7,83  | 7830  | 170,04  | 768,71  | 13,35 | 2250,30 | 3019,01 | 1509,51 | Suporta!     |
| 22,2 | Silte areno-argiloso | 8,52  | 8520  | 300,84  | 836,45  | 23,63 | 2273,93 | 3110,38 | 1555,19 | Suporta!     |
| 22,4 | Silte areno-argiloso | 9,11  | 9110  | 392,4   | 894,37  | 30,82 | 2304,75 | 3199,12 | 1599,56 | Suporta!     |
| 22,6 | Silte areno-argiloso | 10,1  | 10100 | 379,32  | 991,57  | 29,79 | 2334,54 | 3326,11 | 1663,05 | Suporta!     |
| 22,8 | Silte areno-argiloso | 6,57  | 6570  | 209,28  | 645,01  | 16,44 | 2350,98 | 2995,93 | 1497,99 | Suporta!     |
| 23   | Silte areno-argiloso | 10,5  | 10500 | 98,1    | 1030,84 | 7,70  | 2358,68 | 3389,52 | 1694,76 | Suporta!     |
| 23,2 | Silte areno-argiloso | 10,3  | 10300 | 1203,36 | 1011,20 | 94,51 | 2453,19 | 3464,39 | 1732,20 | Suporta!     |
| 23,4 | Silte areno-argiloso | 15,21 | 15210 | 542,82  | 1493,24 | 42,63 | 2495,83 | 3989,07 | 1994,53 | Suporta!     |
| 23,6 | Silte areno-argiloso | 29,24 | 29240 | 686,7   | 2870,63 | 53,93 | 2549,76 | 5099,52 | 2549,76 | Suporta!     |
| 23,8 | Silte areno-argiloso | 25,12 | 25120 | 791,34  | 2466,15 | 62,15 | 2611,91 | 5078,06 | 2539,03 | Suporta!     |
| 24   | Silte areno-argiloso | 46,51 | 46510 | 640,92  | 4566,11 | 50,34 | 2662,25 | 5324,50 | 2662,25 | Suporta!     |
| 24,2 | Silte areno-argiloso | 58,87 | 58870 | 0       | 5779,55 | 0,00  | 2662,25 | 5324,50 | 2662,25 | Suporta!     |

## CPT 3

| Prof. (m) | Tipo de solo         | qc (Mpa) | qc (Kpa) | fs (Kpa) | Rp (kN) | RI (kN) | RI acumulado (kN) | Rrup (kN) | Radm (kN) | Assentamento |
|-----------|----------------------|----------|----------|----------|---------|---------|-------------------|-----------|-----------|--------------|
| 0,2       | Areia silto-argilosa | 0        | 0        | 0        | 0,00    | 0,00    | 0,00              | 0,00      | 0,00      | Não suporta! |
| 0,4       | Areia silto-argilosa | 4,03     | 4030     | 78,48    | 395,64  | 6,16    | 6,16              | 12,33     | 6,16      | Não suporta! |
| 0,6       | Areia silto-argilosa | 2,07     | 2070     | 124,26   | 203,22  | 9,76    | 15,92             | 31,85     | 15,92     | Não suporta! |
| 0,8       | Areia silto-argilosa | 1,97     | 1970     | 65,4     | 193,40  | 5,14    | 21,06             | 42,12     | 21,06     | Não suporta! |
| 1         | Areia silto-argilosa | 2,17     | 2170     | 71,94    | 213,04  | 5,65    | 26,71             | 53,42     | 26,71     | Não suporta! |
| 1,2       | Areia silto-argilosa | 2,86     | 2860     | 85,02    | 280,78  | 6,68    | 33,39             | 66,77     | 33,39     | Não suporta! |
| 1,4       | Areia silto-argilosa | 2,47     | 2470     | 52,32    | 242,49  | 4,11    | 37,50             | 74,99     | 37,50     | Não suporta! |
| 1,6       | Areia silto-argilosa | 2,37     | 2370     | 45,78    | 232,67  | 3,60    | 41,09             | 82,18     | 41,09     | Não suporta! |
| 1,8       | Areia silto-argilosa | 2,28     | 2280     | 111,18   | 223,84  | 8,73    | 49,82             | 99,65     | 49,82     | Não suporta! |
| 2         | Areia silto-argilosa | 2,67     | 2670     | 111,18   | 262,13  | 8,73    | 58,56             | 117,11    | 58,56     | Não suporta! |
| 2,2       | Areia silto-argilosa | 2,28     | 2280     | 78,48    | 223,84  | 6,16    | 64,72             | 129,44    | 64,72     | Não suporta! |
| 2,4       | Areia silto-argilosa | 2,09     | 2090     | 45,78    | 205,19  | 3,60    | 68,32             | 136,63    | 68,32     | Não suporta! |
| 2,6       | Areia silto-argilosa | 2,29     | 2290     | 45,78    | 224,82  | 3,60    | 71,91             | 143,82    | 71,91     | Não suporta! |
| 2,8       | Areia silto-argilosa | 2,88     | 2880     | 39,24    | 282,74  | 3,08    | 74,99             | 149,99    | 74,99     | Não suporta! |
| 3         | Areia silto-argilosa | 2,39     | 2390     | 65,4     | 234,64  | 5,14    | 80,13             | 160,26    | 80,13     | Não suporta! |
| 3,2       | Areia silto-argilosa | 2,89     | 2890     | 104,64   | 283,73  | 8,22    | 88,35             | 176,70    | 88,35     | Não suporta! |
| 3,4       | Areia silto-argilosa | 3,28     | 3280     | 39,24    | 322,01  | 3,08    | 91,43             | 182,86    | 91,43     | Não suporta! |
| 3,6       | Areia silto-argilosa | 2,89     | 2890     | 117,72   | 283,73  | 9,25    | 100,68            | 201,35    | 100,68    | Não suporta! |
| 3,8       | Areia silto-argilosa | 3,68     | 3680     | 32,7     | 361,28  | 2,57    | 103,24            | 206,49    | 103,24    | Não suporta! |
| 4         | Areia silto-argilosa | 3,39     | 3390     | 78,48    | 332,81  | 6,16    | 109,41            | 218,82    | 109,41    | Não suporta! |
| 4,2       | Areia silto-argilosa | 2,90     | 2900     | 71,94    | 284,71  | 5,65    | 115,06            | 230,12    | 115,06    | Não suporta! |
| 4,4       | Areia silto-argilosa | 3,49     | 3490     | 52,32    | 342,63  | 4,11    | 119,17            | 238,33    | 119,17    | Não suporta! |
| 4,6       | Areia siltosa        | 4,47     | 4470     | 45,78    | 438,84  | 3,60    | 122,76            | 245,52    | 122,76    | Não suporta! |
| 4,8       | Areia siltosa        | 4,38     | 4380     | 222,36   | 430,01  | 17,46   | 140,23            | 280,45    | 140,23    | Não suporta! |
| 5         | Areia siltosa        | 6,15     | 6150     | 255,06   | 603,77  | 20,03   | 160,26            | 320,52    | 160,26    | Não suporta! |
| 5,2       | Areia siltosa        | 6,64     | 6640     | 287,76   | 651,88  | 22,60   | 182,86            | 365,72    | 182,86    | Não suporta! |
| 5,4       | Areia siltosa        | 6,84     | 6840     | 241,98   | 671,52  | 19,01   | 201,86            | 403,73    | 201,86    | Não suporta! |
| 5,6       | Areia siltosa        | 7,53     | 7530     | 91,56    | 739,26  | 7,19    | 209,06            | 418,11    | 209,06    | Não suporta! |
| 5,8       | Areia siltosa        | 9,10     | 9100     | 111,18   | 893,39  | 8,73    | 217,79            | 435,58    | 217,79    | Não suporta! |

|      |                |       |       |         |         |       |         |         |         |              |
|------|----------------|-------|-------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|--------------|
| 6    | Areia siltosa  | 11,46 | 11460 | 261,6   | 1125,08 | 20,55 | 238,33  | 476,67  | 238,33  | Não suporta! |
| 6,2  | Areia siltosa  | 13,91 | 13910 | 497,04  | 1365,61 | 39,04 | 277,37  | 554,74  | 277,37  | Não suporta! |
| 6,4  | Areia siltosa  | 13,03 | 13030 | 536,28  | 1279,22 | 42,12 | 319,49  | 638,98  | 319,49  | Não suporta! |
| 6,6  | Areia siltosa  | 3,13  | 3130  | 58,86   | 307,29  | 4,62  | 324,11  | 631,40  | 315,70  | Não suporta! |
| 6,8  | Areia siltosa  | 5,38  | 5380  | 176,58  | 528,18  | 13,87 | 337,98  | 675,96  | 337,98  | Não suporta! |
| 7    | Areia siltosa  | 4,6   | 4600  | 189,66  | 451,60  | 14,90 | 352,88  | 705,76  | 352,88  | Não suporta! |
| 7,2  | Areia siltosa  | 4,41  | 4410  | 26,16   | 432,95  | 2,05  | 354,93  | 709,86  | 354,93  | Não suporta! |
| 7,4  | Areia siltosa  | 9,61  | 9610  | 333,54  | 943,46  | 26,20 | 381,13  | 762,26  | 381,13  | Não suporta! |
| 7,6  | Areia siltosa  | 9,22  | 9220  | 189,66  | 905,17  | 14,90 | 396,02  | 792,05  | 396,02  | Não suporta! |
| 7,8  | Areia siltosa  | 18,54 | 18540 | 490,5   | 1820,16 | 38,52 | 434,55  | 869,10  | 434,55  | Não suporta! |
| 8    | Areia siltosa  | 25,12 | 25120 | 654     | 2466,15 | 51,37 | 485,91  | 971,83  | 485,91  | Não suporta! |
| 8,2  | Areia siltosa  | 21,39 | 21390 | 130,8   | 2099,96 | 10,27 | 496,19  | 992,37  | 496,19  | Não suporta! |
| 8,4  | Areia siltosa  | 17,47 | 17470 | 758,64  | 1715,11 | 59,58 | 555,77  | 1111,54 | 555,77  | Não suporta! |
| 8,6  | Areia siltosa  | 14,43 | 14430 | 143,88  | 1416,66 | 11,30 | 567,07  | 1134,14 | 567,07  | Não suporta! |
| 8,8  | Areia siltosa  | 9,14  | 9140  | 353,16  | 897,32  | 27,74 | 594,81  | 1189,61 | 594,81  | Não suporta! |
| 9    | Areia siltosa  | 6,79  | 6790  | 340,08  | 666,61  | 26,71 | 621,52  | 1243,03 | 621,52  | Não suporta! |
| 9,2  | Areia siltosa  | 11,2  | 11200 | 477,42  | 1099,56 | 37,50 | 659,01  | 1318,03 | 659,01  | Não suporta! |
| 9,4  | Areia siltosa  | 9,34  | 9340  | 536,28  | 916,95  | 42,12 | 701,13  | 1402,27 | 701,13  | Não suporta! |
| 9,6  | Areia siltosa  | 7,97  | 7970  | 91,56   | 782,45  | 7,19  | 708,32  | 1416,65 | 708,32  | Não suporta! |
| 9,8  | Areia siltosa  | 7,19  | 7190  | 392,4   | 705,88  | 30,82 | 739,14  | 1445,02 | 722,51  | Não suporta! |
| 10   | Areia siltosa  | 6,9   | 6900  | 346,62  | 677,41  | 27,22 | 766,37  | 1443,77 | 721,89  | Não suporta! |
| 10,2 | Areia siltosa  | 2,78  | 2780  | 294,3   | 272,93  | 23,11 | 789,48  | 1062,41 | 531,20  | Não suporta! |
| 10,4 | Areia siltosa  | 2,78  | 2780  | 71,94   | 272,93  | 5,65  | 795,13  | 1068,06 | 534,03  | Não suporta! |
| 10,6 | Areia siltosa  | 3,08  | 3080  | 156,96  | 302,38  | 12,33 | 807,46  | 1109,84 | 554,92  | Não suporta! |
| 10,8 | Areia siltosa  | 4,85  | 4850  | 189,66  | 476,15  | 14,90 | 822,35  | 1298,50 | 649,25  | Não suporta! |
| 11   | Areia siltosa  | 1,91  | 1910  | 228,9   | 187,51  | 17,98 | 840,33  | 1027,85 | 513,92  | Não suporta! |
| 11,2 | Areia siltosa  | 8,87  | 8870  | 150,42  | 870,81  | 11,81 | 852,15  | 1704,29 | 852,15  | Não suporta! |
| 11,4 | Areia siltosa  | 13,59 | 13590 | 372,78  | 1334,20 | 29,28 | 881,42  | 1762,85 | 881,42  | Não suporta! |
| 11,6 | Areia siltosa  | 15,94 | 15940 | 196,2   | 1564,91 | 15,41 | 896,83  | 1793,67 | 896,83  | Não suporta! |
| 11,8 | Areia siltosa  | 14,28 | 14280 | 752,1   | 1401,94 | 59,07 | 955,90  | 1911,81 | 955,90  | Não suporta! |
| 12   | Areia siltosa  | 9,28  | 9280  | 529,74  | 911,06  | 41,61 | 997,51  | 1908,57 | 954,29  | Não suporta! |
| 12,2 | Areia siltosa  | 6,53  | 6530  | 385,86  | 641,08  | 30,31 | 1027,81 | 1668,90 | 834,45  | Não suporta! |
| 12,4 | Areia siltosa  | 5,85  | 5850  | 268,14  | 574,32  | 21,06 | 1048,87 | 1623,20 | 811,60  | Não suporta! |
| 12,6 | Areia siltosa  | 6,64  | 6640  | 379,32  | 651,88  | 29,79 | 1078,67 | 1730,55 | 865,27  | Não suporta! |
| 12,8 | Areia siltosa  | 4,68  | 4680  | 313,92  | 459,46  | 24,66 | 1103,32 | 1562,78 | 781,39  | Não suporta! |
| 13   | Areia siltosa  | 8,9   | 8900  | 431,64  | 873,76  | 33,90 | 1137,22 | 2010,98 | 1005,49 | Não suporta! |
| 13,2 | Areia siltosa  | 7,43  | 7430  | 346,62  | 729,44  | 27,22 | 1164,45 | 1893,88 | 946,94  | Não suporta! |
| 13,4 | Areia siltosa  | 6,84  | 6840  | 346,62  | 671,52  | 27,22 | 1191,67 | 1863,18 | 931,59  | Não suporta! |
| 13,6 | Areia siltosa  | 10,08 | 10080 | 379,32  | 989,60  | 29,79 | 1221,46 | 2211,06 | 1105,53 | Não suporta! |
| 13,8 | Areia siltosa  | 6,94  | 6940  | 425,1   | 681,33  | 33,39 | 1254,85 | 1936,18 | 968,09  | Não suporta! |
| 14   | Areia siltosa  | 6,56  | 6560  | 320,46  | 644,03  | 25,17 | 1280,02 | 1924,04 | 962,02  | Não suporta! |
| 14,2 | Areia siltosa  | 9,7   | 9700  | 510,12  | 952,30  | 40,06 | 1320,08 | 2272,38 | 1136,19 | Suporta!     |
| 14,4 | Areia siltosa  | 8,62  | 8620  | 536,28  | 846,27  | 42,12 | 1362,20 | 2208,47 | 1104,23 | Não suporta! |
| 14,6 | Areia siltosa  | 6,46  | 6460  | 45,78   | 634,21  | 3,60  | 1365,80 | 2000,01 | 1000,00 | Não suporta! |
| 14,8 | Areia siltosa  | 9,02  | 9020  | 549,36  | 885,54  | 43,15 | 1408,94 | 2294,48 | 1147,24 | Suporta!     |
| 15   | Areia siltosa  | 4,41  | 4410  | 379,32  | 432,95  | 29,79 | 1438,73 | 1871,69 | 935,84  | Não suporta! |
| 15,2 | Areia siltosa  | 8,63  | 8630  | 457,8   | 847,25  | 35,96 | 1474,69 | 2321,94 | 1160,97 | Suporta!     |
| 15,4 | Areia siltosa  | 6,18  | 6180  | 405,48  | 606,72  | 31,85 | 1506,54 | 2113,26 | 1056,63 | Não suporta! |
| 15,6 | Areia siltosa  | 3,44  | 3440  | 111,18  | 337,72  | 8,73  | 1515,27 | 1852,99 | 926,49  | Não suporta! |
| 15,8 | Argila siltosa | 1,18  | 1180  | 52,32   | 115,85  | 4,11  | 1519,38 | 1635,22 | 817,61  | Não suporta! |
| 16   | Argila siltosa | 1,68  | 1680  | 39,24   | 164,93  | 3,08  | 1522,46 | 1687,39 | 843,70  | Não suporta! |
| 16,2 | Argila siltosa | 1,68  | 1680  | 45,78   | 164,93  | 3,60  | 1526,06 | 1690,99 | 845,49  | Não suporta! |
| 16,4 | Argila siltosa | 1,78  | 1780  | 52,32   | 174,75  | 4,11  | 1530,16 | 1704,92 | 852,46  | Não suporta! |
| 16,6 | Argila siltosa | 1,78  | 1780  | 65,4    | 174,75  | 5,14  | 1535,30 | 1710,05 | 855,03  | Não suporta! |
| 16,8 | Argila siltosa | 2,08  | 2080  | 85,02   | 204,20  | 6,68  | 1541,98 | 1746,18 | 873,09  | Não suporta! |
| 17   | Argila siltosa | 2,38  | 2380  | 104,64  | 233,66  | 8,22  | 1550,20 | 1783,85 | 891,93  | Não suporta! |
| 17,2 | Argila siltosa | 1,99  | 1990  | 19,62   | 195,37  | 1,54  | 1551,74 | 1747,11 | 873,55  | Não suporta! |
| 17,4 | Argila siltosa | 3,85  | 3850  | 39,24   | 377,97  | 3,08  | 1554,82 | 1932,79 | 966,40  | Não suporta! |
| 17,6 | Argila siltosa | 1,89  | 1890  | 117,72  | 185,55  | 9,25  | 1564,07 | 1749,62 | 874,81  | Não suporta! |
| 17,8 | Areia          | 7,49  | 7490  | 150,42  | 735,33  | 11,81 | 1575,88 | 2311,21 | 1155,60 | Suporta!     |
| 18   | Areia          | 13,57 | 13570 | 320,46  | 1332,23 | 25,17 | 1601,05 | 2933,28 | 1466,64 | Suporta!     |
| 18,2 | Areia          | 11,32 | 11320 | 490,5   | 1111,34 | 38,52 | 1639,57 | 2750,91 | 1375,46 | Suporta!     |
| 18,4 | Areia          | 14,85 | 14850 | 1072,56 | 1457,90 | 84,24 | 1723,81 | 3181,71 | 1590,85 | Suporta!     |
| 18,6 | Areia          | 61,84 | 61840 | 640,92  | 6071,13 | 50,34 | 1774,15 | 3548,30 | 1774,15 | Suporta!     |
| 18,8 | Areia          | 81,66 | 81660 | 0       | 8016,95 | 0,00  | 1774,15 | 3548,30 | 1774,15 | Suporta!     |

## ANEXO C – Códigos

### Script 6

```

1 - #####
2 #             INSTALAÇÃO E CARREGAMENTO DE PACOTES NECESSÁRIOS
3 - #####
4 #Pacotes utilizados
5 pacotes <- c("plotly","tidyverse","knitr","kableExtra",
6             "splines","reshape2","PerformanceAnalytics","metan","correlation",
7             "see","ggraph","nortest","rgl","car","olsrr","jtools","ggstance",
8             "magick","cowplot","Rcpp","yardstick", "readxl")
9
10 - if(sum(as.numeric(!pacotes %in% installed.packages())) != 0){
11   instalador <- pacotes[!pacotes %in% installed.packages()]
12   for(i in 1:length(instalador)) {
13     install.packages(instalador, dependencies = T)
14     break()}
15   sapply(pacotes, require, character = T)
16 } else {
17   sapply(pacotes, require, character = T)
18 }
19
20
21
22 #loadfile
23
24 library("readxl")
25
26 # xls files
27 torquedataN <- read_excel("dados_treino.xlsx")
28
29 #Estatísticas univariadas
30 summary(torquedataN)
31
32 #Estimando a Regressão Múltipla ()
33 modelo_A6 <- lm(formula = RadmN ~ torque,
34                 data = torquedataN)
35

```



```

35 |
36 summary(modelo_A6)
37
38 #Estimando a Regressão Múltipla ()
39 modelo_B6 <- lm(formula = RadMN ~ torque + Prof,
40                 data = torquedataN)
41
42 summary(modelo_B6)
43
44 #Realizando o teste de shapiro francia para verificar se seguem a distr. normal
45 sf.test(modelo_A6$residuals)
46
47 sf.test(modelo_B6$residuals)
48 #Não seguem
49 #Fazendo então boxcox
50 #Para calcular o lambda de Box-Cox
51 lambda_BCN <- powerTransform(torquedataN$RadMN) #função powerTransform do pacote
52 lambda_BCN
53
54 #Inserindo o lambda de Box-Cox na base de dados para a estimação de um novo mod
55 torquedataN$bc_RadMN <- (((torquedataN$RadMN ^ lambda_BCN$lambda) - 1) /
56                        lambda_BCN$lambda)
57
58 ▾ #####
59 modelo_D6 <- lm(formula = bc_RadMN ~ torque,
60                 data = torquedataN)
61
62 summary(modelo_D6)
63
64 export_summs(modelo_A6, modelo_D6, scale = T, digits = 4)
65
66 ▾ #####
67 sf.test(modelo_D6$residuals)
68
69 ▾ #####
70
71 modelo_E6 <- lm(formula = bc_RadMN ~ torque + Prof,
72                 data = torquedataN)
73
74 summary(modelo_E6)
75
76 export_summs(modelo_A6, modelo_B6, modelo_D6, modelo_E6, scale = T, digits = 4)
77
78 ▾ #####
79 sf.test(modelo_E6$residuals)
80
81 ▾ #####
82 modelo_F6 <- lm(formula = bc_RadMN ~ torque + Prof + qc,
83                 data = torquedataN)
84
85 summary(modelo_F6)
86
87 export_summs(modelo_A6, modelo_D6, modelo_E6, modelo_F6, scale = T, digits = 4)
88
89 #Shapiro-Francia
90 sf.test(modelo_F6$residuals)
91
92
93 #Plotando os resíduos do modelo F
94 torquedata %>%
95   mutate(residuos = modelo_F6$residuals) %>%
96   ggplot(aes(x = residuos)) +
97   geom_histogram(color = "white",
98                 fill = "#440154FF",
99                 bins = 30,
100                alpha = 0.6) +
101   labs(x = "Resíduos",
102        y = "Frequência") +
103   theme_bw()
104

```

```

105 #Acréscendo uma curva normal teórica para comparação entre as distribuições
106 torquedata %>%
107   mutate(residuos = modelo_F6$residuals) %>%
108   ggplot(aes(x = residuos)) +
109     geom_histogram(aes(y = ..density..),
110                   color = "white",
111                   fill = "#440154FF",
112                   bins = 30,
113                   alpha = 0.6) +
114     stat_function(fun = dnorm,
115                 args = list(mean = mean(modelo_F6$residuals),
116                             sd = sd(modelo_F6$residuals)),
117                 size = 2, color = "grey30") +
118     scale_color_manual(values = "grey50") +
119     labs(x = "Resíduos",
120          y = "Frequência") +
121     theme_bw()
122
123 #Multicolinearidade VIF
124
125 ols_vif_tol(modelo_F6)
126
127 #Heterocedasticidade
128 ols_test_breusch_pagan(modelo_F6)
129
130 #####
131 modelo_G6 <- lm(formula = bc_RadMN ~ Prof + qc,
132                data = torquedataN)
133
134 summary(modelo_G6)
135
136 export_summs(modelo_A6, modelo_B6, modelo_D6, modelo_E6, modelo_F6, modelo_G6, sc
137
138
139 #####
140
141 modelo_H6 <- lm(formula = bc_RadMN ~ torque + qc,
142                data = torquedataN)
143
144 #Parâmetros do modelo
145 summary(modelo_H6)
146
147
148 #prevendo modelo:
149 # xls files
150 torquetesten <- read_excel("dados_teste.xlsx")
151
152 #prevendo modelo D:
153 torquetesten$bc_RadMN_hat_D <- predict(modelo_D7, torquetesten)
154 torquetesten$RadMN_hat_D <- (((torquetesten$bc_RadMN_hat_D*lambda_BCN$lambda) + 1
155
156 #Plotando os dados do modelo D
157 ggplot(torquetesten, aes(x=RadMN, y=RadMN_hat_D)) +
158   geom_point(size=2, shape=18) +
159   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
160   labs(x = "Radm* Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
161   ggtitle("Modelo D - Calculado x Estimado")
162
163
164 #prevendo modelo E:
165 torquetesten$bc_RadMN_hat_E <- predict(modelo_E7, torquetesten)
166 torquetesten$RadMN_hat_E <- (((torquetesten$bc_RadMN_hat_E*lambda_BCN$lambda) + 1
167
168 #Plotando os dados do modelo D e E
169 ggplot(torquetesten, aes(x=RadMN, y=RadMN_hat_D)) +
170   geom_point(size=2, shape=18) +
171   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE)+
172   labs(x = "Radm* Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +

```

```

173 ggtitle("Modelo D - Calculado x Estimado") +
174 ggplot(torquetesten, aes(x=RadmN, y=RadmN_hat_E)) +
175 geom_point(size=2, shape=18) +
176 geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
177 labs(x = "Radm* Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
178 ggtitle("Modelo E - Calculado x Estimado")
179
180
181 #prevendo modelo F:
182 torquetesten$bc_RadmN_hat_F <- predict(modelo_F7, torquetesten)
183 torquetesten$RadmN_hat_F <- (((torquetesten$bc_RadmN_hat_F*lambda_BCN$lambda) + 1
184
185 #Plotando os dados do modelo D, E e F
186 ggplot(torquetesten, aes(x=RadmN, y=RadmN_hat_D)) +
187   geom_point(size=2, shape=18) +
188   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE)+
189   labs(x = "Radm* Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
190   ggtitle("Modelo D - Calculado x Estimado") +
191   ggplot(torquetesten, aes(x=RadmN, y=RadmN_hat_E)) +
192   geom_point(size=2, shape=18) +
193   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE)+
194   labs(x = "Radm* Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
195   ggtitle("Modelo E - Calculado x Estimado") +
196   ggplot(torquetesten, aes(x=RadmN, y=RadmN_hat_F)) +
197   geom_point(size=2, shape=18) +
198   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
199   labs(x = "Radm* Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
200   ggtitle("Modelo F - Calculado x Estimado")
201
202
203
204 #prevendo modelo G:
205 torquetesten$bc_RadmN_hat_G <- predict(modelo_G7, torquetesten)
206 torquetesten$RadmN_hat_G <- (((torquetesten$bc_RadmN_hat_G*lambda_BCN$lambda) + 1
207
208 #Plotando os dados do modelo D, E, F e G
209 ggplot(torquetesten, aes(x=RadmN, y=RadmN_hat_D)) +
210   geom_point(size=2, shape=18) +
211   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE)+
212   labs(x = "Radm* Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
213   ggtitle("Modelo D - Calculado x Estimado") +
214   ggplot(torquetesten, aes(x=RadmN, y=RadmN_hat_E)) +
215   geom_point(size=2, shape=18) +
216   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE)+
217   labs(x = "Radm* Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
218   ggtitle("Modelo E - Calculado x Estimado") +
219   ggplot(torquetesten, aes(x=RadmN, y=RadmN_hat_F)) +
220   geom_point(size=2, shape=18) +
221   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
222   labs(x = "Radm* Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
223   ggtitle("Modelo F - Calculado x Estimado") +
224   ggplot(torquetesten, aes(x=RadmN, y=RadmN_hat_G)) +
225   geom_point(size=2, shape=18) +
226   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
227   labs(x = "Radm* Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
228   ggtitle("Modelo G - Calculado x Estimado")
229
230
231 #calculando os MSE para os modelos
232
233 MSE_D6 <- mean(((torquetesten$RadmN-torquetesten$RadmN_hat_D) ^ 2))
234 MSE_D6
235
236 MSE_E6 <- mean(((torquetesten$RadmN-torquetesten$RadmN_hat_E) ^ 2))
237 MSE_E6
238
239 MSE_F6 <- mean(((torquetesten$RadmN-torquetesten$RadmN_hat_F) ^ 2))
240 MSE_F6
241
242 MSE_G6 <- mean(((torquetesten$RadmN-torquetesten$RadmN_hat_G) ^ 2))

```

```
243 MSE_G6
244
245
246 #calculando os RÂ² para os modelos
247
248
249 #Modelo D
250 rsq(torquetesten, torquetesten$Radmn, torquetesten$Radmn_hat_D, na_rm = TRUE)
251
252
253 #Modelo E
254 rsq(torquetesten, torquetesten$Radmn, torquetesten$Radmn_hat_E, na_rm = TRUE)
255
256
257 #Modelo F
258 rsq(torquetesten, torquetesten$Radmn, torquetesten$Radmn_hat_F, na_rm = TRUE)
259
260
261 #Modelo G
262 rsq(torquetesten, torquetesten$Radmn, torquetesten$Radmn_hat_G, na_rm = TRUE)
263
```

## Script 7

```

1 < #####
2 #           INSTALAÇÃO E CARREGAMENTO DE PACOTES NECESSÁRIOS
3 < #####
4 #Pacotes utilizados
5 pacotes <- c("plotly","tidyverse","knitr","kableExtra",
6             "splines","reshape2","PerformanceAnalytics","metan","correlation",
7             "see","ggraph","nortest","rgl","car","olsrr","jtools","ggstance",
8             "magick","cowplot","Rcpp","yardstick", "readxl")
9
10 < if(sum(as.numeric(!pacotes %in% installed.packages())) != 0){
11     instalador <- pacotes[!pacotes %in% installed.packages()]
12 <     for(i in 1:length(instalador)) {
13         install.packages(instalador, dependencies = T)
14 <     break()}
15     sapply(pacotes, require, character = T)
16 < } else {
17     sapply(pacotes, require, character = T)
18 < }
19
20
21 #loadfile
22
23 library("readxl")
24
25 # xls files
26 torquedata <- read_excel("dados_treino.xlsx")
27
28 torquedata %>%
29     kable() %>%
30     kable_styling(bootstrap_options = "striped",
31                 full_width = F,
32                 font_size = 12)
33
34 #Estatísticas univariadas
35 summarv(torquedata)
36
37 #Estimando a Regressão Múltipla ()
38 modelo_A7 <- lm(formula = Radm ~ torque,
39                data = torquedata)
40
41 summary(modelo_A7)
42
43 #Estimando a Regressão Múltipla (BOM!!!!)
44 modelo_B7 <- lm(formula = Radm ~ torque + Prof,
45                data = torquedata)
46
47 summary(modelo_B7)
48
49 #####3
50
51 #fazendo boxcox
52 #Para calcular o lambda de Box-Cox
53 lambda_BC <- powerTransform(torquedata$Radm) #função powerTransform do pacote c
54 lambda_BC
55
56 #Inserindo o lambda de Box-Cox na base de dados para a estimação de um novo mod
57 torquedata$bc_Radm <- (((torquedata$Radm ^ lambda_BC$lambda) - 1) /
58                      lambda_BC$lambda)
59
60 < #####
61 modelo_D7 <- lm(formula = bc_Radm ~ torque,
62                data = torquedata)
63
64 summary(modelo_D7)
65
66 export_summs(modelo_A7, modelo_B7, modelo_D7, scale = T, digits = 4)
67
68 < #####

```

```

69
70 modelo_E7 <- lm(formula = bc_Radm ~ torque + Prof,
71                 data = torquedata)
72
73 summary(modelo_E7)
74
75 export_summs(modelo_A7, modelo_B7, modelo_D7, modelo_E7, scale = T, digits = 4)
76
77 #Shapiro-Francia: n > 30
78 sf.test(modelo_E7$residuals) #função sf.test do pacote nortest
79
80
81 #Plotando os resíduos do modelo E
82 torquedata %>%
83   mutate(resíduos = modelo_E7$residuals) %>%
84   ggplot(aes(x = resíduos)) +
85   geom_histogram(color = "white",
86                 fill = "#440154FF",
87                 bins = 30,
88                 alpha = 0.6) +
89   labs(x = "Resíduos",
90        y = "Frequência") +
91   theme_bw()
92
93 #Acrescentando uma curva normal teórica para comparação entre as distribuições
94 torquedata %>%
95   mutate(resíduos = modelo_E7$residuals) %>%
96   ggplot(aes(x = resíduos)) +
97   geom_histogram(aes(y = ..density..),
98                 color = "white",
99                 fill = "#440154FF",
100                bins = 30,
101                alpha = 0.6) +
102   stat_function(fun = dnorm,
103                args = list(mean = mean(modelo_E7$residuals),
104                              sd = sd(modelo_E7$residuals)),
105                size = 2, color = "grey30") +
106   scale_color_manual(values = "grey50") +
107   labs(x = "Resíduos",
108        y = "Frequência") +
109   theme_bw()
110
111
112 #Diagnóstico de multicolinearidade (Variance Inflation Factor e Tolerance)
113 ols_vif_tol(modelo_E7)
114 #função ols_vif_tol do pacote olsrr
115
116 #####DIAGNÓSTICO DE HETEROCEDASTICIDADE
117
118 #Teste de Breusch-Pagan para diagnóstico de heterocedasticidade
119 ols_test_breusch_pagan(modelo_E7)
120
121 #função ols_test_breusch_pagan do pacote olsrr
122 #Presença de heterocedasticidade -> omissão de variável(is) explicativa(s) rel
123
124 #H0 do teste: ausência de heterocedasticidade.
125 #H1 do teste: heterocedasticidade, ou seja, correlação entre resíduos e uma ou
126 #variáveis explicativas, o que indica omissão de variável relevante!
127
128
129 #####
130
131 modelo_F7 <- lm(formula = bc_Radm ~ torque + Prof + qc,
132                 data = torquedata)
133
134 summary(modelo_F7)
135
136 export_summs(modelo_A7, modelo_B7, modelo_D7, modelo_E7, modelo_F7, scale = T, di
137

```

```

138 #Shapiro-Francia|
139 sf.test(modelo_F7$residuals) #funçãofsf.test do pacote nortest
140
141
142 #Plotando os resãduos do modelo F
143 torquedata %>%
144   mutate(residuos = modelo_F7$residuals) %>%
145   ggplot(aes(x = residuos)) +
146     geom_histogram(color = "white",
147                   fill = "#440154FF",
148                   bins = 30,
149                   alpha = 0.6) +
150   labs(x = "Resãduos",
151        y = "Frequãncia") +
152   theme_bw()
153
154 #Acrescentando uma curva normal teãrica para comparaãfo entre as distribuiãfo
155 torquedata %>%
156   mutate(residuos = modelo_F7$residuals) %>%
157   ggplot(aes(x = residuos)) +
158     geom_histogram(aes(y = ..density..),
159                   color = "white",
160                   fill = "#440154FF",
161                   bins = 30,
162                   alpha = 0.6) +
163     stat_function(fun = dnorm,
164                  args = list(mean = mean(modelo_F7$residuals),
165                               sd = sd(modelo_F7$residuals)),
166                  size = 2, color = "grey30") +
167     scale_color_manual(values = "grey50") +
168     labs(x = "Resãduos",
169          y = "Frequãncia") +
170     theme_bw()
171
172
173 #Diagnãstico de multicolinearidade (Variance Inflation Factor e Tolerance)
174 ols_vif_tol(modelo_F7)
175 #funçãofols_vif_tol do pacote olsrr
176
177 #####DIAGNãSTICO DE HETEROCEDASTICIDADE
178
179 #Teste de Breusch-Pagan para diagnãstico de heterocedasticidade
180 ols_test_breusch_pagan(modelo_F7)
181
182
183 #funçãofols_test_breusch_pagan do pacote olsrr
184 #Presenãsa de heterocedasticidade -> omissãfo de variãvel(is) explicativa(s) rel
185
186 #H0 do teste: ausãncia de heterocedasticidade.
187 #H1 do teste: heterocedasticidade, ou seja, correlaãfo entre resãduos e uma ou
188 #variãveis explicativas, o que indica omissãfo de variãvel relevante!
189
190
191 #####
192
193 modelo_G7 <- lm(formula = bc_Radm ~ Prof + qc,
194                data = torquedata)
195
196 summary(modelo_G7)
197
198 export_summs(modelo_A7, modelo_B7, modelo_D7, modelo_E7, modelo_F7, modelo_G7, sc
199
200 #####
201
202 modelo_H7 <- lm(formula = bc_Radm ~ torque + qc + Prof + fs,
203                data = torquedata)
204
205 summary(modelo_H7)
206
207

```

```

208 #prevendo modelo:
209 # xls files
210 torqueteste <- read_excel("dados_teste.xlsx")
211
212 #prevendo modelo D:
213 torqueteste$bc_Radm_hat_D <- predict(modelo_D7, torqueteste)
214 torqueteste$Radm_hat_D <- (((torqueteste$bc_Radm_hat_D*lambda_BC$lambda) + 1)) ^
215
216 #Plotando os dados do modelo D
217 ggplot(torqueteste, aes(x=Radm, y=Radm_hat_D)) +
218   geom_point(size=2, shape=18) +
219   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
220   labs(x = "Radm Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
221   ggtitle("Modelo D - Calculado x Estimado")
222
223
224 #prevendo modelo E:
225 torqueteste$bc_Radm_hat_E <- predict(modelo_E7, torqueteste)
226 torqueteste$Radm_hat_E <- (((torqueteste$bc_Radm_hat_E*lambda_BC$lambda) + 1)) ^
227
228 #Plotando os dados do modelo D e E
229 ggplot(torqueteste, aes(x=Radm, y=Radm_hat_D)) +
230   geom_point(size=2, shape=18) +
231   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
232   labs(x = "Radm Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
233   ggtitle("Modelo D - Calculado x Estimado")+
234   ggplot(torqueteste, aes(x=Radm, y=Radm_hat_E)) +
235   geom_point(size=2, shape=18) +
236   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
237   labs(x = "Radm Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
238   ggtitle("Modelo E - Calculado x Estimado")
239
240
241
242 #prevendo modelo F:
243 torqueteste$bc_Radm_hat_F <- predict(modelo_F7, torqueteste)
244 torqueteste$Radm_hat_F <- (((torqueteste$bc_Radm_hat_F*lambda_BC$lambda) + 1)) ^
245
246 #Plotando os dados do modelo D, E e F
247 ggplot(torqueteste, aes(x=Radm, y=Radm_hat_D)) +
248   geom_point(size=2, shape=18) +
249   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
250   labs(x = "Radm Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
251   ggtitle("Modelo D - Calculado x Estimado") +
252   ggplot(torqueteste, aes(x=Radm, y=Radm_hat_E)) +
253   geom_point(size=2, shape=18) +
254   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
255   labs(x = "Radm Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
256   ggtitle("Modelo E - Calculado x Estimado") +
257   ggplot(torqueteste, aes(x=Radm, y=Radm_hat_F)) +
258   geom_point(size=2, shape=18) +
259   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
260   labs(x = "Radm Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
261   ggtitle("Modelo F - Calculado x Estimado")
262
263 #Plotando os dados do modelo F
264 ggplot(torqueteste, aes(x=Radm, y=Radm_hat_F)) +
265   geom_point(size=2, shape=18) +
266   geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
267   labs(x = "Radm Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
268   ggtitle("Modelo F - Calculado x Estimado")
269
270 #prevendo modelo G:
271 torqueteste$bc_Radm_hat_G <- predict(modelo_G7, torqueteste)
272 torqueteste$Radm_hat_G <- (((torqueteste$bc_Radm_hat_G*lambda_BC$lambda) + 1)) ^
273
274 #Plotando os dados do modelo D, E, F e G
275 ggplot(torqueteste, aes(x=Radm, y=Radm_hat_D)) +
276   geom_point(size=2, shape=18) +

```



```

277 | geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
278 | labs(x = "Radm Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
279 | ggtitle("Modelo D - Calculado x Estimado") +
280 | ggplot(torqueteste, aes(x=Radm, y=Radm_hat_E)) +
281 | geom_point(size=2, shape=18) +
282 | geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
283 | labs(x = "Radm Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
284 | ggtitle("Modelo E - Calculado x Estimado") +
285 | ggplot(torqueteste, aes(x=Radm, y=Radm_hat_F)) +
286 | geom_point(size=2, shape=18) +
287 | geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
288 | labs(x = "Radm Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
289 | ggtitle("Modelo F - Calculado x Estimado") +
290 | ggplot(torqueteste, aes(x=Radm, y=Radm_hat_G)) +
291 | geom_point(size=2, shape=18) +
292 | geom_smooth(method=lm, se=TRUE, fullrange=TRUE) +
293 | labs(x = "Radm Calculada (kN)", y = "Radm Estimada (kN)") +
294 | ggtitle("Modelo G - Calculado x Estimado")
295
296
297 #calculando os MSE para os modelos
298
299 MSE_D7 <- mean(((torqueteste$Radm-torqueteste$Radm_hat_D) ^ 2))
300 MSE_D7
301
302 MSE_E7 <- mean(((torqueteste$Radm-torqueteste$Radm_hat_E) ^ 2))
303 MSE_E7
304
305 MSE_F7 <- mean(((torqueteste$Radm-torqueteste$Radm_hat_F) ^ 2))
306 MSE_F7
307
308 MSE_G7 <- mean(((torqueteste$Radm-torqueteste$Radm_hat_G) ^ 2))
309 MSE_G7
310
311
312 #calculando os RÂ² para os modelos
313
314
315 #Modelo D
316 rsq(torqueteste, torqueteste$Radm, torqueteste$Radm_hat_D, na_rm = TRUE)
317
318
319 #Modelo E
320 rsq(torqueteste, torqueteste$Radm, torqueteste$Radm_hat_E, na_rm = TRUE)
321
322
323 #Modelo F
324 rsq(torqueteste, torqueteste$Radm, torqueteste$Radm_hat_F, na_rm = TRUE)
325
326 #Modelo G
327 rsq(torqueteste, torqueteste$Radm, torqueteste$Radm_hat_G, na_rm = TRUE)
328

```