

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ**  
**PEDRO REBESCHINI JUNIOR**

**CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DE CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA E  
SONDAGEM SPT NO CAMPO EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA DA FAG EM  
CASCAVEL - PR**

**CASCAVEL - PR**

**2019**

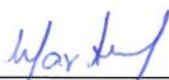
**CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG**

**PEDRO REBESCHINI JUNIOR**

**CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DE CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA E  
SONDAGEM SPT NO CAMPO EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA DA FAG EM  
CASCAVEL - PR**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor Mestre, Engenheiro Civil Maycon André de Almeida.

**BANCA EXAMINADORA**



---

**Orientador Prof. Mestre Maycon André de Almeida**  
Centro Universitário Assis Gurgacz  
Engenheiro Civil



---

**Professora Mestre Camila Forigo**  
Centro Universitário Assis Gurgacz  
Engenheira Civil



---

**Professor Mestre Guilherme Irineu Venson**  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Engenheiro Civil

Cascavel, 14 de Junho de 2019.

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ**  
**PEDRO REBESCHINI JUNIOR**

**CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DE CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA E  
SONDAGEM SPT NO CAMPO EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA DA FAG EM  
CASCAVEL - PR**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Professor Orientador: Mestre,  
Engenheiro Civil Maycon André de Almeida**

**CASCAVEL - PR**

**2019**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha mãe que me deu todo o apoio necessário para a minha formação, que sempre me motivou nos momentos mais difíceis da graduação, exercendo da forma majestosa o papel de pai e mãe.

## **AGRADECIMENTOS**

Com grande satisfação agradecemos todos àqueles que foram importantes para mim nesta caminhada. Primeiramente agradecemos a Deus por ter dado saúde, coragem e muita força para concluir este trabalho, sempre iluminando e guiando no caminho correto.

A minha mãe, Flávia e meu padrasto, Aldo, meu expresso reconhecimento por sempre me encorajar, pelos bons conselhos e ter muita paciência comigo, foram fundamentais para que fosse possível finalizar o trabalho.

Ao professor e orientador Eng. Maycon André de Almeida, por todas as orientações, ensinamentos e dedicação. O qual se mostrou tanto como um profissional formidável, mas também uma pessoa incrível que sempre se dispôs a ajudar em todos os momentos.

A esta instituição e a todo o seu corpo docente, que possuem alta qualificação para ensinar e se dedicar ao aprendizado do aluno.

A todos os nossos familiares, amigos, que fizeram parte da formação torcendo por nossa vitória e sempre estando do nosso lado em todos os momentos desta caminhada.

## **EPÍGRAFE**

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo.”  
Winston Churchill

## RESUMO

Tendo em vista que grande maioria das obras de pequeno porte não realizam a sondagem do solo devido ao seu alto custo, acaba sendo realizado projetos de fundações as cegas, sem quaisquer conhecimento do local onde será realizado, acaba acarretando um sub-dimensionamento, solo inadequado para o tipo de fundação dimensionada, acarretando assim até mesmo em problemas futuros. Com o objetivo de usar um novo método para obter o índice de resistência do solo, através de um ensaio mais barato e prático, acaba chamando a atenção por seu desempenho em campo, substituindo a tradicional sondagem SPT.

O ensaio com penetrômetro possui a vantagem da mobilidade, permitindo verificar o perfil de resistência do solo em profundidade, e também a análise de várias camadas, obtendo, assim, os resultados de maneira instantânea, por isso foram comparados resultados para analisar sua eficiência quanto ao método de Sondagem SPT. Foram realizados ensaios metro a metro com o CPD, totalizando uma profundidade de até 15 metros, sendo que este equipamento fornece o índice de penetração em mm/golpe. Para cada 9 golpes do equipamento, sendo realizados diversos ensaios por metro, em um poço de inspeção no CEEF, para correlacionar dados de índice de umidade e massa específica que foram coletados ao longo da profundidade, conforme a realização do ensaio. Existem 3 ensaios de sondagem SPT realizados para o trabalho de Zen e Almeida (2018), no mesmo local da pesquisa, que foi usado como base para comparação de resultados.

Com esses ensaios foi definido a melhor forma de adquirir o índice de resistência usando o CPD, com a utilização de uma segunda variável que é o teor de umidade ( $w$ ), que acaba levando em consideração a perda de resistência do solo por saturação, que é o principal ponto negativo da sondagem CPD, com a utilização dessa variável, foi encontrado índices confiáveis para realização de sondagens de baixa profundidade.

**Palavra-chave:** CPD. SPT. Índice de Penetração. Peso Específico. Correlação.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Esquema do Equipamento CPD e Processo executivo .....                                                                 | 19 |
| Figura 2 – Exemplo gráfico CPD: a) Materiais com menor capacidade de suporte e b) Materiais com maior capacidade de suporte..... | 21 |
| Figura 3 – Equipamento de Sondagem SPT .....                                                                                     | 24 |
| Figura 4 – Equipamento de Sondagem SPT .....                                                                                     | 25 |
| Figura 5 – Equipamento de Sondagem SPT .....                                                                                     | 25 |
| Figura 6 – Localização CEEF.....                                                                                                 | 28 |
| Figura 7 – Curva granulométrica.....                                                                                             | 30 |
| Figura 8 – Índices de Consistência.....                                                                                          | 32 |
| Figura 9 – Índices de resistência do solo.....                                                                                   | 33 |
| Figura 10 – Abertura Poço de Inspeção .....                                                                                      | 35 |
| Figura 11 – Equipamento CPD.....                                                                                                 | 36 |
| Figura 12 – Ensaio CPD .....                                                                                                     | 36 |
| Figura 13 – Cilindro Cortante.....                                                                                               | 37 |
| Figura 14 – Solo Retirado Com o Cilindro Cortante.....                                                                           | 38 |
| Figura 15 – Amostras de Solo .....                                                                                               | 38 |
| Figura 16 – Escada de significância de Fisher .....                                                                              | 40 |
| Figura 17 – Correlação dos Dados .....                                                                                           | 40 |
| Figura 18 – Regressão Linear .....                                                                                               | 41 |
| Figura 19 – Índice CPD.....                                                                                                      | 43 |
| Figura 20 – Correlação entre $N_{spt}$ e CPD .....                                                                               | 45 |
| Figura 21 – Correlação e entre $N_{spt}$ e CPD e Teor de Umidade ( $w$ ) .....                                                   | 46 |
| Figura 22 – Correlação entre $N_{spt}$ e CPD e Peso Específico Natural ( $\gamma_n$ ) .....                                      | 47 |
| Figura 23 – Correlação entre $N_{spt}$ e CPD e Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ ).....                                          | 48 |
| Figura 24 – Correlação entre $N_{spt}$ e CPD e Teor de Umidade ( $w$ ).....                                                      | 51 |
| Figura 25 – Correlação entre $N_{spt}$ e CPD e Peso Específico Natural ( $\gamma_n$ ) .....                                      | 53 |
| Figura 26 – Correlação entre $N_{spt}$ e CPD e Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ ).....                                          | 55 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Equação 1 – Índice de Penração.....                                                      | 20 |
| Equação 2 – Tensão de Ponta.....                                                         | 21 |
| Equação 3 – Índice N através de CPD.....                                                 | 45 |
| Equação 4 - Índice N através de CPD e Teor de Umidade.....                               | 46 |
| Equação 5 - Índice N através de CPD e Peso Específico Natural .....                      | 48 |
| Equação 6 - Índice N através de CPD e Peso Específico Seco .....                         | 49 |
| Equação 7 - Índice N através de CPD e Teor de Umidade (Zen e Almeida, 2018).....         | 52 |
| Equação 8 - Índice N através de CPD e Peso Específico Natural (Zen e Almeida, 2018)..... | 54 |
| Equação 9 - Índice N através de CPD e Peso Específico Seco (Zen e Almeida, 2018).....    | 56 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**ASTM** – *American Society for Testing and Materials*

**CBR** – *California Bearing Ratio*

**CEEF**: Campo experimental de engenharia da FAG

**CPD** – Cone de Penetração Dinâmica

**NBR** – Norma Brasileira

**SPT** – *Standard penetration test*

## SUMÁRIO

|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b>                                      | <b>14</b> |
| 1.1 INTRODUÇÃO                                         | 14        |
| 1.2 OBJETIVOS                                          | 15        |
| 1.2.1 Objetivo geral                                   | 15        |
| 1.2.2 Objetivos específicos                            | 15        |
| 1.3 JUSTIFICATIVA                                      | 15        |
| 1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA                             | 16        |
| 1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE                             | 16        |
| 1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA                            | 16        |
| <b>CAPÍTULO 2</b>                                      | <b>18</b> |
| 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA                              | 18        |
| 2.1.1 Cone de Penetração Dinâmica (CPD)                | 18        |
| 2.1.1.1 Histórico                                      | 18        |
| 2.1.1.2 Equipamento                                    | 19        |
| 2.1.1.3 Penetração do CPD                              | 20        |
| 2.1.1.4 Resistência à Penetração do CPD                | 21        |
| 2.1.1.5 Vantagens do CPD – Cone de Penetração Dinâmica | 22        |
| 2.1.1.6 Fatores que afetam os resultados do ensaio CPD | 22        |
| 2.1.2 Sondagem SPT                                     | 23        |
| 2.1.2.1 Equipamento                                    | 23        |
| 2.1.2.2 Influência no resultado de Sondagem SPT        | 26        |
| <b>CAPÍTULO 3</b>                                      | <b>28</b> |
| 3.1 METODOLOGIA                                        | 28        |
| 3.1.1 Tipo de estudo e local da pesquisa               | 28        |
| 3.1.2 Caracterização do subsolo do CEEF                | 29        |
| 3.1.2.1 Granulometria                                  | 29        |
| 3.1.2.2 Índices físicos                                | 31        |
| 3.1.2.3 Índices de consistência                        | 32        |
| 3.1.2.4 Investigações geotécnicas                      | 32        |
| 3.1.3 Coleta de dados                                  | 34        |
| 3.1.3.1 Abertura Poço de Inspeção                      | 34        |

|                                                                                                 |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.3.2 Execução de ensaios CPD .....                                                           | 35        |
| 3.1.3.3 Coleta de Amostras de Solo.....                                                         | 37        |
| 3.1.3.4 Regressão Linear .....                                                                  | 39        |
| <b>CAPÍTULO 4.....</b>                                                                          | <b>42</b> |
| 4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                                                               | 42        |
| 4.1.1 Determinação do índice CPD no CEEF .....                                                  | 42        |
| 4.1.2 Determinação dos índices físicos do CEEF.....                                             | 43        |
| 4.1.3 Análise de dados.....                                                                     | 44        |
| 4.1.3.1 Correlação do índice N através do CPD (regressão simples).....                          | 44        |
| 4.1.3.2 Correlação do índice N através do CPD e Teor de Umidade (regressão dupla) .....         | 45        |
| 4.1.3.3 Correlação do índice N através do CPD e Peso Específico Natural (regressão dupla) ..... | 47        |
| 4.1.3.4 Correlação do índice N através do CPD e Peso Específico Seco (regressão dupla) ....     | 48        |
| 4.1.4 Índices físicos determinados por Zen e Almeida (2018).....                                | 49        |
| 4.1.4.1 Correlação do índice N através do CPD e Teor de Umidade (regressão simples) .....       | 50        |
| 4.1.4.2 Correlação do índice N através do CPD e Peso Específico Natural (regressão dupla) ..... | 52        |
| 4.1.4.3 Correção do índice N através CPD e Peso Específico Seco (regressão dupla) .....         | 54        |
| <b>CAPÍTULO 5.....</b>                                                                          | <b>57</b> |
| CONCLUSÃO.....                                                                                  | 57        |
| <b>CAPÍTULO 6.....</b>                                                                          | <b>59</b> |
| <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>                                                   | <b>59</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                        | <b>60</b> |
| <b>ANEXO 1.....</b>                                                                             | <b>62</b> |
| <b>ANEXO 2.....</b>                                                                             | <b>63</b> |

## CAPÍTULO 1

### 1.1 INTRODUÇÃO

O solo contém propriedades muito distintas, tipos de solo e seu grau de compactação, tornando um elemento complexo que requer um cuidado maior em relação ao seu uso na engenharia. Na etapa de pré-projeto estrutural, o estudo geotécnico do local a ser implantada a obra é essencial, assim incentivando a buscar novas ferramentas que possam auxiliar nessa análise, buscando por eficiência, praticidade e baixo custo. Uma ferramenta muito utilizada em obras rodoviárias, por ser de aplicação manual a baixas profundidades, é o Cone de Penetração Dinâmica (CPD). Foi feito um estudo exploratório ao longo de uma profundidade para analisar sua eficiência na construção civil, comparado com o Ensaio de Penetração Padrão (SPT).

O SPT é normalizado pela ABNT NBR 6484 (2001) e consiste em dois ensaios em um, o ensaio de resistência que consiste em contabilizar os golpes necessários para cravação de 45 cm divididos em 3 segmentos, utilizando apenas os últimos 30 cm para obter o índice de resistência à penetração do amostrador padrão (N), também realizando, ao mesmo tempo, a sondagem a trado em profundidade. Mesmo que o ensaio traga muitos benefícios, de acordo com Lukiantchuki (2012), o equipamento vem sendo questionado quanto a sua dispersão de resultados recorrente ao processo executivo do equipamento que apresenta uma ampla defasagem no resultado final, por conta da má execução dos operadores.

O CPD é um equipamento versátil, de fácil manuseio e transporte, muito utilizado para estudo de propriedades do solo em rodovias, em suas camadas de subleitos, podendo, assim, ter um acompanhamento do trecho de forma fácil e ágil. Devido em obras rodoviárias a camada superficial ser a mais importante, em obras rodoviárias esse equipamento é muito utilizado. Permite obter parâmetros de resistência do solo de forma rápida.

Sendo assim, com este estudo, foi correlacionado dados de SPT com os dados obtidos com o método CPD, no Campo Experimental de Engenharia da FAG, na cidade de Cascavel-PR, ao longo da profundidade, através de um poço de inspeção.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Verificar a viabilidade do uso do Cone de Penetração Dinâmica, em comparação com a Sondagem de Penetração Padrão, no Campo Experimental FAG, na cidade de Cascavel-PR.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a relação entre os índices de resistência CPD e SPT obtidos ao longo da profundidade, no CEEF;
- Procurar estabelecer relação entre os 2 índices de resistência, possibilitando utilizar o CPD para dimensionamento de fundações;
- Avaliar através de bibliografias o potencial do seu uso na prática.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O método de CPD é uma boa opção para sondagem em baixa profundidade, por ser um equipamento com custo benefício alto, fácil manuseio, deslocamento mais acessível e também precisando apenas de duas pessoas para fazer uso do aparelho, um para operar o aparelho e outro para coletar os dados. Acaba se tornando uma opção mais vantajosa para quem vai executar o trabalho, podendo verificar a resistência à penetração no solo, no próprio local.

Esse estudo será voltado principalmente para fundações rasas, localizadas como tubulões e estacas de pequena profundidade, para obras de pequeno porte, que normalmente não se realiza sondagem SPT, devido ao seu alto custo.

Com esse estudo, vai ser possível analisar, se o equipamento pode também ser utilizado para obter parâmetros aceitáveis do solo em sondagens de fundações na construção civil, podendo assim ser uma opção viável e atrativa.

#### 1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Existe possibilidade de se estabelecer uma relação entre índice de penetração CPD e o índice de resistência do SPT, de modo que se possam dimensionar fundações com esses dados, no Campo Experimental de Engenharia da FAG, na cidade de Cascavel, região oeste do estado do Paraná?

#### 1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

O principal objetivo é correlacionar os dois ensaios, CPD e SPT, podendo assim criar uma fórmula que leve em consideração a umidade e peso específico, para achar o valor do SPT correspondente na cota, e assim dimensionar fundações.

A utilização do CPD é economicamente viável devido à redução de mão de obra para operar o equipamento, baixo valor para aquisição e, assim, fazer a migração para o ensaio CPD para o uso na construção civil, buscando deste modo, auxiliar no dimensionamento de fundações em baixa profundidade.

#### 1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A análise foi limitada em correlacionar dados dos 3 ensaios de Sondagem SPT realizados para o trabalho de Zen e Almeida (2018), com os dados obtidos através do CPD. Por meio desse estudo foi realizado ensaios de metro em metro ao longo da profundidade até 15 metros, através de um poço de inspeção realizado no Campo Experimental de Engenharia FAG, localizado na Avenida das Torres, 500, no Bairro FAG, da cidade de Cascavel, Paraná.

O levantamento dos dados por meio de perfuração contínua, analisando metro a metro, realizando três ensaios em cada metro. Foi coletada amostras a cada metro em conjunto com o ensaio para a determinação, índice de umidade, peso específico natural e peso específico seco do solo através de cilindro cortante.

## CAPÍTULO 2

### 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo, será abordada a correlação do CPD com outros métodos, sendo o mais utilizado, o CBR (*California Bearing Ratio*), normatizado pela ABNT NBR 9895 (2016), cuja relação de dados com o CPD vem sendo bastante estudada, devido à semelhança dos resultados obtidos entre os dois ensaios, mas com a diferença que o ensaio CPD fornece resultados “*in situ*”, diferente do CBR, onde é necessário que seus ensaios sejam feitos em laboratório, com custo elevado de equipamentos. Segundo Guedes (2008), devido ao crescimento de ruas, avenidas e rodovias, os estudos da pavimentação estão evoluindo, buscando novas técnicas que tragam uma economia significativa para o custo final da obra e também bom rendimento.

#### 2.1.1 Cone de Penetração Dinâmica (CPD)

##### 2.1.1.1 Histórico

O CPD foi originalmente criado por Scala (1959), na Austrália. O processo se dá através da cravação de um cone no solo devido à queda de um martelo, verificando resistência à penetração na camada, obtendo esse índice pela relação entre a cravação do cone, pelo número de golpes aplicados, analisando as mudanças que ocorrem ao longo da profundidade.

O principal objetivo do desenvolvimento do CPD foi criar um equipamento simples, versátil e barato para estudar as propriedades mecânicas do solo, em baixas profundidades, mas este também é muito usado em subleitos para o dimensionamento de pavimentação (GUEDES, 2008).

O CPD vem sendo visto com bons olhos por algumas organizações do Brasil, mostrando interesse na sua utilização devido sua facilidade de acesso ao equipamento e,

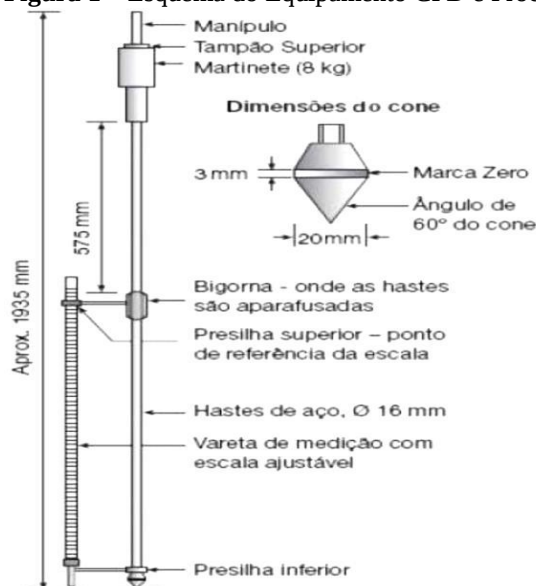
principalmente, ao seu baixo custo, facilidade de manuseio e resultados instantâneos, tornando-se, assim, foco das principais pesquisas para sua utilização em rodovias (GUEDES, 2008).

#### 2.1.1.2 Equipamento

O equipamento é composto por uma haste de aço de 20 mm de diâmetro, com a ponta cônica de aço temperado, com 30° ou 60° de ângulo de inclinação, tendo seu diâmetro levemente maior que sua haste, garantindo que a resistência seja realizada apenas no cone. A realização do ensaio consiste em punccionar a haste no solo através da queda livre do martelo de 8 kg de uma altura de 575mm. Após a cravação da haste no solo é feita a medição de sua penetração, através de uma régua graduada, que é apoiada na haste do equipamento. O equipamento CPD e seu processo executivo são mostrados na Figura 1.

Segundo Jordão (2009), a aplicação do CPD em locais com materiais com diâmetro dos agregados superior a 2 polegadas, apresenta resultados questionáveis devido ao impedimento da cravação do cone, causando grande variação de resultados se for usado em grandes áreas com o mesmo tipo de material.

**Figura 1** – Esquema do Equipamento CPD e Processo executivo



Fonte: Costa, (2015).



Fonte: Almeida e Neto, (2018).

### 2.1.1.3 Penetração do CPD

No ensaio de CPD é desconsiderado o primeiro golpe do aparelho no solo devido ser o momento que o equipamento se fixa ao mesmo. As medidas do CPD são obtidas pelo número de golpes por (mm) e resistência média do solo metro a metro analisado. O Gráfico com a curva do Índice de Penetração, que será obtida pelo CPD, será determinado pela relação da profundidade pelo número de golpes aplicados. De acordo com Guedes (2008), é possível estabelecer esse Índice de Penetração através da Equação 1.

**Equação 1 – Índice de Penetração**

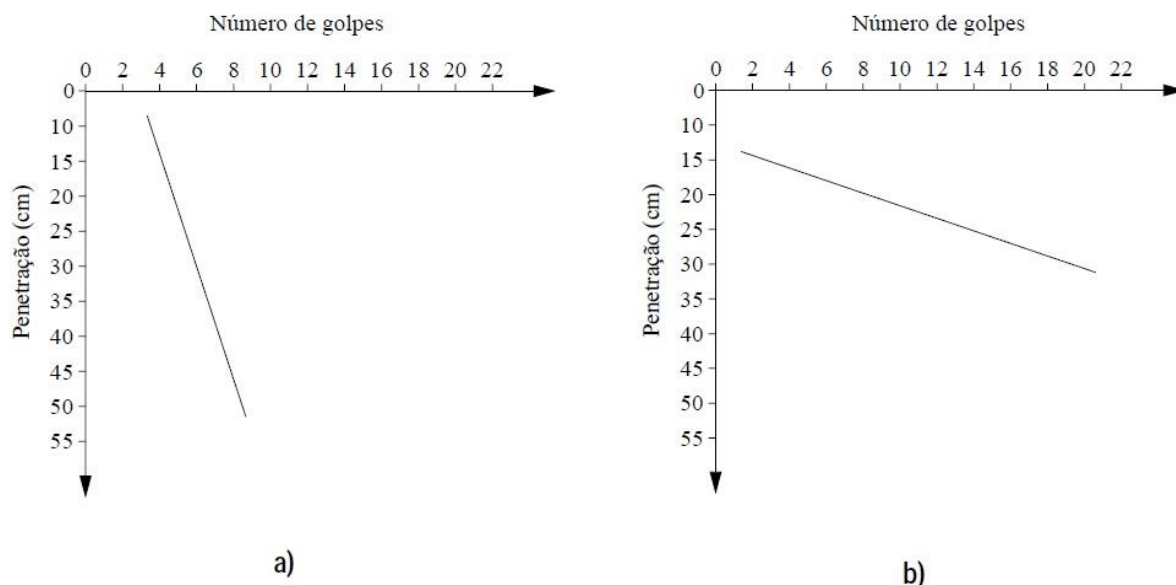
$$CPD = \frac{\text{Penetração Total (mm)}}{N^{\circ} \text{ de Golpes}} \quad (1)$$

Onde:

CPD: Índice de Penetração (mm/golpe)

De acordo com Guedes (2008), dependendo do tipo de solo analisado, da sua umidade e densidade, a inclinação da curva muda, quanto maior, próximo da horizontal, maior a capacidade daquele solo de receber carga, conforme Figura 2.

**Figura 2** – Exemplo gráfico CPD: a) Materiais com menor capacidade de suporte e b) Materiais com maior capacidade de suporte.



Fonte: Costa (2008).

#### 2.1.1.4 Resistência à Penetração do CPD

Tsuha (2003) sugere a utilização da expressão matemática para transformação dos padrões de número de golpes em valores de tensões na ponta do cone. A resistência à ponta do cone de penetração ( $q_p$ ) se dá pela aplicação da Equação 2, que segue a linha de cálculo usado em estacas pré-moldadas.

**Equação 2** – Tensão de Ponta

$$q_p = \left[ \frac{M_1}{M_1 + M_2} \right] \cdot \frac{M \cdot a \cdot H}{A \cdot e} \quad (2)$$

Onde:

$q_p$ : Tensão de ponta (kPa)

$M_1$ : Massa do martelo do aparelho (8 kg)

$M_2$ : Massa Total das composições das hastes do martelo, cabeça de bater e hastes guias (4 Kg)

$a$ : Aceleração da gravidade ( $10 \text{ m/s}^2$ )

$H$ : Altura da queda do martelo (575 mm)

$A$ : Seção transversal do cone ( $490,87 \text{ mm}^2$ )

e: Penetração média por golpe (mm)

#### 2.1.1.5 Vantagens do CPD – Cone de Penetração Dinâmica

Segundo Guedes (2008), o CPD tem inúmeras vantagens, as quais lhe tornam um equipamento muito atrativo, tais como:

- Equipamento portátil, de fácil manuseio e transporte;
- Por ser utilizado em baixas profundidades, acaba, por muitas vezes, não necessitando de grandes movimentações de terra, que é o caso do uso na pavimentação, sendo de custo baixo e de ensaio quase que não destrutivo;
- Simples execução, não precisando de pessoas com muito conhecimento técnico, apenas dois operadores, um para fazer o ensaio e outro para anotar os dados de cravação;
- O ensaio CPD e os resultados podem ser analisados por pessoas com treinamento simples.
- Seu baixo custo o torna viável para sondagens de solo em pequenas edificações que, quando pensado no SPT, acabava se tornando inviável.

#### 2.1.1.6 Fatores que afetam os resultados do ensaio CPD

Os resultados do CPD, iguais outros tipos de ensaio de sondagem, têm influência direta de diversos fatores, uns com maior proporção que outros.

De acordo com Guedes (2008), a condição climática é o principal fator que afeta os resultados, dependendo de cada tipo de solo, mas principalmente os solos que sofrem maior impacto, são estes os Siltosos e Argilosos. Os solos considerados granulares grossos são os que menos são afetados quando expostos a climas extremos.

Toda variedade de resultados obtidos para materiais confinados e não confinados, com sua condição mais rígida, é dada pela inclinação que ocorre na lança, no momento de atrito na penetração. Sempre se deve ter o cuidado na realização do ensaio para ver se este está sendo realizado corretamente, se está sendo respeitada a altura de queda, se não tem nada que possa

obstruir ou afetar o resultado e, também, o operador não pode influenciar na hora da queda do martelo, deve deixá-lo cair livremente para não ocorrer variação.

O CPD possui limitações como qualquer outro método, suas limitações. Silva Júnior (2006) cita algumas delas, são:

- Elevada variação de resultados no caso de grandes extensões granulares;
- O uso do CPD para materiais com diâmetro nominal, das partículas de agregados, superior a duas polegadas é questionável;
- Algumas das relações existentes de resistência são somente aplicáveis a determinados tipos de materiais e circunstâncias, e não a todos os casos.

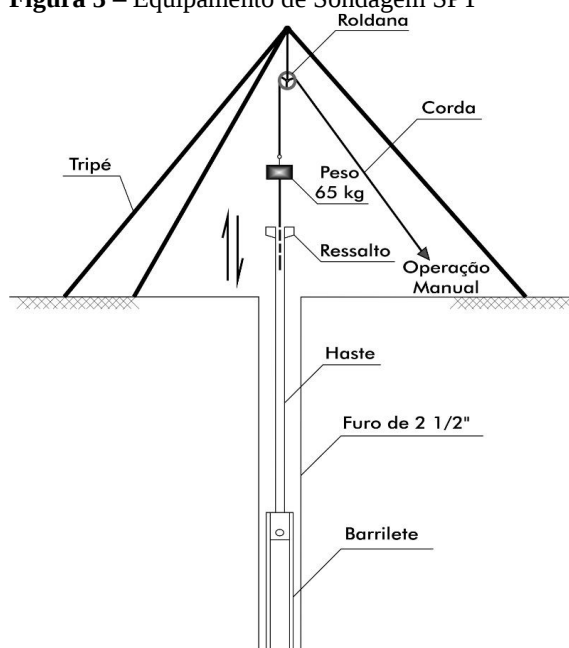
### 2.1.2 Sondagem SPT

O Ensaio de simples reconhecimento do solo, mundialmente conhecido como SPT, é a sondagem de análise das características do solo mais utilizada no Brasil e também em outros países. A Sondagem SPT é muito utilizada por sua facilidade de manuseio, resultados precisos e a simplicidade do equipamento (LUKIENTCHUKI, 2012).

#### 2.1.2.1 Equipamento

A sondagem SPT é normatizada pela norma ABNT NBR 6481 (2001), na qual é obtida a resistência à penetração pelo índice ( $N_{SPT}$ ), por meio da cravação de um martelo com peso de 65 kg, de uma altura de 75 cm, conforme esquema do equipamento SPT na Figuras 3. O índice de penetração é obtido pela quantidade de golpes necessários para a cravação de 45 cm do amostrador, no solo, desconsiderando a cravação inicial de 15 cm (LUKIENTCHUKI, 2012).

**Figura 3** – Equipamento de Sondagem SPT



Fonte: Costa (2015).

Com a sondagem SPT é possível determinar os valores N de resistência, o qual é o principal dado usado para determinar outros índices do solo, (LUKIANITCHUKI, 2012).

Segundo Costa (2015), várias críticas têm sido feitas ao ensaio SPT, críticas tais, que estão relacionadas à variação de resultados, principalmente provenientes da dependência do operador e também da diversidade dos equipamentos e dos procedimentos em uso.

Muito dos problemas são causados pela má operação do equipamento, não cumprindo os procedimentos conforme ABNT NBR 6484 (2001), problemas estes normalmente causados pela fadiga do operador devido ao peso elevado do equipamento, sendo assim, não tendo controle da altura de queda do martelo, causando influência direta no resultado final do N<sub>spt</sub>. Nas Figuras 4 e 5 pode ser analisado as dimensões do aparelho, assim podendo ter a percepção do motivo da fadiga dos operadores do equipamento.

**Figura 4 – Equipamento de Sondagem SPT**



(a) Torre de sondagem completa  
Fonte: Lukiantchuki (2012).

(b) Composição para perfuração/cravação e trado helicoidal

**Figura 5 – Equipamento de Sondagem SPT**



(a) Cabeça de bater

(b) Martelo cilíndrico maciço

Fonte: Lukiantchuki (2012).

### 2.1.2.2 Influência no resultado de Sondagem SPT

De acordo com Costa (2015), diversos fatores podem influenciar nos resultados. Foram divididos em três classes básicas: Aparelhagem, procedimento e condição do solo:

a) Fatores relacionados ao solo:

- Resistência;
- Compacidade relativa ou consistência;
- Permeabilidade;
- Grau de saturação;
- Sensibilidade (argilas);
- Forma, distribuição e tamanho dos grãos (areias).

b) Fatores relacionados aos procedimentos:

- Avanço, limpeza e estabilidade do furo;
- Profundidade relativa do furo e do revestimento;
- Intervalo de tempo entre a perfuração e a amostragem;
- Espaçamento entre amostragens subsequentes;
- Profundidade de penetração do amostrador.

c) Fatores ligados ao amostrador:

- Razão da área projetada;
- Rugosidade externa e interna;
- Forma e estado da sapata cortante;
- Alargamento externo e interno;
- Área e forma das aberturas de alívio de pressão ou ventosas.

De acordo com a ABNT NBR 6484 (2001), quando chegada inspeção no nível d'água, é necessário fazer a limpeza dos furos seja completa, eliminando todo o resíduo da escavação. De acordo com Costa (2015), quando acaba não sendo feita a desobstrução dos orifícios e não efetuada a limpeza adequada, inevitavelmente acaba por aumentar a resistência à penetração.

Por outro lado, a lavagem excessiva acaba aliviando as tensões, reduzindo a sua resistência à penetração.

## CAPÍTULO 3

### 3.1 METODOLOGIA

#### 3.1.1 Tipo de estudo e local da pesquisa

Trata-se de um estudo experimental com o ensaio CPD, muito utilizado em rodovias. Este vem sendo estudado para sua inclusão na construção civil para auxiliar no projeto de fundações, usando parâmetros já existentes do solo obtidos por outros métodos que em conjunto com o CPT pode ser obtido uma fórmula para descobrir o índice de resistência do solo com o equipamento, de forma que tenha uma confiabilidade semelhante ou superior ao obtido pela sondagem SPT. Segundo Costa (2015), é possível relacionar o ensaio em SPT com os dados obtidos com CPD, sendo uma boa opção para baixas profundidades.

O estudo será realizado no CEEF localizado na Avenida das Torres, Bairro FAG, no município de Cascavel, estado do Paraná, com uma área de 100 m<sup>2</sup>, conforme apresentado na Figura 6.

**Figura 6** – Localização CEEF



Fonte: Google Earth (2018).

O município de Cascavel completou 66 anos em 2018, com aproximadamente 324.476 habitantes, segundo o IBGE (2018). Encontra-se na região Oeste do Paraná, sendo a quinta cidade mais populosa do estado, com clima tropical. É referência em agronegócios na região.

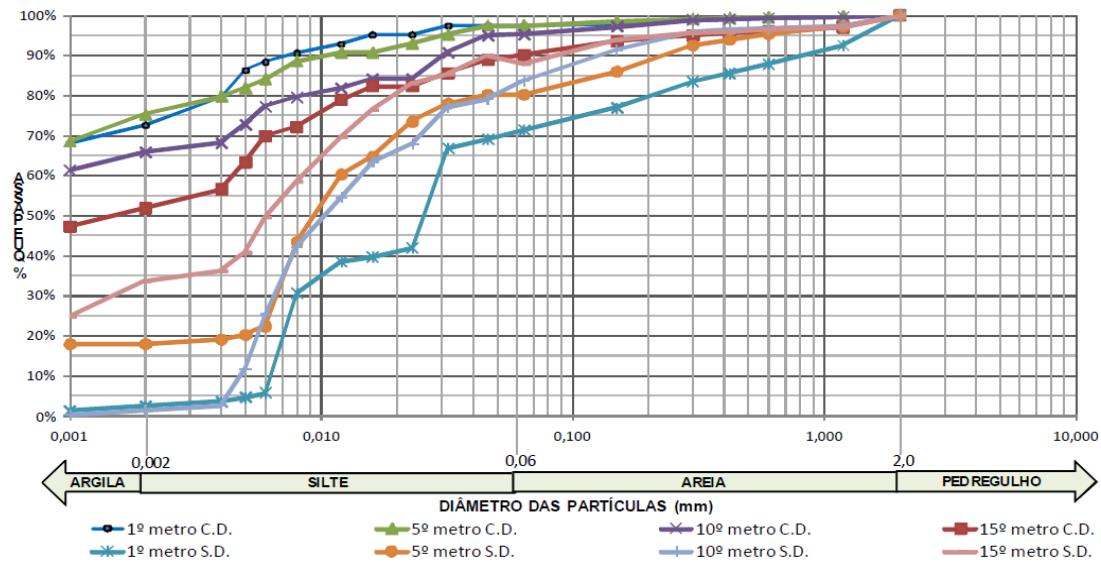
### 3.1.2 Caracterização do subsolo do CEEF

Segundo Zen e Almeida (2018), o solo de Cascavel é formado a partir do intemperismo do basalto. Sua coloração escura se dá devido à presença de óxido de ferro, apresentando solos espessos com boa capacidade de retenção de água, aeração e baixa permeabilidade.

A cidade possui um solo residual, laterítico e colapsível. Ao norte é ondulado, constituído por colinas amplas e baixas declividades e onde o relevo apresenta-se acidentado, (Zen e Almeida, 2018).

#### 3.1.2.1 Granulometria

Segundo Zen e Almeida (2018), devido às evidências de laterização do solo da cidade de Cascavel, foram obtidas, curvas granulométricas para o solo da profundidade, com defloculante (C.D) e sem defloculante (S.D), objetivamente avaliar a diferenciação da textura, conforme Figura 7.

**Figura 7 – Curva granulométrica**

Fonte: Zen e Almeida (2018).

Analisando as curvas granulométricas, foi observado a flocculação das mesmas devido a presença de óxido de ferro, como ocorre na maioria dos solos brasileiros (lateríticos), que possui grande parcela de finos (argilas e siltes) e alta porosidade, (Zen e Almeida, 2018). Pode-se observar também a alta porcentagem de argila e silte presente no solo, conforme Tabela 1, pode-se classificá-lo como solo como uma argila siltosa.

**Tabela 1 – Porcentagem de materiais sem defloculante**

| Solo                    | Argila (%) | Silte (%) | Areia (%) |
|-------------------------|------------|-----------|-----------|
| <b>Sem defloculante</b> |            |           |           |
| 1m                      | 1,88       | 68,65     | 29,47     |
| 5m                      | 17,92      | 62,28     | 19,80     |
| 10m                     | 1,01       | 81,56     | 17,43     |
| 15m                     | 29,62      | 58,73     | 11,65     |
| <b>Com defloculante</b> |            |           |           |
| 1m                      | 71,86      | 25,47     | 2,67      |
| 5m                      | 74,98      | 22,33     | 2,70      |
| 10m                     | 65,34      | 29,14     | 5,52      |
| 15m                     | 50,22      | 39,26     | 10,52     |

Fonte: Zen e Almeida (2018).

### 3.1.2.2 Índices físicos

Através do trabalho de Zen e Almeida (2018), foram obtidos os valores médios dos principais índices físicos do solo.

O peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ ) apresentou valor médio ao longo da profundidade de 26,8 kN/m<sup>3</sup>. Esse valor é relativamente alto, devido à presença de agente cimentante óxido de ferro, fruto dos processos intempéricos da rocha basalto, (Zen e Almeida, 2018). O Peso específico natural ( $\gamma_n$ ), o peso específico seco ( $\gamma_d$ ), peso específico saturado ( $\gamma_s$ ) e o índice de vazios ( $e$ ) do solo são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** – Principais índices físicos do CEEF

| Prof. | $\gamma_n$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_{sat}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $e$ |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|-----|
| 1m    | 16,2                               | 12,6                               | 18,2                                   | 1,3 |
| 2m    | 16,1                               | 12,6                               | 18,2                                   | 1,3 |
| 3m    | 15,9                               | 12,7                               | 18,3                                   | 1,2 |
| 4m    | 16,4                               | 13,1                               | 18,5                                   | 1,0 |
| 5m    | 16,3                               | 13,1                               | 18,3                                   | 1,1 |
| 6m    | 17,7                               | 12,6                               | 17,8                                   | 1,1 |
| 7m    | 16,8                               | 11,5                               | 17,2                                   | 1,3 |
| 8m    | 17,7                               | 12,6                               | 17,9                                   | 1,1 |
| 9m    | 17,0                               | 12,0                               | 17,4                                   | 1,2 |
| 10m   | 17,4                               | 11,8                               | 17,4                                   | 1,3 |
| 11m   | 15,6                               | 10,3                               | 16,4                                   | 1,6 |
| 12m   | 15,3                               | 9,8                                | 16,3                                   | 1,8 |
| 13m   | 16,8                               | 10,8                               | 16,8                                   | 1,5 |
| 14m   | 16,6                               | 10,7                               | 16,7                                   | 1,5 |
| 15m   | 15,2                               | 8,3                                | 15,2                                   | 2,3 |

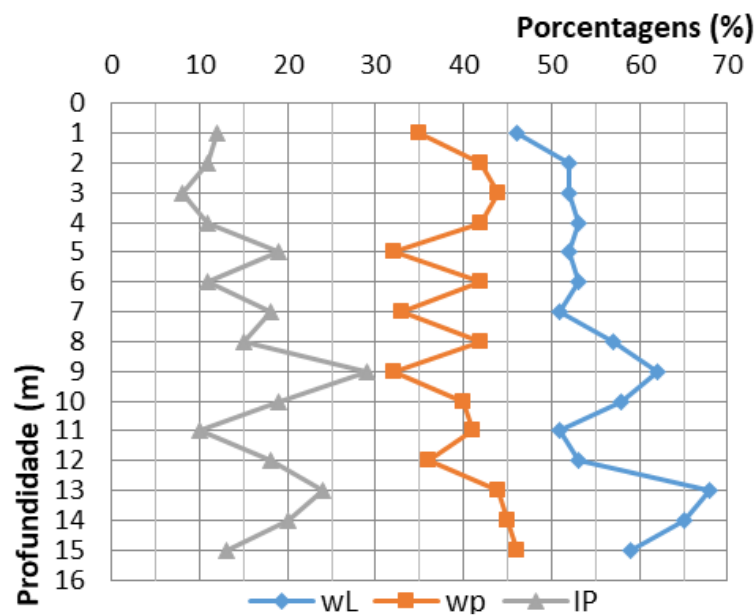
Fonte: Zen e Almeida (2018).

É possível verificar que a partir do 5 m de profundidade as amostras encontram-se com grau de saturação alto, motivo explicado pela proximidade com o nível d'água do campo experimental, que foi encontrado a uma profundidade de 12 m (Zen e Almeida, 2018).

### 3.1.2.3 Índices de consistência

Os resultados obtidos para os índices de consistência (Limite de liquidez – WL, Limite de Plasticidade – WP e Índice de Plasticidade – IP), estão representados na Figura 8.

**Figura 8** – Índices de Consistência



Fonte: Zen e Almeida (2018).

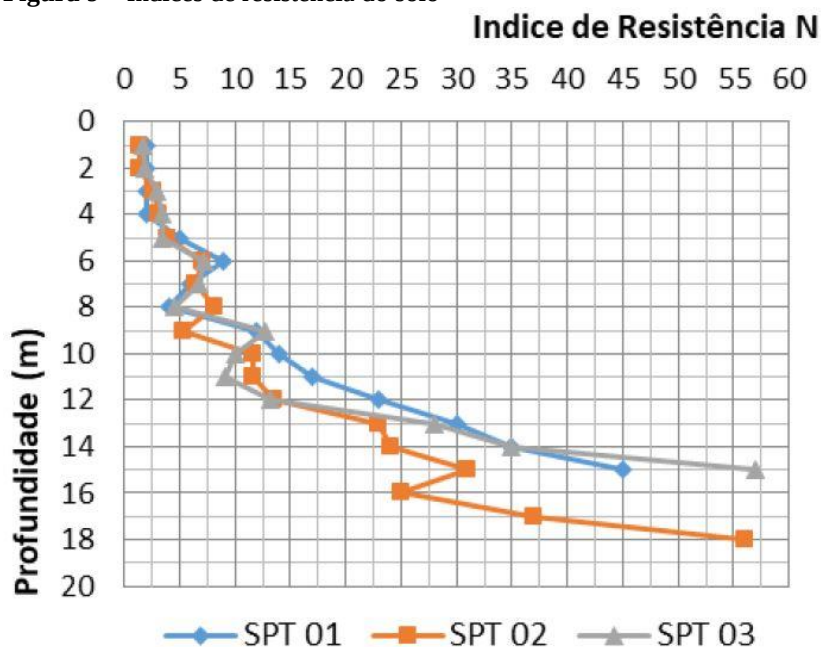
O limite de liquidez apresentou valores médios de 55%, já o limite de plasticidade de 40% e o Índice de plasticidade (IP) apresentou um valor de 16% (Zen e Almeida, 2018). Com os dados de WL indica que o solo é muito compressível, o que acaba sofrendo adensamento quando aplicado carregamento, muito comum em solos lateríticos, limitando o uso de fundações rasas.

### 3.1.2.4 Investigações geotécnicas

Foram realizados três ensaios de sondagem do tipo SPT no CEEF, a fim de verificar a resistência do solo ao longo da profundidade. Como resultados das sondagens, é apresentada a

Figura 9, representando os valores de resistência N, para os três ensaios realizados (Zen e Almeida, 2018).

**Figura 9** – Índices de resistência do solo



Fonte: Zen e Almeida (2018).

Quanto aos valores de índice de resistências encontrados pela sondagem SPT, pode-se perceber o surgimento do nível de água entre o 12° e 13° metro de profundidade, apesar do surgimento, o solo apresentou  $N_{spt}$  superiores a 30, se mostrando um solo bom para apoio de fundações em estaca escavada ou hélice contínua (Zen e Almeida, 2018).

Com todos os dados retirados dos ensaios, gerou a Tabela 3, com o resumo das camadas do solo do CEEF com os valores médios de índices físicos e características.

**Tabela 3** – Resumo das camadas de solo do CEEF.

| VALORES MÉDIOS                      | CAMADA 1<br>1 a 9 metros | CAMADA 2<br>10 a 15 metros |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| w (%)                               | 34                       | 53                         |
| LL (%)                              | 53                       | 59                         |
| LP (%)                              | 38                       | 42                         |
| IP (%)                              | 15                       | 17                         |
| $\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )     | 12                       | 12                         |
| $\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )     | 27                       | 27                         |
| $\gamma_{sat}$ (KN/m <sup>3</sup> ) | 17                       | 16                         |
| Sr (%)                              | 55                       | 60                         |
| Argila (%)                          | 70                       | 56                         |
| Silte (%)                           | 25                       | 35                         |
| Areia (%)                           | 5                        | 9                          |
| Consistência                        | Muito mole<br>a média    | Rija a dura                |
| Índice de vazios (e)                | 1,22                     | 1,55                       |

Fonte: Zen e Almeida (2018).

### 3.1.3 Coleta de dados

#### 3.1.3.1 Abertura Poço de Inspeção

Para realizar os ensaios metro a metro foi realizado um poço de inspeção com 1 metro de diâmetro, utilizando perfuratriz hidráulica sob caminhão, sendo feita a escavação metro a metro até atingir a profundidade de 15 metros, conforme Figura 10.

**Figura 10** – Abertura Poço de Inspeção



Não foi encontrado nível d'água no local da perfuração, foi constatada uma redução da posição do lençol freático em comparação ao trabalho Zen e Almeida (2018), na qual foi possível determinar nível d'água em 12 e 15 metros, conforme Anexo 1 e 2.

#### 3.1.3.2 Execução de ensaios CPD

Foram realizados 5 ensaios CPD por metro, distribuídos em toda a superfície do furo, com 4 ensaios próximos as extremidades e 1 no centro. Figura 11 pode-se observar o equipamento utilizado. Foram executados 10 golpes com o equipamento, desconsiderando sempre o primeiro devido a acomodação natural do cone do equipamento no solo. Ao final de cada ensaio foi medida a haste do equipamento para saber quantos milímetros o mesmo penetrou e com isso foi determinado o índice de penetração do CPD, em mm/golpe. Na Figura 12, pode-se observar a posição do aparelho sendo feito o ensaio no segundo metro.

**Figura 11** – Equipamento CPD



**Figura 12** – Ensaio CPD



### 3.1.3.3 Coleta de Amostras de Solo

A cada metro foram coletadas três amostras de solo com um cilindro cortante, com altura de 51 mm e diâmetro interno de 54,53mm, totalizando o volume de 116,81cm<sup>3</sup>, o qual era usado óleo vegetal nas extremidades para facilitar a cravação do mesmo, conforme Figura 13. Foi determinada a tara da balança de precisão com o cilindro cortante e posteriormente pesando com o solo retirado, assim determinando a massa específica. As amostras foram retiradas das paredes do fuste, conseguindo assim retirar solo indeformado para análise, sem alterar suas características naturais, na Figura 14 pode-se visualizar o cilindro com o solo retirado do local.

**Figura 13 – Cilindro Cortante**



**Figura 14** – Solo Retirado Com o Cilindro Cortante



Após a coleta de dados do cilindro cortante, foi retirado o solo do mesmo e colocado em cápsulas para ser levadas à estufa no laboratório de solos, durante 24 horas foram expostos à temperatura de 105°C, conforme Figura 15. Após toda a análise de dados, foi feita a triagem dos dados obtidos, analisando todos para ver se não teve nenhum dado incompatível, para posteriormente ser feita uma média dos valores obtidos por metro, assim sendo utilizados apenas os dados confiáveis obtidos.

**Figura 15** – Amostras de Solo



Após 24 horas, o solo foi retirado da estufa, coletado o peso da massa seca, em seguida foi tabelado os dados, assim foi calculado os principais índices físicos utilizados na elaboração da pesquisa. Na Tabela 4 é apresentando as equações utilizadas para a obter os dados que foram utilizados para correlacionar com o CPD.

**Tabela 4** – Principais Índices Físicos

|                                                      |                                                        |                                                                                                      |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Índice de vazios (e)                                 | $e = V_v / V_s$                                        | $V_v$ = volume de vazios<br>$V_s$ = volume de sólidos                                                |
| Porosidade (n)                                       | $n = V_v / V_t$                                        | $V_v$ = volume de vazios<br>$V_t$ = volume total                                                     |
| Grau de saturação (s)                                | $s = V_w / V_v$                                        | $V_w$ = volume de água<br>$V_v$ = volume de vazios                                                   |
| Umidade (w)                                          | $w = P_w / P_s$                                        | $P_s$ = peso de sólidos<br>$P_w$ = peso da água                                                      |
| Peso específico aparente úmido ( $\gamma_n$ )        | $\gamma_n = M_t / V_t$                                 | $M_t$ = massa total<br>$V_t$ = volume total                                                          |
| Peso específico aparente saturado ( $\gamma_{sat}$ ) | $\gamma_{sat} = \gamma_s + (e \cdot \gamma_w) / 1 + e$ | $\gamma_s$ = peso específico partículas<br>$\gamma_w$ = peso específico da água (g/cm <sup>3</sup> ) |
| Peso específico aparente seco                        | $\gamma_d = P_s / V_s$                                 | $P_s$ = peso de sólidos<br>$V_s$ = volume de sólidos                                                 |

Fonte: Freitas (2018).

### 3.1.3.4 Regressão Linear

A análise de regressão gera uma equação para descrever a relação estatística entre uma ou mais variáveis preditoras e a variável resposta. A regressão linear encontra a linha que melhor representa as variáveis de entrada com a variável de saída (Santos, 2018).

Para determinar a fórmula usando a correlação entre os Nspt's existentes, CPD e índices físicos tanto os obtidos na coleta de dados quanto os do trabalho de Zen e Almeida (2018), é utilizado regressão linear.

Na regressão linear é usado dois parâmetros para estabelecer se a correlação aceitável ou não. O *p-valor* e o coeficiente de determinação  $R^2$  são valores estatísticos que trabalham juntos, indicando numericamente se a correlação pode ser considerada forte ou fraca. Os valores do *p-valor* inferiores a 0,05 e o coeficiente de determinação  $R^2$  superior a 0,5 indicam correlação forte.

O *p*-valor diz o qual a probabilidade de obter uma estatística de teste igual ou ainda melhor do que a amostra observada, definindo valores *p*-valor > 5% como nula, não sendo uma amostra confiável (Victor e Paes, 2010). Segundo Bussab e Morettin (2010), conforme Figura 16, foi criada uma escala de significância de Fisher que determina a relevância dos valores obtidos, mostrando assim quanto menor, mais forte é a correlação, dessa forma.

**Figura 16** – Escala de significância de Fisher

| valor- <i>p</i>       | 0,10     | 0,05     | 0,025       | 0,01  | 0,005       | 0,001      |
|-----------------------|----------|----------|-------------|-------|-------------|------------|
| Natureza da evidência | marginal | moderada | substancial | forte | muito forte | fortíssima |

Fonte: Bussab e Morettin (2010).

As regressões foram feitas pelo *software* Excel, pela plataforma de análise de dados, tabelando todos os dados, usando como dados Y os dados que se pretendem obter (índice de resistência N), e X os valores do índice de penetração CPD, conforme Figura 17.

**Figura 17** – Correlação dos Dados

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet and a regression analysis dialog box. The spreadsheet has three columns: 'PROF. (m)', 'N', and 'CPD'. Rows 1 through 14 are listed. A red rectangular box highlights the 'N' and 'CPD' columns. A large red 'Y' is placed over the 'N' column, and a large red 'X' is placed over the 'CPD' column. The dialog box, titled 'SPT 01' and 'Regressão', is open. It shows the 'Entrada' (Input) section with 'Intervalo Y de entrada' set to 'Y' and 'Intervalo X de entrada' set to 'X'. There are checkboxes for 'Rótulos' (Labels), 'Constante é zero' (Constant is zero), and 'Nível de confiança' (Confidence level) set to 95%. The 'Opções de saída' (Output options) section has 'Intervalo de saída' (Output range) selected. The 'Resíduos' (Residuals) section has checkboxes for 'Resíduos' (Residuals), 'Resíduos padronizados' (Standardized residuals), 'Plotar resíduos' (Plot residuals), and 'Plotar ajuste de linha' (Plot line of fit). The 'Probabilidade normal' (Normal probability) section has a checkbox for 'Plotagem de probabilidade normal' (Normal probability plot).

A regressão pode ser feita de duas formas, tanto simples como foi mostrado na Figura acima, como também dupla, que é adicionado mais uma variável, com o intuito de melhorar a confiabilidade nos dados, tornando uma correlação mais forte, para isso é acrescentado mais uma coluna em X para ser feita a correlação.

Após correlacionar os dados o programa apresenta a planilha de resumo dos resultados, conforme Figura 18. A análise dos dados é feita pelos coeficientes de determinação  $R^2$  e  $p$ -valor determinando se a correlação é forte ou fraca, conforme Figura 18.

**Figura 18 – Regressão Linear**

|    | A                        | B            | C           | D           | E           | F                 | G              | H              | I              |
|----|--------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1  | RESUMO DOS RESULTADOS    |              |             |             |             |                   |                |                |                |
| 2  |                          |              |             |             |             |                   |                |                |                |
| 3  | Estatística de regressão |              |             |             |             |                   |                |                |                |
| 4  | R múltiplo               | 0,551257992  |             |             |             |                   |                |                |                |
| 5  | R-Quadrado               | 0,303885373  |             |             |             |                   |                |                |                |
| 6  | R-quadrado ajustado      | 0,226962297  |             |             |             |                   |                |                |                |
| 7  | Erro padrão              | 13,60562176  |             |             |             |                   |                |                |                |
| 8  | Observações              | 14           |             |             |             |                   |                |                |                |
| 9  |                          |              |             |             |             |                   |                |                |                |
| 10 | ANOVA                    |              |             |             |             |                   |                |                |                |
| 11 |                          | gl           | SQ          | MQ          | F           | F de significação |                |                |                |
| 12 | Regressão                | 1            | 1050,531736 | 1050,531736 | 5,675085258 | 0,034621047       |                |                |                |
| 13 | Resíduo                  | 13           | 2406,468264 | 185,1129434 |             |                   |                |                |                |
| 14 | Total                    | 14           | 3457        |             |             |                   |                |                |                |
| 15 |                          |              |             |             |             |                   |                |                |                |
| 16 |                          | Coeficientes | Erro padrão | Stat t      | valor-P     | 95% inferiores    | 95% superiores | Inferior 95,0% | Superior 95,0% |
| 17 | Interseção               | 0            | #N/D        | #N/D        | #N/D        | #N/D              | #N/D           | #N/D           | #N/D           |
| 18 | CPD                      | 0,353512042  | 0,148394573 | 2,382243744 | 0,033168538 | 0,032925059       | 0,674099026    | 0,032925059    | 0,674099026    |
| 19 |                          |              |             |             |             |                   |                |                |                |

Na Figura 18 pode visualizar que a regressão tem uma correlação fraca, com  $R^2$  inferior a 0,5 e  $p$ -valor inferior a 0,05, sendo aceitável. Assim o mais indicado é ser feito o acréscimo de outra variável para buscar uma melhor correlação.

## CAPÍTULO 4

### 4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

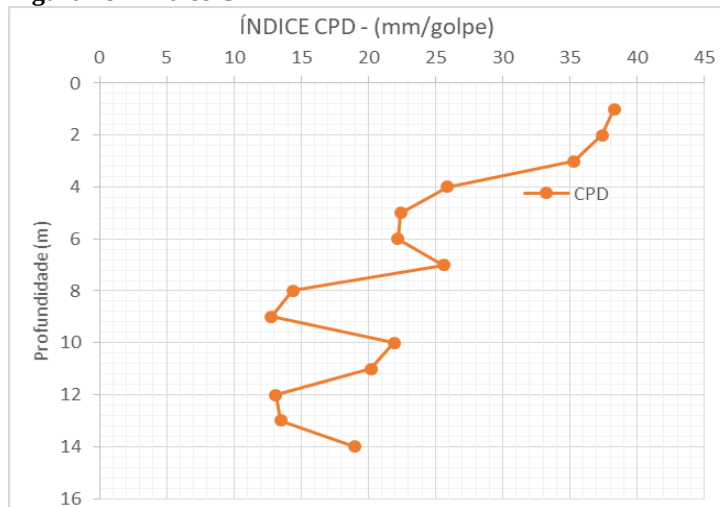
#### 4.1.1 Determinação do índice CPD no CEEF

Através dos ensaios em campo, foi determinado o índice CPD no CEEF, depois da realização de 5 ensaios por metro e determinado a média por metro do ensaio, foi obtido os seguintes dados (Tabela 5), os quais foram usados para correlacionar todos os dados do trabalho, tanto com regressão linear simples como composta.

**Tabela 5 – Índices CPD no CEEF**

| <b>ÍNDICE CPD NO CEEF</b> |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| <b>PROF.<br/>(m)</b>      | <b>CPD<br/>(mm/golpe)</b> |
| 1                         | 38,3                      |
| 2                         | 37,4                      |
| 3                         | 35,3                      |
| 4                         | 25,9                      |
| 5                         | 22,4                      |
| 6                         | 22,2                      |
| 7                         | 25,6                      |
| 8                         | 14,4                      |
| 9                         | 12,8                      |
| 10                        | 21,9                      |
| 11                        | 20,2                      |
| 12                        | 13,1                      |
| 13                        | 13,5                      |
| 14                        | 19                        |

Com a análise da média de dados obtida pelos ensaios, pode-se perceber o grande ganho de resistência a partir do oitavo metro de profundidade, conforme gráfico na Figura 19.

**Figura 19 – Índice CPD**

#### 4.1.2 Determinação dos índices físicos do CEEF

Através de amostras indeformadas e deformadas coletadas do poço de inspeção, metro a metro, foi determinado em laboratório os índices físicos do solo, tais como, peso específico natural ( $\gamma_n$ ), peso específico seco ( $\gamma_d$ ) e teor de umidade ( $w$ ), conforme Tabela 6. Com os dados coletados foram feitas correlações para saber qual dos índices físicos em conjunto com o CPD pode ser mais bem aproveitado para determinar o índice de resistência  $N$  com maior exatidão.

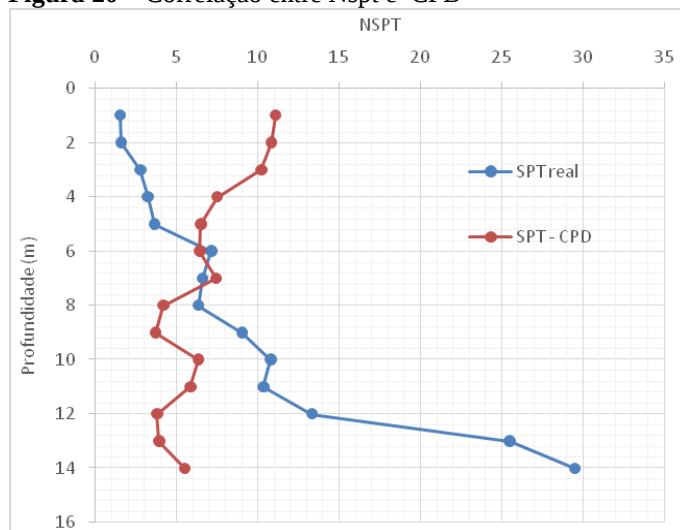
Tabela 6 – Índices CPD no CEEF

| <b>ÍNDICES FÍSICOS DETERMINADOS DO CEEF</b> |               |                                                 |                                                 |
|---------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>PROF. (m)</b>                            | <b>w ( %)</b> | <b><math>\gamma_n</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b><math>\gamma_d</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b> |
| 1                                           | 48%           | 2,03                                            | 1,35                                            |
| 2                                           | 37%           | 1,82                                            | 1,26                                            |
| 3                                           | 53%           | 1,82                                            | 1,20                                            |
| 4                                           | 51%           | 1,58                                            | 1,14                                            |
| 5                                           | 46%           | 1,90                                            | 1,24                                            |
| 6                                           | 45%           | 1,68                                            | 1,18                                            |
| 7                                           | 43%           | 1,96                                            | 1,20                                            |
| 8                                           | 44%           | 1,94                                            | 1,33                                            |
| 9                                           | 41%           | 1,81                                            | 1,26                                            |
| 10                                          | 48%           | 1,91                                            | 1,28                                            |
| 11                                          | 52%           | 1,87                                            | 1,21                                            |
| 12                                          | 51%           | 1,62                                            | 1,11                                            |
| 13                                          | 52%           | 1,86                                            | 1,20                                            |
| 14                                          | 83%           | 1,88                                            | 1,20                                            |

#### 4.1.3 Análise de dados

##### 4.1.3.1 Correlação do índice N através do CPD (regressão simples)

Conforme mostra a Figura 20 podemos ver a dispersão dos pontos do  $N_{spt}$  real e do índice N obtido pela correlação, tendo uma grande dispersão de valores quando analisado com uma regressão simples apenas com o índice CPD.

**Figura 20 – Correlação entre Nspt e CPD**

Mesmo com uma correlação teoricamente atendendo o mínimo para ser considerada uma boa correlação, apresentando o *p*-valor de 0,027 e o coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,57, regressão linear não obteve resultado satisfatório.

Por meio de regressão linear simples foi determinada a Equação 3, que retrata a correlação do Nspt determinado ao longo da profundidade, sendo a média das sondagens SPT de Zen e Almeida (2018) em conjunto com o valor de CPD obtido ao longo da profundidade.

#### Equação 3 – Índice N através de CPD

$$N=0,29.CPD \text{ (mm/golpe)} \quad (3)$$

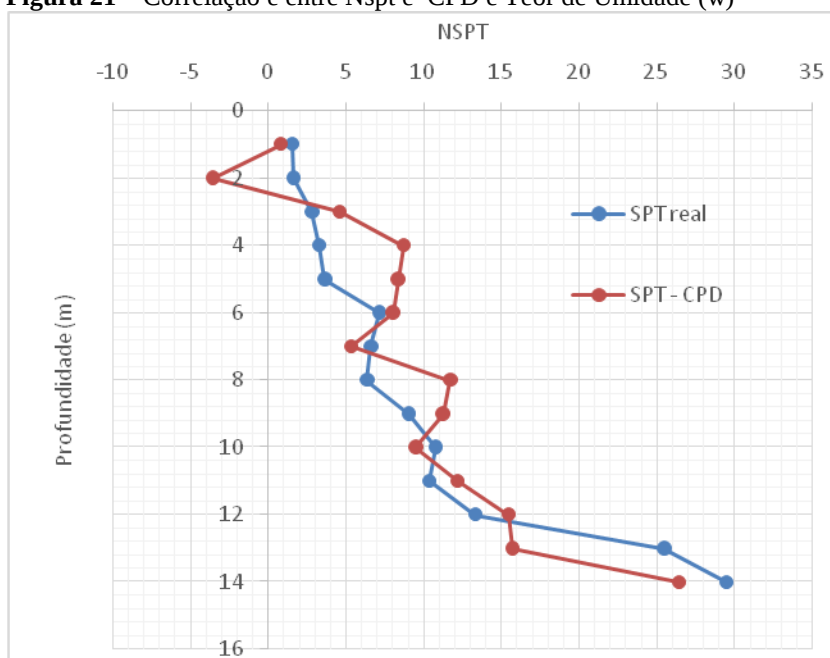
A correlação apresentou coeficientes muito rentes ao limite, pode ser visto no graficamente a dispersão de valores, não sendo confiável a utilização da regressão simples nesse caso, pois apenas com o índice CPD não se obteve valores confiáveis para a utilização na prática.

#### 4.1.3.2 Correlação do índice N através do CPD e Teor de Umidade (regressão dupla)

A junção das duas constantes, CPD e teor de umidade (*w*), resultaram em uma correlação excelente, mostrando que a regressão dupla não teve uma dispersão de valores,

conforme Figura 21, com valores próximos do Nspt real, o qual foi desconsiderado o valor da cota de 15m devido que foi onde se encontra a camada impenetrável, assim fornecendo valores muito dispersos.

**Figura 21** – Correlação e entre Nspt e CPD e Teor de Umidade (w)



Por meio da regressão linear foi determinado a Equação 4, foi realizada regressão linear dupla buscando melhorar os resultados, aumentando o número de variáveis, assim conseguindo uma melhor confiabilidade nos resultados. Foi utilizado o Nspt determinado ao longo da profundidade, sendo a média das sondagens SPT de Zen e Almeida (2018) em conjunto com o valor de CPD e teor de umidade (w) obtido ao longo da profundidade. A correlação apresentou o *p-valor* de  $2,98.10^{-06}$  e o coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,89.

**Equação 4** - Índice N através de CPD e Teor de Umidade

$$N = -0,53.CPD \text{ (mm/golpe)} + 43,96.w \quad (4)$$

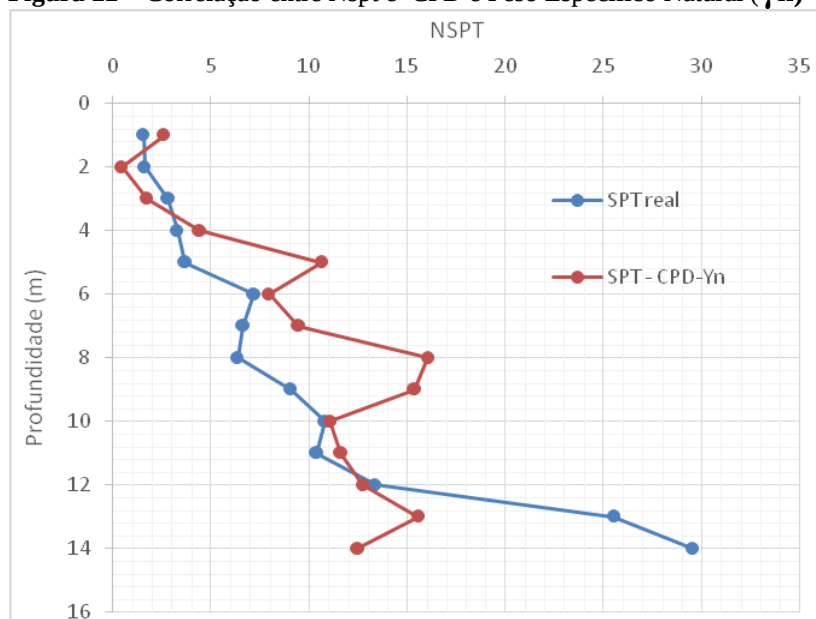
A correlação na qual teve melhor desempenho foi a regressão dupla entre CPD e teor de umidade (w). Foi possível perceber tanto visualmente nos gráficos quanto na regressão linear. A junção das duas constantes mostrou uma confiabilidade ótima nos 10 primeiros

metros, após isso teve dispersão dos Nspt Real com o N obtido pela regressão devido ao grau de dureza do solo encontrado no local, também pela presença de cristais a partir do décimo metro o que prejudica os resultados do ensaio CPD.

#### 4.1.3.3 Correlação do índice N através do CPD e peso específico natural (regressão dupla)

A junção das duas constantes, CPD e peso específico natural ( $\gamma_n$ ), resultaram em uma boa correlação, mostrando uma média dispersão de valores, conforme Figura 22. Devido a dispersão de valores, o uso do peso Especifico natural ( $\gamma_n$ ) acaba não tendo muita precisão em seus resultados.

**Figura 22** – Correlação entre Nspt e CPD e Peso Específico Natural ( $\gamma_n$ )



Por meio da regressão linear foi determinado a Equação 5, foi realizada regressão linear dupla buscando melhorar os resultados, aumentando o número de variáveis, assim conseguindo uma melhor confiabilidade nos resultados. Foi utilizado o Nspt determinado ao longo da profundidade, sendo a média das sondagens SPT de Zen e Almeida (2018) em conjunto com o valor de CPD e Peso Específico Natural ( $\gamma_n$ ) obtido ao longo da

profundidade. A correlação apresentou o *p-valor* de  $5.10^{-4}$  e o coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,73.

**Equação 5** - Índice N através de CPD e Peso Específico Natural

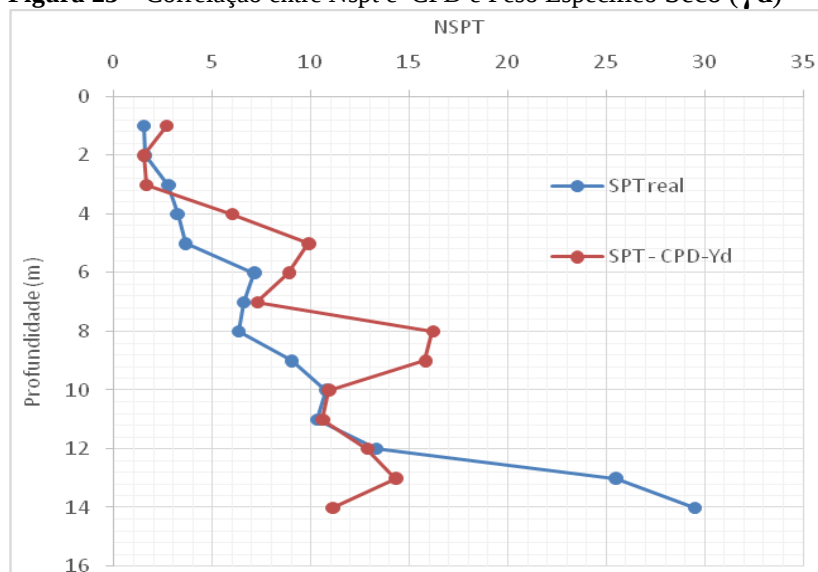
$$N = -0,61 \cdot \text{CPD}(\text{mm/golpe}) + 12,78 \cdot \gamma_n \quad (5)$$

Mesmo a correlação apresentando coeficientes satisfatórios, graficamente deu para notar a dispersão de valores o que significa que não tem tanta precisão no resultado final como comparado à correlação com o teor de umidade.

#### 4.1.3.4 Correlação do índice N através do CPD e peso específico seco (regressão dupla)

A junção das duas constantes, CPD e peso específico seco ( $\gamma_d$ ), resultaram em uma boa correlação, mostrando uma média dispersão de valores, conforme Figura 23. Devido a dispersão de valores, o uso do peso específico seco ( $\gamma_d$ ) acaba não tendo tanta precisão.

**Figura 23** – Correlação entre Nspt e CPD e Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ )



Por meio da regressão linear foi determinado a Equação 6, foi realizada regressão linear dupla buscando melhorar os resultados, assim conseguindo uma melhor confiabilidade nos resultados. Foi utilizado o  $N_{spt}$  determinado ao longo da profundidade, sendo a média das sondagens SPT de Zen e Almeida (2018) em conjunto com o valor de CPD e Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ ) obtido ao longo da profundidade. A correção apresentou o *p-valor* de  $1.10^{-3}$  e o coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,70.

**Equação 6** - Índice N através de CPD e Peso Específico Seco

$$N = -0,58.CPD(mm/golpe) + 18,45.\gamma_d \quad (6)$$

Mesmo a correlação apresentando coeficientes satisfatórios, graficamente deu para notar a dispersão de valores o que significa que não tem tanta precisão no resultado final como comparado à correlação com o teor de umidade.

#### 4.1.4 Índices físicos determinados por Zen e Almeida (2018)

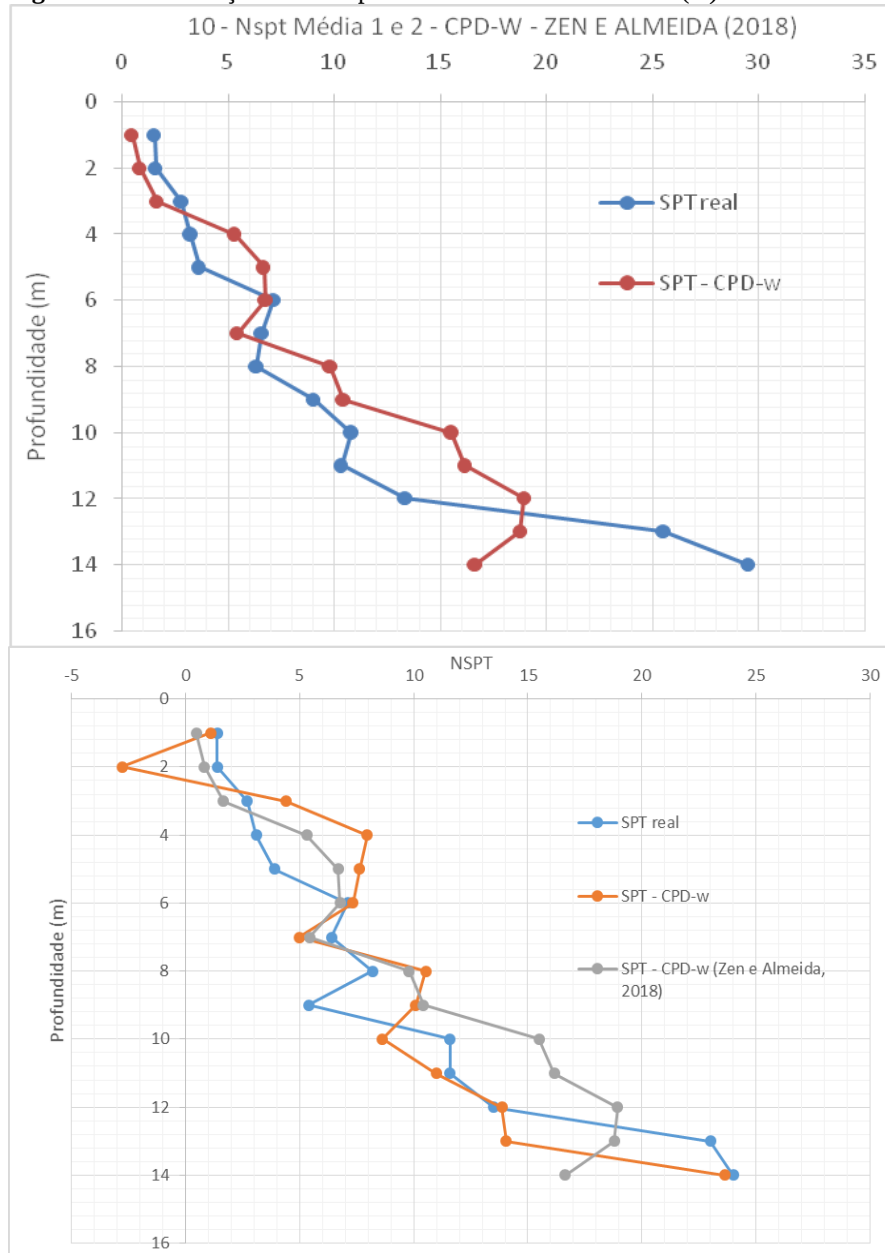
Para correlação foram utilizados os índices físicos do solo obtidos pelo trabalho de Zen e Almeida (2018), buscando correlacionar junto com o índice CPD do CEEF. Os principais índices físicos do solo que foram utilizados para correlacionar foram: Peso Específico Natural ( $\gamma_n$ ), Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ ) e Teor de umidade ( $w$ ), Conforme Tabela 7.

**Tabela 7 – Principais Índices Físicos, Zen e Almeida (2018)**

| <b>ÍNDICES FÍSICOS ZEN E ALMEIRA (2018)</b> |                                  |                                  |                  |          |                           |
|---------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------|----------|---------------------------|
| <b>PROF.<br/>(m)</b>                        | <b>Yn<br/>(KN/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Yd<br/>(KN/m<sup>3</sup>)</b> | <b>w<br/>(%)</b> | <b>N</b> | <b>CPD<br/>(mm/golpe)</b> |
| 1                                           | 16,20                            | 12,60                            | 34%              | 1,55     | 38,30                     |
| 2                                           | 16,10                            | 12,60                            | 34%              | 1,60     | 37,40                     |
| 3                                           | 15,90                            | 12,70                            | 34%              | 2,80     | 35,30                     |
| 4                                           | 16,40                            | 13,10                            | 34%              | 3,25     | 25,90                     |
| 5                                           | 16,30                            | 13,10                            | 34%              | 3,65     | 22,40                     |
| 6                                           | 17,70                            | 12,60                            | 34%              | 7,15     | 22,20                     |
| 7                                           | 16,80                            | 11,50                            | 34%              | 6,60     | 25,60                     |
| 8                                           | 17,70                            | 12,60                            | 34%              | 6,35     | 14,40                     |
| 9                                           | 17,00                            | 12,00                            | 34%              | 9,05     | 12,80                     |
| 10                                          | 17,40                            | 11,80                            | 53%              | 10,80    | 21,90                     |
| 11                                          | 15,60                            | 10,30                            | 53%              | 10,35    | 20,20                     |
| 12                                          | 15,30                            | 9,80                             | 53%              | 13,35    | 13,10                     |
| 13                                          | 16,80                            | 10,80                            | 53%              | 25,50    | 13,50                     |
| 14                                          | 16,60                            | 10,70                            | 53%              | 29,50    | 19,00                     |

#### 4.1.4.1 Correlação do índice N através do CPD e teor de umidade (regressão simples)

A junção das duas constantes, CPD e teor de umidade (w), resultaram em uma correlação ótima, mostrando que a regressão dupla teve baixa dispersão de valores em comparação com o N<sub>spt</sub> real, conforme Figura 24, com valores próximos do N<sub>spt</sub> real, o qual foi desconsiderado o valor da cota de 15m devido que foi onde se encontra a camada impenetrável, assim fornecendo valores muito dispersos.

**Figura 24** – Correlação entre Nspt e CPD e Teor de Umidade (w)

Por meio da regressão linear foi determinado a Equação 7, foi realizada correlação dupla, aumentando o número de variáveis, buscando melhor confiabilidade nos resultados. Foi utilizado o Nspt determinado ao longo da profundidade, sendo a média das sondagens SPT de Zen (2016), em conjunto com o valor de CPD obtido ao longo da profundidade e teor de umidade (w) obtido por Zen e Almeida (2018). A correção apresentou o *p-valor* de  $2,07 \cdot 10^{-5}$  e o coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,85.

**Equação 7** - Índice N através de CPD e Teor de Umidade (Zen e Almeida, 2018)

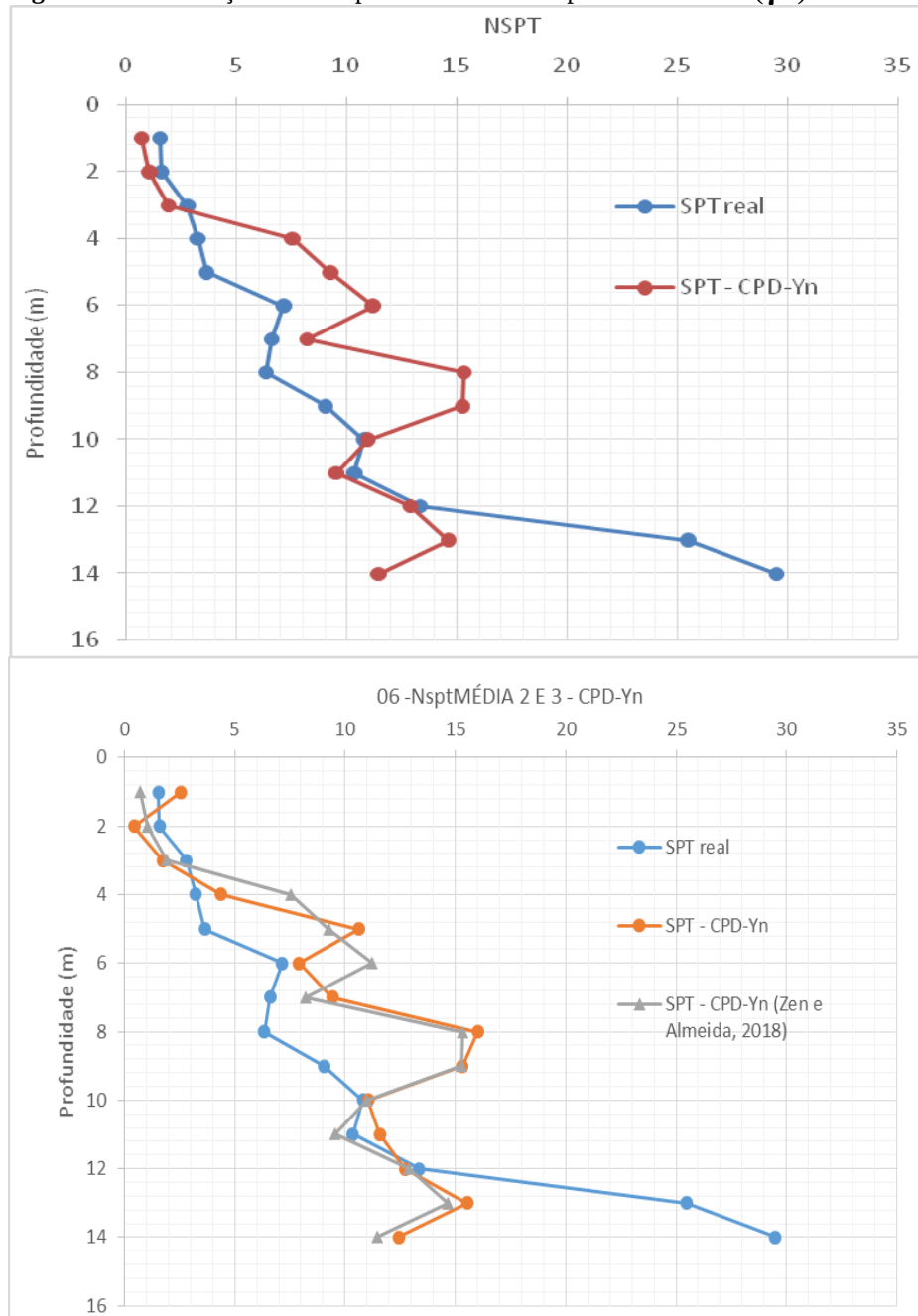
$$N = -0,39.CPD(mm/golpe) + 45,36.w \quad (7)$$

A correlação na qual teve melhor desempenho foi a regressão dupla entre CPD e teor de umidade ( $w$ ). Foi possível perceber tanto visualmente nos gráficos quanto na regressão linear. A junção das duas constantes mostrou uma confiabilidade ótima nos 10 primeiros metros, após isso teve dispersão dos  $N_{spt}$  Real com o  $N$  obtido pela regressão devido ao grau de dureza do solo encontrado no local, também pela presença de cristais a partir do décimo metro o que prejudica os resultados do ensaio CPD.

#### 4.1.4.2 Correlação do índice N através do CPD e peso específico natural (regressão dupla)

A junção das duas constantes, CPD e peso específico natural ( $\gamma_n$ ), resultaram em uma razoável correlação, com uma boa compatibilidade nos primeiros 3 metros, em seguida apresentando uma dispersão de valores entre o  $N_{spt}$  Real e o  $N$  encontrado, conforme Figura 25. Devido a dispersão de valores, o uso do peso específico natural ( $\gamma_n$ ), acaba não tendo precisão adequada para ser utilizado.

**Figura 25** – Correlação entre Nspt e CPD e Peso Específico Natural ( $\gamma_n$ )



Por meio da regressão linear foi determinado a Equação 8, foi feita correlação dupla buscando melhorar os resultados, aumentando o número de variáveis, conseguindo uma melhor confiabilidade nos resultados. Foi utilizado o Nspt determinado ao longo da profundidade, sendo a média das sondagens SPT em conjunto com o valor de CPD e peso específico natural ( $\gamma_n$ ) obtido por Zen e Almeida (2018). A correção apresentou o *p*-valor de  $8 \cdot 10^{-4}$  e o coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,71.

**Equação 8** - Índice N através de CPD e Peso Específico Natural (Zen e Almeida, 2018)

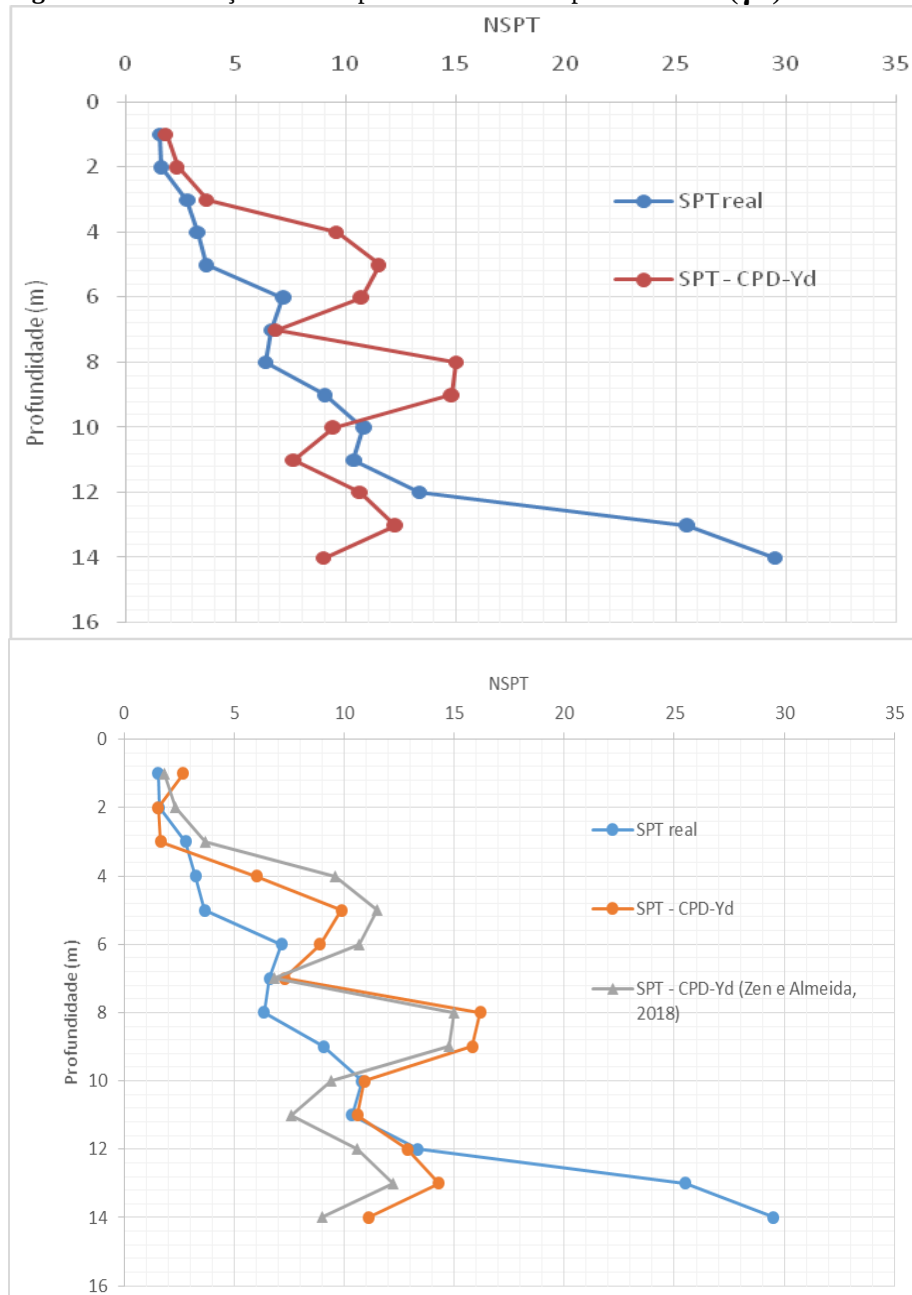
$$N = -0,52.CPD(mm/golpe) + 12,98. \gamma_n \quad (8)$$

Mesmo a correlação apresentando coeficientes satisfatórios, graficamente deu para notar a dispersão de valores o que significa que não tem tanta precisão no resultado final como comparado à correlação com o teor de umidade.

#### 4.1.4.3 Correção do índice N através CPD e peso específico seco (regressão dupla)

A junção das duas constantes, CPD e peso específico seco ( $\gamma_d$ ), resultaram em uma baixa correlação, mostrando uma grande dispersão de valores, conforme Figura 26. Devido a dispersão de valores, o uso do peso específico seco ( $\gamma_d$ ) acaba não tendo precisão adequada para ser utilizado.

**Figura 26** – Correlação entre Nspt e CPD e Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ )



Por meio da regressão linear foi determinado a Equação 9, sendo realizada correlação dupla buscando melhorar os resultados, assim apresentando maior confiabilidade nos resultados. Foi utilizado o Nspt determinado ao longo da profundidade, sendo a média das sondagens SPT em conjunto com o valor de CPD e Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ ) por Zen e Almeida (2018). A correção apresentou o  $p$ -valor de  $3,8 \cdot 10^{-3}$  e o coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,62.

**Equação 9** - Índice N através de CPD e Peso Específico Seco (Zen e Almeida, 2018)

$$N = -0,55.CPD(mm/golpe) + 18,19. \gamma_d \quad (9)$$

Mesmo a correlação apresentando coeficientes satisfatórios, graficamente deu para notar a dispersão de valores o que significa que não tem tanta precisão no resultado final como comparado à correlação com o teor de umidade.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo caracterizar e analisar o solo do Campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz, utilizando os principais índices físicos do solo para correlacionar em conjunto com o índice CPD, buscando assim encontrar uma nova forma de obter a resistência do solo com um equipamento mais acessível em comparação com o SPT. As características do solo foram realizadas por ensaios em laboratório e campo, através de coleta de amostras de solo ao longo da profundidade, por meio de amostras deformadas/indeformada, assim como os dados do estudo de Zen e Almeida (2018).

Foram usados como base, sondagens SPT do local realizados por Zen e Almeida (2018), tal que foi descartado a primeira sondagem devido a dispersão de valores em comparação com as outras duas. O trabalho estava previsto para ser realizada correlação em 15 metros de profundidade, porém foi opção remover o último metro devido aos altos valores de N.

Com os resultados das regressões, todas se encaixaram nos parâmetros pré-estabelecidos para uma boa regressão, de certa forma, todas com suas particularidades nos resultados, mas sempre as correlações duplas se destacando na sua precisão de resultados, tanto com os dados obtidos em campo quanto com os dados do trabalho de Zen e Almeida (2018). A junção do índice CPD com o teor de umidade ( $w$ ) se destacou pela sua precisão, a qual se dá, pois, leva em consideração a perda de resistência do solo com o aumento da umidade.

O CPD acaba tendo valores muito dispersos com umidade, pois o aumento dela a penetração tende a ser maior por isso ela acaba influenciando tanto, o que era previsto no começo do trabalho.

Através os dados obtidos pelas correlação linear simples entre índice N através do CPD, a correlação apresentou o  $p$ -valor de  $2,98.10^{-06}$  e o coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,89, mostrou que apenas com a variável CPD não é possível aplicar na pratica, mesmo os dados atendendo o mínimo exigido, acaba não tendo tanta precisão quanto feita regressão simples.

A correlação do índice N através de CPD e Peso Específico Natural ( $\gamma_n$ ) sendo feita regressão dupla, apresentou tanto com os dados obtidos em campo tanto com os do trabalho de Zen e Almeida (2018), teve mesma média de resultados, os dois apresentando uma leve dispersão de valores, sendo boa correlação, mas com uma leve dispersão de valores, não sendo a melhor opção para ser usada na prática.

A correlação do índice N através de CPD e Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ ) sendo feita regressão dupla, apresentou tanto com os dados obtidos em campo tanto com os do trabalho de Zen e Almeida (2018), obteve mesma média de variação de resultados entre os dois, apresentando uma leve dispersão de valores, sendo boa correlação, mas com uma leve dispersão de valores, não sendo a melhor opção para ser usada na prática.

Com a conclusão do trabalho pode-se constatar que o Cone de Penetração Dinâmica apresenta valores confiáveis para obter o índice de resistência N, o qual é utilizado para dimensionamento de fundações. A utilização do CPD em junção com o Teor de Umidade é a escolha correta para fundações rasas, podendo assim tornar uma opção viável e confiável para obras de pequeno porte, buscando assim auxiliar na elaboração de projetos de fundação.

## **CAPÍTULO 6**

### **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para trabalhos futuros:

Comparação com esse trabalho com outro realizado em outra localização, porém, com o mesmo tipo de solo de estudo.

A substituição do Cone de Penetração dinâmica por Penetrômetro Manual e comparar os dois métodos em correlação com o SPT.

Comparar a eficiência do CPD em relação ao CBR, posteriormente comparar com sua eficiência com o SPT, buscando analisar qual local tem melhor aplicação.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA E OLIVEIRA (2018). Estimativa do Ângulo de Atrito e Coesão Através de Índices de Resistência Obtidos pela Sondagem Spt em Solo Laterítico e Colapsível Característico da Cidade de Cascavel no Estado do Paraná. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6484 (2001). Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181 (2016a). Análise Granulométrica. Rio de Janeiro.

BUSSAB, Wilton de O.; MORETTIN, Pedro A.. **ESTATÍSTICA BÁSICA**. 6. ed. Pinheiros: Saraiva, 2010. 540 p. (2ª TIRAGEM).

COSTA, S. C. F. E. **Estudo da Viabilidade do Uso do Cone de Penetração Dinâmica e do Light Weight Deflectometer em Projetos de Fundações Superficiais**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2015.

DÉCOURT, L. & QUARESMA FILHO, A. R. (1991). The SPT-CF, an improved SPT. 2º.

DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 6. Rio de Janeiro, ABMS, Anais..., Rio de Janeiro, p. 15-53, 1978.

FOLQUE, J. B. Investigação em Mecânica dos solos. 1986.

GARCIA, J.R.; RODRIGUES, R.A. & LOLLO, J.A. A Influência de Diferentes Fluidos de Inundação no Colapso Estrutural de um Solo Arenoso Laterítico. Civil Engeneering Journal, Guimarães, Portugal, Universidade do Minho, n. 21, p. 49-58, 2004.

GUEDES, S. B. **Estudo da Viabilidade Técnica do Cone de Penetração Dinâmica (CPD), do Cone de Penetração Estática (CPE) e do Penetrômetro Panda no Dimensionamento de Pavimentos Urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2008.

LUKIANCHUKI, J. A. **Interpretação de Resultados do Ensaio SPT com Base em Instrumentação Dinâmica**, Tese (Pós-Graduação em Geotécnica) – Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotécnica, São Carlos - SP, 2012.

NETO, C. S.; ALMEIDA, M. A. **Utilização do Penetrômetro Dinâmico para Estimativa da Tensão admissível do Solo de Cascavel-PR, em Função do Teor de Umidade**. Cascavel-PR, 2018.

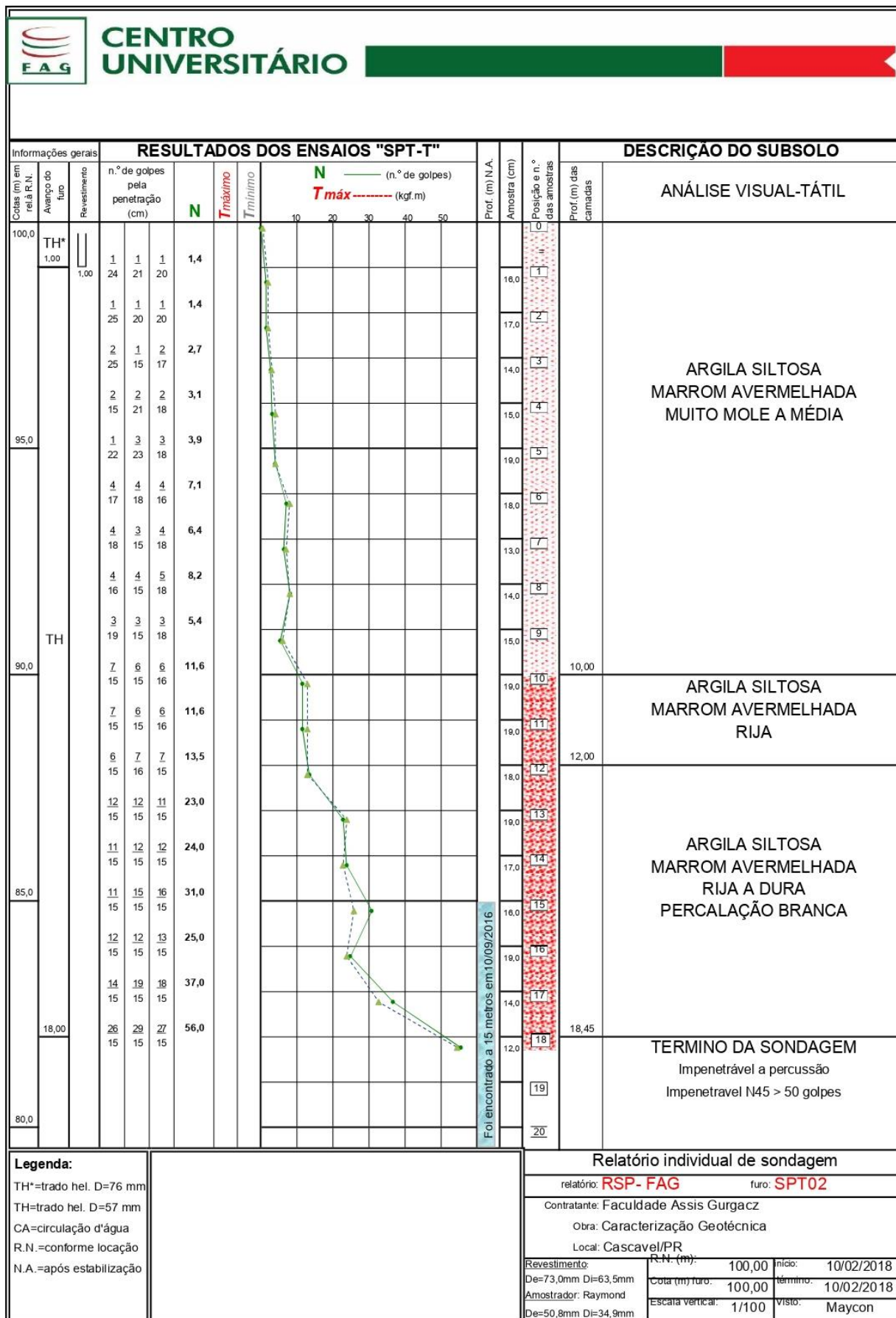
PINTO, C.S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo, Mcgraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977.

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

ZEN, B. A. B.; ALMEIDA, M. A. **Utilização Implantação e Caracterização Geotécnica do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-PR.** Cascavel-PR, 2018.

## ANEXO 1



## ANEXO 2

