

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
LUIZ HENRIQUE ZANELLA DE LORENZO

**COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO DE ENERGIA DO SPT E OS MÉTODOS
CLÁSSICOS DE BIBLIOGRAFIA PARA A ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE
CARGA DE ESTACAS ESCAVADAS COM TRADO MECÂNICO**

CASCATEL - PR

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
LUIZ HENRIQUE ZANELLA DE LORENZO

**COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO DE ENERGIA DO SPT E OS MÉTODOS
CLÁSSICOS DE BIBLIOGRAFIA PARA A ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE
CARGA DE ESTACAS ESCAVADAS COM TRADO MECÂNICO**

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: Prof. Me. Eng. Civil Maycon André de Almeida.

CASCADEL - PR

2017

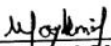
CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG

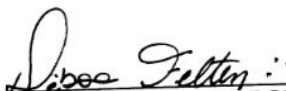
LUIZ HENRIQUE ZANELLA DE LORENZO

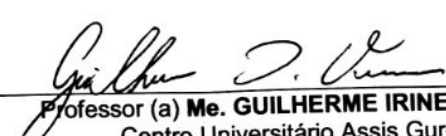
**COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO DE ENERGIA DO SPT E OS MÉTODOS
CLÁSSICOS DE BIBLIOGRAFIA PARA A ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE
CARGA DE ESTACAS ESCAVADAS COM TRADO MECÂNICO**

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 (a) **Me. Eng. Civil Maycon André de Almeida**.

BANCA EXAMINADORA


Orientador (a) Prof^a. **Me. MAYCON ANDRÉ DE ALMEIDA**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil


Professor (a) **Me. DEBORA FELTEN**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheira Civil


Professor (a) **Me. GUILHERME IRINEU VENSON**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil

Cascavel, 20 de novembro de 2017.

RESUMO

No momento em que é feito algum tipo de sondagem para que seja realizado o dimensionamento da fundação, poucas vezes é falado sobre se executar a prova de carga mesmo sendo ela de extrema importância a fim de averiguar se os dados encontrados coincidem com a realidade. O ensaio de simples reconhecimento do solo (SPT) é o mais utilizado no mundo, e visando melhorar o ensaio obtendo mais informações de forma que seja possível um dimensionamento mais próximo da realidade, algumas mudanças e um novo método de dimensionamento foram propostos por Aoki (2012), sendo este método chamado de Método de Energia do SPT. As mudanças propostas consistem em medir o comprimento do solo no amostrador-padrão depois ter sido realizado o ensaio e determinar a eficiência do ensaio SPT. O Método de Energia do SPT utiliza estes novos dados e baseia-se matematicamente no Princípio de Hamilton e na teoria da equação para que seja possível a sua formulação. Com este trabalho foi possível perceber que o dimensionamento desenvolvido por Aoki (2012) possui valores de resistência total maior do que utilizando-se métodos já consagrados bibliograficamente como Aoki e Velloso (1975) e Decourt e Quaresma (1978), sendo assim menos conservador que eles, já que os valores obtidos através dele chegam a ser três vezes maior que dos outros métodos.

Palavras-chave: Energia do SPT; Ensaio SPT; Eficiência.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ensaio SPT.....	16
Figura 2 – Exemplo de amostrador para ensaio SPT, martelo de bater.	18
Figura 3 – Sistema inteiro montado.	19
Figura 4 – Exemplo de laudo.....	21
Figura 5 - Evolução de energia potencial, cinética e trabalho durante o evento golpe do martelo.....	22
Figura 6 - Referencial absoluto no ensaio SPT.	27
Figura 7 – Embuchamento no amostrador-padrão.	28
Figura 8 – Energia potencial do sistema.....	28
Figura 9 - Equilíbrio de forças no amostrador no momento que ocorre o golpe.....	30
Figura 10 - Equilíbrio de forças na ponta do amostrador.	32
Figura 11 – Comparação entre os métodos.	46
Figura 12 – Comparação entre os métodos considerando somente resistência lateral.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela1 – Coeficiente de ponderação da capacidade de carga de fundações.....	15
Tabela 2 – N_{spt} retirado de laudo feito por Zen (2016).	37
Tabela3 - Valores propostos para K e α	38
Tabela 4 - Fatores de correção F_1 e F_2	38
Tabela 5 -Coeficientes α e β	39
Tabela 6 - Coeficiente característico do solo.....	39
Tabela 7 – N_{spt} retirado de laudo feito por Zen (2016).	43
Tabela 8 – Eficiência calculas pelo ensaio de prova de carga estática.	44
Tabela 9 – Dimensionamento pelo método de Aoki (2012).....	45
Tabela 10 – Comparação entre os métodos de dimensionamento.....	45
Tabela 11 – Dimensionamento desconsiderando a resistência de ponta, com valores de N_{spt} normais.	46

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Princípio de Hamilton.....	21
Equação 2 – Eficiência do ensaio.....	23
Equação 3 – Energia potencial elástica total	24
Equação 4 – Energia potencial normalizada	24
Equação 5 – Energia potencial de deformação.....	24
Equação 6 – Equação da onda.....	25
Equação 7 –Solução geral da Equação da onda	25
Equação 8 – Resistência total oferecida pelo solo	26
Equação 9 – Eficiência.	29
Equação 10 – Equilíbrio de forças	30
Equação 11 – Resistencia a penetração estática.	31
Equação 12 - Força de atrito na parede vertical externa do amostrador	31
Equação 13 – Força de atrito na parede vertical interna do amostrador	31
Equação 14 – Relação de atrito.	32
Equação 15 – Força resistente R_2	32
Equação 16 – Atrito interno.	33
Equação 17 – Relação de atrito.	33
Equação 18 – Razão de atrito	33
Equação 19 - Força de reação vertical na seção anelar da ponta do amostrador.....	33
Equação 20 - Componente vertical da força de atrito da superfície biselada do amostrador..	34
Equação 21 – Medida da ponta cônica até começo da circunferência da mesma.	34
Equação 22 – Área da ponta cônica do amostrador padrão.....	34
Equação 23 – Atrito lateral entre o solo e o amostrador	34
Equação 24 – Resistência de ponta	34
Equação 25 – Resistência total	34
Equação 26 – Estimativa de carga.....	37
Equação 27 –Dimensionamento pelo método de Decourt e Quaresma	39
Equação 28 – Resistência total	40
Equação 29 – Resistência lateral	40
Equação 30 – Resistência de ponta	40
Equação 31 – Tensão lateral.....	41
Equação 32 – Resistencia a penetração	41

Equação 33 – Tensão de ponta	41
Equação 34 – Relação de atrito	42

SUMÁRIO

CAPITULO 1	11
1.1 INTRODUÇÃO	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE	13
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	13
CAPITULO 2	15
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1.1 Investigações Geotécnicas	15
2.1.2 O ensaio SPT	16
2.1.2.1 Equipamentos	17
2.1.2.2 Procedimento da sondagem SPT	19
2.2 PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA DE HAMILTON	21
2.3 TEORIA DA EQUAÇÃO DA ONDA APLICADA NO SPT	25
2.4 MÉTODO DE ENERGIA DO SPT PARA ESTIMATIVA DE CARGA	27
2.5 MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE CARGA DE FUNDAÇÕES POR ESTACAS	35
CAPITULO 3	36
3.1 METODOLOGIA	36
3.1.1 Tipo de estudo e amostra	36
3.1.1.1 Caracterização do solo	36
3.1.2 Estimativa de carga de estacas	37
3.1.2.1 Método de Aoki e Velloso (1975)	37
3.1.2.2 Método de Decourt e Quaresma (1978)	39
3.1.2.3 Método de Aoki (2012)	40
3.1.3 Análise de dados	42
CAPITULO 4	43
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1.1 Métodos clássicos de dimensionamento	43
4.1.2 Método de Aoki (2012)	44

4.1.3 Comparação entre os métodos.....	45
CAPITULO 5.....	48
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
CAPITULO 6.....	49
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	49
REFERÊNCIAS	50

CAPITULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

A sondagem é um meio de se investigar o tipo de solo e suas condições se utilizando de aparelhos específicos para obter tais resultados, sendo a sondagem SPT “*Standard Penetration Test*” a mais utilizada, sendo ela regulamentada pela norma NBR 6484/2001.

Observando a norma da sondagem SPT que são utilizadas para que seja feito o projeto de fundações percebe-se que não levam em consideração os erros que podem ter ocorrido na execução, sejam eles envolvendo aparelhagem ou erro humano, fazendo com que os valores obtidos sejam diferentes dos reais. Um meio para averiguar tais resultados seria a realização da prova de carga, porém devido ao seu alto custo muitas vezes somente é realizado quando a obra em questão tiver um número de estacas superior aos valores especificados pela norma NBR 6122/2010.

Quando realizada a prova de carga, poderá ser utilizado índices de segurança menos conservadores sendo estes descrito na norma NBR 6122/2010 de forma que se tenha um gasto menor em aço e em concreto.

Desenvolveu-se um método alternativo para o dimensionamento de estacas, aonde considerando-se a eficiência do equipamento e a energia empregada pelo mesmo é capaz de produzir valores mais condizentes com a realidade, se tornando assim mais seguro, com isso foi desenvolvido o Método de Energia SPT.

O Método de Energia SPT utiliza-se da sondagem SPT, que consiste na cravação de um amostrador por meio de golpes de um martelo de 65 Kg em queda livre a uma altura de 75 cm a fim de encontrar o índice de resistência a penetração do amostrador no solo (N). Este índice de resistência (N) é definido como a quantidade de golpes necessários para a cravação dos últimos 30 cm do amostrador padrão, esta medição se dá metro a metro através da cravação de 45 cm de um amostrador padrão.

A ideia por trás deste novo método é a utilização de dois novos dados, sendo um deles o embuchamento do solo no amostrador que é obtido através da medição da altura de solo dentro do amostrador, esta medida começa a ser feita a partir da ponta do mesmo, e o outro a eficiência do sistema SPT utilizado, obtida através de testes utilizando prova de carga de modo que seja possível obter um dimensionamento da forma mais próxima da realidade possível.

Com esses novos dados, e baseando-se matematicamente no princípio da conservação de energia de Hamilton (1744) que consiste na conservação total da energia entre dois instantes quaisquer do evento dinâmico e na teoria da equação da onda aplicada ao ensaio SPT, deduzindo-se assim que a energia potencial no ensaio é sempre variável, tendo como valor mínimo a altura de 75 cm é possível a formulação de uma nova equação, calculando com ela a resistência unitária de ponta e de atrito para realização do dimensionamento de estacas.

É de extrema importância conhecer a eficiência do equipamento SPT utilizado, para que se tenha uma interpretação correta dos dados obtidos, tendo assim valores de N_{spt} padronizados para aquele equipamento e equipe que realizou o teste em questão.

O presente estudo comparou a eficácia do método de energia do SPT com relação a outros métodos clássicos de bibliografia como Aoki e Velloso (1975) e Decourt e Quaresma (1978) para o dimensionamento de estacas escavadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Comparar o novo método de energia SPT desenvolvido por Aoki (2012) com os métodos de Aoki e Velloso (1975) e Decourt e Quaresma (1978).

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar a eficiência média das sondagens SPT já realizada no Campo experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz, utilizando dados de trabalhos e ensaios já realizados no local;
- Dimensionar para diversas profundidades e diâmetros a capacidade de carga de estacas através dos métodos clássicos de bibliografia e pelo método de energia por Aoki (2012).

1.3 JUSTIFICATIVA

Aoki (2012) mostra que é possível aprimorar e desenvolver aspectos inovadores para o ensaio SPT, podendo obter novos parâmetros para que se calcule a resistência unitária de ponta e de atrito através deste método desenvolvido pelo mesmo, chamado de energia do SPT.

Devido as informações adicionais e as considerações que o método energia do SPT traz é possível obter uma segurança ainda maior quando utilizado para o dimensionamento de estacas e ainda ser mais barato, pois os valores obtidos serão mais próximos dos reais, evitando assim que não ocorra superdimensionamento.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Caso seja realizado dimensionamento de estacas utilizando o método desenvolvido por Aoki (2012) como este se sairá comparado aos dimensionamentos de Aoki e Velloso (1975) e Decourt e Quaresma (1978), e poderá ele substituí-los?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

Baseando-se nos resultados obtidos por Aoki (2012) é possível sim que o método de energia SPT substitua os métodos mais clássicos, pois obtendo-se o valor da eficiência do equipamento utilizado é possível chegar o mais perto do índice de resistência (N) real do solo, pois é considerado somente a energia que chega até o amostrador.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Os dados analisados foram de sondagens já realizadas, onde obteve-se os dados de eficiência do equipamento de sondagem utilizado e a medida do embuchamento do solo no amostrador, através dos trabalhos de Dalla Costa (2014) e Belusso e Schlosser (2015) no Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz localizado na Avenida das Torres, 500, na cidade de Cascavel, Paraná.

A pesquisa se restringiu na análise de dados já obtidos em sondagens realizadas. Estes dados serviram como base para a realização do dimensionamento das estacas em diversos diâmetros e profundidades, determinando a capacidade de carga das estacas através dos métodos de Aoki e Velloso (1975), Decourt e Quaresma (1978) e Aoki (2012), comparando os resultados. Não foi necessário a realização de testes laboratoriais.

CAPITULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo encontra-se abordagens sobre o conceito do ensaio de SPT conforme a norma NBR 6484/2001, Princípio de Hamilton e sobre o método de energia do SPT para estimativa de carga.

2.1.1 Investigações Geotécnicas

Conhecer as características do solo é de fundamental importância para que haja a elaboração dos projetos de fundações de forma segura e econômica. Segundo Schnaid (2012), o custo envolvido para que seja realizado sondagens de reconhecimento varia de 0,2 a 0,5% do custo total de uma obra convencional, podendo ser uma porcentagem maior caso seja uma obra especial ou em condição adversa.

A investigação geotécnica é de suma importância, com ela pode-se diminuir o risco de dados incorretos e reduzir o fator de segurança utilizado no dimensionamento, resultando em uma maior segurança e um menor custo para que seja realizada a fundação.

A redução do fator de segurança e dá conforme a NBR 6122/2010, dependendo do tipo de sondagem utilizada conforme a Tabela 1.

Tabela1 – Coeficiente de ponderação da capacidade de carga de fundações.

Condição	Coeficiente
Fundação superficial (sem prova de carga) ^(A)	3
Fundação profunda (sem prova de carga) ^(A)	2
Fundação com prova de carga	1,5

^(A)Capacidade de carga obtida por método empírico ou semi-empírico.

Fonte: NBR 6122/2010.

Quando utilizada a sondagem SPT para reconhecimento do solo a norma NBR 8036/1983, recomenda que deve ser realizado no mínimo, uma sondagem para cada 200 m² de área da projeção em planta do edifício até 1200 m², em áreas entre 1200 m² e 2400 m² deverá ser realizada uma sondagem a cada 400 m² da área em questão, sendo que para áreas maiores

que 2400 m² o número de sondagem ficará a critério do projetista. E em quaisquer circunstâncias quando o local for menor que 200m² terá que ser feito duas sondagens e caso a área tiver entre 200 m² e 400 m² será obrigatória no mínimo três sondagens.

2.1.2 O ensaio SPT

O ensaio SPT “*Standard Penetration Test*”, é uma forma de investigação do solo que tem como objetivo explorar e identificar características geotécnicas, tais como: a determinação do índice de resistência a penetração do amostrador-padrão, determinação do topo rochoso e a profundidade do nível d’água.

Este ensaio utiliza-se de um tripé como mostrado na Figura 1 e consiste na cravação de um amostrador-padrão por meio de golpes de um martelo de 65kg em queda livre a uma altura de 75 cm, anotando o número de golpes necessários para que ocorra a penetração de três trechos de 15cm, sendo o índice de resistência a penetração do amostrador (N) obtido através da somatória dos números de golpes dos últimos 30 cm para a cravação do amostrador padrão. Este ensaio é realizado metro a metro e necessita entre 3 a 5 pessoas para a realização do mesmo.

Figura 1 – Ensaio SPT.



Fonte: SETE engenharia.

2.1.2.1 Equipamentos

Os aparelhos necessários para a realização do ensaio segundo NBR 6484/2001 são:

- Torre com roldana: pode utilizar guincho motorizado ou sarilho de forma a auxiliar no manuseio das hastes e componentes necessários. A roldana deverá estar sempre lubrificada de modo a reduzir ao máximo o atrito;
- Tubos de revestimento: são feitos de aço podendo variar em comprimento entre 1,00 m e/ou 2,00m e com $D_{ext} = 76,1 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ e $D_{int} = 68,8 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, sendo possível a realização de emendas através de luvas;
- Composição de perfuração ou cravação: formada com hastes de aço com diâmetro nominal interno de 25 ($D_{ext} = 33,4 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$ e $D_{int} = 24,3 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$), possuindo peso teórico de 32N/m. Podem ser acopladas utilizando-se de luvas ou roscas bem atarraxadas, seus segmentos podem variar entre 1,00 m e/ou 2,00m;
- Trado-concha: deverá ter diâmetro de $(100 \pm 10) \text{ mm}$;
- Trado helicoidal: possui diâmetro mínimo de 56mm, e para que seja possível a operação o tubo de revestimento deverá ser de 5 mm a 7 mm maior, de modo que o amostrador-padrão consiga descer livremente dentro da perfuração;
- Trépano ou peça de lavagem: constituído por peça de aço com ponta biselada, possui diâmetro nominal 25 e conta com duas saídas laterais para água, sendo estas a uma distância mínima de 200 mm ou máximo de 300mm da ponta biselada. A diferença entre a largura da lâmina do trépano e o diâmetro interno do tubo de revestimento utilizado deverá ser entre 3 mm a 5 mm;
- Amostrador-padrão: Possui diâmetro externo de $50,8 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ e diâmetro interno de $34,9 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ e é composto por cabeça, corpo e sapata. A cabeça deverá possuir dois orifícios laterais para saída da água e do ar, devendo também conter internamente uma válvula constituída por esfera de aço. O corpo tem de ser totalmente liso e sem nenhuma deformação, podendo ou não ser bipartido longitudinalmente. A sapata necessitará ser de aço temperado e não possuir nenhuma trinca ou qualquer tipo de deformação que acabe alterando a sua seção;
- Cabeça de bater: é onde ocorre o impacto direto do martelo, deverá ser constituída por tarugo de aço de $(83 \pm 5) \text{ mm}$ de diâmetro, $(90 \pm 5) \text{ mm}$ de altura e tendo sua massa nominal entre 3,5 kg e 4,5 kg;

- Martelo padronizado: forma prismática ou cilíndrica constituída de ferro, possuindo em sua parte inferior um coxim de madeira dura, podendo ser vazada ou maciça pesando um total de 65kg;
- Baldinho para esgotar o furo;
- Medidor de nível d'água;
- Metro de balcão;
- Recipientes para amostras;
- Bomba d'água centrífuga motorizada;
- Caixa d'água ou tambor com divisória interna para decantação; e
- Ferramentas gerais necessárias à operação da aparelhagem.

A figuras 2 demonstra o amostrador e o martelo de bater respectivamente, enquanto a Figura 3 mostra todo o sistema.

Figura 2 – Exemplo de amostrador para ensaio SPT, martelo de bater.



Fonte: Alibaba (2017).

Figura 3 – Sistema inteiro montado.



Fonte: AGMgeotecnica (2017).

2.1.2.2 Procedimento da sondagem SPT

Conforme norma NBR 6484/2001, o procedimento inicial para começar a sondagem é a locação dos furos, devendo ser marcado utilizando um piquete de madeira ou material apropriado contendo identificação do furo, devendo ele ser muito bem cravado no solo de modo que sirva de referência de nível para a execução da sondagem e determinação da cota através de nivelamento topográfico.

Após a marcação, inicia-se o processo de perfuração onde utiliza-se do trado-concha ou cavadeira manual, perfurando até a profundidade de 1 m, realizando a instalação do primeiro segmento do tubo de revestimento dotado de sapata cortante sendo inserido o revestimento até onde se fizer necessário, devendo ficar a uma distância de no mínimo 50 cm do fundo do furo para que seja realizado o ensaio e amostragem. A partir deste ponto se usa o trado helicoidal para realização da perfuração, intercalando entre a perfuração e o ensaio, até que se atinja o nível d'água. Caso o avanço do trado helicoidal seja inferior a 50 mm após 10 minutos de operação ou atinja o nível d'água, utiliza-se da perfuração por circulação de água por meio do trépano de lavagem. O trado helicoidal pode ser substituído em qualquer caso,

desde que seja garantida a limpeza do furo e não ocorra a perturbação do solo no ponto de ensaio.

A próxima etapa será a determinação do índice de resistência a penetração do amostrador padrão (N) e a retirada de amostras para exames laboratoriais, estas amostras são retiradas utilizando-se do amostrador-padrão com a execução da sondagem SPT.

O ensaio SPT consiste na cravação de um amostrador-padrão por meio de golpes de um martelo de 65 Kg em queda livre a uma altura de 75 cm, anotando-se o número de golpes necessários para a cravação de três trechos de 15 cm sendo o índice de resistência a penetração do amostrador (N) a somatória de golpes necessários para a cravação dos últimos 30 cm do amostrador-padrão.

A cravação do amostrador-padrão só será interrompida antes dos 45 cm quando se ocorre alguma destas situações:

- O número de golpes ultrapassa 30 em um segmento de 15cm;
- Ter sido aplicado 50 golpes durante a cravação total do amostrador; e
- Se após 5 golpes não tiver avanço.

As amostras colhidas deverão ser imediatamente acondicionadas em recipientes herméticos identificados com as informações necessárias da amostra colhida, para que seja realizado posteriormente a análise em laboratório, e posteriormente será identificado no mínimo as seguintes características sendo elas a granulometria, plasticidade, cor e a origem.

Deverá ser feito um relatório de modo que se tenha informações tais como, nome da empresa, número do trabalho, local aonde foi realizado, número da sondagem, data e hora do início e termino da sondagem, métodos de perfuração utilizados para cada profundidade, avanço do tubo de revestimento, numeração e profundidade das amostras, descrição tátil-visual das amostras e demais informações pertinentes de modo que seja realizado o relatório final, conforme é mostrado um exemplo de laudo na Figura 4.

V = energia potencial do sistema; e

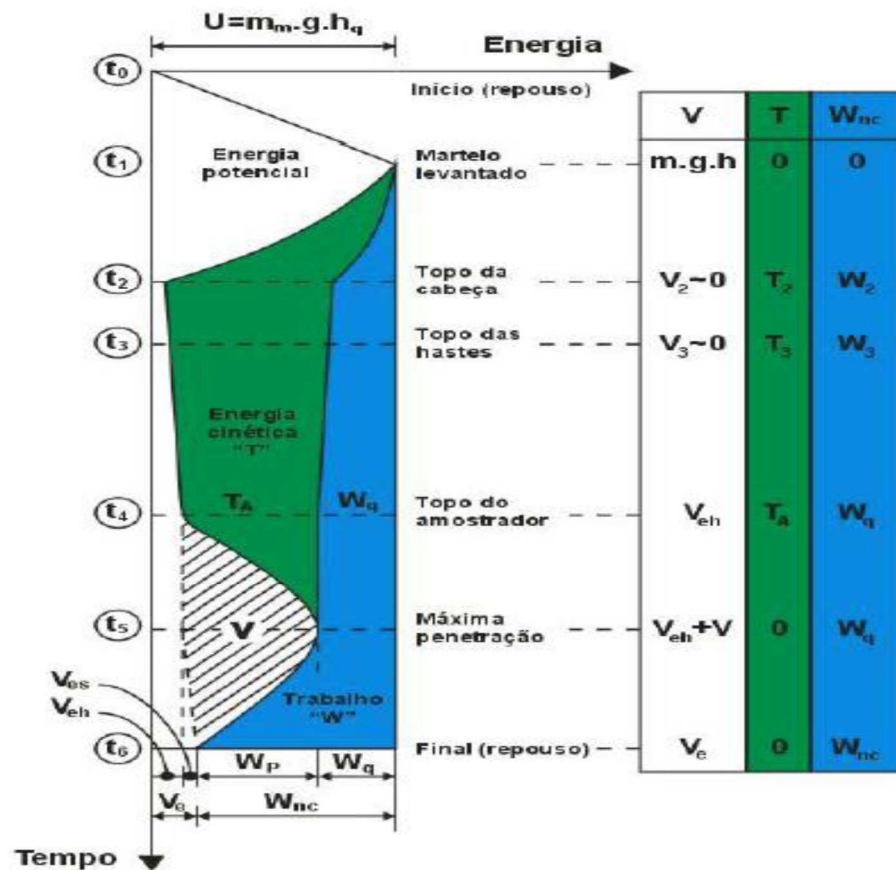
W_{nc} = trabalho efetuado por forças não conservativas;

t_1 = tempo inicial; e

t_2 = tempo final.

A Figura 5 é uma representação da aplicação do Princípio de Hamilton na sondagem SPT, mostrando os tipos de energias e as suas transformações no decorrer da onda de impacto desde o golpe em sua haste até o amostrador.

Figura 5 - Evolução de energia potencial, cinética e trabalho durante o evento golpe do martelo.



Fonte: AOKI & CINTRA, 2000 *apud* NEVES, 2004.

Em sua dissertação, Neves (2004) faz a interpretação da Figura 5 de modo que se têm:

a) o momento que se inicia o ensaio e o martelo de 65 kg é levantado a uma altura de 75 cm que, este momento está compreendido entre t_0 à t_1 , sendo t_1 o ponto de maior energia potencial e t_0 , o ponto de início. O martelo no ponto t_1 entra em queda livre, transformando a

energia potencial em energia cinética no instante t_2 havendo dissipação da energia por meio da deformação elástica e trabalho realizado por forças não conservativas.

Esta perda de energia é resultado de alguns fatores, tais como atrito, a centralização imperfeita do martelo no momento do impacto e até mesmo a utilização de coxins de madeira, fazendo com que a eficiência do sistema diminua, pois, a quantidade de energia que chega ao amostrador é menor que a inicial.

b) no intervalo t_2 à t_3 é onde a onda de impacto percorre do topo da cabeça de bater até as hastes, sendo as variações de energia potencial, cinética e trabalho demasiadamente pequeno neste instante. Esta mesma onda continua percorrendo até o instante t_4 chegando ao topo do amostrador cravando ele assim no solo.

c) no período de tempo entre t_3 e t_4 a energia cinética (T_3) é reduzida tornando-se T_a , que é utilizada para calcular a eficiência do ensaio na Equação 2 e todo o resto da energia neste momento transforma-se em energia potencial que se acumula nas hastes (V_{eh}) e em trabalho realizado por forças não conservativas do sistema. Nota-se que a energia cinética T_a é inversamente proporcional ao comprimento das hastes.

Equação 2 é utilizada para calcular a eficiência do ensaio:

$$\eta^* = \frac{T_A}{U} \quad (2)$$

Onde:

η^* = eficiência do ensaio;

T_A = máxima energia cinética transmitida para o sistema amostrador-solo, este valor é obtido através da realização de prova de carga.

U = energia potencial normalizada do SPT (478,3 J).

d) O instante t_4 é o momento que se inicia a penetração do amostrador no solo, sendo o instante t_5 o ponto de maior penetração ocorrendo a transformação da energia cinética (T_a) para energia potencial de deformação (V).

e) no intervalo de tempo entre t_5 e t_6 uma fração ínfima da energia potencial de deformação (V) se transforma em potencial elástica (V_{es}) devido a deformação elástica que se tem do solo e do amostrador e o restante da energia acaba sendo transformada em trabalho realizado pelas forças resistentes não conservativas.

f) no instante t_6 toda a energia potencial elástica (V_e) acumulada é liberada e o sistema entra em repouso, tendo-se então o trabalho das forças não conservativas (W_{nc}) composto por suas parcelas W_q e W_p .

Analisando as informações é possível deduzir as equações:

$$V_e = V_{es} + V_{eh} \quad (3)$$

Onde:

V_e = energia potencial elástica total;

V_{es} = energia potencial elástica devido o amostrador; e

V_{eh} = energia potencial elástica devido ao solo.

Pode-se deduzir que a força inicialmente aplicada de 478,3 J é igual a somatória de forças finais, sendo estas forças finais a dissipação devido a elasticidade do solo e o trabalho das forças não conservativas, logo se é obtida a Equação 4.

$$U = V_e + W_{nc} \quad (4)$$

Onde:

U = energia potencial normalizada do SPT (478,3 J).

V_e = energia potencial elástica total;

W_{nc} = trabalho das forças não conservativas (W_{nc})

Assim deduziu-se que a energia cinética total no momento t_4 (T_a), é dada pela somatória de toda a energia e trabalho realizado neste instante.

$$T_a = V = V_{es} + W_p \quad (5)$$

Onde:

T_a = energia cinética no momento t_4 ;

V = energia potencial de deformação;

V_{es} = energia potencial de deformação devido ao solo; e

W_p = trabalho realizado pelas forças resistentes não conservativas.

O valor da energia cinética T_a é obtida através da prova de carga, utilizando-se de instrumentação instalada na parte superior do amostrador.

Resumidamente, aplicando-se o Princípio de Hamilton no ensaio SPT nota-se que a energia potencial do sistema é transformada em energia potencial elástica e em trabalho das forças não conservativas.

2.3 TEORIA DA EQUAÇÃO DA ONDA APLICADA NO SPT

Segundo Smith (1960) o impacto causado pelo martelo no momento do golpe para a cravação do amostrador pode ser interpretado pela equação da onda.

A equação da onda segundo Cintra *et al* (2013), descreve o deslocamento w da seção transversal z ao longo do tempo t como mostrado na Equação 6:

$$C^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{sU}{\rho A} \quad (6)$$

Onde:

w = deslocamento da seção;

t = tempo;

z = abscissa da seção;

s = reação lateral local;

ρ = massa específica;

c = velocidade da propagação = $(E/\rho)^{0,5}$;

A = área; e

U = perímetro.

A Equação 7 é a equação da onda obtida por Jean le Rond d'Alembert e tem como sua solução geral à forma, retirada do livro Cintra *et Al* (2013):

$$w(z, t) = g(z + ct) + f(z - ct) = Wd \downarrow + Wu \uparrow \quad (7)$$

Onde:

$w(z,t)$ = deslocamento da seção z no instante t .

As componentes g e f são denominadas de onda descendente (Wd) e onda ascendente (Wu) que se deslocam em uma velocidade c . A velocidade da partícula em cada instante durante toda a sua propagação é proporcional a resistência oferecida pelo solo. Sendo a resistência total oferecida pelo solo dada pela Equação 8.

$$R_t(z, t) = R_u(z, t) \cdot [1 + J_s \cdot v(z, t)] \quad (8)$$

Onde:

J_s = coeficiente de amortecimento de Smith;

$v(z, t)$ = velocidade de partícula;

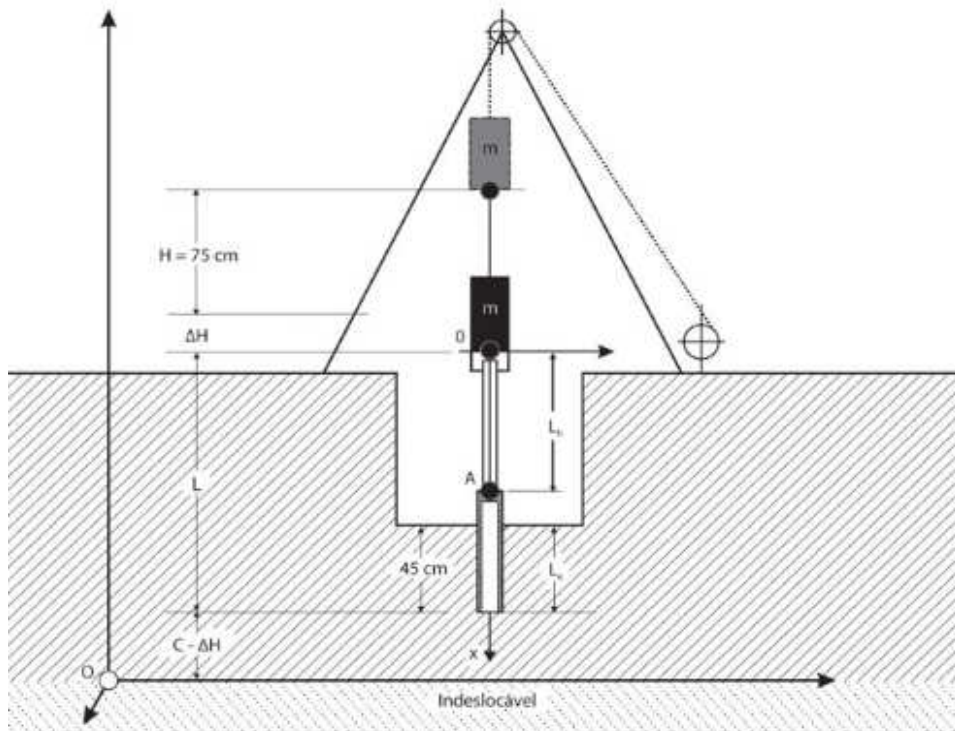
R_u = resistência a penetração estática do amostrador; e

R_t = resistência total oferecida pelo solo.

Segundo Aoki (1979) este sistema depende das características do solo ao longo do amostrador e do solo entre a ponta do amostrador e a superfície que serve de origem do ponto de referência.

A Figura 6 demonstra que a altura de queda real do martelo seria $H + \Delta H$, ao invés de somente os 75 cm como descritos na norma NBR 6484/2001. Logo, a energia potencial no ensaio é variável, tendo como valor mínimo a altura de queda de 75 cm (AOKI, 2012).

Figura 6 - Referencial absoluto no ensaio SPT.



Fonte: AOKI, 2012.

2.4 MÉTODO DE ENERGIA DO SPT PARA ESTIMATIVA DE CARGA

Aoki (2012) sugere um novo procedimento para se calcular a capacidade de carga de estacas, utilizando novos parâmetros que podem ser retirados de um ensaio SPT. Neste método, além dos dados normalmente usados, tem a eficácia do sistema e o embuchamento do solo no amostrador-padrão, sendo o embuchamento a altura do solo retida no amostrador como mostrado na Figura 7.

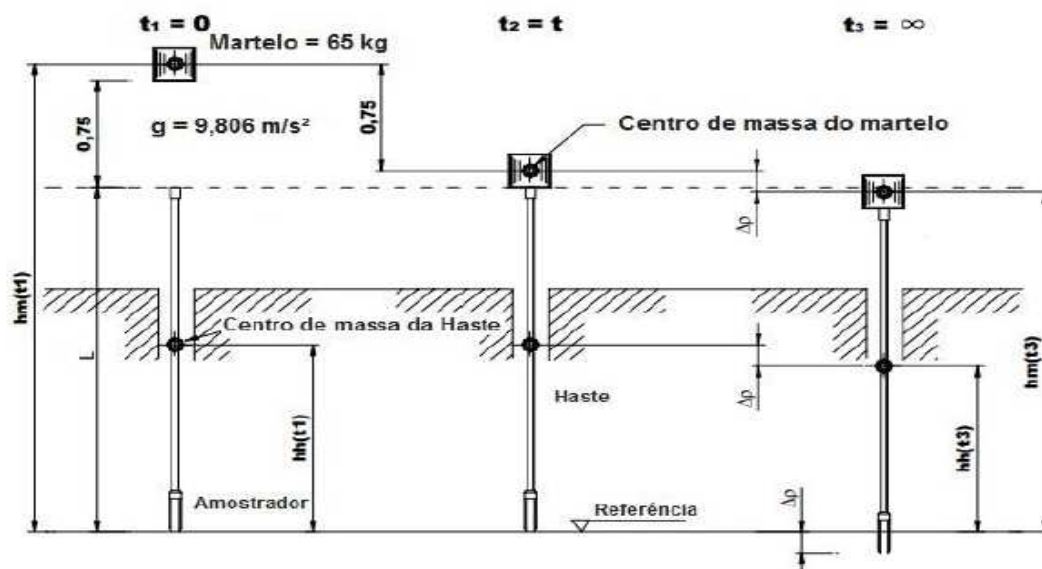
Figura 7 – Embuchamento no amostrador-padrão.



Fonte: Jean Paulo Mendes Alves (2015).

Estes parâmetros nos possibilitam descobrir a energia real que chega ao amostrador, sendo que ela depende de quanta energia é perdida no sistema até que ela chegue no amostrador e da resistência a penetração do amostrador no solo (R_u). Na figura 8 é demonstrado o processo de cravação do amostrador, no primeiro momento ($t_1=0$) é antes do martelo ser liberado, no segundo instante ($t_2=t$) é o momento aonde anterior ao impacto do martelo na cabeça de bater e na última fase ($t_3=\infty$) corresponde ao momento posterior a cravação do amostrador, conforme Figura 8.

Figura 8 – Energia potencial do sistema.



Fonte: Energia potencial do sistema (Odebrecht, 2003).

A energia no sistema começa transmitida a partir do momento que o martelo atinge a cabeça de bater, sendo propagada em forma de uma onda de tensão, passando pela configuração de todo o sistema, perdendo energia até o momento que ocorre a cravação do amostrador no sol, assim sendo a quantidade e energia perdida diretamente ligada a qualidade e configuração do sistema (Belicanta e Ferraz, 2000).

Deste modo afim de se obterá quantidade de energia recebida pelo sistema é empregada a prova de carga estática sobre o amostrador SPT, com o intuito de se obter uma curva *carga x deslocamento*, registrando os esforços e os deslocamentos para que se crie a curva e com a área desta curva se tornando possível determinar a quantidade de energia cinética recebida pelo sistema a fim de determinar a eficiência do ensaio (NEVES, 2004).

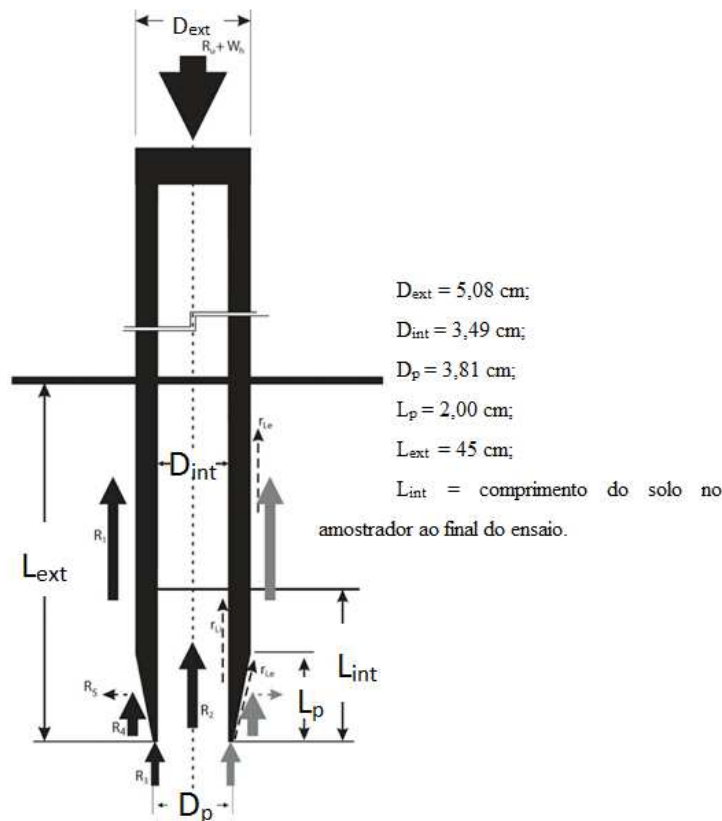
Quando o deslocamento da prova de carga for igual a medida de penetração gerada por um golpe do martelo é possível encontrar o trabalho gerado pelas forças resistentes “Wps” através da curva carga-deslocamento, podendo assim calcular a eficiência através da Equação

$$\eta_s = \frac{W_{ps}}{U} \times 100 \% \quad (9)$$

Com estes novos dados e baseando-se matematicamente no Princípio de Hamilton e na teoria da equação da onda, Aoki (2012) demonstra ser possível determinara resistência à penetração do amostrador padrão no solo de forma mais próxima ao real devido a adição de novos parâmetros, criando assim o novo método chamado de Método de energia do SPT.

Na Figura 9 é apresentado uma interpretação do equilíbrio de forças no amostrador no momento que ocorre o impacto do martelo durante o ensaio SPT, juntamente com as medidas de um amostrador padrão brasileiro com dimensões padronizadas conforme NBR 6484/2001.

Figura 9 - Equilíbrio de forças no amostrador no momento que ocorre o golpe.



Fonte: Cintra et al, 2013.

Conforme Cintra *et al.* (2013) a variável L_{int} seria realizada a cada profundidade, pois tem correlação direta com o atrito causado pela penetração do amostrador no solo. E Segundo Cintra *et al.* (2013) devido ao equilíbrio estático das forças demonstrado na Figura 9 é permitido escrever a Equação 10:

$$R_u + W_h = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (10)$$

Em que:

W_h = peso das hastes (3,6 kgf/m) e cabeça de bater (65kg);

R_u = resistência a penetração estática do amostrador;

R_1 = força de atrito na parede vertical externa do amostrador;

R_2 = força de atrito na parede vertical interna do amostrador;

R_3 = força de reação vertical na seção anelar da ponta do amostrador;

R_4 = componente vertical da força de atrito ao longo da superfície biselada tronco cônica do amostrador;

R_5 = componente horizontal da força de atrito ao longo da superfície biselada tronco cônica do amostrador.

A resistência a penetração estática do amostrador é influenciada diretamente pela eficiência do equipamento utilizado, além do N_{spt} do solo que está sendo cravado o amostrador, logo tendo a Equação 11:

$$R_u = \eta \cdot 65.75 \cdot \left[\frac{\frac{30}{N_{spt}} + 75}{75} \right] \cdot \frac{N_{spt}}{30} (\text{kgf}) \quad (11)$$

Onde:

η = eficiência do ensaio, obtido através de prova de carga;

N_{spt} = N_{spt} da camada de solo analisada.

A força resistente R_1 , ocorre por causa do atrito do amostrador com o solo em sua parte externa, de forma que suas medidas e o atrito da sua parede externa sejam diretamente proporcionais ao seu resultado, tendo assim a Equação 12:

$$R_1 = \pi \cdot D_{ext} \cdot (L_{ext} - L_p) \cdot r_L \quad (12)$$

Onde:

r_L = atrito na parede externa e no chanfro do amostrador;

A força R_2 se desenvolve internamente ao longo do tubo, sendo determinada em função das suas medidas e ao seu atrito da parede interna do amostrador, como expressa na Equação 13:

$$R_2 = \pi \cdot D_{int} \cdot r_{Li} \cdot L_{int} \quad (13)$$

Onde:

L_{int} = medida de embuchamento obtida através do ensaio;

D_{int} = diâmetro interno do amostrador-padrão (3,49 cm);

r_{Li} = atrito na parede interna do amostrador, obtido através de cálculo.

Por vezes o atrito interno é maior que o atrito externo, tendo assim uma relação entre o atrito interno e o externo, conforme mostrado na Equação 14:

$$a = r_{Li}/r_L \quad (14)$$

a = valor mínimo de 1, como descrito por Aoki;

r_L = atrito na parede externa e no chanfro do amostrador;

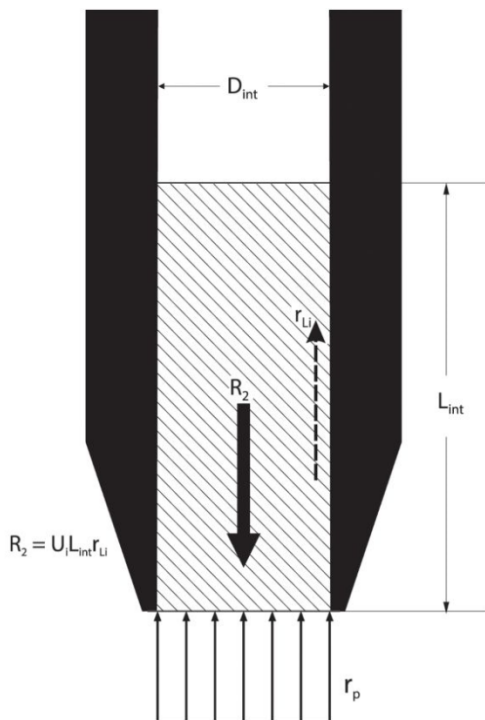
r_{Li} = atrito na parede interna do amostrador.

Considerando o atrito interno maior que o externo sendo possível reescrever a Equação de R_2 como descrito na Equação 15:

$$R_2 = \pi \cdot D_{int} \cdot a \cdot r_L \cdot L_{int} \quad (15)$$

Na Figura 10 é apresentado o equilíbrio de forças na ponta aberta do amostrador.

Figura 10 - Equilíbrio de forças na ponta do amostrador.



Fonte: Cintra et al, 2013.

Ainda observando o equilíbrio de forças na ponta do amostrador na Figura 10, é possível admitir que o atrito interno no amostrador (R_2) é igual a resistência da ponta aberta do amostrador padrão SPT, podendo reescrever a equação como:

$$R_2 = \pi \cdot D_{int}^2 / 4 \cdot r_p \quad (16)$$

Denomina-se como razão de atrito (R_f) o número que relaciona o atrito lateral externo com a resistência de ponta do ensaio SPT obtendo-se a Equação 17:

$$R_f = r_L / r_p = r_{Li} / (a \cdot r_p) \quad (17)$$

Onde:

r_L = atrito na parede externa e no chanfro do amostrador;

r_{Li} = atrito na parede interna do amostrador;

a = relação entre atrito interno e externo;

r_p = resistência de ponta;

Ao considerar a expressão anterior, podemos dizer que a razão de atrito pode ser determinada então pela Equação 18:

$$R_f = D_{int} / (4 \cdot a \cdot L_{int}) \quad (18)$$

A força resistente R_3 , ocorre por causa da reação com o solo em sua parte anelar na ponta do amostrador, de forma que as medidas da ponta do amostrador, a razão de atrito, o atrito na parede externa e no chanfro do amostrador, obtendo assim a Equação 19:

$$R_3 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_p - D_{int})^2 \cdot \left(\frac{r_L}{R_f}\right) \quad (19)$$

Onde:

D_p = diâmetro da ponta.

A força resistente R_4 é resultante das medidas cônicas na ponta do amostrador juntamente com o atrito na parte externa do amostrador, tendo assim a Equação 20:

$$R_4 = (S_L * L_p / L) * r_L \quad (20)$$

Onde:

L_p = comprimento da ponta cônica (2cm);

L = medida em cm do começo da ponta cônica até se tornar uma circunferência, calculada pela Equação 21;

S_L = área da ponta cônica do amostrador padrão, calculada pela Equação 22.

$$L = \{ L_p^2 + \left[\frac{D_{ext} - D_p}{2} \right]^2 \}^{0,5} \quad (21)$$

$$S_L = \pi * L * (D_{ext} + D_p) / 2 \quad (22)$$

Com todas as considerações anteriores, pode-se determinar o atrito lateral entre o solo e o amostrador do ensaio conforme Equação 23:

$$r_L = \frac{R_u - W_h}{\pi * D_{ext} * (L_{ext} - L_p) + \pi * D_{int} * a * L_{int} + \frac{\pi * (D_p - D_{int})^2 * R_f}{4 * a} + S_L * \frac{L_p}{L}} \quad (23)$$

Podendo ser deduzida a resistência de ponta pela Equação 24:

$$r_p = r_L / R_f \quad (24)$$

Onde:

r_p = resistência de ponta;

R_f = relação de atrito.

Tendo como resistência última de ruptura a Equação 25:

$$R_t = \frac{r_L + r_p}{2} \quad (25)$$

Onde:

R_t = resistência última de ruptura.

2.5 MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE CARGA DE FUNDAÇÕES POR ESTACAS

O método de Aoki e Velloso (1975) e Decourt e Quaresma (1978), foram criados a partir de correlações entre os resultados obtidos através dos ensaios dinâmicos e de penetração estática.

Estes métodos utilizam-se de coeficientes já estabelecidos, tais como os coeficientes do solo e do tipo de estaca que será utilizada, esses valores são utilizados para o cálculo de resistência de ponta e resistência lateral afim de se determinar a capacidade de carga. Os procedimentos de cálculos afim de se determinar tais resistências estarão descritos de forma completa no Capítulo 3.

CAPITULO 3

3.1 METODOLOGIA

Este trabalho teve como seu objetivo averiguar se o novo método desenvolvido por Aoki (2012) para o dimensionamento de estacas apresenta resultados próximos aos métodos clássicos, os dados utilizados para a pesquisa foram de trabalhos anteriores realizados no Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz, localizado na Avenida das Torres, 500, na cidade de Cascavel, Paraná.

3.1.1 Tipo de estudo e amostra

O estudo foi a análise de dados de sondagens já realizadas retirados através dos trabalhos de Dalla Costa (2014), Belusso e Schlosser (2015) e Zen (2016), utilizando-se deles para a realização do dimensionamento de estacas pelos métodos clássicos de bibliografia e pelo método desenvolvido por Aoki (2012), verificando se o método desenvolvido por Aoki apresenta estimativa próxima aos métodos clássicos.

A pesquisa foi realizada pelo método quantitativo, pois foram realizados cálculos a fim de dimensionar estacas para diversos diâmetros e profundidades através dos métodos clássicos e o novo método de energia pelo ensaio de sondagem SPT desenvolvido por Aoki (2012).

3.1.1.1 Caracterização do solo

Os resultados da caracterização do solo foram obtidos por Zen (2016) através da realização do ensaio SPT e coleta de amostras para que fosse feitos ensaios laboratoriais, compreendendo os ensaios de LL e Lp, cálculos de IG e IP sendo feita a classificação do solo segundo TBR e SUCS.

O ensaio SPT foi realizado até atingir o 15º metro, sendo realizado em três pontos diferentes, sendo que os dados utilizados neste trabalho foram somente o do primeiro ponto (SPT 01), sendo os valores obtidos para o índice N_{spt} conforme Tabela 2 e a classificação do solo dada como argila silto arenosa.

Tabela 2 – Nspt retirado de laudo feito por Zen (2016).

Profundidade	Nspt
1	2
2	2
3	2
4	2
5	5
6	9
7	8
8	4
9	12
10	14
11	17
12	23
13	30
14	34
15	45

Fonte: Zen (2016).

3.1.2 Estimativa de carga de estacas

Foi feita a estimativa de carga utilizando o método de Aoki e Velloso (1975), Decourt e Quaresma (1978) e o novo método desenvolvido por Aoki (2012), os dados foram anotados em forma de tabela para serem comparados.

Estes métodos partem do princípio que se utilizando de correlações entre o índice de penetração Nspt é possível calcular a capacidade de carga da fundação, a sua ruptura.

A seguir é apresentado o procedimento de cálculo dos métodos citados anteriormente.

3.1.2.1 Método de Aoki e Velloso (1975)

Equação 26 é utilizada para o dimensionamento através do método de Aoki e Velloso (1975), sendo que os valores de K , α , $F1$ e $F2$ são retirados da Tabela 3 e 4 respectivamente.

$$P_u = \frac{A_p \cdot N_p \cdot K}{F1} + \frac{U \cdot \sum_1^N (K \alpha \cdot \bar{N} \cdot \Delta L)}{F2} \quad (26)$$

Onde:

P_u = carga de ruptura da estaca (kN);

A_p = área da ponta da estaca (m²);

K, α = coeficiente tabelado de acordo com o solo;

U = perímetro da estaca (m);

Δl = espessura da camada de solo considerada (m);

N_p = Nspt da cota e apoio da estaca;

$\overline{N_l}$ = média Nspt ao longo da camada de solo;

F_1 e F_2 = tabelado de acordo com o sistema de fundação utilizado.

Tabela3 - Valores propostos para K e α .

Tipo de solo	K (Mpa)	α (%)
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
Silteareno-argiloso	0,45	2,8
Silte argiloso	0,23	3,4
Silteargilo-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: Alonso (1983).

Tabela 4 - Fatores de correção F_1 e F_2 .

Tipo de estaca	F_1	F_2
Franki	2,5	“2F1”
Metálica	1,75	“2F1”
Pré-moldada	1+D/0,8	“2F1”
Escavada	3,0	“2F1”
Raiz, Hélice contínua e Ômega	2,0	“2F1”

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

3.1.2.2 Método de Decourt e Quaresma (1978)

Equação 27 é utilizada para o dimensionamento através do método de Decourt e Quaresma (1978), sendo os valores de α , β e C retirados da Tabela 5 e 6:

$$Pu = \alpha \cdot C \cdot Ap \cdot \overline{Np} + \beta \cdot 10 \left(\frac{\overline{Nl}}{3} + 1 \right) \cdot Sl \quad (27)$$

Onde:

α, β = coeficientes tabelados em função do solo e do sistema de fundação;

Ap = área da ponta da estaca (m^2);

Sl = área lateral útil da estaca;

$\overline{Np}$ = média N_{spt} da cota de apoio;

$\overline{Nl}$ = média N_{spt} ao longo do fuste da estaca;

C = coeficiente tabelado de acordo com o solo;

Tabela 5 - Coeficientes α e β .

Estaca	Cravada (estaca padrão)		Escava (em geral)		Escavada (c/ bentonital)		Hélice contínua		Raiz		Injetada (alta pressão)	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
Solo												
Argilas	1,00*	1,00*	0,85	0,80	0,85	0,90*	0,30*	1,00*	0,85	1,50*	1,00*	3,00*
Solos**	1,00*	1,00*	0,60	0,65	0,60	0,75*	0,30*	1,000*	0,60	1,50*	1,00*	3,00*
Areias	1,00*	1,00*	0,50	0,50	0,50	0,60*	0,30*	1,00*	0,50	1,50*	1,00*	3,00*

* Valores para o qual a correlação inicial foi desenvolvida

* Valores apenas indicativos do reduzido número de dados disponíveis

** Solos intermediários

Fonte: Decourt (1996).

Tabela 6 - Coeficiente característico do solo.

Coeficiente característico do solo C	
Solo	C (kPa)
Argila	120
Silte argiloso	200
Silte arenoso	250
Areia	400

Fonte: Decourt e Quaresma (1978).

3.1.2.3 Método de Aoki (2012)

Equação 28 é utilizada para o dimensionamento através do novo método de fundações de acordo com Aoki (2012):

$$R_t = R_l + R_p \quad (28)$$

Onde:

R_t = resistência total;

R_l = resistência lateral;

R_p = resistência de ponta.

Na Equação 29 e 30 R_l e R_p são explicados respectivamente:

$$R_l = r_{L1} * h_1 + r_{L2} * h_2 + r_{L3} * h_3 + r_{Ln} * h_n \dots \quad (29)$$

Onde:

r_{L1} = atrito na parede externa e no chanfro do amostrador na primeira camada analisada;

h_1 = área externa da primeira camada analisada;

r_{L2} = atrito na parede externa e no chanfro do amostrador na segunda camada analisada;

h_2 = área externa da segunda camada analisada;

r_{L3} = atrito na parede externa e no chanfro do amostrador na terceira camada analisada;

h_3 = área externa da terceira camada analisada;

r_{Ln} = atrito na parede externa e no chanfro do amostrador na camada “n” analisada;

h_n = área externa da camada “n” analisada;

$$R_p = r_p * A_p \quad (30)$$

Onde:

r_p = tensão na ponta na camada em análise;

A_p = área da ponta da estaca.

A tensão lateral e de ponta utilizadas para os cálculos são obtidas através da Equação 31 e 33 respectivamente.

$$r_L = \frac{R_u - W_h}{\pi * D_{ext} * (L_{ext} - L_p) + \pi * D_{int} * a * L_{int} + \frac{\pi * (D_p - D_{int})^2 * R_f}{4 * a} + s_l * \frac{L_p}{L}} \quad (31)$$

Onde:

r_L = atrito na parede externa e no chanfro do amostrador;

R_u = resistência a penetração estática do amostrador;

W_h = peso das hastes e cabeça de bater;

D_p = diâmetro da ponta do amostrador (3,81cm);

D_{ext} = diâmetro externo do amostrador (5,08cm);

D_{int} = diâmetro interno do amostrador (3,49cm);

L_p = altura da ponta do amostrador (2,0cm);

L_{ext} = altura total cravada do amostrador (45cm);

L_{int} = altura do embuchamento do solo;

a = relação entre atrito interno e externo.

Para a realização da Equação 31 é necessário a resistência a penetração (R_u) que pode ser obtida através da Equação 32.

$$R_u = \eta \cdot 65.75 \cdot \left[\frac{\frac{30}{N_{spt}} + 75}{75} \right] \cdot \frac{N_{spt}}{30} \text{ (kgf)} \quad (32)$$

Onde:

η = eficiência do sistema, obtido por prova de carga sobre amostrador padrão;

N_{spt} = número de golpes necessários para a cravação do amostrador nos últimos 30 cm da camada em análise.

E a tensão de ponta pode ser deduzida pela Equação 33:

$$r_p = r_L / R_f \quad (33)$$

r_p = tensão de ponta;

Rf = relação de atrito.

Para que seja utilizada a Equação 33 é preciso de Rf , que é calculado através da Equação 34:

$$Rf = \frac{D_{int}}{4*a*L_{int}} \quad (34)$$

Rf = relação de atrito.

D_{int} = diâmetro interno do amostrador;

L_{int} = altura do embuchamento do solo.

a = atrito.

3.1.3 Análise de dados

Foi realizada a análise dos resultados obtidos através das equações de Aoki e Velloso (1975) e Decourt e Quaresma (1978) com o novo método desenvolvido por Aoki (2012), verificando se o novo método desenvolvido por Aoki (2012) apresentava dados parecidos com os outros dois métodos clássicos, estes dados estão em forma de tabela no *software* Excel.

CAPITULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.1 Métodos clássicos de dimensionamento

A cara caracterização do solo por parte de Zen (2016) em seu trabalho, onde os classificou e obteve o Nspt para cada camada. Os valores de Nspt para cada profundidade estão descritos na Tabela 7 e a caracterização de todas as camadas do solo seguindo o especificado pela NBR 7181/84 quando utilizado defloculante foi de argila silto arenosa.

Tabela 7 – Nspt retirado de laudo feito por Zen (2016).

Profundidade	Nspt
1	2
2	2
3	2
4	2
5	5
6	9
7	8
8	4
9	12
10	14
11	17
12	23
13	30
14	34
15	45

Fonte: Zen (2016).

O dimensionamento do método de Aoki e Velloso (1975) e Decourt e Quaresma (1978) se deu através de planilha, sendo todo o seu cálculo realizado seguindo a metodologia descrita no Capítulo 3.

Observou-se que o método de Aoki e Velloso (1975) considera mais a resistência de ponta que a lateral, sendo isto ao contrário do método de Decourt e Quaresma (1978) aonde os valores obtidos da resistência lateral chegar a ser até duas vezes maior que o pontual.

4.1.2 Método de Aoki (2012)

A eficiência utilizada no método de Aoki foi obtida através do ensaio de prova de carga estática sobre o amostrador-padrão para o solo do Campo Experimental da Faculdade Assis Gurgacz, sendo este ensaio realizado por Belusso e Schlosser (2015), aonde foi encontrada uma média de 52,85% de eficiência como mostra a Tabela 8.

O embuchamento foi realizado após cada ensaio de SPT, sendo medida o comprimento da amostra dentro do amostrador-padrão, obtendo assim uma medida de embuchamento para cada profundidade.

Para o dimensionamento foi considerado que as estacas seriam realizadas com diâmetro de 30 cm, teriam um arrasamento de 1 metro e possuiriam N_{spt} conforme Tabela 7.

Tabela 8 – Eficiência calculas pelo ensaio de prova de carga estática.

Prova de carga estática (PCE)	Profundidade (m)	Deslocamento (mm)	N_{spt} (nº golpes/30cm)	Eficiência (%)
PCE 1	1	40	2,75	23,01
PCE 2	2	35	3,15	45,5
PCE 3	3	42	3,52	47,07
PCE 4	1	40	1,25	32,43
PCE 5	2	40	2,35	72,07
PCE 6	3	40	3	61,71
PCE 7	1	35	1,55	57,41
PCE 8	2	45	1,5	71,55
PCE 9	3	40	1,97	65,11
Média				52,85

Fonte: Belusso e Schlosser (2015).

Utilizando-se os dados obtidos por Belusso e Vanessa Schlosser (2015), retirou-se os valores que estavam muito abaixo da média, sendo eles, os valores de PCE 1 e PCE 4, de forma que a amostra ficasse mais homogênea, desta forma chegou-se a uma nova média de

60,06%, utilizando este novo valor para que fosse realizado o dimensionamento pelo novo método de Aoki (2012).

4.1.3 Comparação entre os métodos

A Tabela 10 compara os valores obtidos para a resistência lateral, de ponta e total de cada método, sendo que se nota o valor elevado do método de Aoki (2012) quando comparados com os outros métodos. Para o método de Aoki (2012) o coeficiente de segurança para determinação da carga admissível foi utilizado conforme norma NBR 6122/2010, onde determina que previsão de capacidade de carga para estacas sem prova de carga o fator de segurança é 2.

Os dimensionamentos das estacas foram feitos a partir do seu terceiro metro até o seu décimo, na tabela 9 é mostrado a tabela do cálculo utilizando o método de Aoki (2012), sendo 4 Resistencia admissível (R_{adm}) o somatório da resistência lateral e pontual dividido pelo fator de segurança de valor 2, determinado por norma NBR 6122/2010 para previsões sem prova de carga obtendo assim os valores de resistência para os sete metros de profundidade, mostrados na Tabela 10.

Tabela 9 – Dimensionamento pelo método de Aoki (2012).

Prof (m)	Nspt	Lint (cm)	Arrasam.	Lutil (m)	Ru (kgf)	W (kgf)	a	L cm	Sl cm ²	Rf	rL	rP	Fuste (kN)	Ponta (kN)	Radm
4	2	23	1	3	187	17,8	1	2,1	29,3	0,038	0,2	4,6	50,4	32,6	41,5
5	5	27	1	4	467,5	21,4	1	2,1	29,3	0,032	0,4	13,7	92	96,6	94,3
6	9	26	1	5	841,4	25	1	2,1	29,3	0,034	0,8	24,3	169	172,1	170,5
7	8	21	1	6	747,9	28,6	1	2,1	29,3	0,042	0,8	18,3	240,8	129,6	185,2
8	4	22	1	7	374	32,2	1	2,1	29,3	0,04	0,4	9	274,5	63,8	169,1
9	12	23	1	8	1121,9	35,8	1	2,1	29,3	0,038	1,1	29,6	380,4	209,4	294,9
10	14	27	1	9	1308,9	39,4	1	2,1	29,3	0,032	1,257	38,89	498,9	274,9	386,9

Fonte: Autor (2017).

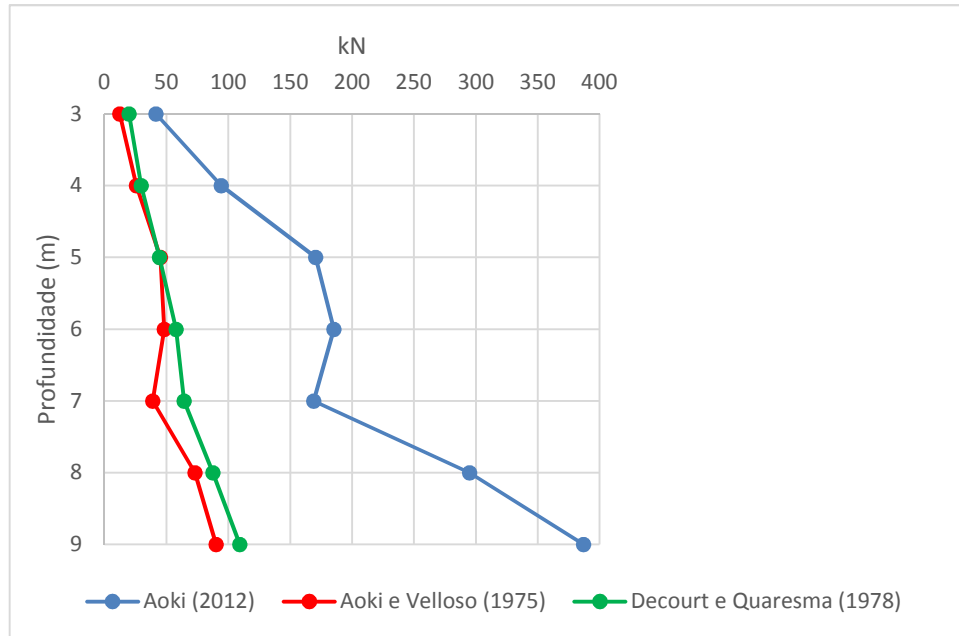
Tabela 10 – Comparação entre os métodos de dimensionamento.

Aoki			Aoki e Velloso			Decourt e Quaresma		
Res. Lateral (kN)	Res. de Ponta (kN)	Res. Admissível (kN)	Res. Lateral (kN)	Res. de Ponta (kN)	Res. Admissível (kN)	Res. Lateral (kN)	Res. de Ponta (kN)	Res. Admissível (kN)
50,4	32,6	41,5	9,3	15,6	12,4	25,1	14,4	19,8
92,0	96,6	94,3	12,4	38,9	25,7	37,7	21,6	29,7
169,0	172,1	170,5	20,2	70,0	45,1	50,3	38,5	44,4
240,8	129,6	185,2	34,2	62,2	48,2	62,8	52,9	57,9

274,5	63,8	169,1	46,7	31,1	38,9	77,9	50,5	64,2
380,4	209,4	294,9	52,9	93,3	73,1	117,3	57,7	87,5
498,9	274,9	386,9	71,5	108,9	90,2	146,5	72,1	109,3

Fonte: Autor (2017).

Figura 11 – Comparação entre os métodos.



Fonte: Autor (2017).

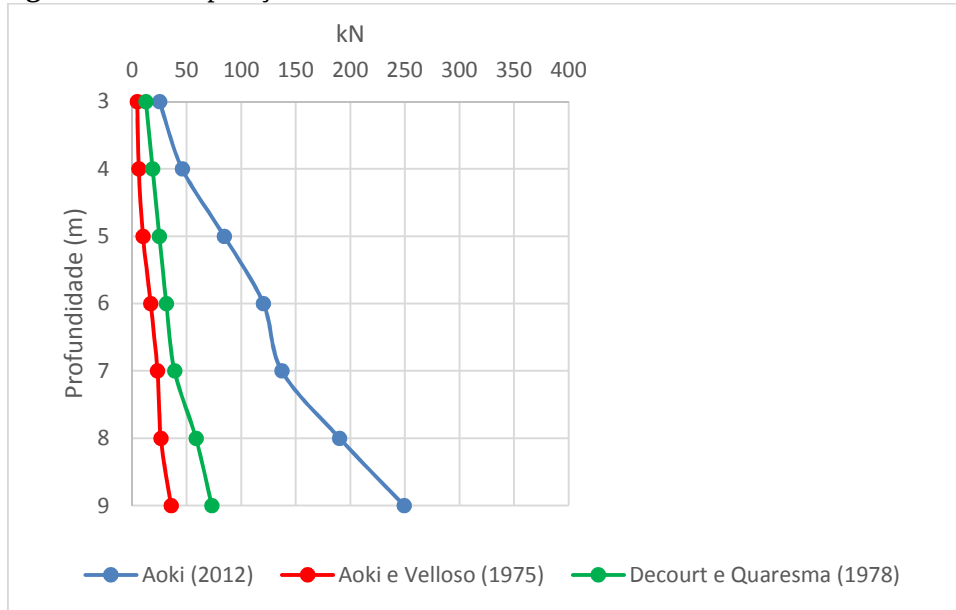
Em razão do processo executivo o solo no fundo estará fofo, fazendo com que a resistência de ponta não seja sequer parecida com a estimada, devido a isso desconsiderou-se a resistência de ponta por segurança. Utilizando o Nspt conforme a Tabela 7 para a estimativa de carga através dos três métodos, obteve-se os resultados de dimensionamentos demonstrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Dimensionamento desconsiderando a resistência de ponta, com valores de Nspt normais.

Aoki		Aoki e Velloso		Decourt e Quaresma	
Res. Lateral (kN)	Res. Admissível (kN)	Res. Lateral (kN)	Res. Admissível (kN)	Res. Lateral (kN)	Res. Admissível (kN)
50,4	25,2	9,3	4,7	25,1	12,6
92	46	12,4	6,2	37,7	18,8
169	84,5	20,2	10,1	50,3	25,1
240,8	120,4	34,2	17,1	62,8	31,4
274,5	137,2	46,7	23,3	77,9	39,0
380,4	190,2	52,9	26,4	117,3	58,6
498,9	249,4	71,5	35,8	146,5	73,2

Fonte: Autor (2017).

Figura 12 – Comparação entre os métodos considerando somente resistência lateral.



Fonte: Autor (2017).

A diferença de resistência fica ainda maior quando se utiliza um N_{spt} reduzido que foi utilizado para ver se os novos métodos se beneficiariam, fazendo com que a diferença entre as resistências somente aumenta devido a isso.

Percebe-se que em todos os momentos os valores obtidos através do método de Aoki (2012) foram maiores que os outros métodos, mostrando que realmente, ele é menos conservador.

CAPITULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram realizados dimensionamentos de estaca utilizando-se de três métodos diferentes, sendo eles Aoki (2012), Aoki e Velloso (1975) e Decourt e Quaresma (1978) em sete profundidades diferentes, percebendo os valores obtidos para os métodos mais clássicos ficaram muito parecidos, já o método de Aoki (2012) a partir de quatro metros de profundidade a diferença entre eles só aumentou, chegando a obter valores até quatro vezes maiores que os outros, como é mostrado na Tabela 10.

Percebe-se também que grande parte da variação dos valores de N_{spt} ocorrem principalmente pela não conformidade do ensaio com o método normatizado, sendo assim é muito importante saber a eficiência do sistema para que se tenha o N_{spt} o mais próximo do real possível.

Com este trabalho foi possível perceber que com a utilização de alguns procedimentos simples e que são fáceis de se executar é possível obter novos parâmetros a fim de melhorar o ensaio SPT. E com a utilização desses novos parâmetros chegar a dimensionamento que se comporte de uma maneira menos conservadora que os demais métodos, resultando em uma economia na hora da execução da obra.

Em meio a tanto dimensionamento, seria de grande interesse haver a realização de uma prova de carga a fim de se comparar os valores reais obtidos com os valores obtidos através dos dimensionamentos.

Através do valor de eficiência obtida por meio dos trabalhos de Belusso e Schlosser (2015), percebe-se que os valores utilizados pelos métodos de Aoki e Velloso (1975) e Decourt e Quaresma (1978) são conservadores, visto que já existe o coeficiente de segurança para que a carga admissível encontrada não seja maior que a carga real suportada pelo solo, fazendo com que muitas vezes a estaca seja superdimensionada.

Apesar dos resultados obtidos através do método de Aoki (2012) estarem de acordo com o seu método, seria interessante a realização da prova de carga estática sobre estacas com mesmo diâmetro que a que se planeja utilizar, para que seja conferido os dados dimensionados pelos dados reais.

CAPITULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar novamente dimensionamento de estacas utilizando métodos os abordados neste trabalho, com a diferença que seria feita uma prova de carga com o objetivo de comparar os valores de dimensionamentos com valor real suportado obtido através da prova de carga.

REFERÊNCIAS

- AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In.: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Buenos Aires, 1975. Anais. Buenos Aires: ISSMFE, V.1, p. 367-376, 1975.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – NBR 6122; **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – NBR 6484; **Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – NBR 7181; **Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – NBR 8036; **Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.
- BELUSSO, A; SCHLOSSER, T. V. **Determinação da eficiência do ensaio SPT em diversas profundidades de solo na cidade de Cascavel/PR**. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) – Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel/PR, 2015.
- CINTRA, J. C. A; AOKI N; TSUHA C. H. C.; GIACHETI H.L. **Fundações ensaios estáticos e dinâmicos**. São Paulo: Oficina de textos, 2013.
- COSTA, L. O. R. D. **Determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre amostrador padrão**. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) – Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel/PR, 2014.
- FERREIRA, M. Q. **Adaptação do ensaio SPT para determinação de parâmetros adicionais para o dimensionamento de fundações**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2015.
- NEVES, S. L. F. **Metodologia para a determinação da eficiência no ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 111 pp, 2004.
- ODEBRECHT, E. **Medidas de energia no ensaio SPT**. Tese de Doutorado –Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 250 p, 2003.
- SMITH, E.A.L. **Pile Driving Analysis by the Wave Equation** .*Journal of the Soil Mechanic sand Foundations Division*, 1960, Vol. 86, Issue 4, Pg. 35-64.
- ZEN, B. A. B. **Caracterização geotécnica do subsolo do campo experimental do centro acadêmico da FAG em Cascavel/PR**. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) – Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel/PR, 2016.