

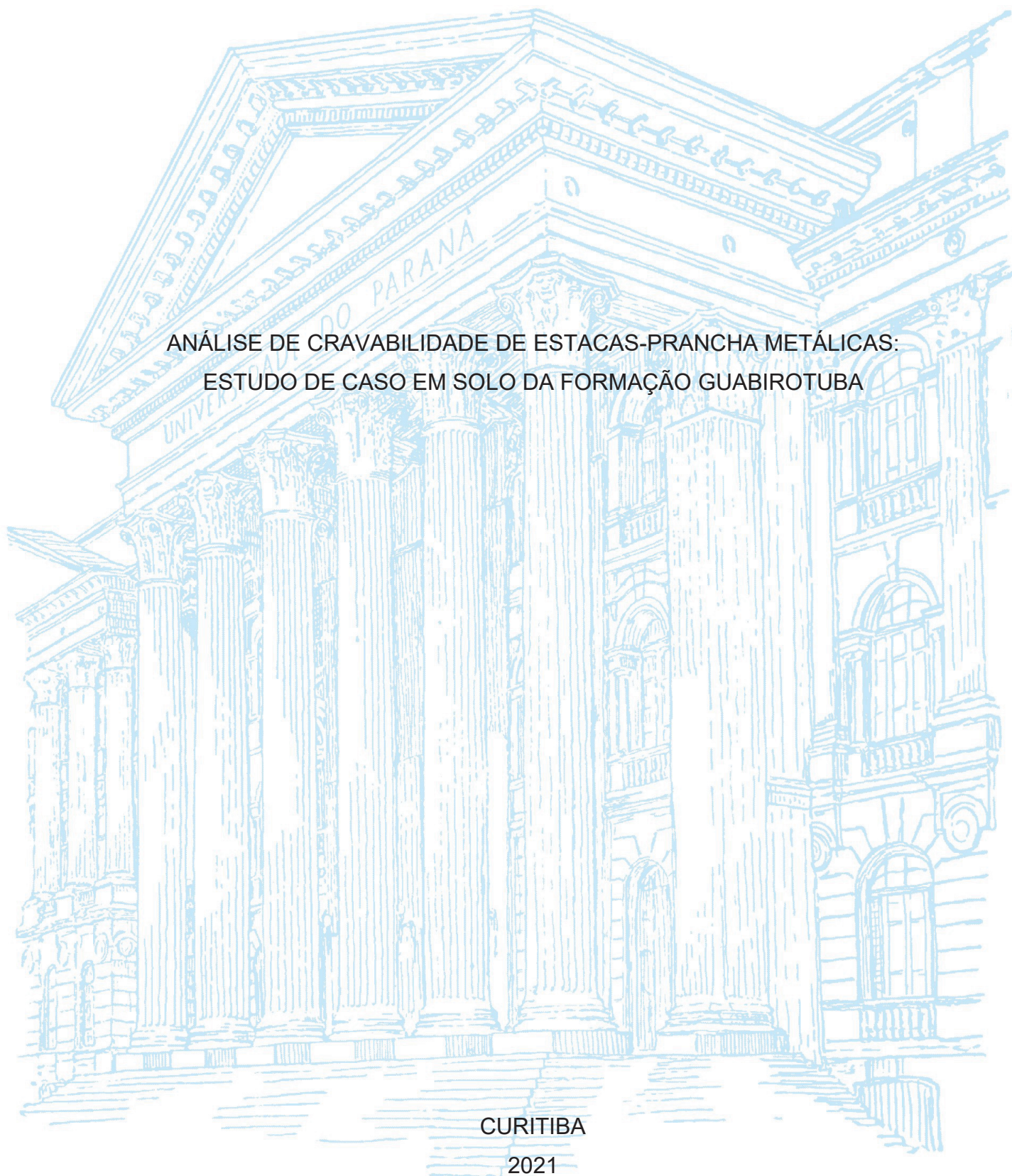
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALEXANDRE SAMUEL RAMALHO

ANÁLISE DE CRAVABILIDADE DE ESTACAS-PRANCHA METÁLICAS:  
ESTUDO DE CASO EM SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA

CURITIBA

2021



ALEXANDRE SAMUEL RAMALHO

ANÁLISE DE CRAVABILIDADE DE ESTACAS-PRANCHA METÁLICAS:  
ESTUDO DE CASO EM SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Orientadora: Profa. Dra. Larissa de Brum Passini

CURITIBA

2021



Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

---

R165a Ramalho, Alexandre Samuel  
Análise de cravabilidade de estacas-prancha metálicas: estudo de caso em solo da formação Guabirota [recurso eletrônico] / Alexandre Samuel Ramalho – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Construção Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Larissa de Brum Passini

1. Fundações (Engenharia). 2. Máquinas para construção civil (Martelo vibratório). 3. Estacas de aço (Cravabilidade). I. Universidade Federal do Paraná. II. Passini, Larissa de Brum. III. Título.

CDD: 624.154

---

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -  
40001016049P2

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ALEXANDRE SAMUEL RAMALHO** intitulada: **ANÁLISE DE CRAVABILIDADE DE ESTACAS-PRANCHA METÁLICAS: ESTUDO DE CASO EM SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA**, sob orientação da Profa. Dra. LARISSA DE BRUM PASSINI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 02 de Junho de 2021.

Assinatura Eletrônica

02/06/2021 15:52:57.0

LARISSA DE BRUM PASSINI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

02/06/2021 14:19:37.0

NALOAN COUTINHO SAMPA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

02/06/2021 14:25:26.0

VITOR PEREIRA FARO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

02/06/2021 14:57:37.0

LUIZ RUSSO NETO

Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ)

---

Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3110 - E-mail: ppgecc@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 95428

**Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 95428**



## AGRADECIMENTOS

- Primeiramente a Deus, por tudo!
- Ao meu pai, Nivaldo de P. Ramalho, e a minha mãe, Ruth B. Ramalho, pelo amor, incentivo e apoio incondicional de sempre.
- Ao meu irmão, Guilherme S. Ramalho, pela amizade e companhia.
- À minha esposa, Thaisa Alessandra Squisatti, pelo incentivo, carinho, paciência, compreensão e toda a ajuda despendida.
- À minha avó, Dalva Kostkoski Biscaia, pelas suas orações.
- À Universidade Federal do Paraná, à qual devo a oportunidade de construir os pilares de minha profissão.
- À Prof. Dra. Larissa de Brum Passini, professora de dedicação e disposição singular, à qual agradeço por me incentivar a participar do programa de Pós-Graduação de Construção Civil da UFPR.
- Aos profissionais da Secretaria Municipal de Obras de Curitiba, em especial ao engenheiro Mário Padovani.
- Aos Professores Mauro Lacerda Santos Filho, Edu José Franco e Eduardo Ratton, pela orientação e oportunidade de participar de uma obra que ficará na história de minha cidade natal e que fará parte do cotidiano de milhares de curitibanos.
- Ao engenheiro Cristhyano Cavali da Luz pelo incentivo e orientação profissional.
- Ao engenheiro Marcelo Souren Carvalho pela confiança, troca de ideias e parceria.
- Ao Prof. Dr. Luiz Russo Neto, profissional entusiasta de soluções inovadoras na Engenharia Geotécnica e de conhecimento admirável, ao qual devo muito para a realização deste trabalho.
- Ao engenheiro Tiago de Jesus Souza que, mesmo sem conhecer pessoalmente, se dispôs prontamente a me auxiliar neste trabalho contribuindo com ricas sugestões.
- Aos amigos que diretamente ou indiretamente me incentivaram e ajudaram durante os anos de estudo.

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais*



## RESUMO

A seleção de martelos vibratórios para cravação de estacas prancha é algo que envolve uma série de variáveis sendo buscadas soluções para esse problema desde a metade do século XX, com desenvolvimento de métodos como o Vibdrive, NVAFlloc, NVAFgen, CUR166, EAU1996, TNOWAVE, Vibdrive, Vipere, Azzouzi, NVAF-PSD design charts além dos ábacos empíricos desenvolvidos pelos fabricantes de estacas ou de martelos. Os modelos mais modernos se baseiam no modelo de equação de onda proposto por Smith (1960), tal solução é empregada pelo software GRLWEAP da PDI. Segundo o US COE (1997;2004), para a calibração desse programa pode-se empregar os resultados de provas de carga dinâmica (PDA). Assim, com base nos resultados obtidos de ensaio PDA que forneceu dados de *damping*, *quake*, resistência do conjunto solo/estaca e de sondagens à percussão (SPT) para reconhecimento do solo local, foi calibrado *software* de análise de cravabilidade de estacas (GRLWEAP da PDI) a fim de avaliar taxas de penetração e resistências máximas oferecidas por estacas-prancha metálica cravadas com martelo vibratório em solo da Formação Guabirotuba. A pesquisa utilizou como estudo de caso a obra de contenção da trincheira da Av. Mário Tourinho sob a Av. Nsa. Aparecida em Curitiba-PR, utilizando ensaios de PDA realizados nas estacas modelo AZ19-700 que servem como meso e infraestrutura para o tabuleiro da referida trincheira. Durante a pesquisa ficou claro que os métodos mais usuais de verificação de cravabilidade não levam em conta o efeito de excentricidades existentes entre a pinça e estaca e atritos entre estacas adjacentes, como no caso de cortinas de estacas, o que pode dificultar a análise de cravabilidade, levando a previsão de cravação e cotas de cravação divergentes das que serão verificadas em campo. Após os estudos e análises realizadas, é possível observar que a não convergência entre os resultados do software GRLWEAP e os encontrados no ensaio PDA pode estar associada a excentricidades e atritos desconsiderados pelo software, que geram perdas na eficiência e ganhos na resistência à cravação, superiores aos previstos na modelagem, bem como da dificuldade em estabelecer valores adequados de *quake* e *damping* ao solo do modelo.

Palavras chaves: Martelo vibratório. Prova de carga dinâmica. Cravabilidade.

## **ABSTRACT**

The selection of vibro hammers to drive steel sheet piles is something that involves a series of variables, a problem solution have being sought for since the mid-twentieth century, with the development of methods such as Vibdrive, NVAFloc, NVAFgen, CUR166, EAU1996, TNOWAVE, Vibdrive, Vipere, Azzouzi, NVAF-PSD design charts, besides empirical charts development by piles or vibratory hammers producers. More modern models are based in the wave equation model proposed by Smith (1960), such solution is used by GRLWEAP software from PDI. According to US COE (1997-2004), to calibrate this program, it can be used the results of Pile Dynamic Analysis (PDA). Thereby, based on the results obtained from the analysis (PDA) that provided data about damping, quake, resistance of soil/pile and probing to percussion (SPT) for local soil reconnaissance, the pile drivability analysis software (GRLWEAP by PDI) was calibrated in order to evaluate piercing rates and maximum resistance presented by steel sheet piles drove with vibro hammer into Guabirota Formation soil. This research used as case study the underpass containment work on Mário Tourinho Ave. under Nsa. Aparecida Ave. in Curitiba, Paraná done on piles model AZ19-700, which serve as abutment and substructure for the deck of that underpass. During the research it became clear that the most usual driveability verification models do not take into account the eccentricities effects present between the grips and piles and friction between adjacent piles, such as in steel sheet pile walls, what can make it harder to make driveability analysis. leading to divergent driving predictions and driving quotas from those observed in field. After conducting studies and analysis, it is possible to observe that the non-convergence between GRLWEAP software results and those find in PDA analysis may be associated to eccentricities and friction not considered by the software, what generate efficiency loss and resistance gains to pile driving, higher to those predicted in the modeling, as well the difficulty in establishing adequate values of quake and damping to the model's ground.

Key words: Vibro hammer, Pile Dynamic Analysis, Driveability.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Escavação da trincheira Washington Luis .....	21
Figura 2-2 - Trincheira Washington Luis Finalizada .....	22
Figura 2-3 - Complexo viário da Arena das Dunas em Natal/RN .....	22
Figura 2-4 - Trincheira em Tuneiras do Oeste/PR.....	23
Figura 2-5 - Uso de estacas prancha metálicas em Curitiba .....	23
Figura 2-6 - Uso de estacas prancha metálicas em Curitiba - Próximo à reitora da UFPR .....	24
Figura 2-7 - Deposição de fácies na Bacia de Curitiba.....	26
Figura 2-8 - Curvas granulométricas de solo para a Bacia de Curitiba .....	27
Figura 2-9 - Tensão cisalhante máxima x tensão normal .....	28
Figura 2-10 - Variação da umidade versus profundidade da camada .....	29
Figura 2-11 - Esquema básico de equipamento SPT .....	30
Figura 2-12 - Esquema de um martelo vibratório .....	33
Figura 2-13 - Forças centrífugas ( $F_v$ e $F_h$ ) geradas pelas massas excêntricas ( $m$ ) girando com velocidade constante $w$ .....	34
Figura 2-14 - Funções descritivas do movimento harmônico .....	35
Figura 2-15 - Redução da resistência cisalhante de solo granular por conta da vibração .....	37
Figura 2-16 - Reorientação das partículas de argila devido ao movimento de cravação .....	38
Figura 2-17 - Propagação de ondas geradas pela vibração do martelo.....	39
Figura 2-18 - Forma de propagação das ondas P e S no solo.....	39
Figura 2-19 - Propagação da onda R na camada superficial do solo.....	41
Figura 2-20 - a) Movimento de penetração da estaca prancha; b) Resistência de fuste; .....	42
Figura 2-21 - Fluxograma para projeto de cortina de estacas prancha como pilar de OAE .....	43
Figura 2-22 - Cravabilidade para estacas AZ duplas.....	44
Figura 2-23 - Questões que envolvem a cravação de estacas por vibração.....	46
Figura 2-24 - Fatores envolvidos no processo de execução e projeto de cravação de estacas por vibração.....	47
Figura 2-25 - Ábaco para seleção de martelo vibratório .....	50
Figura 2-26 - Exemplo de curva de velocidade de cravação x profundidade .....	52

Figura 2-27 - Exemplo de ábaco NVAF-PSD .....	54
Figura 2-28 - Modelo com esforços durante cravação por vibração.....	55
Figura 2-29 - Representação da estaca e do sistema de cravação proposta por Smith em 1960.....	57
Figura 2-30 - Modelo elastoplástico idealizado por Smith (1960).....	58
Figura 2-31 - Efeito de pinça em posição excêntrica à estaca .....	59
Figura 2-32 - Forma de evitar excentricidade na estaca por conta da posição da pinça .....	60
Figura 2-33 - Esforço por fricção entre conectores das estacas.....	60
Figura 2-34 - Arranjo da instalação dos transdutores em perfil metálico.....	63
Figura 2-35 - Tela inicial do GRLWEAP 2005 para seleção de martelo, estaca e definição de parâmetro do solo.....	68
Figura 2-36 - Fluxo para análise de cravabilidade pelo GRLWEAP .....	72
Figura 2-37 - Variação do gain/loss para análise de cravabilidade pelo GRLWEAP .....	74
Figura 3-1 - Localização geográfica e contexto geológico do local da obra .....	77
Figura 3-2 - Execução de sondagem SPT durante as obras.....	78
Figura 3-3 - Locação das sondagens realizadas e resumos dos valores de N <sub>spt</sub> .	79
Figura 3-4 - Locação das sondagens realizadas e resumos dos valores de N <sub>spt</sub> .	81
Figura 3-5 - Perfil estratigráfico do solo (Local de cravação das estacas AZ-19 com 13 m).....	82
Figura 3-6 - Sobreposição da cravação das estacas no perfil estratigráfico (Local de cravação das estacas AZ-19 lado direito com 13m).....	83
Figura 3-7 - Sobreposição da cravação das estacas no perfil estratigráfico (Local de cravação das estacas AZ-19 lado esquerdo com 13m).....	84
Figura 3-8 - Corte do solo para abertura da trincheira.....	85
Figura 3-9 - Corte do solo para abertura da trincheira.....	85
Figura 3-10 - Dimensões da seção das estacas utilizadas com dimensões em mm .....	86
Figura 3-11 - Primeiro modelo de martelo utilizado, MRZV 18-V .....	88
Figura 3-12 - Primeiro modelo de martelo utilizado, MRZV 18-V .....	89
Figura 3-13 - Martelo MS-50 H3 com uso de gabarito para cravação .....	90
Figura 3-14 - Detalhe da pinça durante a cravação de uma estaca GU8N .....	90
Figura 3-15 - Estacas GU 8N fundidas por atrito durante a cravação .....	91
Figura 3-16 - Execução de pré-furos .....	92

Figura 3-17 - Locação dos ensaios PDA realizados.....	93
Figura 3-18 - Martelo para realização de ensaio PDA.....	94
Figura 3-19 - Instalação da instrumentação e execução do ensaio .....	95
Figura 3-20 - Resultados da análise pelo CASE para a estaca E1190 .....	97
Figura 3-21 - Resultados da análise pelo CAPWAP para a estaca E1190 .....	97
Figura 3-22 - Simulação Carga x Recalque pelo CAPWAP, dados do PDA na E-1190 .....	97
Figura 3-23 - Distribuição da resistência lateral em função da profundidade.....	99
Figura 3-24 - Resistência mobilizada pela ponta e lateral por estaca ensaiada...	100
Figura 3-25 - Resistência mobilizada por metro cravado de estaca (kN/m) .....	100
Figura 3-26 - Deslocamento medido x calculado pelo CAPWAP .....	101
Figura 3-27 - Configuração dos dados do martelo, estaca e de fator de "gain/loss" .....	103
Figura 4-1 - inputs para análise da Estaca 1190 no GRLWEAP .....	105
Figura 4-2 - Resultados obtidos para E1190 – inputs baseados nos resultados do CAPWAP .....	106
Figura 4-3 - Resultados obtidos para E1190 – inputs baseados nos resultados do CAPWAP .....	106
Figura 4-4 - Resultados obtidos para E1190 – Análise para martelo MS50-H3 ...	107
Figura 4-5 - Cravabilidade para E1190 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca simples.....	107
Figura 4-6 - Cravabilidade para E1190 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca dupla .....	108
Figura 4-7 - Influência do valor de quake e damping na taxa de penetração.....	111
Figura 4-8 - Cravabilidade para E1190 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca simples.....	112
Figura 4-9–Resistências máximas para cada estaca ensaiada conforme CAPWAP e GRLWEAP .....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Designação de solos com base na resistência a penetração para ensaio SPT .....	31
Tabela 2-2 - Classificação dos martelos vibratórios .....	33
Tabela 2-3 - Velocidade típica de propagação das ondas P e S de acordo com Bodare (1998).....	41
Tabela 2-4 - Escolha de estaca a ser utilizada .....	44
Tabela 2-5 - Escolha de estaca a ser utilizada em solos coesivos de acordo com o SCI, 1998.....	45
Tabela 2-6 - Classificação da cravabilidade quanto a velocidade de cravação (mm/s) .....	51
Tabela 2-7 - Condições que exigem prova de carga estática nas estacas.....	61
Tabela 2-8 - Características físicas de concreto e aço utilizados em estacas.....	64
Tabela 2-9 - Valores de fator de amortecimento (Jc) .....	66
Tabela 2-10 - Parâmetros de análise para solos não coesivos .....	70
Tabela 2-11 - Parâmetros de análise para solos coesivos .....	70
Tabela 2-12 - Considerações de parâmetros do solo realizadas pelo GRLWEAP .....	71
Tabela 2-13 - Fator de "Setup" em função de seu tipo.....	73
Tabela 2-14 - Valores recomendados de quake e damping .....	75
Tabela 3-1 - Modelos de estacas utilizada e comprimento cravado.....	86
Tabela 3-2 - Especificações técnicas do martelo MRZV 18V .....	88
Tabela 3-3 - Especificações técnicas do martelo MS-50 H3 .....	89
Tabela 3-4 - Estacas ensaiadas com PDA e resumo de cargas mobilizadas .....	95
Tabela 3-5 - Tempo decorrido desde a cravação até a data do ensaio.....	96
Tabela 3-6 - Resumo dos valores calculados pelo CAPWAP .....	98
Tabela 4-1 - Resumo dos resultados obtidos da modelagem no GRLWEAP por estaca .....	108
Tabela 4-2 - Resumo dos resultados obtidos da modelagem no GRLWEAP por estaca .....	109
Tabela 4-3 - Variação de quake, damping e influência na taxa de penetração....	110

## NOTAÇÕES E SÍMBOLOS

CPT – *Cone Penetration Test*

DMX – Deslocamento máximo da estaca durante o impacto

EMX – Energia máxima no golpe

FMX – Força máxima no impacto

LTSR - *Long Term Static Resistance*

Nspt,60 – SPT corrigido para eficiência de 60%

OAE – Obra de Arte Especial (Ex. pontes, viadutos e trincheiras)

PDA - *Pile Driving Analyzer*

RMX – Resistência estática mobilizada

SA - *SPT N-value Based Method*

SPT – *Standard Penetration Test*

SRD - *Static Resistance to Drive*

ST - *Soil Type Based Method*

A – Amplitude

E – Modulo de elasticidade do material

$E$  – Modulo de elasticidade dinâmico do material da estaca

Fh – Força horizontal

Fv – Força vertical

$F(t_1)$  - Força no tempo  $t_1$

$F(t_2)$  - Força no tempo  $t_2$

Jc – Fator de amortecimento para o método CASE

K – Coeficiente de mola

$R_L$  – Resistência lateral ao longo da estaca

$R_p$  – Resistência de ponta

$R_t$  – Resistência à penetração da estaca

T – Período

$V_p$  - Velocidades de cravação em mm/s

$V_p$  - Velocidade de ponta da estaca

Z – Impedância

$c$  – Velocidade de onda no material

f – Frequência

$f_n$  – Frequência natural

$f_s$  = Fator de configuração (setup)

$m$  – Massa

$t_1$  – Tempo de maior intensidade do golpe

$t_2$  – Tempo de menor intensidade do golpe

$v(t_1)$  - Velocidade no tempo  $t_1$

$v(t_2)$  - Velocidade no tempo  $t_2$

$\xi$  – taxa de amortecimento (*damping ratio*)

$\varphi$  – Ângulo de fase

$\rho$  – Massa específica do material da estaca

$\omega$  – Frequência angular

$\omega_n$  – Frequência angular natural



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo geral	17
1.1.1	Objetivos específicos	17
1.2	Justificativa	17
1.3	Estrutura da dissertação	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
2.1	Histórico do uso de estacas prancha e cravação por vibração	20
2.2	Características geológicas e geotécnicas de Curitiba	24
2.2.1	Características geológicas	24
2.2.2	Características geotécnicas	26
1.2	<i>Standard Penetration Test</i> – SPT	30
2.3	Martelos vibratórios	32
2.4	Efeito da vibração no solo	35
2.5	Seleção da estaca prancha	42
2.6	Seleção do martelo vibratório e cravabilidade	45
2.6.1	Fontes de perdas de eficiência do martelo e de cravabilidade	59
2.7	Prova de carga dinâmica – PDA	61
2.7.1	Interpretação dos resultados	65
2.8	GRLWEAP	67
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>76</b>
3.1	Estudo de caso	76
3.2	Caracterização do solo	78
3.2.1	Sondagens <i>Standard Penetration Test</i> (SPT)	78
3.3	Estacas utilizadas	86
3.4	Equipamentos empregados	87
3.5	Ensaio PDA realizado	92
3.5.1	Resultados PDA	96

3.6	Dados de entrada no GRLWEAP-2005	102
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>104</b>
4.1	Modelagem no GRLWEAP	104
4.2	Cravabilidade com base nos métodos empíricos e semiempíricos	112
4.3	Discussão dos resultados	113
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>117</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>119</b>
	<b>APÊNDICE A – ANÁLISES GRLWEAP (2005)</b>	<b>125</b>
	<b>ANEXO A – SONDAgens SPT</b>	<b>144</b>
	<b>ANEXO B – ENSAIO PDA</b>	<b>176</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à urbanização, a engenharia geotécnica vem sendo demandada para prover condições técnicas que permitam a ocupação ou uso de espaços que necessitam de escavações e contenções, sendo necessário levar em conta a influência da obra sobre as construções adjacentes. Estes efeitos são complexos de serem previstos, pois envolvem variáveis de difícil domínio absoluto, tais como: características e condições do solo, presença de água, rigidez dos elementos de contenção, métodos construtivos e qualidade da mão de obra (BARKAN, 1962; MILITITSKY, 2016).

Segundo MILITITSKY (2016), para a execução de obras de escavação e contenção as possibilidades executivas são diversas, dentre elas, a cortina de estacas prancha metálicas. Mesmo não sendo uma solução usual para obras permanentes, apresenta-se como uma opção viável em locais com espaço suficiente para a execução de maneira a garantir a verticalidade das estacas e o rebaixamento de nível d'água pode gerar algum tipo de problema. Trata-se de uma metodologia que proporciona poucas vibrações no terreno. Por todas essas possibilidades, apresenta-se como solução interessante no meio urbano.

A tecnologia de construção utilizando estacas prancha possui mais de 100 anos, datando desde 1.900, com uso de estacas em madeira ou ferro. As estacas, na forma como existem hoje, só foram possíveis com o avanço da tecnologia da laminação, sendo as primeiras desenvolvidas em 1.914.

Para cravação das estacas prancha uma alternativa é o uso de martelos vibratórios. Esses, por sua vez, foram inicialmente desenvolvidos na Alemanha e na União Soviética entre os anos de 1930 e 1931, sendo o conceito de cravação vibratória desenvolvido por Pavyluk em 1931. O primeiro uso comercial foi realizado por Hertwig em 1932, cravando estacas de madeira para fundações da Universidade Técnica de Berlim, em Charlottenburg (VIKING, 2002).

Inicialmente, os martelos vibratórios foram desenvolvidos para cravação em solos granulares, com pesquisas a respeito dessa metodologia nesse tipo de solo. Porém, durante a Segunda Guerra Mundial, as pesquisas dessa técnica construtiva foram prejudicadas, sendo retomadas no pós-guerra e estendidas também para solos coesivos por Rusakov e Kharkevih (1942) e por Tsaplin (1953). Contudo, ainda hoje a escolha do equipamento de vibração é um tema

envolto de incertezas e que conta com a prática de fornecedores e de ábacos empíricos para nortear a seleção do martelo vibratório (ALONSO, 2019).

O primeiro uso de estacas prancha metálicas em uma obra viária na América Latina foi na construção do Túnel Paulo Autran, em São Paulo, no ano de 2008, permitindo uma passagem para a via de acesso ao estacionamento do Aeroporto de Congonhas. Uma obra com 310m de extensão, sendo 160m sob a Avenida Washington Luís e 150m aberta, apenas como contenção. (ARCELOR MITTAL, 2020)

Este trabalho tem como estudo de caso a execução da trincheira da Avenida Mário Tourinho sob a Avenida Nossa Senhora Aparecida, na qual a Universidade Federal do Paraná (UFPR), por meio do Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura, atuou como projetista e consultora. O método de cravação de estacas prancha metálicas foi definido como sendo por vibração com intuito de preservar as construções vizinhas e gerar menos ruídos que em comparação com cravação por impacto.

Durante a execução, houve dificuldade além da prevista para cravação por vibração das estacas. Foram observadas: deformações excessivas, quebra por cisalhamento e dificuldade de cravação, mais pontualmente nas estacas que deveriam ser cravadas a 13 m de profundidade, sendo estas as que enfrentariam maior resistência do solo, conforme sondagens realizadas, incorrendo na interrupção precoce de sua cravação total prevista.

Note-se que, além da já complexa questão geotécnica, há outros fatores envolvidos na prática de cravação de estacas prancha metálicas por meio de martelos vibratórios. Questões essas que este trabalho pretende contribuir com pesquisa bibliográfica e aplicação prática no contexto da obra supramencionada como estudo de caso.

## 1.1 Objetivo geral

Calibrar *software* de análise de cravabilidade de estacas (GRLWEAP da PDI) com os coeficientes de amortecimento do solo, *damping* e *quake*, com base nos resultados obtidos de ensaio de prova de carga dinâmica (PDA), tratados pelo método CASE e CAPWAP, e de sondagens à percussão (SPT), a fim de avaliar a cravabilidade de estacas prancha metálica através de martelo vibratório em solo da Formação Guabirota, utilizada em obra na região de Curitiba.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- a) Levantar bibliografia específica sobre o tema com aplicação prática.
- b) Relatar e avaliar as dificuldades encontradas durante a cravação de estacas prancha metálica por vibração em obra na região de Curitiba.
- c) Aplicar conceitos levantados na pesquisa bibliográfica em análise das condições de obra de trincheira na região de Curitiba como estudo de caso através do *software* GRLWEAP em comparação com os resultados obtidos com o ensaio PDA.

## 1.2 Justificativa

Gerscovich et al. (2019) descrevem a necessidade de cuidados com escavações em centros urbanos com relação a recalques e movimentações que afetem construções adjacentes. Essa cautela se deve, normalmente, às restrições de espaço e interferências com redes de serviços públicos nestas áreas. Devido a isso, o taludamento, por exemplo, é inviável.

Isto posto, em situações em que o espaço disponível para a solução de contenção é restrito, o uso de estacas prancha metálicas se apresentam como uma possível solução, podendo serem cravadas por martelos a percussão ou vibração, sendo que a última tem impacto reduzido na vizinhança da obra. Assim, sua utilização é possível até mesmo em regiões densamente urbanizadas, como descreve Sena (2016).

O uso de martelos vibratórios para cravação de estacas é um método que submete as estacas a menor esforço axial. Desta forma, permite que sejam utilizadas seções mais esbeltas, que geram economia financeira.

O projeto de engenharia proporciona a introdução de novas tecnologias no canteiro de obras, indicando em sua concepção inovações tecnológicas oriundas dos setores de materiais, componentes e de equipamentos. Considerar a possibilidade de uma alternativa construtiva nova possibilita elevar o grau de industrialização do processo de produção. (BARROS, 1996)

Por isso, é interessante entender as limitações desse método quanto à sua aplicabilidade em solos argilosos. Contudo, a dificuldade de previsão da cravabilidade reside na falta de total conhecimento a respeito do mecanismo de redução da resistência à penetração do solo devido ao movimento de vibração da estaca. (VIKING, 2002).

Segundo Viking (2002), é notável a quantidade reduzida de estudos que são publicados com relação ao uso de martelos vibratórios, dada a quantidade de estacas cravadas anualmente. Em complemento, o autor afirma que são quilômetros de estacas cravadas anualmente e não se dominam as variáveis que influenciam sua aplicabilidade, implicando na limitação do total uso da capacidade dessa técnica. Essa dificuldade também é relatada por Sinke (2020), sendo uma verdadeira incógnita conseguir determinar qual martelo vibratório é capaz de cravar a estaca à profundidade prevista em projeto.

Além destes autores, dentro do cenário nacional a problemática a respeito do uso de martelos vibratórios não é diferente. Segundo Falconi, Gusmão e Alonso (2020) esta tecnologia é muito recente no Brasil, carecendo ainda de muitos estudos que ficam ainda mais complexos quando se trata de estacas prancha por introduzir variáveis que estacas de fundação não possuem. Porém, essa é uma técnica de cravação de estacas que está em uso no Brasil, e por conta do superficial conhecimento teórico é dependente do conhecimento prático e experiências pessoais de projetistas e executores.

Segundo Kormann (2002), informações geotécnicas a respeito da Formação Guabirotuba são escassas, sendo em grande parte obtidas com intuito específico de execução de obras sem ampla divulgação técnica dos resultados. Em contraposição à experiência internacional, em que argilas rijas e duras são objetos de intensa pesquisa acadêmica.



As incertezas ainda existentes acerca do tema e desenvolver pesquisa que proporcione maior industrialização na construção motivam os estudos realizados neste trabalho.

### 1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos. O capítulo atual, **Capítulo 1**, corresponde a introdução, em que se apresenta a contextualização, a problemática do tema, os objetivos e as justificativas para a execução desta pesquisa.

No **Capítulo 2** é apresentada a pesquisa bibliográfica fundamentada em normas, artigos, dissertações e teses que versam sobre o tema, trazendo informações quanto ao comportamento do solo quando submetido à vibração, métodos de análise desse comportamento, o método de cravação e experiências pretéritas. Apresenta, dentre outras abordagens, o histórico do uso de martelos vibratórios no mundo e no Brasil, modelos matemáticos empíricos para seleção de martelos vibratórios, normas e emprego do ensaio de prova de carga dinâmica (PDA) e mecanismo de cálculo utilizado pelo GRLWEAP.

A caracterização do local do estudo de caso foi desenvolvida no **Capítulo 3**, com apresentação das considerações de projeto, da execução em campo e dos resultados obtidos durante a cravação, além de apresentar os resultados de ensaio SPT realizados no local da obra, equipamentos empregados, resultados do PDA e os dados utilizados como *inputs* no *software* GRLWEAP.

No **Capítulo 4** são apresentados os resultados obtidos através da modelagem no GRLWEAP, buscando-se um modelo que representa o PDA como forma de validação do modelo para a posteriori analisar a cravabilidade das estacas prancha com martelo vibratório. Neste mesmo capítulo estão os resultados obtidos e as discussões.

Ao final, no **Capítulo 5**, são expostas as conclusões e considerações finais a respeito dos resultados e sugestões de abordagens para estudos subsequentes que se dediquem a temas semelhantes.

Nos **Anexos e Apêndices** estão expostas informações complementares ao melhor entendimento desse trabalho.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esse capítulo contém um levantamento teórico a respeito das condições que envolvem o Solo da Formação Guabirota encontrado na região de Curitiba, bem como do emprego de martelos vibratórios para cravação de estacas prancha metálicas e as considerações de diversos autores sobre as questões específicas, cuja compreensão se faz necessária para o entendimento a respeito do solo local, do processo de cravação e dos modelos que podem ser aplicados para previsão do comportamento. Inicia com breve histórico do emprego de martelos vibratórios, caracterização geológica e geotécnica de Curitiba, efeitos da vibração no solo, prova de carga dinâmica e emprego do GRLWEAP a previsão de cravabilidade.

### **2.1 Histórico do uso de estacas prancha e cravação por vibração**

As estacas prancha têm sido utilizadas desde o início do século XX. Em 1902, Tryggve Larssen, inspetor de construção do governo de Bremen na Alemanha, desenvolveu o perfil U para utilização em construções de cortinas de estacas. Este perfil passou a ser conhecido como LARSEN em atribuição ao seu inventor. O perfil foi então laminado pela HOESCH e empregado pela primeira vez na beira-mar de Hohentorshafen, em Bremen, estando lá ainda hoje cumprindo sua função (THYSSENKRUPP, 2008).

Desde então, as estacas foram modificadas e adaptadas, possuindo diversos formatos e formas de conexão entre si e possibilidades de composições de perfis.

Com relação aos martelos vibratórios, estes foram desenvolvidos inicialmente para cravação de estacas em solos granulares e fofos. Porém, experimentalmente, foi percebido que também se pode aplicar a técnica em argilas saturadas e mediamente rígidas, assim como em areias densas não saturadas, mesmo que a redução da resistência ao cisalhamento nestes solos seja menor por este método. Na Suécia, essa técnica de cravação tem sido comumente utilizada em solos coesivos com resultados satisfatórios (GUILLEMET, 2013).

Desenvolvidos na Alemanha e na então União Soviética, entre os anos de 1930 e 1931, tiveram o primeiro uso comercial por Hertwig em 1932, cravando estacas de madeira para fundações da *Technische Hochschule*, em Berlim Charlottenburg, sendo então registrada a patente relativa ao princípio de cravação por vibração em Dusseldorf, por Hertwig e Losenhausenwerk (VIKING, 2002).

Com os anos, essa técnica evoluiu tanto em equipamentos quanto na própria execução, com seu uso sendo generalizado e revelando-se eficaz e econômico, devido à facilidade de cravação e baixas perturbações nas áreas adjacentes.

O primeiro uso de estacas prancha metálicas com cravação por martelo vibratório em uma obra viária na América Latina foi na construção do Túnel Paulo Autran, em São Paulo, no ano de 2008 (Figura 2-1 e Figura 2-2), permitindo uma passagem para a via de acesso ao estacionamento do aeroporto de Congonhas. Uma obra com 310m de extensão, sendo 160m sob a Avenida Washington Luís e 150m aberta, apenas como contenção, com gabarito de 4,7m (ARCELORMITTAL, 2020).

Figura 2-1 - Escavação da trincheira Washington Luis



FONTE: TÜNKERS (2008).

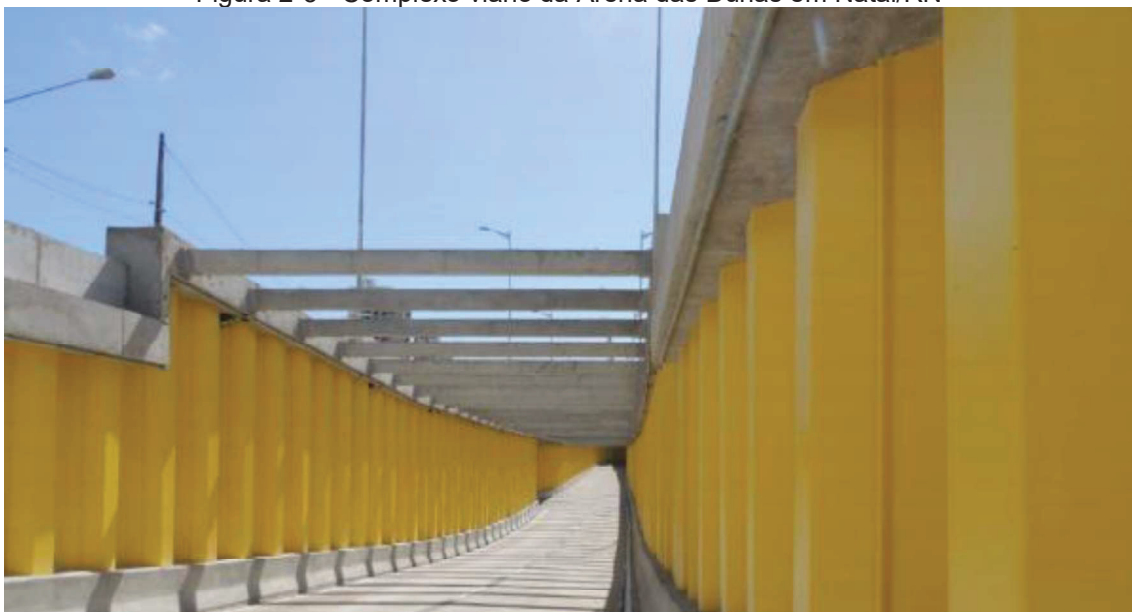
Figura 2-2 - Trincheira Washington Luis Finalizada



FONTE: TÜNKERS (2008).

Em outras oportunidades, esta técnica construtiva também foi empregada no Brasil, como no Complexo Viário da Arena das Dunas, em Natal, no Rio Grande do Norte (Figura 2-3), e na cidade de Tuneiras do Oeste, Paraná (Figura 2-4).

Figura 2-3 - Complexo viário da Arena das Dunas em Natal/RN



FONTE: ARCELORMITTAL (2020)



Figura 2-4 - Trincheira em Tuneiras do Oeste/PR



FONTE: ARCELORMITTAL (2020)

Em Curitiba o uso de estacas-prancha metálicas teve uso na construção de algumas obras de edifícios executados nas décadas de 1980 e 1990, exemplo ilustrado na Figura 2-55 e Figura 2-6, mesmo com a dificuldade de importação deste material na época. Para facilitar a dobra dos perfis na época se utilizavam chapas de pequena espessura, o que limitava o uso desse material em solos mais resistentes ou em obras muito profundas. (OLAVO ET AL, 2012).

Figura 2-5 - Uso de estacas prancha metálicas em Curitiba



FONTE: TWIN CITIES (2012).

Figura 2-6 - Uso de estacas prancha metálicas em Curitiba - Próximo à reitora da UFPR



FONTE: TWIN CITIES (2012).

## 2.2 Características geológicas e geotécnicas de Curitiba

A compreensão das características geológicas da área de construção de uma obra, bem como a composição físico-química e mineralógicas, podem ser determinantes para o sucesso de um projeto e melhor compreensão das limitações dos ensaios de prospecção utilizados (GERSCOVICH ET AL, 2019).

### 2.2.1 Características geológicas

Curitiba e sua região metropolitana estão assentes sobre uma Bacia sedimentar, preenchida por unidade geológica conhecida como Formação Guabirota, estando sobre rochas do Complexo Cristalino. Este tipo de solo é composto por argila siltosa ou silte argiloso, podendo ser também encontrado solos granulares. São comuns as cores cinzas e tons de verdes ou azul e marrom para as argilas, e em locais com processos químicos mais intensos as cores avermelhadas são predominantes. (SALAMUNI, 1998). Segundo Fiori e Salamuni (2012), em média a Formação Guabirota tem cerca de 40 m de espessura, podendo variar de 1 m a 80 m, sendo as maiores espessuras

encontradas localizada na região central e centro-sudeste da bacia, nos bairros do centro sul e sudeste do município.

A Bacia de Curitiba é considerada pequena, podendo ser definida como do tipo rifte, depressão formada por esforços distensivos e controlada por falhas normais, compondo conjuntamente com outras Bacias semelhantes o rifte Continental do Sudeste do Brasil. Esses conjuntos de Bacias tiveram sua origem no Período Cenozoico associado à abertura do Atlântico Sul. Isto, devido a reativações de estruturas do embasamento, formando assim pequenas depressões alongadas em direção NE-SW que, na região de Curitiba, condicionou a formação de espaço de acomodação para a deposição da Formação Guabirota (RICOMMINI ET AL., 2004).

A Formação Guabirota é descrita como constituída por espessas camadas de lama com intercalações de níveis lenticulares de areias arcólicas e, em menor proporção, depósitos de cascalhos e 'margas' (cimentação carbonática - calcretes). Sua sedimentação é atribuída, predominantemente, a depósitos de leques aluviais que ao centro da Bacia alimentariam porções lacustres (BIGARELLA E SALAMUNI, 1962). A idade da sedimentação era controversa até a descoberta da fauna Guabirota em afloramento na Cidade Industrial de Curitiba, que possibilitou estimar a deposição da unidade no Período Eoceno (SEDOR ET AL., 2017). Lima et al. (2013). Assim, caracterizaram o ambiente deposicional da formação como um sistema fluvial distributário, atribuíram a deposição dos sedimentos na região da obra em questão aos rios rasos, dominados por inundações laminares arenosas, caracterizados por sucessões de lamelas maciças intercaladas com estratos de areia fina/média.

Em relação às lamelas esverdeadas, características da Formação Guabirota, Bigarella e Salamuni (1962), atribuíram ao intemperismo sua mudança gradual para tons avermelhados nas porções superiores de afloramentos. Tais argilas foram caracterizadas por Kormann (2002) como compostas predominantemente por esmectitas nos perfis esverdeados, passando a caulinitas nas porções avermelhadas em virtude de ação do intemperismo. Também conhecido popularmente por "sabão de caboclo", devido à sua dureza em seu estado natural, é um material bastante plástico que quando umedecido torna-se bastante liso e escorregadio. Frequentemente, ocasiona



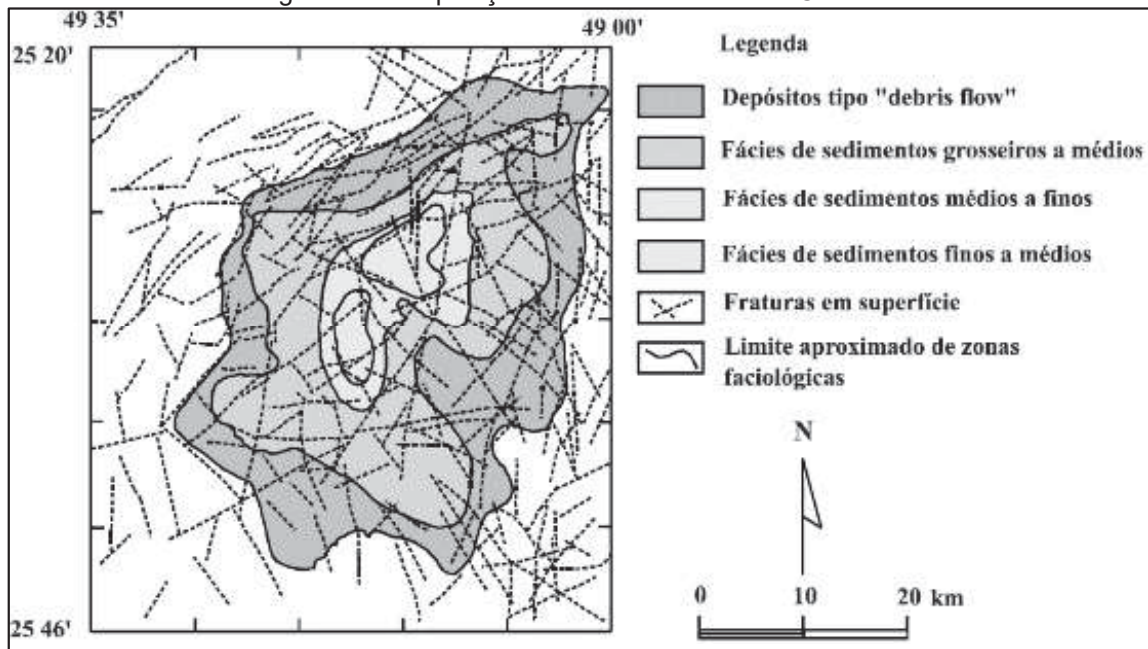
atraso em obras por conta de desmoronamentos durante escavações ou estrangulamento do fuste de estacas (MASSAD ET AL, 1981).

Segundo Fiori e Salamuni (2012), na abertura de trincheiras e obras de engenharia a Formação Guabirota, devido a sua grande variabilidade litológica apresenta-se como um complicador além das questões de instabilidade lateral.

### 2.2.2 Características geotécnicas

Segundo Salamuni (1999), dentro da Bacia de Curitiba, a depender da localização, o solo pode variar de materiais mais finos no centro a depósitos de materiais mais grosseiros nas regiões periféricas, conforme a FONTE do material sedimentar. A Figura 2-7 ilustra a ocorrência de materiais mais finos e grosseiros da Formação Guabirota na Bacia de Curitiba.

Figura 2-7 - Deposição de fácies na Bacia de Curitiba

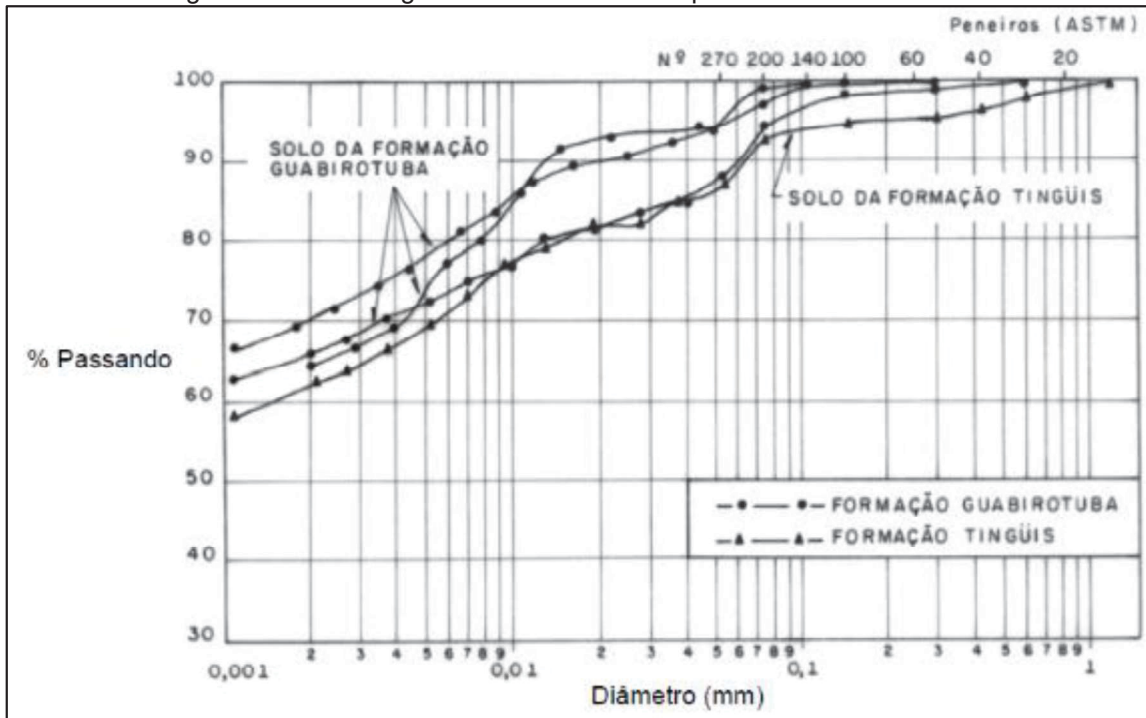


FONTE: SALAMUNI (1999).

Segundo Sinke (2020), a capacidade das vibrações provocarem a diminuição da resistência ao cisalhamento oferecida pelo solo está intimamente ligada à sua granulometria de forma que solos mais arenosos apresentam maior facilidade de redução de resistência.

Sendo o principal depósito sedimentar da Bacia de Curitiba, os sedimentos de argila e silte são os mais abundantes nessa Formação, como pode ser observado na Figura 2-8 que apresenta os resultados de ensaios de granulometria dos sedimentos realizados por Duarte (1986).

Figura 2-8 - Curvas granulométricas de solo para a Bacia de Curitiba



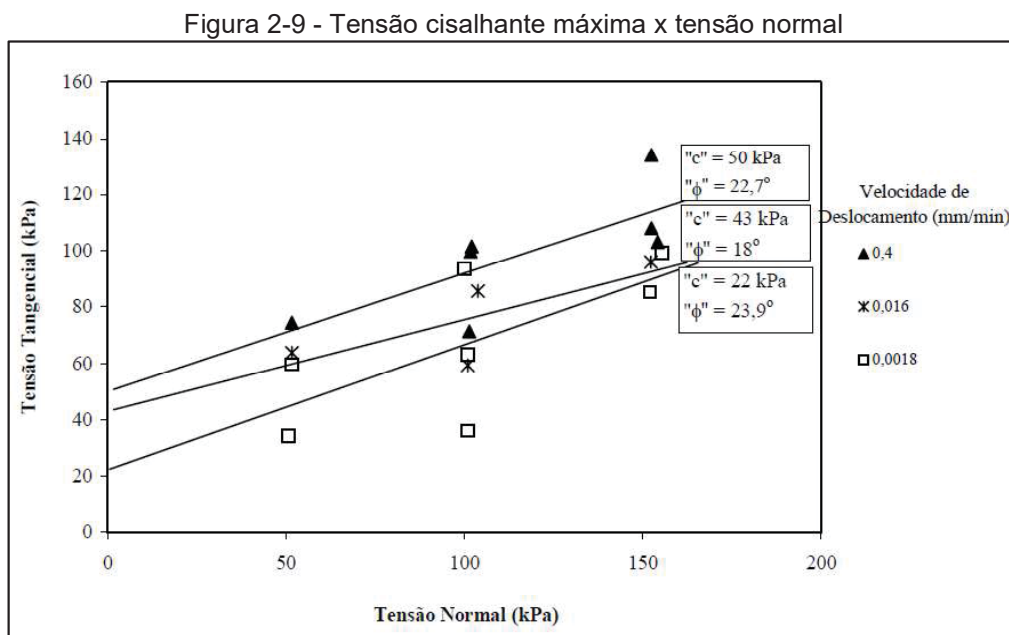
FONTE: DUARTE (1986 apud KORMANN, 2002).

Uma das características relevantes em solos da Formação Guabirota é o sobreadensamento. Segundo Salamuni et al. (1962), o sobreadensamento observado nos solos desta formação pode ser explicado pelo seu histórico geológico. Contudo, para Kormann (2002), o Sobreadensamento observado no solo da Formação Guabirota, carece de mais estudos. O autor sugere que apenas a ação da erosão não seria capaz de produzir tensões de Sobreadensamento com valores tão expressivos quanto os encontrados em seu estudo, da ordem de 300 a 1.280 kPa. Embora a erosão seja um contribuinte, também pode-se explicar os elevados valores devido a variação de pressão neutra por conta do regime climático regional, sem se descartar a influência de tectonismo e cimentação.

Kormann (2002) agrupou informações disponíveis na literatura de ensaios realizados no solo da Formação Guabirota, em condições inalteradas

ou de pouca alteração. Dentre estas informações, as de razão de sobre adensamento ou *Over Consolidation Ratio* (OCR), variando conforme a profundidade, em maiores profundidades a proporção OCR é menor uma vez que o alívio de carregamento é menor no histórico desses solos mais profundos. Portanto, a cota em que o material se encontra influi em suas características geotécnicas devido ao histórico de carregamento e maior suscetibilidade ao intemperismo.

Além da granulometria, histórico geológico e de tensões do solo, informações referentes aos parâmetros de resistência do solo como coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ), devem ser consideradas. Segundo Kormann (2002), o estudo desses parâmetros deve ser feito dentro de uma faixa de tensões aplicável ao problema que se deseja estudar, pois conforme a tensão normal aplicável varia, estes valores também podem sofrer variação, como ilustrado na Figura 2-9.

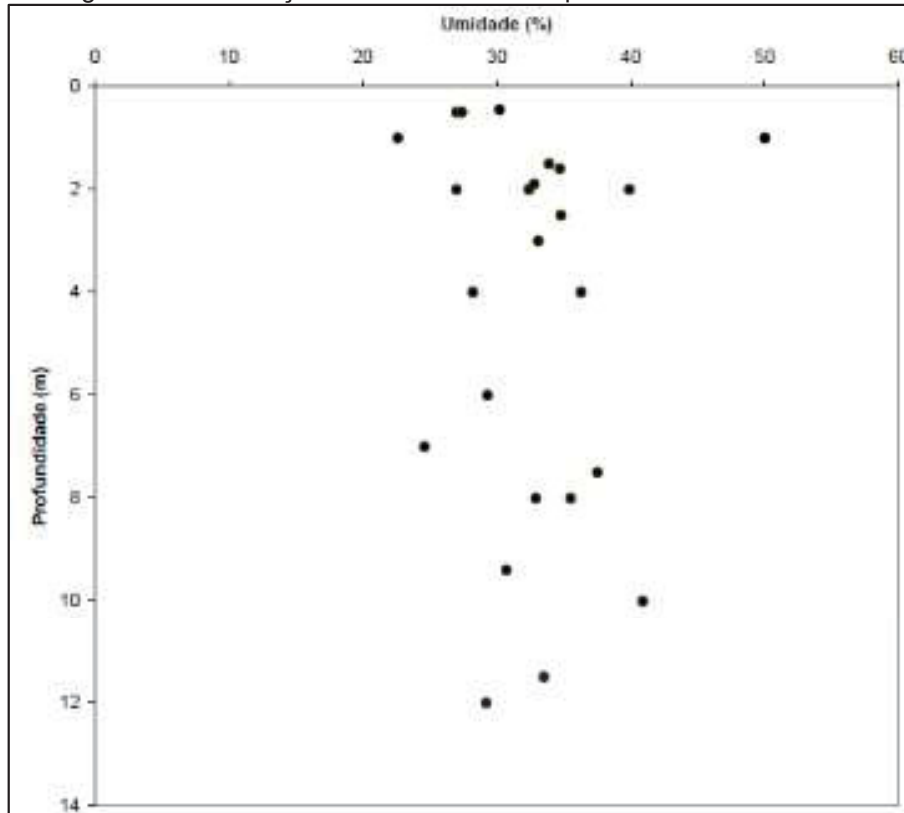


FONTE: KORMANN et al. (1999).

Quanto ao teor de umidade natural presente no solo da Formação Guabirota, pode-se observar valores que variam de 32,6% a 55%, sendo o menor atribuído aos solos menos intemperizados. Elevados teores de umidade podem ser encontrados mesmo em camadas superficiais como ilustrado na Figura 2-10, situação essa que pode ser explicada tanto pelo fenômeno de capilaridade, importante para solos argilosos, como por consequência do regime

pluviométrico da cidade de Curitiba, com valores de precipitação consideráveis, da ordem de 1.200 a 2.100 mm anuais (KORMANN, 2002).

Figura 2-10 - Variação da umidade versus profundidade da camada



FONTE: KORMANN (2002).

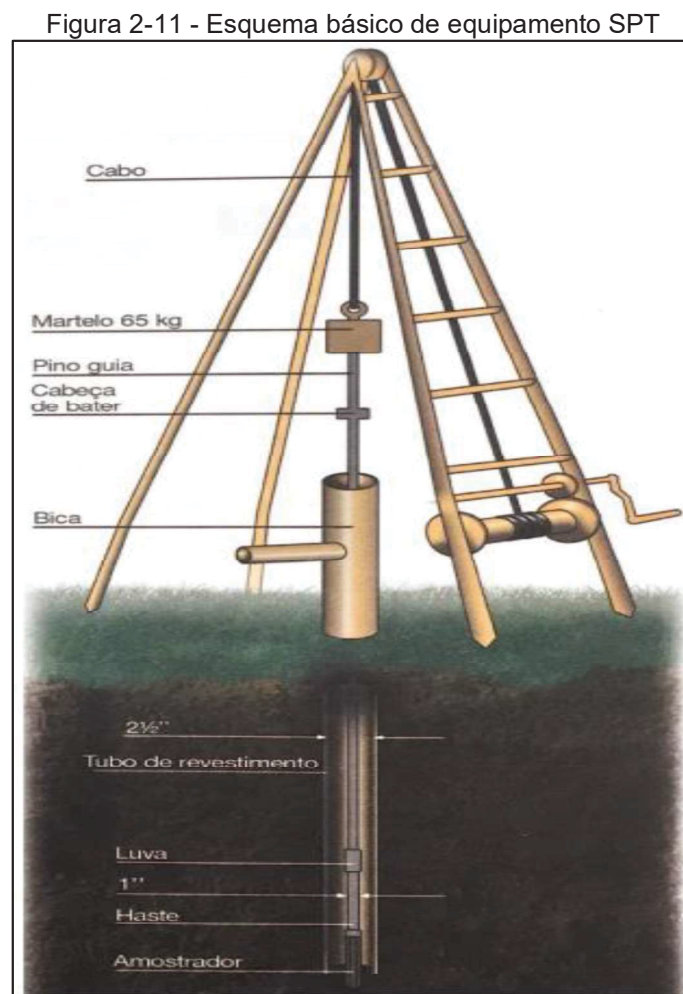
Com relação à permeabilidade, Duarte (1986) chegou a um coeficiente (k) para argilas da ordem de  $10^{-9}$  cm/s. Contudo para Kormann (2002), em campo a permeabilidade tende a ser significativamente maior do que as medidas em laboratório devido às falhas e fraturas existentes no solo em seu estado natural, diferentemente do material ensaiado em laboratório que está intacto. Isso chama a atenção para a importância do efeito de escala para solos compostos por argila fraturada, como a da Formação Guabirota.

Com relação ao ensaio de SPT nos solos da Bacia de Curitiba, uma das características observadas é de que, frequentemente, já nas camadas superficiais o material argiloso pode apresentar consistência considerada de média a rija, com resultados para sondagem SPT valores na ordem de 15 a 30 golpes. Essa consistência dura dos solos da Formação Guabirota explica a limitação frequente nas sondagens SPT a profundidades inferiores a 20 m (KORMANN, 2002).

## 1.2 Standard Penetration Test – SPT

O objetivo de uma investigação para um projeto geotécnico é obter detalhes a respeito da estratigrafia local de forma a estabelecer o perfil geotécnico para análise da estabilidade, além dos parâmetros de solo (GERSCOVICK, 2019).

Apesar de ser um método de investigação geotécnica largamente utilizado no mundo todo e, no Brasil, o *Standard Penetration Test* (SPT) se estabeleceu como método rotineiro para projeto de fundações diretas e profundas. Oferece diferentes técnicas de perfuração, equipamento e procedimento de ensaio nos diversos países onde é empregado, culminando em incongruência no significado real dos resultados obtidos por intermédio deste ensaio. Na Figura 2-11 está ilustrado um equipamento em configuração típica do ensaio SPT.



FONTE: SCHNAID E ODEBRECHT (2012)

Um dos méritos da sondagem SPT é a análise tátil visual do solo e em conjunto com a obtenção da resistência à penetração oferecida pelo solo, com sua classificação conforme a NBR 6484 (2001), como na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - Designação de solos com base na resistência a penetração para ensaio SPT

Solo	Índice de resistência a penetração	Designação
Areia e silte arenoso	<4	Fofa
	5-8	Pouco compacta
	9-18	Medianamente compacta
	19-40	Compacta
	>40	Muito compacta
Argila e silte argiloso	<2	Muito mole
	3-5	Mole
	6-10	Média
	11-19	Rija
	>19	Dura

FONTE: NBR 6484 (ABNT, 2001)

O uso dos valores obtidos no ensaio de SPT exige certo cuidado, pois, devido às diferenças entre a perda de energia teórica de queda do martelo com relação às práticas brasileiras e internacionais, recomenda-se correlacionar os valores de SPT ao padrão internacional  $N_{spt,60}$ . Para isso, os valores do  $N_{spt}$ , obtido por meio da prática brasileira, devem ser majorados em cerca de 15 a 30% para realizar correlações internacionais. A equação 2-1 representa essa correção de energia (SCHNAID E ODEBRECHT, 2012).

$$N_{spt,60} = \frac{N_{spt} \cdot \text{Energia Aplicada}}{0,60} \quad 2-1$$

Onde:

$N_{spt}$  = Número de golpes segundo a prática brasileira

$E_{\text{Energia Aplicada}}$  = Eficiência do sistema em relação aplicação da energia teórica

$N_{spt,60}$  =  $N_{spt}$  em padrões internacionais

Cintra et al. (2013) descreve a necessidade de correção do valor de  $N_{spt}$  conforme a eficiência do ensaio. Sabendo-se que o índice de  $N_{spt}$  é inversamente proporcional à energia efetivamente aplicada na cravação do amostrador ( $E_{\text{aplicada}}$ ), a qual não atinge 100% da energia de queda livre ( $E_{\text{teórica}}$ ) em razão das perdas que ocorrem no sistema. Por isso, podemos definir a eficiência do sistema ( $ef$ ) pela relação 2-2:

$$ef = \left( \frac{E_{aplicada}}{E_{teórica}} \right) \times 100 \quad 2-2$$

Assim, um valor de  $N_{spt}$  obtido com eficiência  $ef = 72\%$  (aceito como o valor médio no sistema manual empregado no Brasil) deveria ser multiplicado por 1,2 para ser comparado ao obtido com  $ef = 60\%$  (considerado o valor médio do sistema mecanizado americano).

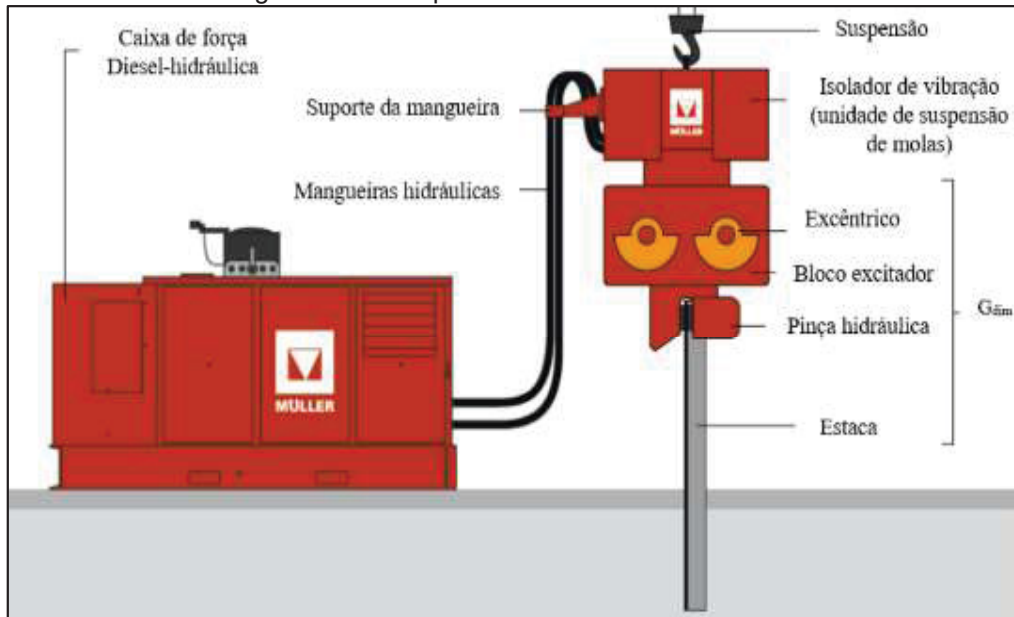
A fim de projeto, existem duas formas de abordar a correlação do  $N_{spt}$ : por meios indiretos ou por meios diretos. Nos métodos indiretos, os resultados do SPT são utilizados para estabelecer os parâmetros constitutivos do comportamento do solo. Nos métodos diretos, o SPT é aplicado diretamente para prever resistência do solo sem utilização de parâmetros intermediários. (SCHNAID E ODEBRECHT, 2012)

### **2.3 Martelos vibratórios**

O martelo vibratório é composto por uma caixa de força na qual existe um motor a diesel, responsável por gerar a energia que alimentará o bloco excitador, em que estão as massas excêntricas, responsáveis por produzir a vibração no sentido vertical conforme giram. Acoplado abaixo do bloco excitador fica a pinça hidráulica, com função de segurar a estaca. Para que a vibração não seja transferida ao guincho que suspende o martelo, o conjunto é composto também por um isolador de vibração. Um esquema de martelo vibratório está representado na Figura 2-12.



Figura 2-12 - Esquema de um martelo vibratório



FONTE: Adaptado de MULLER (2013).

Como forma de classificação dos martelos vibratórios pode-se considerar as suas frequências, classificando-os da seguinte forma:

- a) Baixa frequência: que operam em frequência inferior a 20Hz (1.200 rpm);
- b) Média frequência: que operam em frequência entre 20Hz (1.200 rpm) e 35Hz (2.100 rpm);
- c) Alta frequência: que operam em frequência superior a 35Hz (2.100 rpm).

Holeyman (2002) e Viking (2006) também apresentam a classificação dos martelos vibratórios com base na frequência de vibração, mas acrescentam as margens de trabalho dos momentos excêntricos, força máxima de cravação e amplitude, conforme Tabela 2-2. Ou seja, mesmo dentro de uma faixa de frequência que o martelo opere, ainda existem outras variáveis que interferem em seu desempenho.

Tabela 2-2 - Classificação dos martelos vibratórios

Tipo	Frequência (Hz)	Momento excêntrico, Me (kg.m)	Força máxima de cravação, Fd (kN)	Amplitude, Sp (mm)
Frequência padrão	<30	até 230	Até 4.600	Até 30
Alta frequência	>30	6-45	400-2.700	13-22
Excentricidade variável	31-40	0 a 10-54	600-3.300	14-17

FONTE: HOLEYMAN (2002).



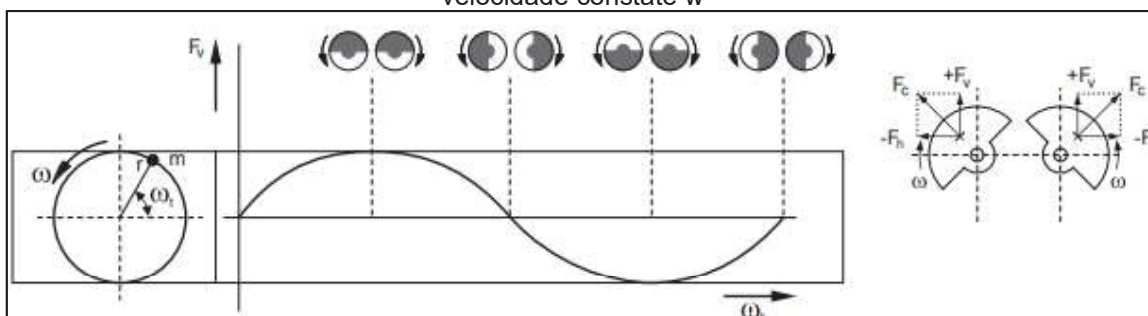
Segundo Guillemet (2013), martelos com frequência abaixo de 30Hz apresentam boa aplicação em solos mais densos por possuir amplitudes maiores e frequência variável. Já os de alta frequência foram desenvolvidos para evitar a ressonância, uma vez que desempenham frequências superiores aos naturais do solo e assim preservam construções vizinhas reduzindo as vibrações. Contudo, sua força de cravação e amplitude o torna limitado.

Os de excentricidade variável são os que possuem maiores vantagens frente aos demais em áreas urbanas com maior sensibilidade a vibração.

A vibração causada pelas massas excêntricas que giram em sincronismo cria forças centrífugas ascendentes e descendentes, como ilustrado na Figura 2-13. O sincronismo é importante para que esforços horizontais ( $F_h$ ) sejam anulados, para assim evitar a perda de eficiência por intermédio de esforços fora do sentido de cravação.

Cabe ressaltar que apesar da vibração reduzir o atrito lateral estaca-solo, a cravação ocorre, principalmente, devido à carga do peso próprio do martelo e da própria estaca (ALONSO, 2019).

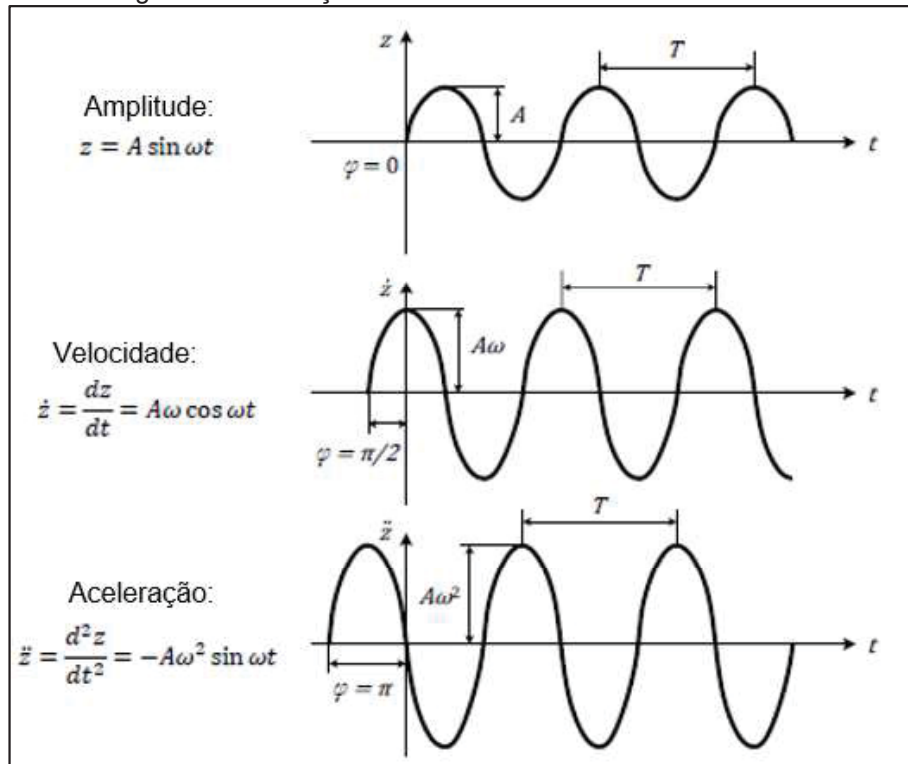
Figura 2-13 - Forças centrífugas ( $F_v$  e  $F_h$ ) geradas pelas massas excêntricas ( $m$ ) girando com velocidade constante  $w$



FONTE: GERDAU (2015)

Como pode ser notado, o tipo de vibração imposta pelo martelo se assemelha ao tipo harmônico, podendo ser descrita por uma função senoidal ou cossenoidal. Na Figura 2-14 estão ilustradas as propriedades de movimento de vibração harmônico do tipo senoidal, bem como as equações de amplitude, velocidade e aceleração.

Figura 2-14 - Funções descritivas do movimento harmônico



FONTE: Adaptado de GUILLEMET (2013).

Onde:

A = Amplitude (m);

T = Período (comprimento de uma rotação) (s);

$\omega = 2\pi/T \rightarrow$  Frequência angular (rad/s);

$f = 1/T \rightarrow$  Frequência (rotações por segundo) (Hz);

$\varphi =$  Ângulo de fase (defasagem em relação a uma função senoidal pura).

## 2.4 Efeito da vibração no solo

A vibração gerada pelos excêntricos do martelo vibratório faz com que o atrito existente entre a estaca e o solo diminua, facilitando o processo de cisalhamento do solo representando, normalmente, ganhos significativos em termos de tempo de cravação em relação aos martelos por impacto (MASSARSCH, 2017).

Segundo Head e Jardine (1992 apud GUILLEMET, 2013), a propagação da vibração, por intermédio de um meio elástico, pode ser entendida pela vibração de uma única partícula que estando em contato com outras ao seu redor as excita, fazendo-as vibrarem. Assim, pode-se descrever o princípio da

propagação de onda, em que existe a transferência de energia de vibração, porém sem que as partículas se desloquem.

A vibração gerada pelo martelo vibratório produz um estado de movimento estacionário. A ressonância pode ocorrer quando a frequência coincide com uma das frequências características do solo, isso ocorre quando durante o processo de cravação a excitação específica da camada de solo coincide com a frequência natural, dependendo das propriedades do solo e da espessura da camada.

Segundo Guillemet (2013), solos com velocidade de onda na faixa de 130 a 600m/s, com espessuras de 1 a 5m, podem entrar em ressonância quando a frequência de cravação é da ordem de 20 a 30Hz.

Aplicando uma vibração contínua, em um sistema em frequência semelhante à frequência natural do material, definida pela equação 2-3, para um sistema linear elástico com um grau de liberdade como um sistema massa mola, ocorre um efeito conhecido como Ressonância.

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 2-3$$

Onde:

$f_n$	=	Frequência natural	[Hz]
$\omega_n$	=	Frequência angular natural	[rad/s]
$k$	=	Coeficiente de mola	[N/m]
$m$	=	massa	[kg]

Em teoria, mantendo-se o a vibração contínua, o sistema entraria em ressonância e produzirá amplitudes de deslocamento infinitas. No entanto, boa parte da energia aplicada na forma de vibração ao solo é perdida por conta da fricção, deformação e outros meios, sendo este fenômeno definido como “amortecimento”, podendo ser quantificado pela taxa de amortecimento “ $\xi$ ” (Equação 2-4). Em materiais com comportamento viscoelástico, esse amortecimento depende das características do solo e da amplitude do carregamento cíclico.

$$\xi = \frac{\Delta W_c}{2\pi \cdot \gamma_c \cdot \tau_c}$$

2-4

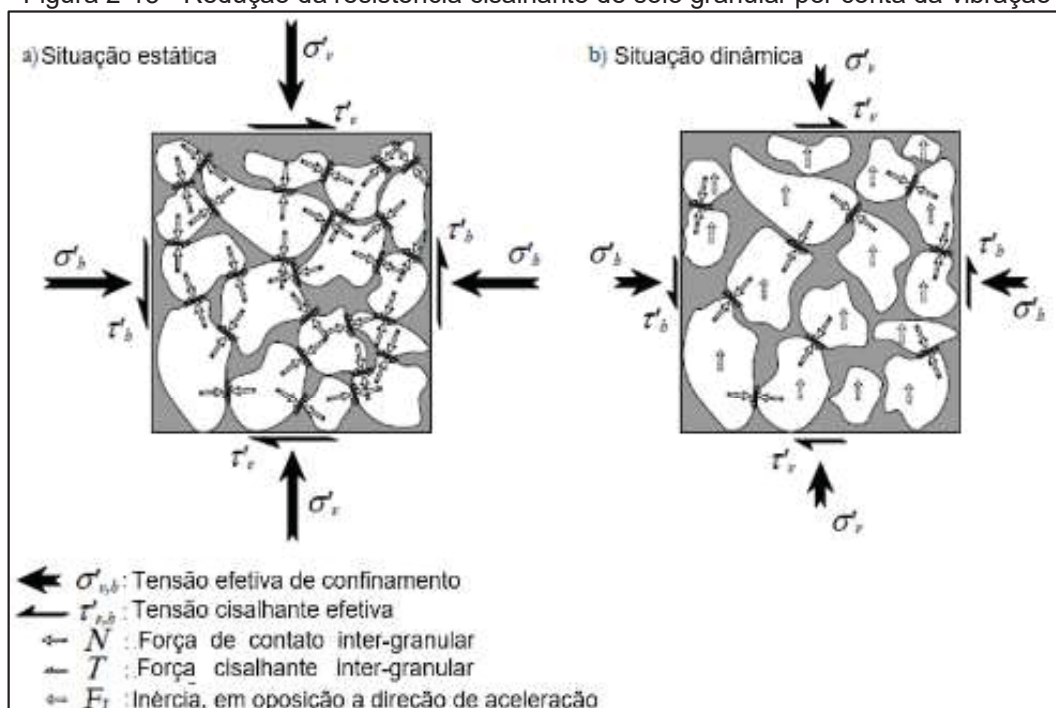
Onde:

$\xi$  = Taxa de amortecimento

Segundo Vucetic e Dobry (1991), areias e lodos não-plásticos são mais suscetíveis à degradação plástica devido ao rearranjo das partículas e perda de contato durante a vibração. Já as partículas de argila são mais firmemente unidas umas às outras por ligações elétricas e químicas que conservam um caráter “elástico” até níveis de deformação mais elevados e os tornam menos suscetíveis à degradação cíclica.

Viking (2002) e Denies (2010) desenvolveram estudos do comportamento de solos granulares quando submetidos à vibração. Com a representação gráfica das tensões em uma porção de solo granular representadas na Figura 2-15.

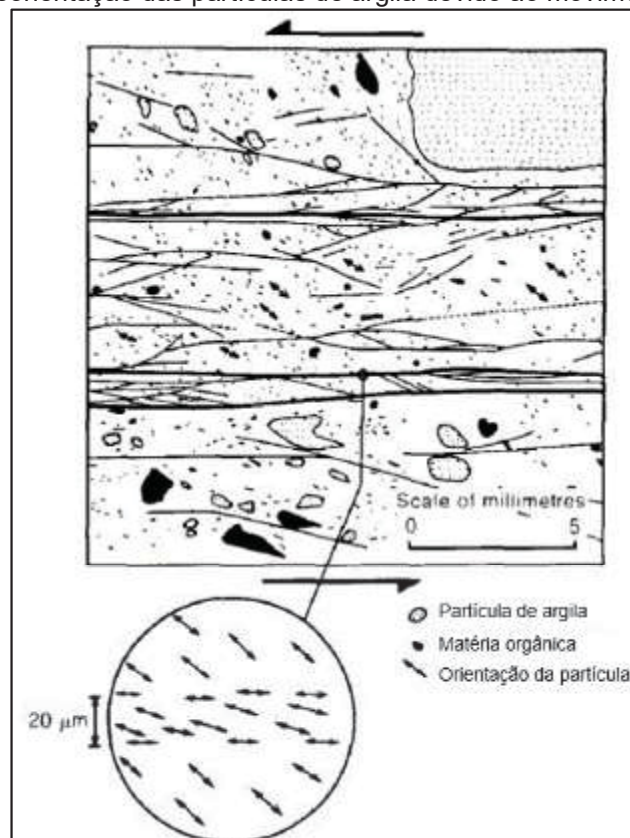
Figura 2-15 - Redução da resistência cisalhante de solo granular por conta da vibração



FONTE: VIKING (2002).

Segundo Sinke (2020), em solos coesivos o deslocamento da estaca tende a causar uma reorientação das partículas do solo e gerar poro pressão. Devido à reorientação e excesso de poro pressão gerados, a força de cisalhante transmitida ao solo é reduzida, pois nesse processo as partículas da argila se posicionam de maneira paralela à superfície cisalhante, como ilustrado na Figura 2-16, sendo esse efeito mais representativo de argilas normalmente adensadas e de baixa resistência.

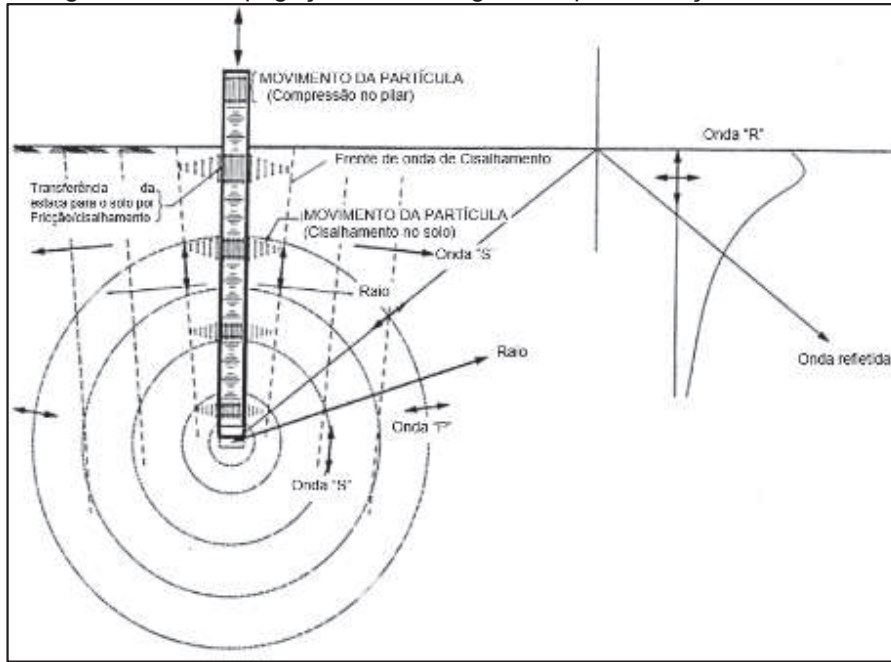
Figura 2-16 - Reorientação das partículas de argila devido ao movimento de cravação



FONTE: SINKE (2020).

Quanto a propagação das ondas no solo geradas durante o processo de cravação pode-se dividi-las em três tipos. As ondas que se propagam a partir do pé da estaca são ondas P e ondas S e têm uma forma esférica. Parte da energia destas ondas, ao encontrar a superfície, é convertida em ondas *Rayleigh* (ondas R) e outra parte é transmitida de volta ao solo, como ilustrado na Figura 2-17.

Figura 2-17 - Propagação de ondas geradas pela vibração do martelo

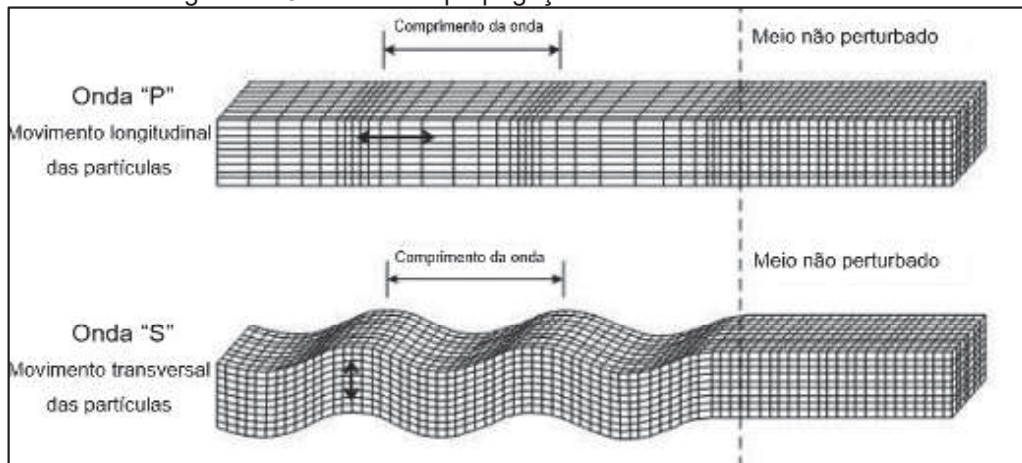


FONTE: ATHANASOPOULOS; PELEKIS (2000).

A onda "P" ou Primária gera um esforço de compressão e descreve uma mudança de volume; já a onda "S" ou Secundária, gera esforços de cisalhamento, causando uma alteração de forma. Isto considerando-se o movimento em um corpo homogêneo, isotrópico e mediantemente elástico. Ambas as ondas, "P" e "S", possuem naturezas distintas e são independentes entre si.

Pode-se tratar cada uma dessas ondas separadamente, por intermédio da equação do movimento em um corpo homogêneo, isotrópico, mediantemente elástico. Na Figura 2-18, está representado de maneira simplificada o comportamento das ondas "P" e "S"

Figura 2-18 - Forma de propagação das ondas P e S no solo



FONTE: GUILLEMET (2013)



Como pode ser observado, a onda “P” é responsável por uma onda que atua longitudinalmente em um movimento de tração e compressão, alterando a densidade local da massa de solo. Por este motivo, a onda “P” tem sua propagação vinculada à resistência uniaxial do material do solo, sendo este dependente do módulo edométrico (M), com a sua velocidade de propagação descrita pela equação 2-5.

$$c_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho} \cdot \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad 2-5$$

Onde:

$c_p$  = Velocidade da onda “P” (m/s);

M = Módulo edométrico (Pa);

$\rho$  = Densidade do solo (kg/m<sup>3</sup>);

G = Módulo de cisalhamento do solo (Pa);

$\nu$  = Coeficiente de Poisson.

Já a onda “S” se propaga transversalmente no solo, sem alterar o volume na massa. A propagação desta onda se baseia na propriedade de transmitir forças de cisalhamento entre partículas, dependendo, portanto, do módulo de cisalhamento, conforme a Equação 2-6.

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad 2-6$$

Onde:

$c_s$  = Velocidade da onda S (m/s);

G = Módulo de cisalhamento do solo (Pa);

$\rho$  = Densidade do solo (kg/m<sup>3</sup>).

Segundo Dowding (1996 apud GUILLEMET, 2013), a onda P se propaga com maior velocidade através da água do que da estrutura do solo, motivo pelo

qual, em solos com maior teor de umidade esta onda se propaga em maiores velocidades.

Como a onda S se propaga através da capacidade de transmissão da força cisalhante pelas partículas do solo, e sendo que a água não oferece qualquer resistência a este tipo de força, em solos saturados esta onda tende a apresentar baixas velocidades.

A Tabela 2-3 apresenta algumas velocidades para cada uma dessas ondas, considerando o solo em seu estado seco ou saturado.

Tabela 2-3 - Velocidade típica de propagação das ondas P e S de acordo com Bodare (1998)

Material		Velocidade da Onda "P" $c_p$ [m/s]	Velocidade da Onda "S" $c_s$ [m/s]
Argila	Seca	100-600	40-300
	Saturada	1450	40-250
Areia	Seca	150-1000	100-500
	Saturada	1450	80-450

FONTE: GUILLEMET (2013).

A onda R, ilustrada pela Figura 2-19, é gerada na interface de vibração entre materiais de diferentes módulos de elasticidade, como solo e o ar. A importância dessa onda está no quão prejudicial ela é ao solo, pois possui grandes deslocamentos, baixas frequências, baixa velocidade e carrega a maior parte da energia vibratória. Sendo uma combinação da onda P e S, podendo ser associada a um movimento elíptico, cujo formato depende da profundidade do solo e do coeficiente de Poisson.

Figura 2-19 - Propagação da onda R na camada superficial do solo

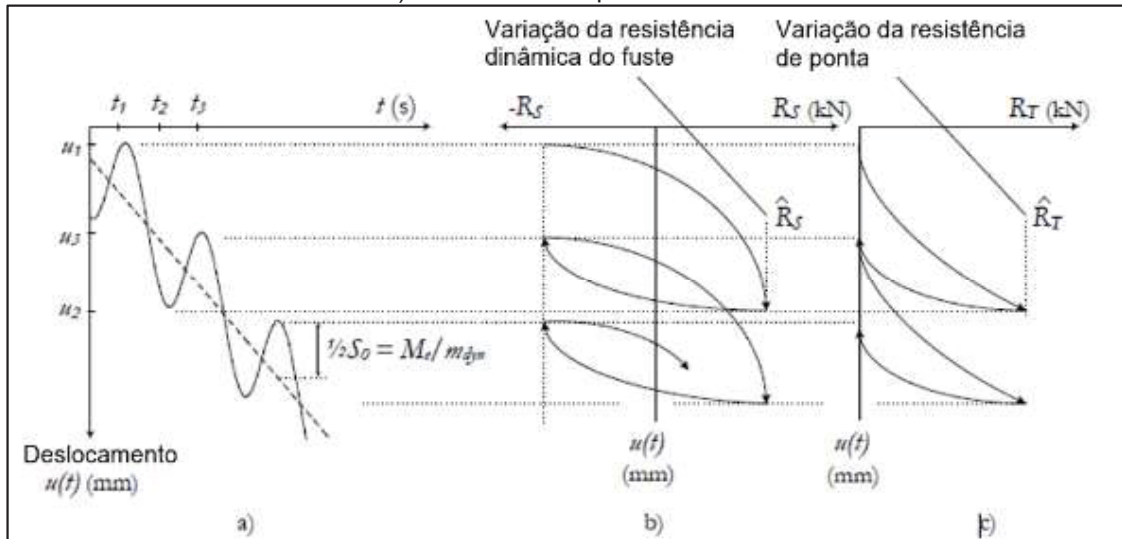


FONTE: GUILLEMET (2013).

Segundo Guillemet (2013), solos duros apresentam uma resistência de ponta na estaca, influenciando significativamente os níveis de vibração. Apesar de ser realizada por martelos que induzem a vibração na vertical, nota-se uma componente horizontal significativa, sendo até mesmo de mesma magnitude ou até maior.

A resistência oferecida pelo fuste da estaca varia conforme a vibração oscila verticalmente e a resistência de ponta varia entre zero e um valor máximo da maneira ilustrada pela Figura 2-20.

Figura 2-20 - a) Movimento de penetração da estaca prancha; b) Resistência de fuste; c) Resistência do pé da estaca



FONTE: DECKNER (2013).

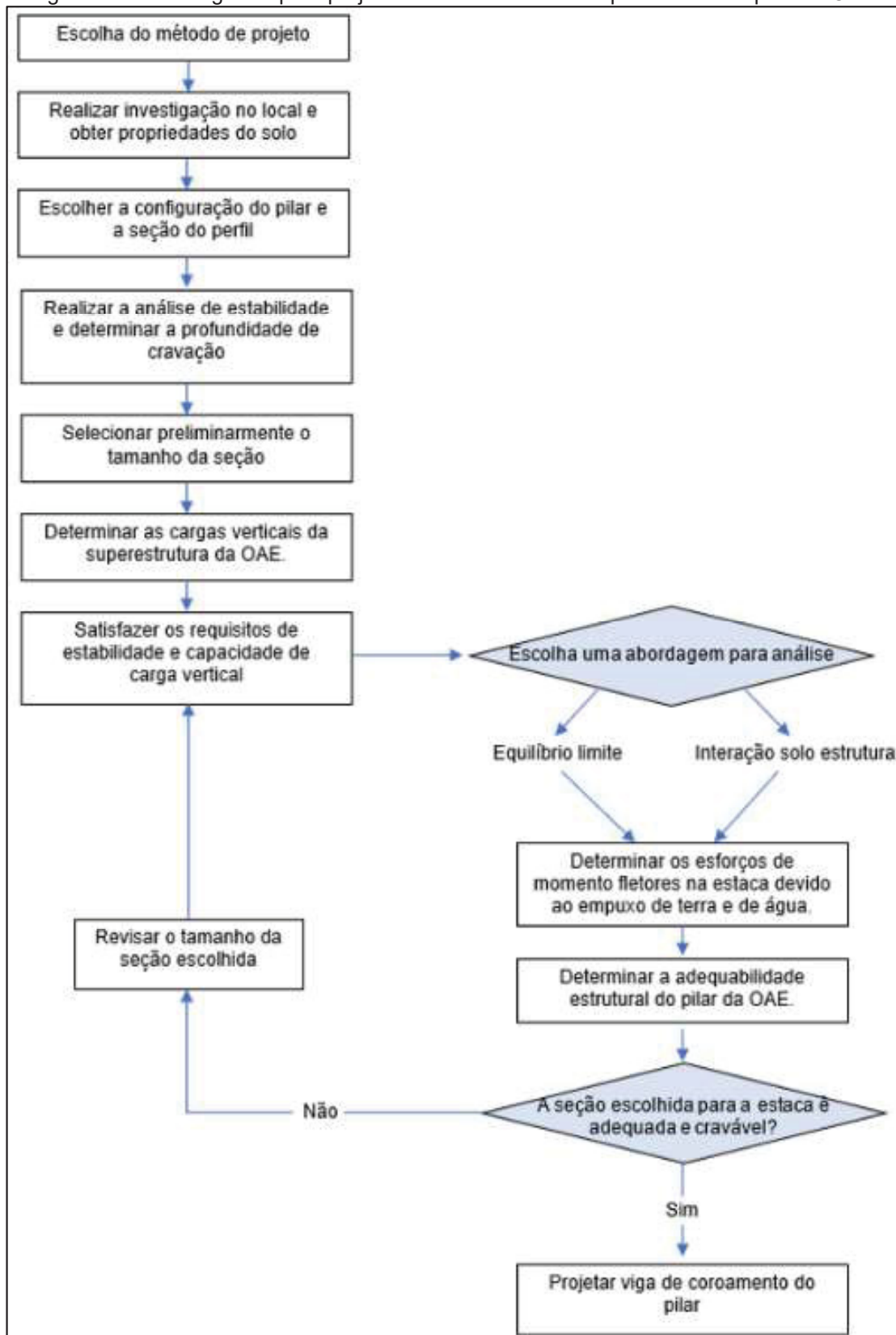
A resistência dinâmica oferecida pelo conjunto estaca-solo é influenciada por quatro fatores principais, tanto para solos granulares e coesivos: Frequência de cravação, velocidade da estaca, amplitude e número de ciclos. Porém para solos coesivos há um acréscimo significativo na resistência de ponta e de fuste quando incrementada a frequência de cravação por vibração. Ao contrário do que ocorre em solos granulares, em que quanto maior o incremento dessas propriedades do martelo, menor a resistência oferecida pelo solo a cravação, tanto pela ponta quanto pelo fuste (MASSARSCH, 2000).

## 2.5 Seleção da estaca prancha

O *Steel Construction Institute* (SCI) (1998) apresenta um esquema orientativo para dimensionamento de cortinas de estacas-prancha, que irão cumprir papel duplo como contenção do solo e como pilares da superestrutura da ponte ou viaduto. Este esquema está representado na Figura 2-21. Conforme o fluxograma apresentado, além das verificações de estabilidade e capacidade estrutural das estacas como cortina e como pilares para a OAE (Obra de Arte Especial), uma das verificações necessárias para o uso de estacas prancha

submetidas a cravação por equipamento, seja vibratório ou por impacto, é a cravabilidade da estaca.

Figura 2-21 - Fluxograma para projeto de cortina de estacas prancha como pilar de OAE



FONTE: Adaptado de THE STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE (SCI) (1998).

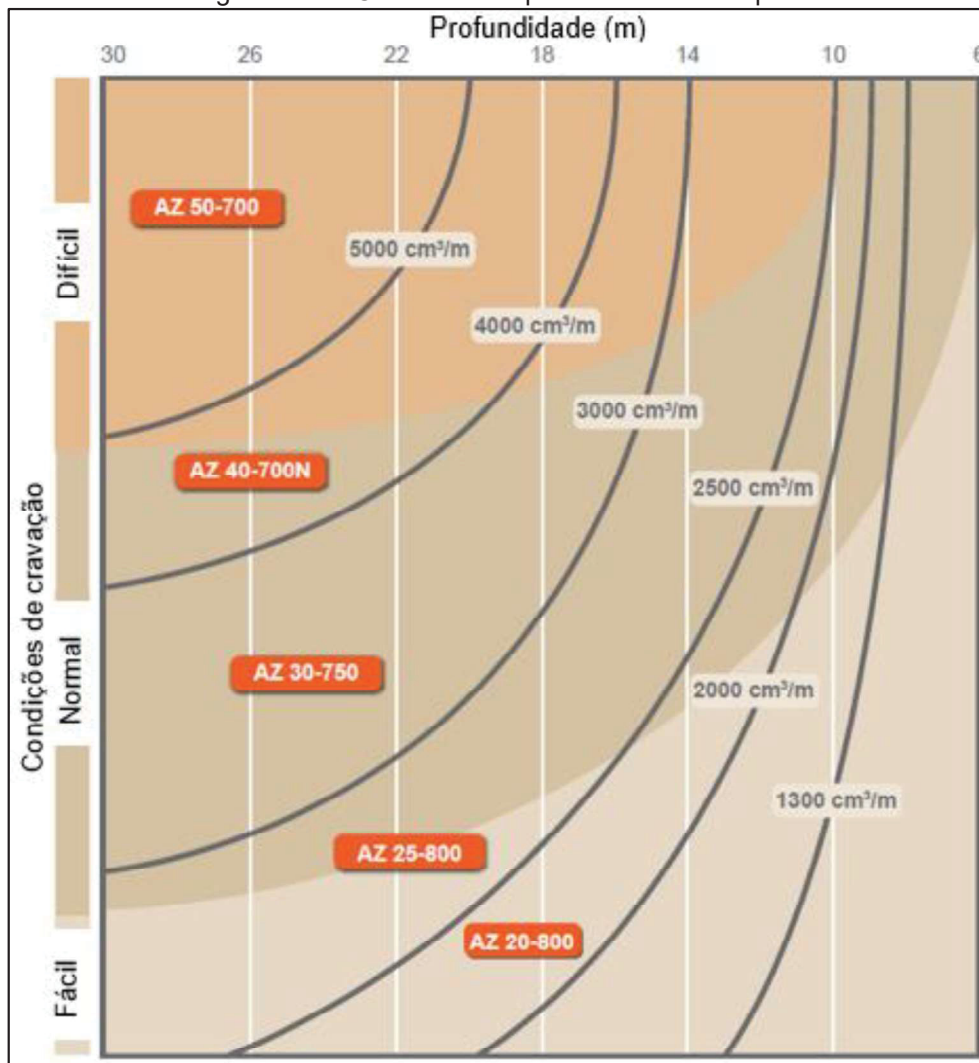
Segundo Arcelormittal (2018), a escolha da estaca-prancha deve levar em consideração o seu comprimento, bem como as condições de solo, apresentando para esta seleção alguns parâmetros conforme listados na Tabela 2-4 e representado na Figura 2-22, levando-se em consideração o Módulo de Resistência por metro de parede indicado para cada faixa de dificuldade de cravação em função da profundidade.

Tabela 2-4 - Escolha de estaca a ser utilizada

Condição de cravação	SPT (golpes)		CPT (mN/m <sup>2</sup> )	
	Coesivo	Não coesivo	Coesivo	Não coesivo
Fácil	0-5	0-20	0-0,5	0-7,5
Normal	5-15	20-40	0,5-1	7,5-1,5
Difícil	>15	>40	>1	>15

FONTE: ARCELORMITTAL (2018).

Figura 2-22 - Cravabilidade para estacas AZ duplas



FONTE: ARCELORMITTAL (2018)

Conforme o SCI (1998), as boas práticas executivas influenciam a facilidade com que a estaca adentrará ao solo. Além disso, para solos coesivos, a resistência à penetração é predominantemente oferecida pela resistência lateral da estaca, de forma que a escolha da seção adequada deve considerar essa resistência oferecida pelo solo à cravação, de maneira a garantir que não empene. Para auxiliar na escolha da estaca, em função do módulo de resistência da parede, apresenta a Tabela 2-5 que leva em conta o grau de aço da estaca, a consistência da argila e a profundidade de cravação.

Tabela 2-5 - Escolha de estaca a ser utilizada em solos coesivos de acordo com o SCI, 1998

Descrição da argila	Mínimo módulo de resistência da parede (cm <sup>3</sup> /m)		Máximo comprimento de cravação (m)
	Grau de aço: (S270GP)	Grau de aço: (S355GP)	
Mole a média	450	400	6
Média	600-700	450-600	9
Média a rija	700-1600	600-1300	14
Rija	2000-2600	1300-2000	16
Muito rija	2600-3000	2000-2500	18
Dura	Não recomendado	4200-5000	20

FONTE: SCI (1998)

## 2.6 Seleção do martelo vibratório e cravabilidade

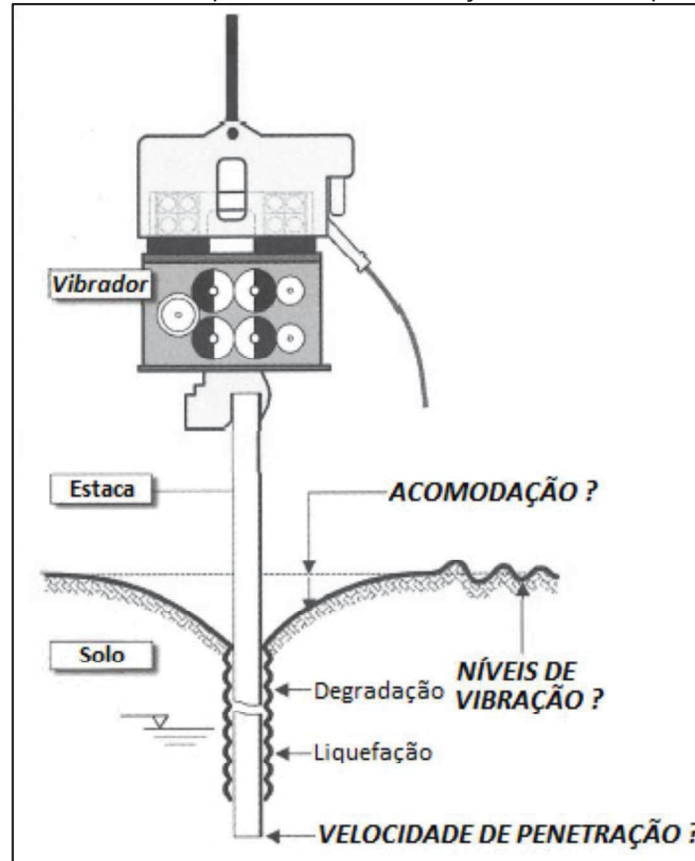
Segundo Baars (2004) nos países baixos 70% das estaca-prancha são cravadas com martelos vibratórios. O autor aponta que ao longo dos anos diversos métodos foram desenvolvidos a fim de definir martelo mais adequado à cravação.

O autor submeteu os métodos Vibdrive, NVAF<sub>loc</sub>, NVAF<sub>gen</sub>, CUR166, EAU1996 a 18 situações de cravação na qual observou que o método mais condizente com as situações definidas em seu estudo foi o Vibdrive. É um dos métodos que considera o efeito de atrito entre os conectores em sua equação.

Holeyman (2002), classifica em três as questões que envolvem a cravação de estacas: A estaca ser cravada, a seleção do martelo e as condições impostas pelo solo (Figura 2-23).



Figura 2-23 - Questões que envolvem a cravação de estacas por vibração

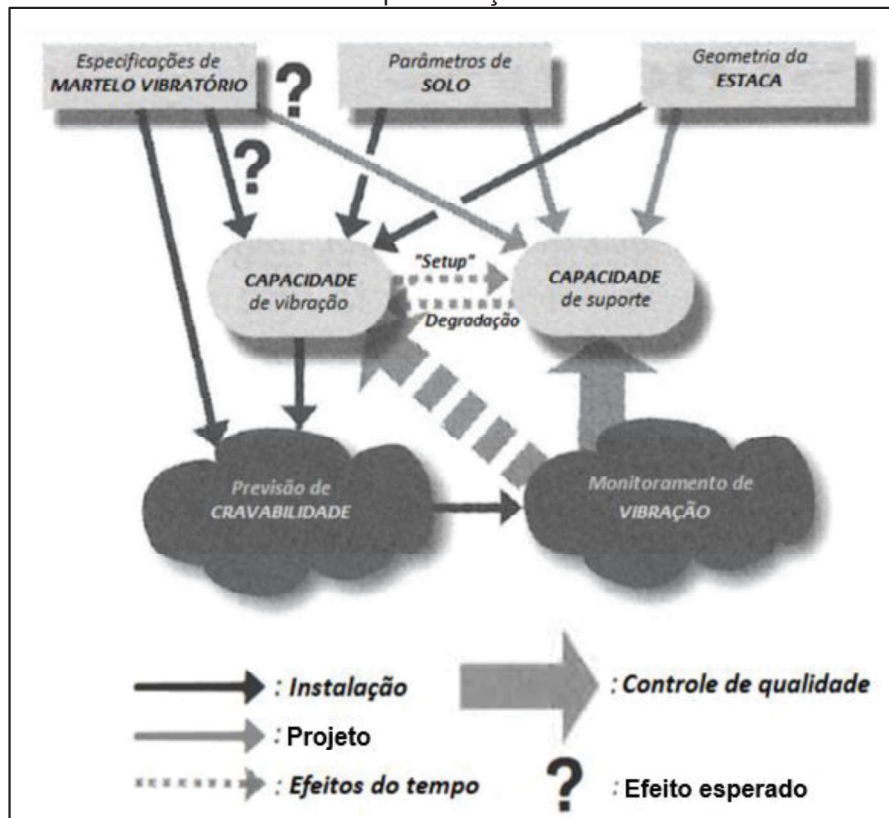


FONTE: HOLEYMAN (2002)

Holeyman (2002) relata que não só a resistência do solo pode ter seu cálculo subestimado ou superestimado, mas também a amplitude de vibração que o martelo poderá entregar, em estudo descrito pelo autor a amplitude na ponta da estaca foi de apenas 20% em relação a amplitude nominal do martelo utilizado, sendo realizada a substituição do "power pack", por um com maior potência, a cravação continuou obtendo êxito com o mesmo martelo.

Recomendando maiores estudos para definir estas perdas, tais como testes em escala real com extenso monitoramento, uma vez que testes de laboratório não conseguem reproduzir adequadamente a dissipação de energia, recomenda a elaboração de procedimentos para testes de carga vibratória. A Figura 2-24, ilustra as variáveis envolvidas no processo de projeto e execução de cravação da estaca por vibração.

Figura 2-24 - Fatores envolvidos no processo de execução e projeto de cravação de estacas por vibração



FONTE: HOLEYMAN (2002)

Em seu Anexo F, a Norma Brasileira NBR 6122 (2019) define critérios para emprego de martelos de queda livre para cravação de estacas metálicas. Contudo, a NBR deixa desguarnecidos projetistas e executores quanto a critérios para emprego de martelos vibratórios, deixando a cargo da recomendação dos fabricantes.

Já a Norma Europeia EN 12063 (1999) orienta quanto à execução de cravação de estacas prancha em diferentes condições, além de apresentar cautelas que devem ser tomadas com relação a soldas, fixação em rochas, estocagem e movimentação. As Normas Holandesa e a alemã, CUR 166 (2012) e a EAU (1990), respectivamente, apresentam equações baseadas em estudos empíricos para seleção do martelo vibratório.

Sinke (2020) considera que, normalmente, o projeto de fundação é conduzido por uma abordagem que leva em conta a capacidade última vertical e lateral. Conseguir acrescentar na análise de projeto a cravabilidade da estaca conduz à necessidade de haver uma previsão desta característica.

O termo cravabilidade é normalmente utilizado para expressar a taxa de penetração ou velocidade de penetração em milímetros por segundo (mm/s) para o caso de martelos vibratórios. Porém, Rooduijn e De Gijt (2017), estendem este entendimento além da velocidade de penetração. Definem cravabilidade como sendo a facilidade de um elemento de fundação ser inserido a uma determinada profundidade com certa velocidade, sem exceder a capacidade estrutural do material.

Particularmente para estacas cravadas, atingir a cota de projeto é importante, pois, caso contrário, pode ocorrer instabilidade da fundação. Além disso, o não atingimento da profundidade de cravação pode ser interpretado como uma falha executiva.

Para Alonso (2019), atualmente a seleção do martelo vibratório é empírica, contando apenas com o conhecimento e prática do executor. Há alguns métodos que procuram estabelecer parâmetros para conduzir a uma escolha mais criteriosa, porém ainda dotados de empirismo.

Sinke (2020) descreve que vários métodos para previsão da cravabilidade foram desenvolvidos ao longo dos anos, tendo como origem os desenvolvidos para martelos de impacto, sendo igualmente empíricos e sem comprovação teórica.

De maneira simplificada, Ernst & Sohn (2004), US COE (1997; 2004) apresentam uma forma de seleção de martelo vibratório com base na força centrífuga mínima que os excêntricos devem produzir para cravar a estaca a profundidade desejada. Essa força é obtida através da equação 2-7. Ressalta-se, essas equações são aplicáveis em solo uniforme, bem estruturado e saturado.

$$F = 15. \left( t + \frac{2 \cdot m_{pile,mat}}{100} \right) \text{ [kN]} \quad 2-7$$

Onde:

F = Força centrífuga mínima (kN);

t = Profundidade de cravação (m);

$m_{pile,mat}$  = Peso da estaca (kg).

Ainda, segundo a recomendação, devem existir 15kN de força centrífuga para cada metro de profundidade e 30kN de força centrífuga para cada 100 kgf de peso de estaca. Além da força centrífuga, a amplitude também pode ser um parâmetro para seleção do martelo vibratório, obtido pela equação 2-8, em função do peso dinâmico do sistema, incluso a pinça.

$$Amplitude = \left( \frac{2000.Momento\ excentrico\ [kg.m]}{peso\ dinâmico\ [kg]} \right) [mm] \quad 2-8$$

Amplitude inferior a 3mm não é recomendada. Como forma orientativa, a amplitude deve ser da ordem de 4mm, 6mm e 8mm, conforme a cravabilidade fácil, normal e difícil, respectivamente, referente à dificuldade de cravação (ERNST & SOHN, 2004).

Alonso (2019), estudou a cravação de estacas de fundação com uso de martelos vibratórios, a fim de definir uma metodologia de seleção dos martelos. Segundo Alonso (2019) a carga de ruptura geotécnica (PR) em uma estaca é a soma da resistência de ponta e de resistência lateral. Porém, a resistência oferecida pelo solo durante a cravação de uma estaca por martelo vibratório é menor do que (PR). Com base nesse conceito e com estudo de cravação de estaca de seção transversal simples (H), com martelos de alta frequência, na costa brasileira, especificamente em Santos (SP), Barra da Tijuca (RJ), Jaboatão dos Guararapes (PE) e São Luís (MA), os parâmetros para seleção deste equipamento podem ser obtidos de acordo com as equações a seguir:

$$P_{din} \geq 0,6.P_{est} \quad 2-9$$

e

$$F_c = 0,8.P_{adm} - (P_{est} + P_{din} + P_{pd}) \quad 2-10$$

Onde:

$P_{din}$  = Peso dinâmico mínimo;

$P_{est}$  = Peso da estaca;

$F_c$  = Força centrífuga mínima;

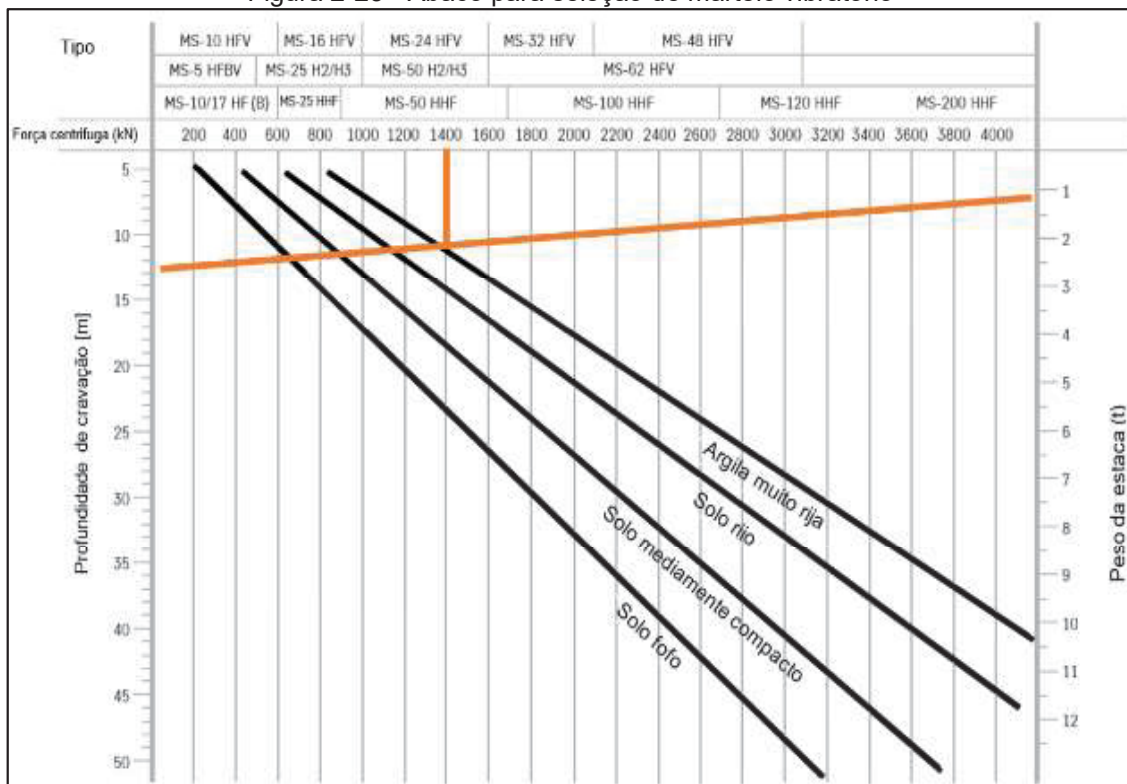
$P_{adm}$  = Carga de trabalho da estaca;

$P_{pd}$  = *Pull-Down* (Quando o martelo dispõe desse elemento).

O modelo proposto por Alonso (2019) se baseia na conservação de força, semelhante aos propostos por Jonker e Warrington (1987, 1989 *apud* HOLLEYMAN, 2002), para estimativa da velocidade de cravação. Ressalta-se que o modelo de Alonso (2019) foi aplicado para argilas moles e, como descrito pelo autor, não seria aplicável a solos de consistência dura, uma vez que parcela de resistência de ponta deveria ser considerada, o que implicaria em mais uma variável. Ainda, cabe ressaltar que o estudo de Alonso (2019), foi com base em estacas de fundação, que diferentemente de estacas de cortinas com estacas prancha não possuem atrito dos conectores das estacas adjacentes.

Existe ainda, a possibilidade de utilização de ábacos fornecidos pelos fabricantes de martelos para escolha do modelo, como de Muller (2013) apresentado na Figura 2-25. Contudo, esses ábacos são limitados à amostragem utilizada para sua concepção, não havendo qualquer fundamentação teórica (ALONSO, 2019). Além de haver um conflito de interesse, uma vez que o fornecedor do martelo, em tese, tem interesse em fornecer o martelo mais pesado/caro.

Figura 2-25 - Ábaco para seleção de martelo vibratório



FONTE: Adaptado de MULLER (2012).

A Universidade de Huston no Texas, em 1993, após teste em escala reduzida, classificou a cravabilidade em três estágios: fácil, moderado e difícil, com velocidades de cravação ( $V_p$ ) em mm/s, conforme a Tabela 2-6. Para a Associação Técnica Europeia de Estacas Prancha, a velocidade limite adotada como parâmetro para interromper a cravação é de 8mm/s, pois velocidades de cravação inferiores a esta podem provocar aquecimento nos conectores. (VIKING, 2002)

Tabela 2-6 - Classificação da cravabilidade quanto a velocidade de cravação (mm/s)

Difícil	Moderado	Fácil
$V_p < 22$	$22 < V_p < 60$	$V_p > 60$

FONTE: VIKING (2002).

Os métodos mais sofisticados de previsão de cravabilidade são os numéricos como o TNOWAVE, Vibdrive e Vipere.

Nesses modelos, a teoria física é introduzida por intermédio de considerações como fadiga do solo e propagação de onda, com a resistência inserida através de molas, amortecimento e inércia. O resultado destes métodos de previsão é a velocidade de cravação em função da profundidade, como ilustrado na Figura 2-26. Quanto à “nega” ou momento de parada é definido em projeto considerando uma velocidade de avanço limite (SINKE, 2020). Para Falconi (2020) esse avanço pode ser de 100 s/m, ou seja, 10 mm/s, considerando o Martelo vibratório adequadamente dimensionado, a Associação técnica Europeia de estacas prancha sugere a o limite de 8mm/s.



Figura 2-26 - Exemplo de curva de velocidade de cravação x profundidade



FONTE: SINKE (2020).

Sinke (2020) propõe em sua dissertação uma abordagem probabilística para previsão de cravabilidade, por método estocástico com levantamento das variáveis envolvidas na cravação de estacas prancha e aplicando a um estudo de caso. O autor lista as diversas variáveis relacionadas, desde as propriedades do próprio martelo e estaca, solo e incertezas, envolvendo análises de amostras e ensaios de campo e laboratoriais. Dentre os métodos de previsão de cravabilidade já existentes, relaciona os mais comumente utilizados:

- a) CUR166 (2012): Norma Holandesa que define o martelo com base na amplitude pela equação 2-11.

$$d = \frac{m_e}{m_{dyn}} \quad 2-11$$

Onde:

$d$  = Amplitude (m)

$m_e$  = Momento excêntrico (kgm)

$m_{dyn}$  = Massa dinâmica (kg)

Busca-se com essa equação, sem envolver o solo, verificar se a amplitude do martelo atende ao mínimo de 5mm, sendo suficiente para degradar a resistência do solo a penetração.

- b) EAU: Norma alemã que define a força vertical mínima que o martelo deve ser capaz de impor à estaca, através da equação 2-12.

$$F_{c,EAU} = \alpha_E \cdot L + \beta_E \cdot m_d \quad 2-12$$

Onde:

$F_{c,EAU}$  = Força vertical cíclica requerida (N);

$\alpha_E = 15E10^{-3}$  (N/m);

L = Comprimento de penetração da estaca (m);

$\beta_E = 3E10^{-4}$  (N/kg);

$m_d$  = Massa dinâmica do martelo e estaca (kg).

- c) Azzouzi: Baseado no método numérico Hypervib1, sugere a equação 2-13, para definição da força vertical mínima necessária do martelo vibratório. Com base em 180 cálculos utilizando o Hypervib1 é um método baseado principalmente na resistência de cone (CPT) em camadas de areias.

$$F_{c,Azzouzi} = \alpha_A \cdot L \cdot \chi \cdot f_A(q_c) + \beta_A \cdot A_t g_A(q_c) \quad 2-13$$

Onde:

$F_{c,Azzouzi}$  = Força vertical cíclica requerida (N);

$\alpha_A = 1,92 \cdot 10^{-3}$

L = Comprimento de penetração da estaca (m);

$\chi$  = Perímetro da estaca prancha (m);

$f_A(q_c)$  = Resistência média do cone nas camadas de areia (N/m<sup>2</sup>);

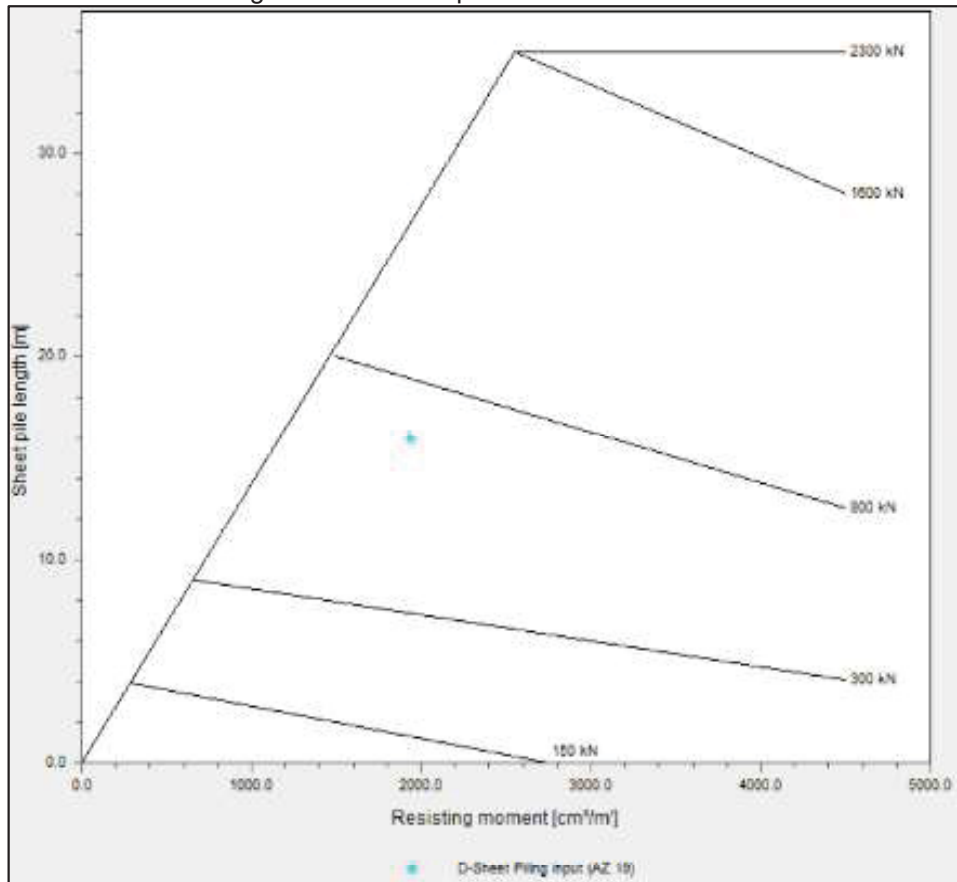
$\beta_A = 1,2 \cdot 10^{-2}$

$A_t$  = Área da seção transversal da estaca (m<sup>2</sup>)

$g_A(q_c)$  = Resistência de cone na ponta da estaca (N/m<sup>2</sup>)

- d) NVAF-PSD *design charts*: São ábacos desenvolvidos para solos típicos da região dos países baixos, com um exemplo apresentado na Figura 2-27.

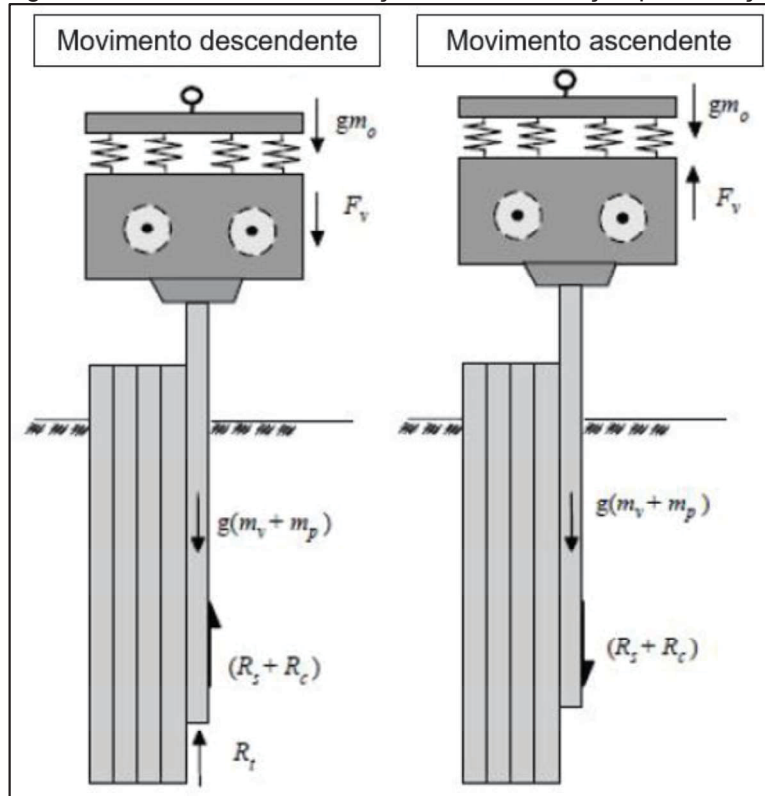
Figura 2-27 - Exemplo de ábaco NVAF-PSD



FONTE: DELTARES (2016)

- e) Vibdrive: Método desenvolvido na Universidade *Louvain-la-Neuve* na Bélgica, é um método semiempírico que prevê a redução da resistência ao cisalhamento do solo durante a vibração. Cita como isso é afetado por dois tipos de fenômenos que alteram as características iniciais de resistência ao cisalhamento do solo: a fluidização, relacionada ao movimento cíclico das partículas do solo devido à aceleração vibratória; e a Liquefação, relacionada ao acréscimo de poro pressão induzido.

Figura 2-28 - Modelo com esforços durante cravação por vibração



FONTE: Cock, (1990 apud SINKE, 2020)

Onde:

$m_0$  = Massa dos excêntricos (kN)

$m_0$  = Massa do bloco excitador (kN)

$F_v$  = Força centrífuga (kN)

$R_s$  = Resistência lateral (kN)

$R_c$  = Atrito entre conectores da estaca (kN)

$R_t$  = Resistência de ponta (kN)

A resistência oferecida pelo conjunto tendo em conta suas a resistência a vibração e de fluidização do solo podem ser calculadas neste método pelas utilizando-se as equações 2-14 a 2-17.

$$q_l = q_s [(1 - \psi) e^{\frac{1}{FR}} + \psi] \quad 2-14$$

$$q_d = (1 - e^{-\alpha}) q_l + q_s \cdot e^{-\alpha} \quad 2-15$$

$$\tau_l = \tau_s [(1 - \psi) e^{\frac{1}{FR}} + \psi] \quad 2-16$$

$$\tau_d = (1 - e^{-\alpha}) \tau_l + \tau_s \cdot e^{-\alpha} \quad 2-17$$

Onde:

$q_d$  = Resistência de ponta a vibração (MPa)

$q_l$  = Resistência de ponta a liquefação (MPa)

$q_s$  = Resistência estática de ponta (CPT) (MPa)

$T_d$  = Resistência lateral da estaca a vibração (kPa)

$T_l$  = Resistência lateral da estaca a liquefação (kPa)

$T_s$  = Resistência estática lateral da estaca (CPT) (kPa)

$\Psi$  = Fator empírico de liquefação ( $4 < \frac{1}{\Psi} < 10$ )

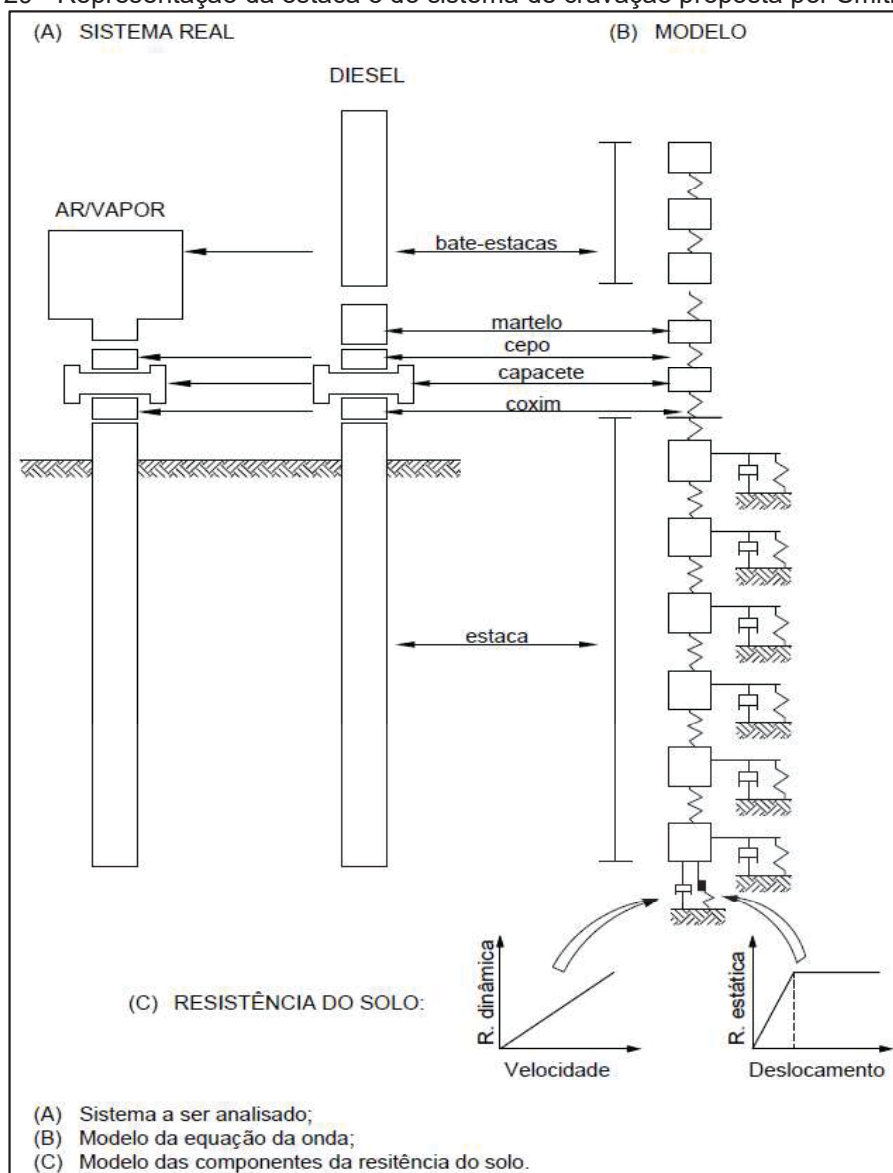
FR = Taxa de atrito (%)

$\alpha$  = Grau de aceleração (a/g)

- f) Vipere: Este método é um refinamento do modelo 1-D radial proposto por Holeyman (1993), desenvolvido por Vanden Berghe e Holeyman (2002). Assim, sendo chamado de *VIPIRE model (Vibratory Penetration Resistance)*. Com este método pode-se prever a variação da capacidade resistente do solo com o tempo e a velocidade de penetração em função da profundidade, durante o processo de cravação vibratória. Aqui, o comportamento do solo é assumido como hipoplástico e considera-se como não drenado utilizando o modelo constitutivos de Bauer e Gudehus (1996 apud SINKE, 2020). Calcula-se a resistência de ponta durante a cravação, considerando a estaca como um cilindro. Sua aplicação prática é limitada devido à quantidade de variáveis de entrada necessárias. (WHENHAM E HOLEYMAN, 2010).
- g) TNOWAVE: Em 1960, a TNO começou a desenvolver na Europa pesquisas com intuito de iniciar um programa próprio para solução de equação de onda, considerando o uso do algoritmo proposto por Smith (1960), solucionando equações diferenciais por integração numérica. (SINKE, 2020).
- h) Modelo de Smith: Foi o primeiro modelo a utilizar a equação de onda unidirecional para análise de cravação.

O método proposto por Smith (1960) foi desenvolvido para a solução da equação de onda aplicada à cravação de estacas sendo adaptado por diversos autores para tratar o comportamento de cravação por vibração, dentre estes, Gardner et al. (1981 apud HOLEYMAN, 2002) que desenvolveram um algoritmo computacional que representa martelo vibratório por um sistema de duas massas separadas por uma mola. Interpretando o conjunto de componentes como massas, molas e amortecedores, como ilustrado na Figura 2-29, é o modelo aplicado no Software GRLWEAP (*Wave Equation Analysis of Pile Driving*), da Pile Dynamic, Inc (PDI), com capacidade para modelar martelos vibratórios desde sua versão de 1998. (HOLEYMAN, 2002).

Figura 2-29 - Representação da estaca e do sistema de cravação proposta por Smith em 1960



FONTE: Adaptado de CINTRA et al (2013).



Nesse modelo a resistência a penetração ( $R_t$ ) é composto por uma parcela estática ( $R_u$ ) e uma parcela dinâmica ( $R_d$ ), conforme a equação 2-18:

$$R_t = R_u + R_d \quad 2-18$$

Assim, tem-se que com o esforço aplicado pelo martelo a ponta da estaca penetra no solo comprimento o solo elasticamente até que ocorre a ruptura plástica tendo-se a penetração permanente da estaca e a partir de então continuando o esforço de cravação há a resistência dinâmica, adiciona, decorrente do amortecimento do solo, de forma que:

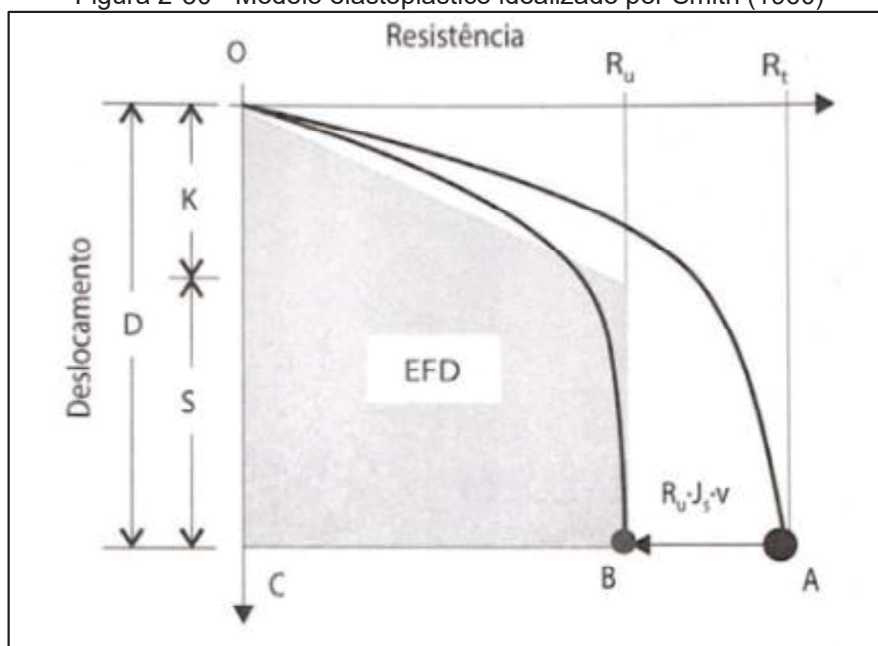
$$R_d = J_s \cdot v \cdot R_u \quad 2-19$$

Onde:

$J_s$  = Coeficiente de amortecimento do solo

$v$  = Velocidade da partícula

Figura 2-30 - Modelo elastoplástico idealizado por Smith (1960)



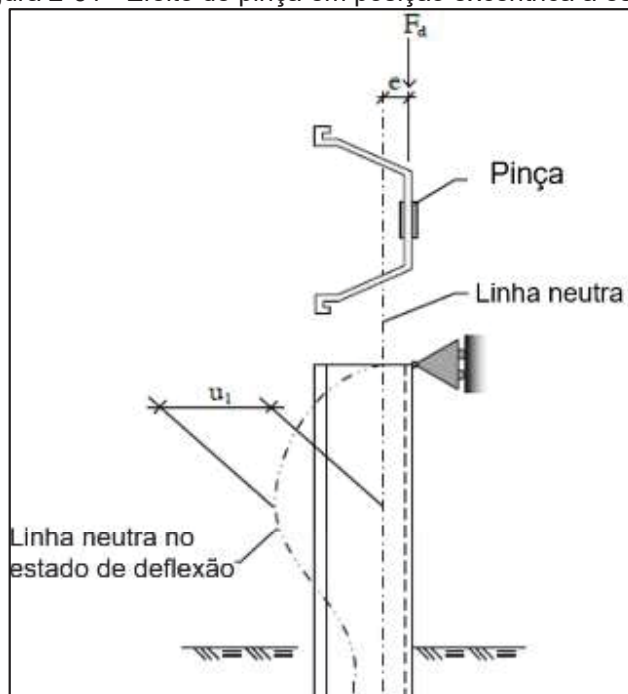
FONTE: Aoki (1996 *apud* CINTRA, 2013)

## 2.6.1 Fontes de perdas de eficiência do martelo e de cravabilidade

A seleção do martelo está diretamente relacionada a cravabilidade, pois deseja-se definir o modelo interpretará as condições de campo a fim de definir o martelo que conseguirá cravar a estaca até a cota de projeto, influenciada pela resistência oferecida pelo solo e a capacidade resistente da estaca. Estas são as preocupações nos modelos de cálculo. Contudo, existem outros fatores que também interferem no desempenho do equipamento, como a posição da pinça sobre a estaca e atrito entre os conectores influenciando o desempenho do martelo, bem como o método executivo.

Segundo Viking et al (2000), a pinça em posição excêntrica ao centro de gravidade da seção da estaca é a uma causa comum de indução de movimento de flexão, introduzindo momentos em seu topo, conforme Figura 2-30, e desorientando a vibração vertical gerada pelos momentos excêntricos do martelo, gerando vibrações laterais. Isto pode ocasionar flambagem, além de aumentar o atrito durante a cravação.

Figura 2-31 - Efeito de pinça em posição excêntrica à estaca

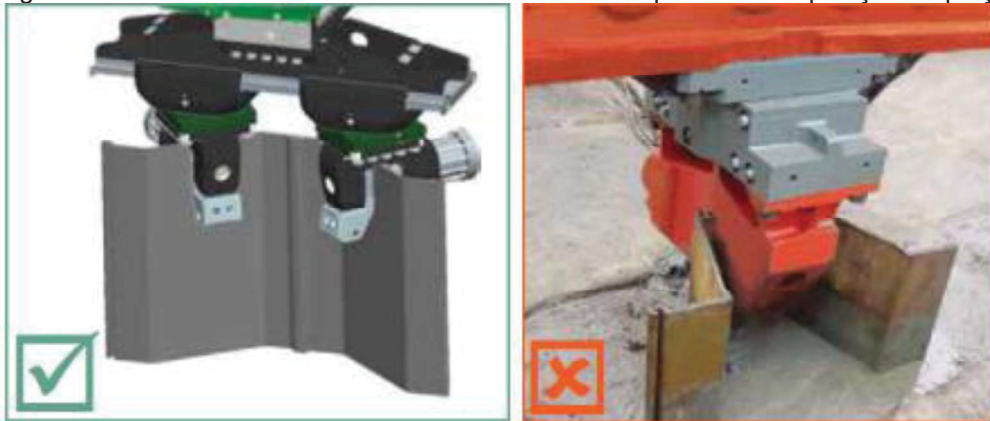


FONTE: VIKING (2000).

Conforme Arcelormittal (2018), para evitar a excentricidade entre a pinça e a estaca, é recomendável que em estacas prancha do tipo “Z” ou para de

qualquer seção com largura a partir de 700mm sejam utilizadas pinças duplas, como demonstrado na Figura 2-31. Pinças únicas aplicam a carga de cravação excêntrica em relação ao centro de gravidade da seção da estaca, o que gera esforços não condizentes com a direção de cravação. Isto acaba por provocar perdas de energia e de eficiência, conduzindo a uma cravação mais lenta.

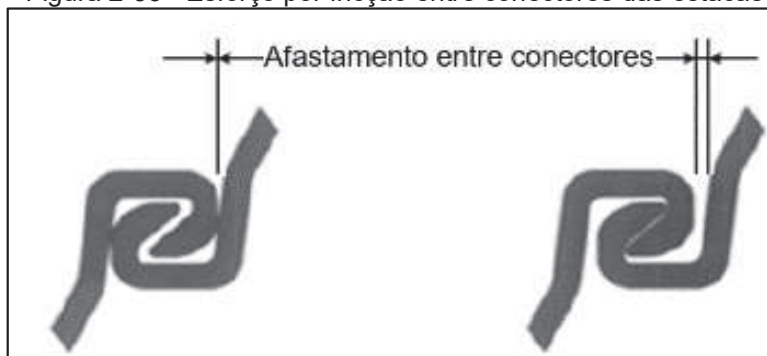
Figura 2-32 - Forma de evitar excentricidade na estaca por conta da posição da pinça



FONTE: ARCELORMITTAI (2018).

Outra forma de perda de energia durante a cravação é o atrito entre conectores. Legrand et al. (1993 *apud* GUILLEMET, 2013) desenvolveu estudos que demonstram que a resistência dos conectores das estacas pode aumentar de duas a cinco vezes as vibrações no solo, o que gera perda de eficiência do martelo. A origem deste atrito está na fricção das partículas de solo e no contato aço-aço (Figura 2-32), principalmente em estacas com problemas de alinhamento como o caso dos perfis tipo “Z”, que por sua própria geometria induzem a excentricidade. (WHENHAM, 2011).

Figura 2-33 - Esforço por fricção entre conectores das estacas



FONTE: VIKING (2002).

Segundo Ferron (2001), o acréscimo de resistência dinâmica causada pelo atrito entre conectores pode ser da ordem de 1 kN/m, para Vanden Berghe (2001), o atrito estático entre conectores pode estar entre 2 e 20 kN/m. Contudo, Sinke (2020) notou que *softwares* de previsão de cravabilidade não levam em conta este atrito, mesmo quando o autor configurou, em seu modelo, esforços de atrito superiores a força centrífuga do martelo.

## 2.7 Prova de carga dinâmica – PDA

Segundo Cintra et al. (2013), a capacidade de carga de um sistema estaca-solo pode ser determinada experimentalmente por meio de prova de carga estática ou dinâmica.

A NBR 6122 (ABNT, 2019) orienta a necessidade de realização de prova de carga estática de acordo com o porte da obra, número de estacas cravadas, material da estaca e condições geotécnicas, conforme a Tabela 2-7. A norma permite o uso de provas de carga dinâmica em substituição às provas de cargas estáticas, na proporção de cinco provas de carga dinâmica para cada prova de carga estática, devendo o procedimento executivo da prova de carga dinâmica atender o especificado pela NBR 13.208 (ABNT, 2007).

Tabela 2-7 - Condições que exigem prova de carga estática nas estacas

Tipo de estaca	A Tensão de trabalho abaixo da qual não serão obrigatórias provas de carga, desde que o número da obra seja inferior à coluna (B), em MPa <sup>b c d</sup>	B Número de estacas da obra a partir do qual serão obrigatórias provas de carga <sup>b c d</sup>
Pré moldada <sup>a</sup>	7,0	100
Madeira	-	100
Aço	0,5 f <sub>yk</sub>	100
Hélice	5,0	100
Escavadas com ou sem fluido $\phi \geq 70$ cm	5,0	75
Raiz <sup>e</sup>	$\leq \phi 310$ mm = 15,0	75
	$\leq \phi 400$ mm = 13,0	
Microestaca <sup>e</sup>	15,0	75
Trado vazado segmentado	5,0	50
Franki	7,0	100

Escavadas fluído $\phi < 70$ cm	4,0	100
Strauss	4,0	100
<p>a Para o cálculo da tensão de trabalho consideram-se estacas vazadas como maciças, desde que a seção vazada não exceda 40% da seção total</p> <p>b Os requisitos acima são válidos para as seguintes condições (não necessariamente simultâneas):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas onde haja experiências prévias com o tipo de estaca empregado.</li> <li>- Onde não houver particularidades geológico-geotécnicas.</li> <li>- Quando não houver variação do processo executivo padrão</li> <li>- Quando não houver dúvida quanto ao desempenho das estacas.</li> </ul> <p>c Quando as condições desta Tabela não ocorrerem, devem ser feitas provas de carga em, no mínimo, 1% das estacas. Observando-se um mínimo de uma prova de carga (conforme ABNT NBR 12131), qualquer que seja no nº de estacas.</p> <p>d As provas de carga executadas exclusivamente para avaliação de desempenho devem ser levadas até que se atinja pelo menos duas vezes a carga admissível ou até que se observe um deslocamento que caracterize ruptura. Caso exista prova de carga prévia, as provas de carga de desempenho devem ser levadas até que se atinja pelo menos 1,6 vezes a carga admissível ou até que se observe um deslocamento que caracterize ruptura.</p> <p>e Diâmetros de perfuração conforme Anexo K.</p>		

FONTE: NBR 6122 (ABNT, 2019).

Segundo a NBR 13.208 (ABNT, 2007), para ter representatividade, deve ser realizada prova de carga dinâmica em pelo menos 5% das estacas, desde que sejam ensaiadas com um mínimo de três elementos, podendo variar de acordo com as condições geológico-geotécnicas e variabilidade das fundações.

O ensaio de carregamento dinâmico pode ser realizado com o uso de duas metodologias, a de energia crescente e a de energia constante.

O método de energia constante consiste na aplicação de golpes com energia sempre constante e que seja preferencialmente igual ou superior a energia empregada na utilizada ao fim da cravação.

Já para o método de energia crescente a altura de queda para os golpes é variável e crescente, partindo inicialmente de um nível de energia inferior ao do término da cravação. A norma recomenda que este método não deve ser utilizado quando existe a possibilidade de manifestação do fenômeno de relaxação. Para calibração das resistências, recomenda-se a análise numérica do tipo CAPWAP<sup>®</sup>. Para qualquer um dos casos é obrigatória a obtenção dos valores de penetração permanente (negas).

Segundo a NBR 13.208 (ABNT, 2007) para execução do PDA, o equipamento utilizado é composto por:

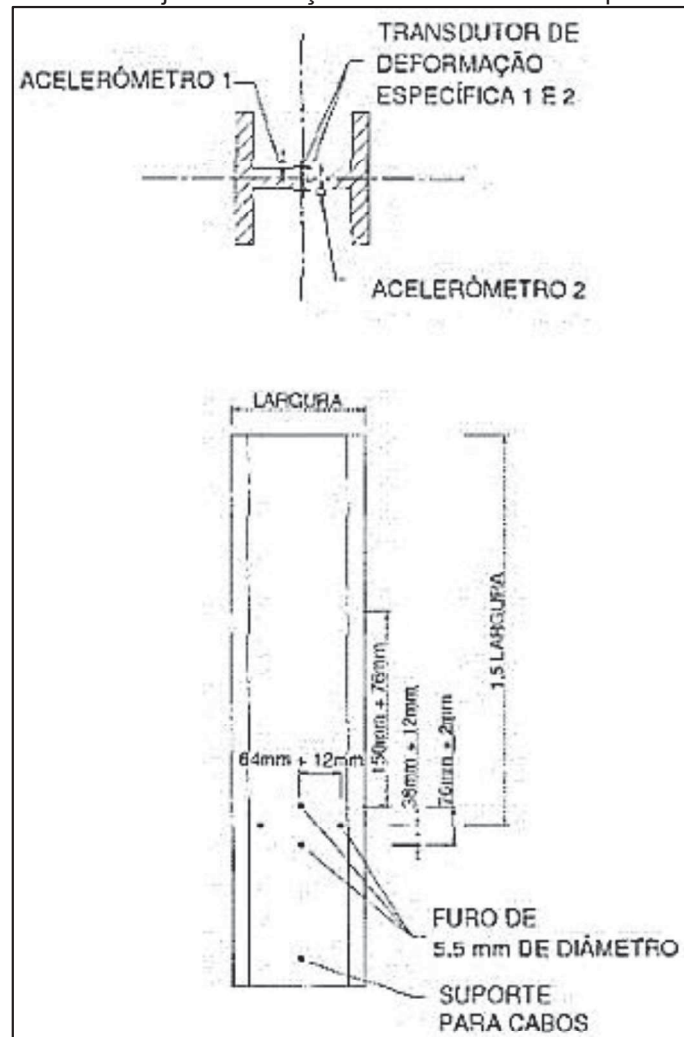
Martelo: deve apresentar massa e energia potencial, ou massa ou energia para provocar força de impacto suficiente para deslocar a estaca

permanentemente em sua ponta e mobilizar as camadas atravessadas pelo fuste;

Transdutores: podem ser de velocidade ou de deslocamento, desde que produzam resultados com precisão equivalente. Devem ser instalados na seção transversal da estaca, aos pares e em posições opostas. A Figura 2-33, apresenta a maneira adequada de instalação dos transdutores em estacas de perfil metálico.

Equipamentos de leitura: Que devem ser calibrados e os desvios de leituras não devem exceder 2% dos valores da calibração.

Figura 2-34 - Arranjo da instalação dos transdutores em perfil metálico



FONTE: NBR 13.208 (ABNT, 2007).

A resposta da estaca ao impacto do martelo é medida através dos transdutores em uma seção da estaca acima da cota do terreno. Dois tipos de



transdutores são utilizados, os de deformação específica e os de aceleração (acelerômetros), além de um equipamento para leitura e registro das medições realizadas, o *Pile Driving Analyser* (PDA).

Para determinação da força, é adotado o módulo de elasticidade dinâmico do material da estaca, dado pela Equação 2-20 (NBR 13.208:2007).

$$E = \rho c^2 \quad 2-20$$

Onde:

$\rho$  = massa específica do material

$c$  = velocidade de onda no material

A Tabela 2-8 apresenta valores característicos desses parâmetros para os materiais comumente empregados na fabricação de estacas.

Tabela 2-8 - Características físicas de concreto e aço utilizados em estacas

Material	E (GPa)	$\rho$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	c (m/s)
Concreto	23	2.500	3.000
Aço	210	8.000	5.120

FONTE: CINTRA (2013).

Por meio da teoria da propagação de onda, o processador do equipamento PDA calcula os resultados de:

- Força máxima no impacto (FMX);
- Energia máxima no golpe (EMX);
- Resistência estática mobilizada (RMX);
- Deslocamento máximo da estaca durante o impacto (DMX);
- Integridade da estaca;
- Tensões máximas na estaca;
- Eficiência do equipamento da cravação.

A equação da onda é uma equação diferencial de derivadas parciais de segunda ordem envolvendo as variáveis: posição de seção transversal ao longo da estaca ( $x$ ) na qual se quer determinar o deslocamento  $u(x,t)$  em um instante de tempo ( $t$ ) qualquer do impacto de um martelo de peso  $W$  caindo de uma altura  $H$ . A equação 2-21, representa a equação da onda.

$$c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad 2-21$$

Essa equação (2-17) é utilizada tanto para avaliar a capacidade de carga de estacas por meio de ensaio de PDA, bem como avaliar a cravabilidade das estacas através de *softwares* específicos, como o GRLWEAP.

Na teoria da propagação unidimensional da onda, para a interpretação da resposta ao carregamento aplicado no sistema estaca-solo, considera-se inicialmente que o impacto do martelo causa uma onda de tensão descendente na estaca. Qualquer que seja a mudança na seção da estaca ou o atrito lateral provoca reflexões ascendentes das ondas de tensão, que são mensuradas por meio de instrumentação que realizam medidas de força e velocidade no topo da estaca. (CINTRA et al., 2013)

### 2.7.1 Interpretação dos resultados

Pode-se interpretar os resultados de provas de carga dinâmica por intermédio de dois métodos distintos, o CASE, desenvolvido pelo *Case Institute of Technology*, e o CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*). A NBR 13.208, de 2007, orienta para que os dados obtidos e processados pelo método CASE devem ser confirmados e calibrados por análise numérica do tipo CAPWAP ou por outra prova de carga estática.

Pelo método CASE, a resistência total é dada pela equação 2-22, onde se admite que a penetração é composta por uma parcela estática ( $R_u$ ), conforme a equação 2-23, e um parcela dinâmica ( $R_d$ ), sendo a parcela dinâmica proporcional a velocidade na ponta da estaca ( $V_p$ ).

$$R_t = R_p + \sum R_L = \frac{1}{2} [F(t_1) + F(t_2)] + \frac{1}{2} Z \cdot [v(t_1) - v(t_2)] \quad 2-22$$

Onde:

$R_t$  = Resistência à penetração da estaca;

$R_p$  = Resistência de ponta;

$R_L$  = Resistência lateral ao longo da estaca;

$t_1$  = Tempo de maior intensidade do golpe;

$t_2 = t_1 + 2L/c$ ;

$F(t_1)$  = Força no tempo  $t_1$ ;

$v(t_1)$  = Velocidade no tempo  $t_1$ ;

$F(t_2)$  = Força no tempo  $t_2$ ;

$v(t_2)$  = Velocidade no tempo  $t_2$ .

$$R_u = R_t - R_d \quad 2-23$$

Sendo,

$$R_d = Jc \cdot Z \cdot Vp$$

Onde:

$Vp$  = Velocidade de ponta da estaca =  $(2F \downarrow - Rp)/Z$ ;

$Z$  = Impedância =  $EA/c$

$Jc$  = *damping* do CASE (amortecimento). Depende do tipo do solo na ponta da estaca, uma proposição é a de Rausch, Goble e Likins (1985 *apud* CINTRA, 2013), como demonstrado na Tabela 2-9.

Tabela 2-9 - Valores de fator de amortecimento ( $Jc$ )

Solo	Varição de $Jc$	Valor sugerido de $Jc$
Areia	0,05-0,20	0,05
Areia siltosa ou silte arenoso	0,15-0,30	0,15
Silte	0,20-0,45	0,30
Argila siltosa ou silte argiloso	0,40-0,70	0,55
Argila	0,60-1,10	1,10

FONTE: RAUSCH, GOBLE e LIKINS (1985 *apud* CINTRA, 2013)

Segundo a NBR 13.208 (ANBT, 2007), o método CASE é capaz de fornecer as seguintes informações principais:

- a) Carga mobilizada na interface solo-estaca;
- b) Integridade estrutural;
- c) Tensões dinâmicas máximas compressivas e de tração;
- d) Deslocamento máximo; e
- e) Máxima energia transferida.

Já no método CAPWAP, modelo do sistema estaca solo é estabelecido com base na proposição de Smith (1960), levando-se em conta o perfil de solo local da estaca a ser ensaiada. Obtidos os resultados do ensaio, o modelo previamente montado é ajustado para que as coincidir com a medição do ensaio realizado *in-loco*, sendo assumido como representativo da realidade a curva ajustada. Este ajuste iterativo para definição da resistência estática ( $R_u$ ) é realizado por meio de programa de computador chamado CAPWAP.

A NBR 13.208 orienta que para cada estaca ensaiada seja realizada uma análise do tipo CAPWAP<sup>®</sup>. Tal análise é recomendada quando desenvolvido ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente ao se desejar avaliação das cargas máximas mobilizadas por atrito lateral e ponta.

Segundo Gonçalves et al (1996) para o método de previsão de carga de ruptura que mais recomendável para comparação entre provas de carga de carga estática e dinâmica é o de Davisson, pois é um método de previsão de carga de ruptura desenvolvido pelos mesmos pesquisadores que desenvolveram o CAPWAP.

## 2.8 GRLWEAP

O programa GRLWEAP – 2005 resolve a equação unidimensional da onda, usando um modelo discreto de massas concentradas. O GRLWEAP<sup>™</sup> calcula os esforços dinâmicos resultantes da cravação, e relaciona a nega com a capacidade de carga da estaca. Para sua concepção, em 1988, o programa GRLWEAP<sup>™</sup> foi baseado no programa WEAP<sup>™</sup> de 1976, segundo informações em PDI (2005).

Segundo *Us Army Corps of Engineers* (1997); (2004), o uso de PDA auxilia a calibração da análise da equação de onda para determinação da capacidade de carga que pode ser feita com auxílio do software GRLWEAP.

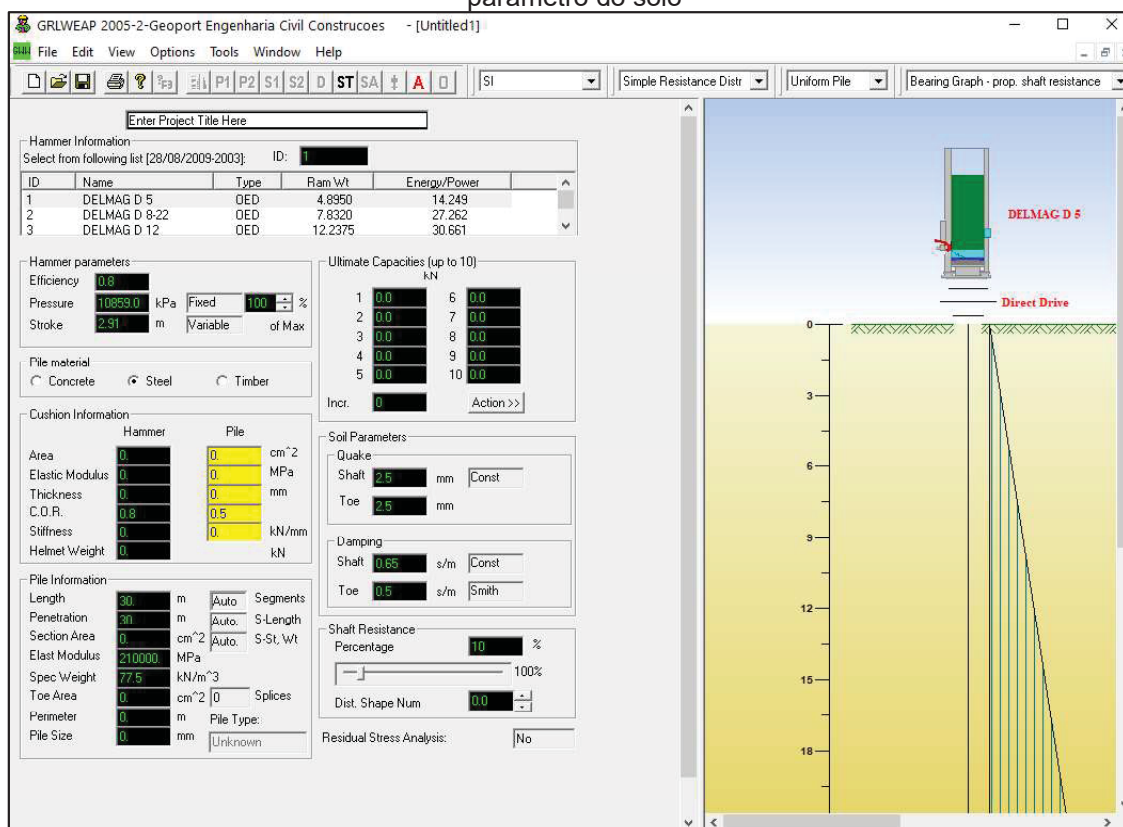
Harpoth (2017) afirma que o GRLWEAP é o software mais prático e comercialmente utilizado para análise de cravação de estacas demonstrando uma acurácia adequada, que tem sido alcançada devido às calibrações realizadas. A precisão do programa é dependente da correta aplicação do modelo de resistência estática a cravação ou *static resistance to driving* (SRD),

que é baseada nas experiências conhecidas e já calculadas, não sendo um problema para casos com extensa bibliografia a respeito.

Utilizando-se do conceito de equação de onda e do método numérico desenvolvido por Smith (1960), o software realiza uma previsão de nega, em que o usuário é responsável por inserir as características do solo ou então permitir que o software realize correlações com base em valores do  $N_{spt}$ , inseridos pelo usuário.

Em sua tela principal, apresentada na Figura 2-34, o programa permite a seleção do modelo de martelo em uma variada lista. Já estando no catálogo informações como frequência e carga aplicada que são automaticamente preenchidos, porém podendo ser modificado pelo usuário.

Figura 2-35 - Tela inicial do GRLWEAP 2005 para seleção de martelo, estaca e definição de parâmetro do solo



FONTE: PDI, 2005.

De maneira semelhante, informações podem ser preenchidas acessando uma lista com diversos tipos de estacas comerciais de concreto, aço ou madeira.

Preenchidas essas informações, o usuário deve definir cargas últimas que para as quais o programa buscará as informações de nega para o caso de martelos de impacto ou de tempo de penetração, para o caso de martelos vibratórios, caso esteja buscando essas informações, caso a análise seja para a cravabilidade o software solicita a entrada dos valores de *Gain/Loss* a serem avaliados, assunto que será tratado mais adiante.

Com relação aos dados de entrada do solo, o software possui dois modos de definição de parâmetros de solo o “ST” (*Soil Type Based Method*) e o “SA” (*SPT N-value Based Method*). O primeiro é um método simplificado que utiliza informações de Bowles e Fellenius descrito por Hannigan *et al.* (1998).

Pelo método “ST”, a resistência de fuste por metro de estaca é calculada utilizando a equação 2-24 e a resistência na ponta da estaca calculada pela equação 2-25

. Para solos não coesivos são consideradas a tensão efetiva e para solos coesivos tensão total.

$$q_s = \beta \cdot p_0 \text{ [kpa]} \quad 2-24$$

Onde:

$q_s$  = Resistência no fuste

$\beta$  = Coeficiente de Bjerrum-Burland, relacionado ao ângulo de atrito entre solo e estaca;

$p_0$  = Pré-carregamento em tensão efetiva

$$q_t = N_t \cdot P_t \text{ [kPa]} \quad 2-25$$

Onde:

$N_t$  = Coeficiente de capacidade no pé da estaca

$P_t$  = Tensão efetiva de pré-carregamento no pé da estaca

Estes coeficientes descritos estão apresentados na Tabela 2-10, para solos não coesivos e na Tabela 2-11 para solos coesivos.



Tabela 2-10 - Parâmetros de análise para solos não coesivos

Solo	Nspt	Ângulo de atrito (graus)	Peso unitário (kN/m <sup>3</sup> )	$\beta$	Nt	Limites (kPa)	
						qs	Qt
Muito fofo	2	25-30	13,5	0,203	12,1	24	2.400
Fofo	7	27-32	16,0	0,242	18,1	48	4.800
Médio	20	30-35	18,5	0,313	33,2	72	7.200
CoMPacto	40	35-40	19,5	0,483	86,0	96	9.600
Muito coMPacto	50+	38-43	22,0	0,627	147,0	192	19.000

FONTE: Manual do GRLWEAP, 2005

Tabela 2-11 - Parâmetros de análise para solos coesivos

Solo	Nspt	qu (kPa)	Peso unitário (kN/m <sup>3</sup> )	qs (kPa)	qt (kPa)
Muito mole	1	12	17,5	3,5	54
mole	3	36	17,5	10,5	162
Médio	6	72	18,5	19,0	324
Rija	12	144	20,5	38,5	648
Muito rija	24	288	20,5	63,5	1.296
Dura	32+	384+	19-22	77,0	1.728

FONTE: Manual do GRLWEAP, 2005

Para o método “SA” recomendado quando se possui os valores de SPT, o software define a resistência oferecida pelo fuste e pela ponta com base na Tabela 2-12. Ressalta-se que, de acordo com o próprio manual do software, os dados de entrada do SPT devem ser ajustados para o Nspt.60.

Primeiramente, o software encontra o peso específico do solo com base em Bowles (1977 apud PDI, 2005) e a partir daí define a tensão efetiva vertical  $\sigma'_v$ , considerando também carregamentos adicionais e a espessura da camada.

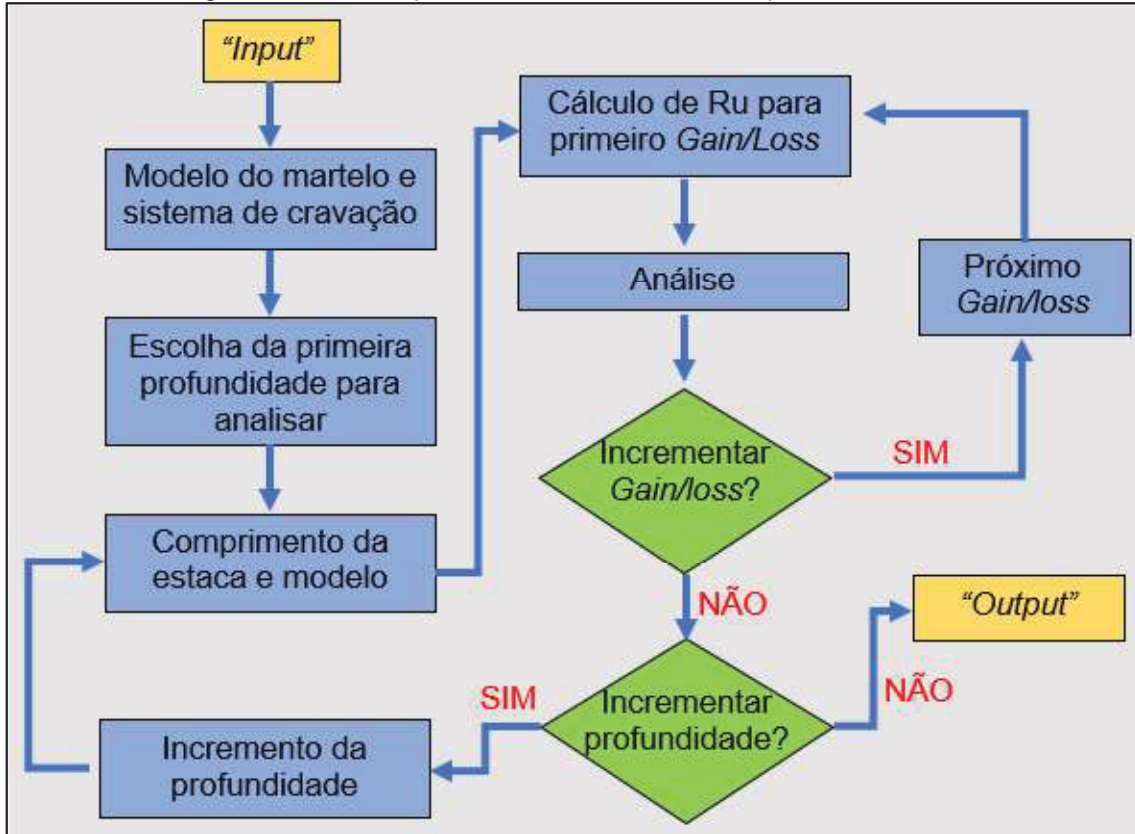
Tabela 2-12 - Considerações de parâmetros do solo realizadas pelo GRLWEAP

Parâmetro	Areias	Argilas	Siltos
Dr = Densidade relativa.	Kulhawy (1989 e 1991)	-	-
$\phi'$ = ângulo de atrito	Schmertmann (1975 e 1978)	$\phi' = 17 + 0,5N \leq 43^\circ$	Se arenoso = areia Se argiloso = argila
$\delta$ = ângulo de atrito solo/estrutura	$\delta = \phi'$	$\delta = \phi'$	-
$\beta$ = Coeficiente de Bjerrum-Borland (Fellenius-1996)	-	-	$\beta = (\phi' - 28) \cdot \left(\frac{0,26}{6}\right) + 0,27$ $0,27 \leq \beta \leq 0,5$
Nt = Coeficiente de capacidade do pé da estaca (Fellenius-1996)	-	-	$Nt = \left(\frac{\phi' - 28}{0,3}\right) + 20$ $20 \leq Nt \leq 40$
OCR	-	OCR = $18N/\sigma'_v$	
KNc = Coeficiente de pressão normalmente consolidada	-	$k_{nc} = 1 - \text{sen}\phi'$ Jaky (1944)	-
$k_0$ = Coeficiente de pressão de solo em repouso	Robertson e CaMPanella (1983) $\frac{(1 - \text{sen}\phi')}{(1 + \text{sen}\phi')} < k_0 < \frac{(1 + \text{sen}\phi')}{(1 - \text{sen}\phi')}$	$k_0 = k_{nc}(OCR)^{1/2}$ Com, $\frac{(1 - \text{sen}\phi')}{(1 + \text{sen}\phi')} \leq k_0 \leq \frac{(1 + \text{sen}\phi')}{(1 - \text{sen}\phi')}$	-
$q_s$ = Resistência do fuste	$q_s = k_0 \cdot \text{tan}\delta \cdot \sigma'_v$ $q_s < 250$ kPa	$q_s = k_0 \cdot \text{tan}\delta \cdot \sigma'_v$ $q_s \leq 75$ kPa	$q_s = \beta \cdot \sigma'_v$ $q_s < 250$ kPa (areia) $q_s \leq 75$ kPa (argila)
$q_{toe}$	$q_{toe} = 200.N$ [kPa] $q_{toe} \leq 12.000$ kPa	$q_{toe} = 54.N$ [kPa] $q_{toe} \leq 3.240$ kPa	$q_{toe} = Nt \cdot \sigma'_v$ $q_{toe} \leq 6.000$ kPa

FONTE: Adaptado de GRLWEAP (2005)

O fluxo para avaliação da cravabilidade por meio do GRLWEAP segue o fluxograma apresentado na Figura 2-35, sendo inserido dados referentes ao martelo, estaca, profundidade, *gain/loss*, configuração de solo e nível d'água, além de eficiência do martelo.

Figura 2-36 - Fluxo para análise de cravabilidade pelo GRLWEAP



FONTE: Adaptado de PDI (2010)

Segundo Falcão (2016), o fator de ganho ou perda (*Gain/loss*) é um dado de entrada no GRLWEAP, relacionado ao fator de cicatrização do solo, ou “Setup.” Pode-se interpretar o fator *Gain/loss* como o inverso do *setup*.

$$SRD = LTSR \times \frac{1}{f_s} \quad 2-26$$

SRD = *Static Resistance to Drive*

LTSR = *Long Term Static Resistance*

$f_s$  = Fator de configuração (*setup*) ou cicatrização

Tabela 2-13 - Fator de "Setup" em função de seu tipo

Tipo de solo	Fator de "Setup"
Argila	3
Silte argiloso	2,5
Silte arenoso	1,5
Areia	1,2
Areia fina	1
Areia grossa	1

FONTE: FALCÃO (2016)

Passini et al (2017) estudou o ganho de resistência, medido para estacas de concreto de seção quadrada de 26x26 cm pré-tensionados com comprimento total de 10 m. Neste estudo foi observado que o ganho de resistência lateral devido a cicatrização do solo foi de cerca de 95%, sem grandes ganhos para a resistência de ponta, ao todo, o ganho de resistência da estaca foi de cerca de 53%, com o ganho sendo mais significativo nos primeiros dias após a cravação. Utilizando a equação 2-27 proposta de Skov e Danver (1988).

$$\left( \frac{R_t}{R_{EDO}} \right) = A \log_{10} \left( \frac{t}{t_{EDO}} \right) + 1 \quad 2-27$$

Onde:

$R_t$  = Resistência estimada da estaca

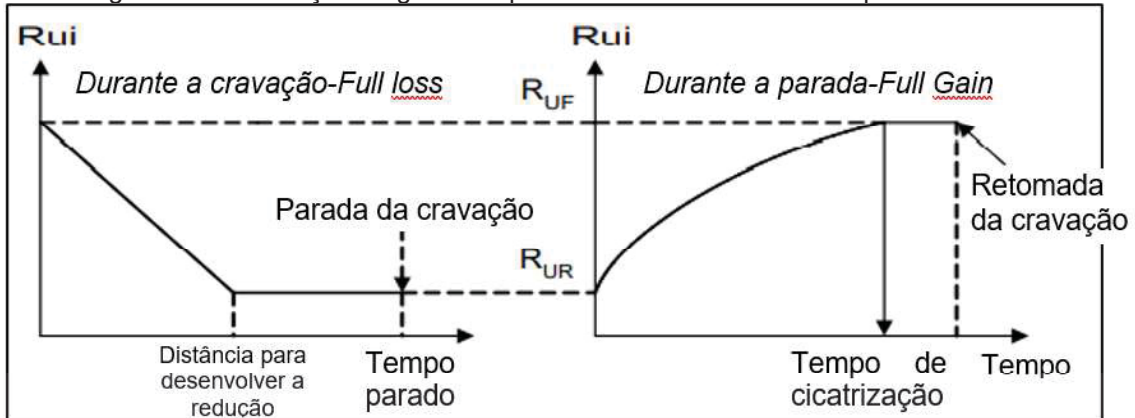
$R_{edo}$  = Resistência ao fim da cravação (*End of Driving*)

A = Constante a ser definida

Os valores encontrados por Passini *et al* (2017) para  $t_{edo} = 0,1$  dia para o parâmetro A foi de 0,217 para resistência lateral e 0,131 para resistência total da estaca.

Na Figura 2-36, retirada do manual do GRLWEAP é ilustrado como o fator de *gain/loss* é interpretado e utilizado dentro do software para análise da cravabilidade.

Figura 2-37 - Variação do gain/loss para análise de cravabilidade pelo GRLWEAP



FONTE: PDI (2010)

De acordo com o manual do GRLWEAP para avaliar o instante da cravação o *gain/loss* deve ser inserido no software como sendo o inverso do *setup*, já para análise de uma recravação o mais adequado é utilizar o valor 1 para *gain/loss*. Segundo Falcão (2016), podemos entender o fator G/L da seguinte forma:0

$G/L = 1 \rightarrow$  Não há alteração de força durante a cravação, então, nenhuma resistência ganha ou perdida será analisada pelo software. Significa que a perda de atrito, decorrente do processo de cravação, não será analisada. Portanto, os resultados fornecidos pelo software serão provenientes de LTSR Resistência estática de longo prazo.

$G/L < 1 \rightarrow$  Faz com que o software considere que existe uma perda de resistência do solo durante o processo de cravação e, após a cravação, ocorrerá um ganho de resistência devido ao “*setup*” do solo.

$G/L > 1 \rightarrow$  induz ao software a consideração de que após a cravação o solo sofrerá um processo de relaxação, ou seja, a resistência oferecida pelo solo durante a cravação será maior do que a resistência final da estaca cravada.

Este efeito é significativo, sendo adequado aguardar 15 dias após a cravação das estacas para ser realizado o ensaio PDA, devido ao efeito de cicatrização do solo (*setup*).

A Análise através do GRLWEAP para martelos vibratórios é limitada e difícil, pois é um método que depende fortemente do impacto que a vibração da estaca tem nas tensões efetivas do solo. Assim em solos fortemente coesos

podem apresentar nenhuma perda de resistência durante a cravação por vibração. (HOLEYMAN, 2002; GRLWEAP, 2010).

*Quake*, é o deslocamento necessário para mobilizar a resistência do solo a agir como uma “mola”. Portanto, a resistência mobilizada dentro do deslocamento do *quake* é a resistência estática. O *damping* é a sensibilidade à velocidade de impacto em comparação a uma rocha resistente, sendo os valores de *damping* geralmente são elevados para argilas rijas. Normalmente os valores de *quake* e *damping* assumidos em problemas de engenharia são os apresentados na e Tabela 2-14. (JIACHEN, 2018)

Na Tabela 2-14 os valores recomendados para *quake* e *damping* por Jiachen (2018), para análise no software GRLWEAP estão apresentados e condizem com os valores sugeridos pelo manual do *software* supramencionado.

Tabela 2-14 - Valores recomendados de quake e damping

<b>Solo</b>	<b><i>quake</i> de fuste (mm)</b>	<b><i>quake</i> de ponta (mm)</b>	<b><i>damping</i> de fuste (s/m)</b>	<b><i>damping</i> de ponta (s/m)</b>
<b>Coesivo</b>	2,0 – 3,5	Diâmetro da estaca/60	0,7 – 1,3	0,5 – 0,6
<b>Não coesivos</b>	1,5 – 3,0	Diâmetro da estaca/120	0,6 - 0,9	0,3 – 0,5
<b>Base rochosa</b>	1,0 – 2,0	2,5	0,5 – 0,8	0,1 – 0,3

FONTE: JIACHEN, 2018

Apesar de ser considerado um padrão de *quake* em torno de 2,5 mm, Aoki (1991 apud CINTRA, 2013) descreve que para solos resilientes (comportamento análogo ao de “borracha”) o valor de *quake* pode apresentar valores da ordem de até 30 mm.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste tópico será apresentado o estudo de caso objeto deste trabalho, bem como os materiais empregados e os métodos adotados. Caracterização do solo conforme sondagem SPT realizada, estacas utilizadas, martelos empregados e resultados do ensaio PDA feito sobre estacas portantes da OAE, bem como o emprego destes dados na modelagem no GRLWEAP, inicialmente com objetivo de simular a prova de carga dinâmica com intuito de validar o modelo para então ser simulado a cravação por vibração.

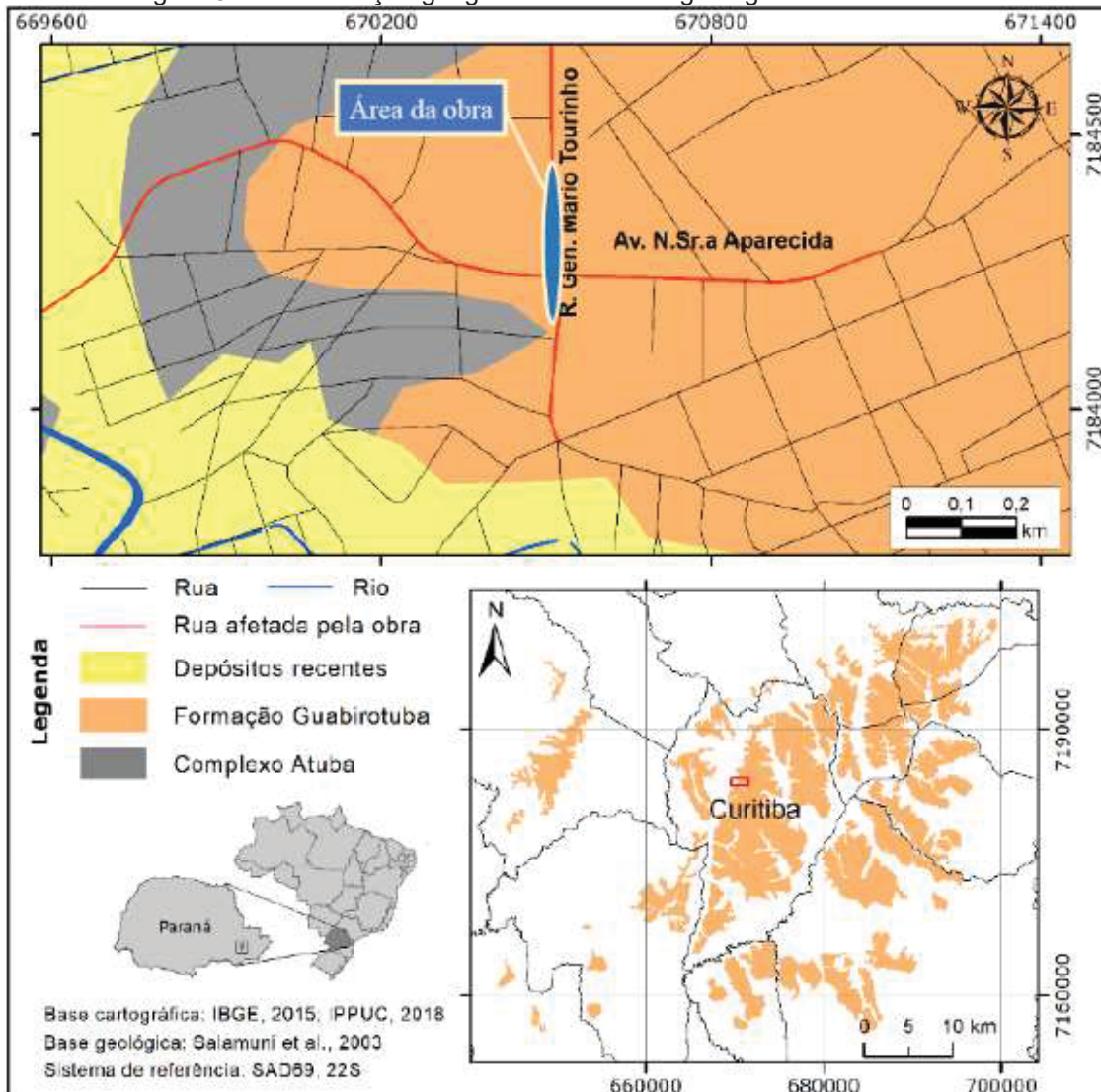
#### **3.1 Estudo de caso**

Na porção noroeste da cidade de Curitiba/PR, no cruzamento entre a rua General Mário Tourinho e a Avenida Nossa Senhora Aparecida, no bairro Seminário (Figura 3-1), foram realizadas obras de implantação de uma trincheira. Nesta obra, a contenção foi feita com estacas prancha metálicas, cravadas por martelo vibratório na escavação realizada na Rua Mário Tourinho, sob a Avenida Nossa Senhora Aparecida.

Em relação ao substrato, a região é caracterizada pela ocorrência dos sedimentos da Formação Guabirotuba – Bacia de Curitiba, além dos depósitos recentes do rio Barigui e porções de exposição de rochas do embasamento da Bacia nas proximidades.



Figura 3-1 - Localização geográfica e contexto geológico do local da obra



FONTE: O autor (2019).

Ao todo a cortina de contenção da obra possui extensão de 280m, aproximadamente, em cada um dos lados da Rua Mário Tourinho, onde foi projetada a trincheira, somando cerca de 560 m de cravação de estacas.

Este estudo de caso aborda apenas o trecho composto por 112 estacas do tipo AZ19-700 que, além da função de contenção, cumprem também o papel de fundação para OAE que sustenta o trecho da Avenida Nossa Senhora Aparecida sobre a escavação realizada na rua Mário Tourinho, ou seja, as estacas quem cumprem também função portante. Neste trecho foi percebida, em campo, uma maior dificuldade de cravação das estacas prancha por mais de um tipo de martelo empregados na obra, ambos vibratórios.

## 3.2 Caracterização do solo

Para investigação de solo, foram realizadas sondagens SPT por empresas diferentes, antes e durante a execução da obra, e a partir de tais informações foram feitas correlações semiempíricas para dimensionamento da cortina de contenção.

### 3.2.1 Sondagens *Standard Penetration Test* (SPT)

Ao todo foram realizadas treze sondagens SPT (*Standard Penetration Test*), sendo sete antes do início da obra, identificadas por meio de numeração, para subsidiar a elaboração do projeto geotécnico, e outras seis, identificadas por letras, já durante a execução da obra para confirmação das primeiras sondagens (Figura 3-2), em virtude de dificuldades executivas na cravação das estacas prancha. A Figura 3-3, apresenta a locação dos ensaios SPT realizados (ANEXO A).

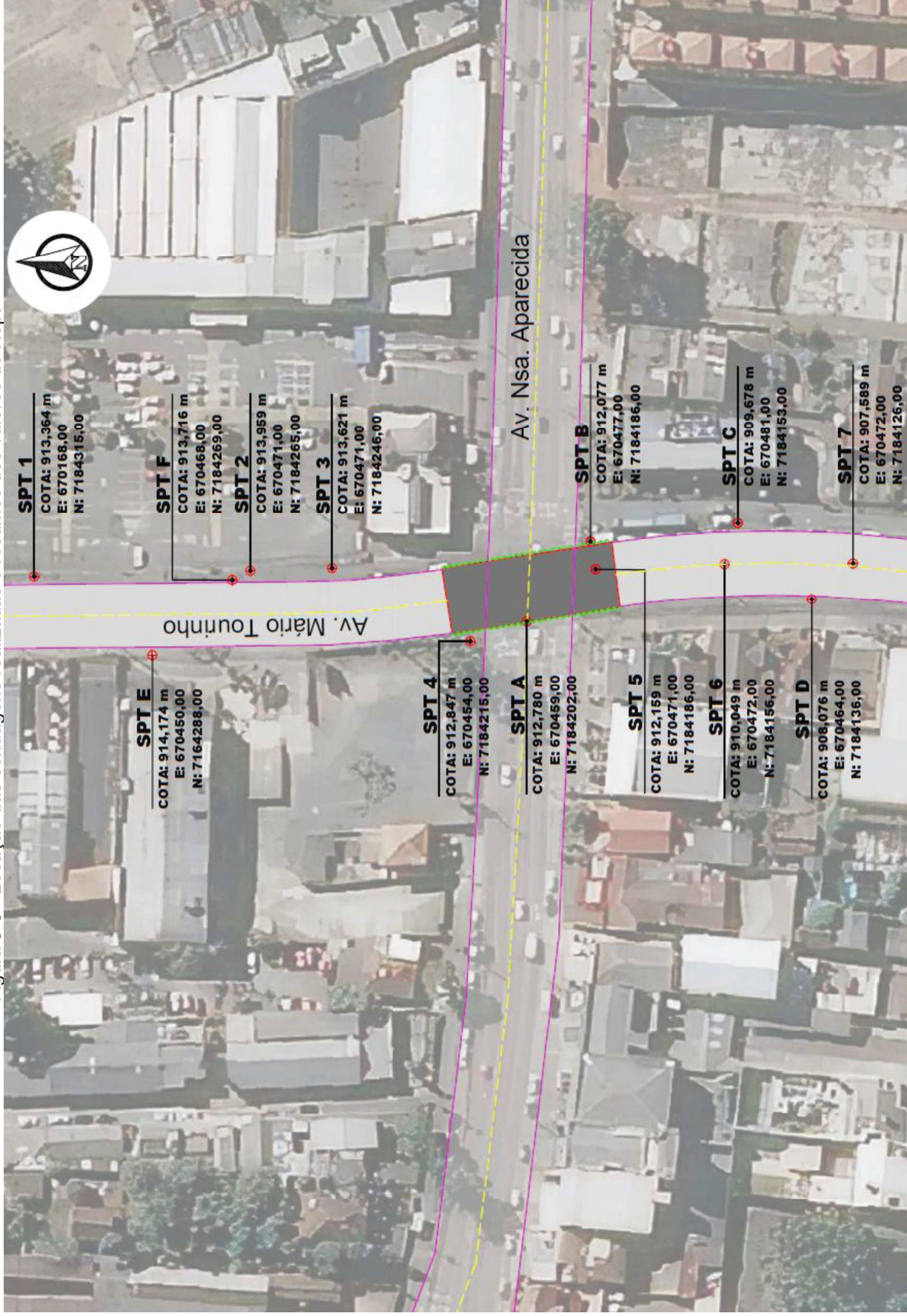
Figura 3-2 - Execução de sondagem SPT durante as obras



FONTE: O autor (2019).



Figura 3-3 - Localização das sondagens realizadas e resumos dos valores de Nspt



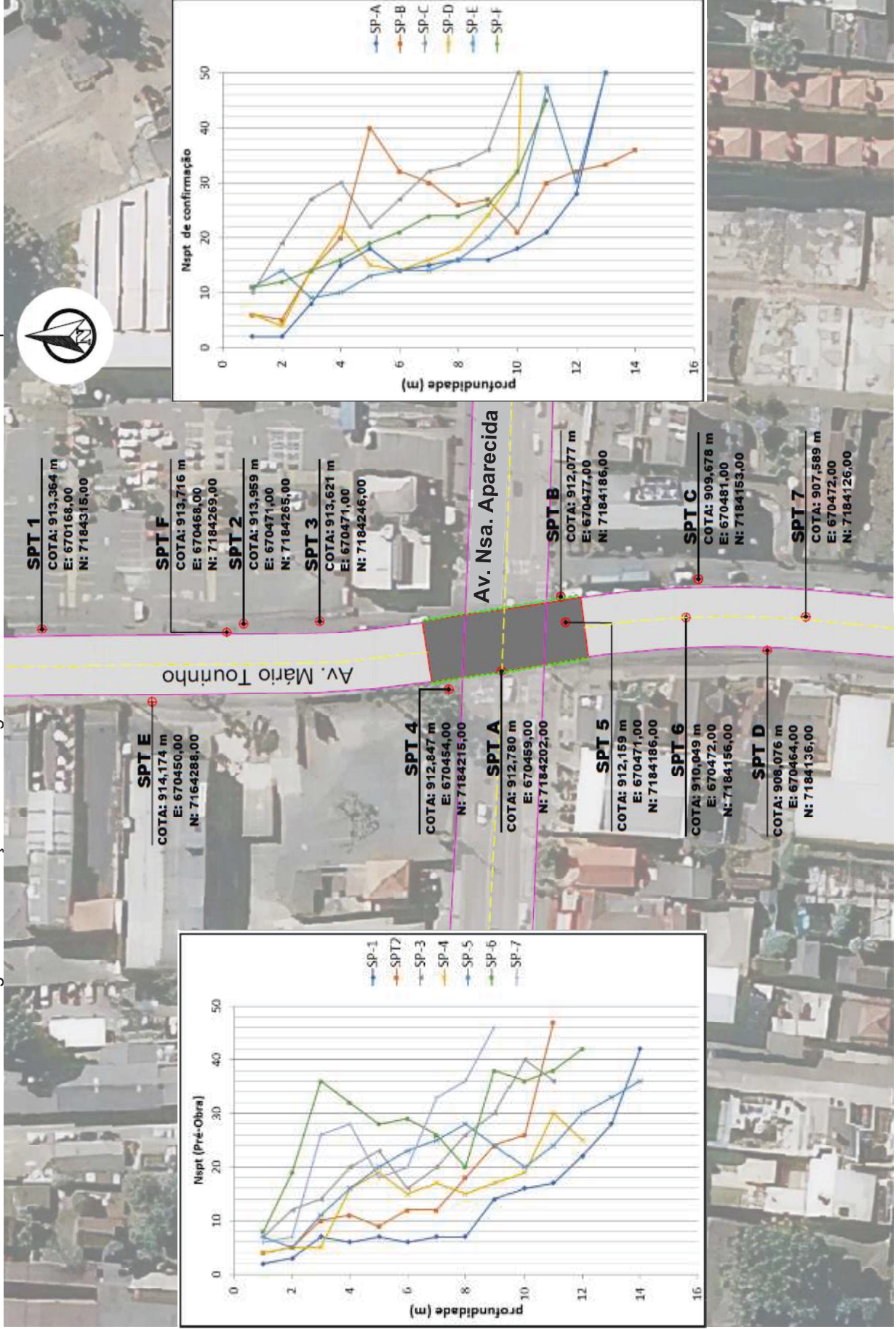
FONTE: O Autor (2021)

Na Figura 3-4 é a apresentado de forma simplificada a localização a variação do SPT de acordo com a profundidade para cada um dos ensaios realizados.

O trecho de cravação de estacas que apresentou maior dificuldade foi o compreendido entre as sondagens de nº 4 e letra "B". Na Figura 3-5 está ilustrado o perfil estratigráfico de acordo com as sondagens SPT, a profundidade de cravação alcançada pelas estacas com os martelos vibratórios empregados, demonstrando que no trecho da OAE da trincheira, muitas das estacas AZ19-700 não atingiram a profundidade de 13m prevista para sua cravação. Identificadas pelo contorno em vermelho, na Figura 3-6 e na Figura 3-7 estão as estacas ensaiadas no PDA que será tratado mais adiante.



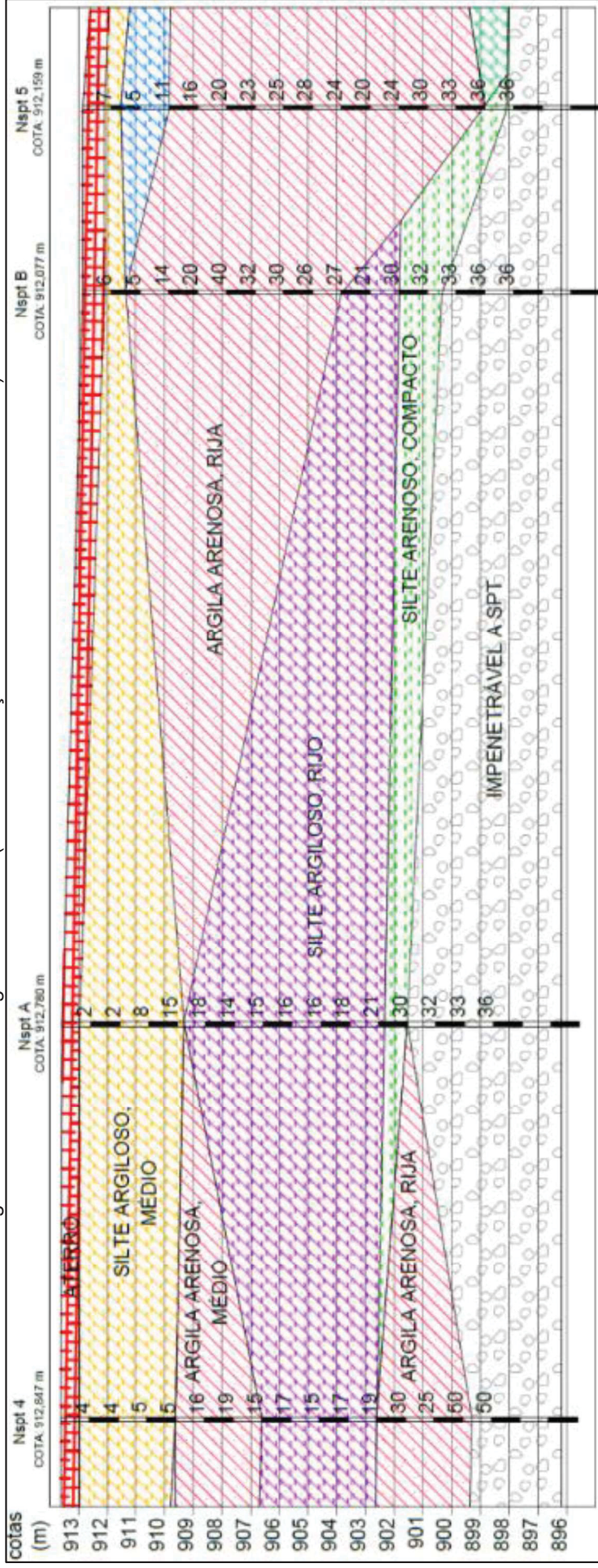
Figura 3-4 - Localização das sondagens realizadas e resumos dos valores de Nspt



FONTE: O autor (2021)

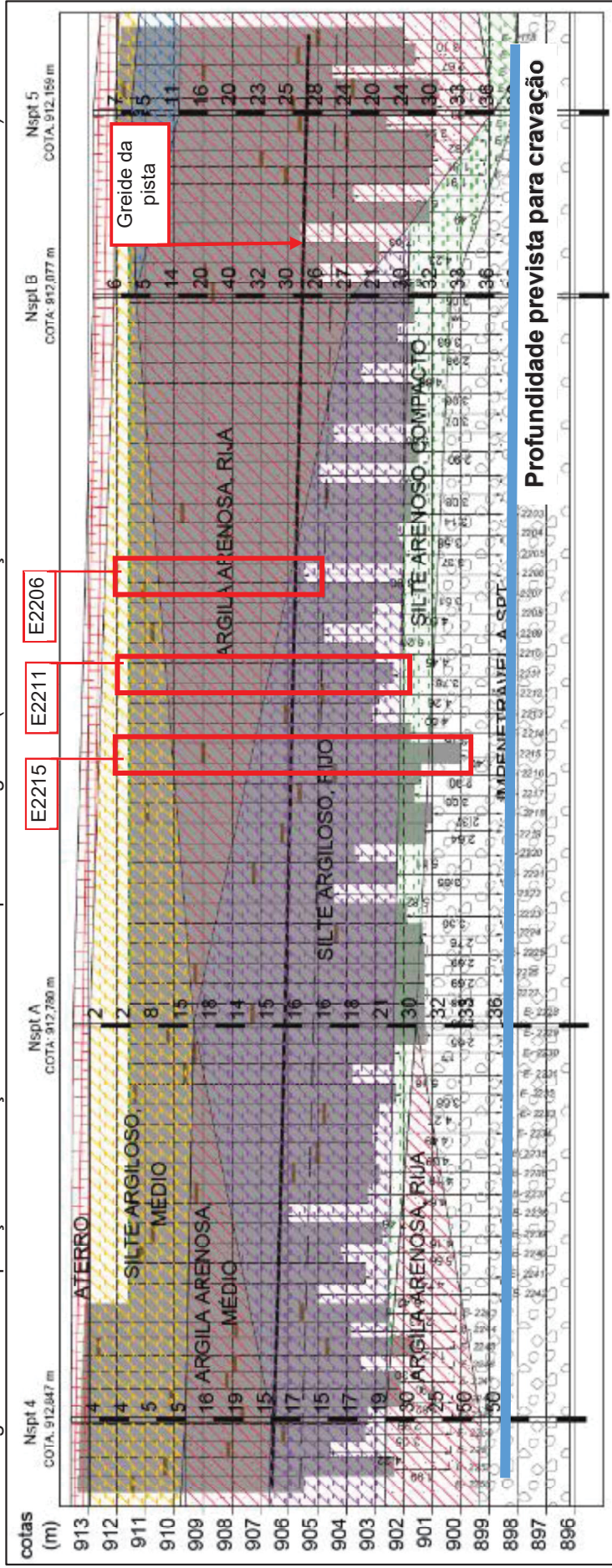


Figura 3-5 - Perfil estratigráfico do solo (Local de cravação das estacas AZ-19 com 13 m)



FONTE: O autor (2019).

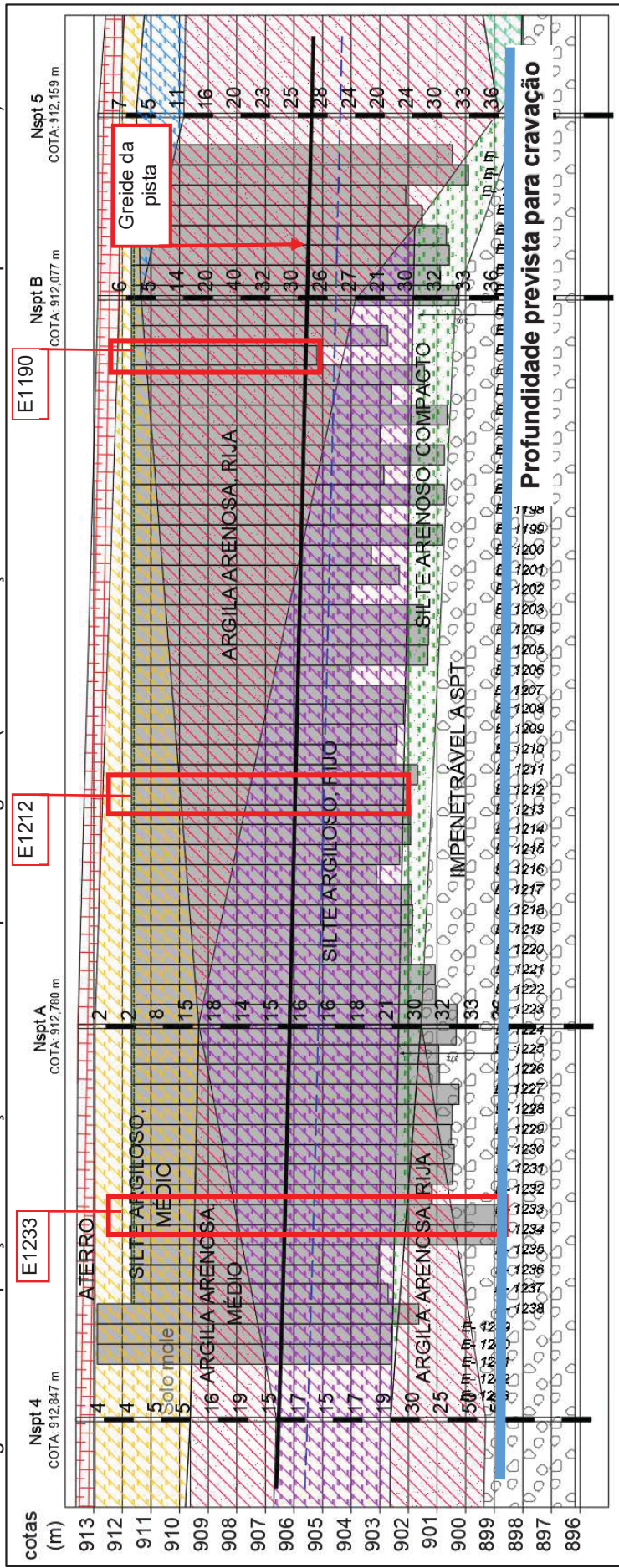
Figura 3-6 - Sobreposição da cravação das estacas no perfil estratigráfico (Local de cravação das estacas AZ-19 lado direito com 13m)



FONTE: O autor (2019)



Figura 3-7 - Sobreposição da cravação das estacas no perfil estratigráfico (Local de cravação das estacas AZ-19 lado esquerdo com 13m)



FONTE: O autor (2019)



Com a escavação para abertura da passagem da trincheira foi possível perceber o perfil de maneira visual, como demonstrado na Figura 3-8 e Figura 3-9.

Figura 3-8 - Corte do solo para abertura da trincheira



FONTE: O autor (2021).

Figura 3-9 - Corte do solo para abertura da trincheira



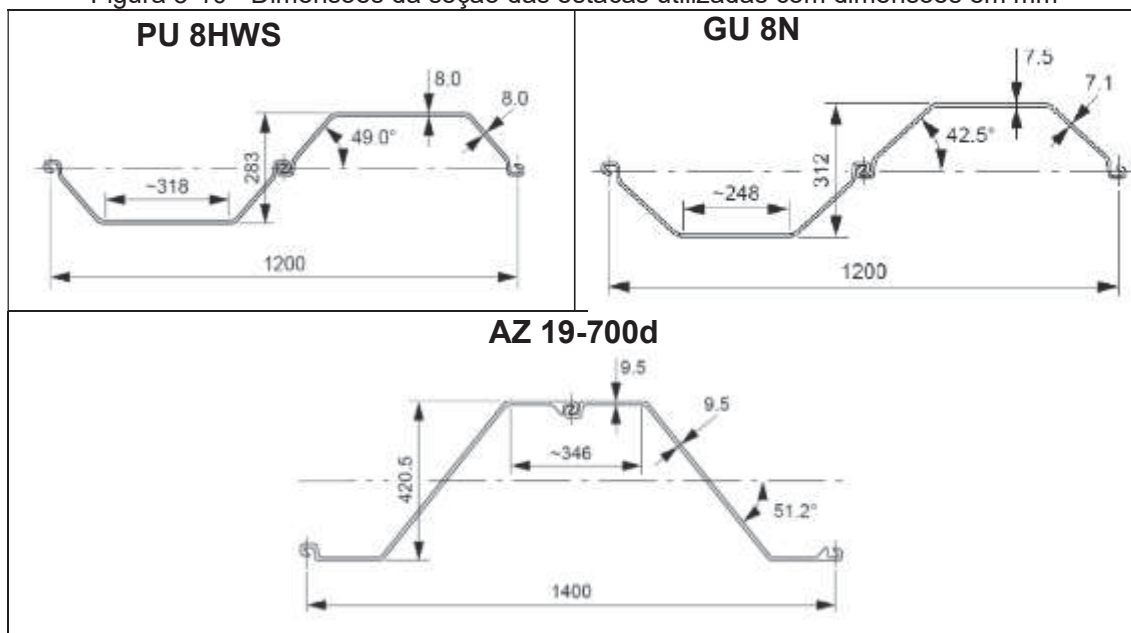
FONTE: O autor (2021).

### 3.3 Estacas utilizadas

Na Figura 3-17 estão representadas as seções das estacas-prancha utilizadas no dimensionamento da cortina de contenção. As estacas PU 8HWS possuem grau de aço S355GP, enquanto as estacas GU 8N e AZ19-700 possuem grau de aço S430GP.

A profundidade de cravação das estacas é variável, conforme o greide da trincheira, bem como dos esforços solicitantes. Assim as estacas PU-8HWS foram cravadas a profundidades que variam de 4 a 12 m, as GU-8N a profundidades que vão de 12 a 13 m e as AZ19-700 projetadas para cravação a 13m de profundidade, conforme Tabela 3-1.

Figura 3-10 - Dimensões da seção das estacas utilizadas com dimensões em mm



FONTE: ARCELORMITTAL (2016).

Tabela 3-1 - Modelos de estacas utilizada e comprimento cravado

Perfil	N. Estaca início	N. Estaca fim	Comprimento (m)	Peso kg/m	Qtd.	Peso Total Kg
LADO ESQUERDO						
PU8	E-1000	E-1017	4	52,8	18	3.801,6
PU8	E-1018	E-1038	5,9	52,8	20	6.230,4
PU8	E-1039	E-1102	8	52,8	65	27.456,0
PU8	E-1103	E-1127	9	52,8	25	11.880,0
PU8	E-1128	E-1143	12	52,8	16	10.137,6
GU8N	E-1144	E-1152	12	48,5	9	5.238,0
GU8N	E-1153	E-1182	13	48,5	30	18.915,0
AZ19	E-1183	E-1238	13	80	56	58.240,0
GU8N	E-1239	E-1288	13	48,5	50	31.525,0
GU8N	E-1289	E-1296	12	48,5	8	4.656,0

PU8	E-1297	E-1323	12	52,8	27	17.107,2
PU8	E-1324	E-1358	10	52,8	35	18.480,0
PU8	E-1359	E-1389	11	52,8	31	18.004,8
PU8	E-1390	E-1414	10	52,8	25	13.200,0
PU8	E-1415	E-1430	12	52,8	16	10.137,6
PU8	E-1431	E-1435	10	52,8	5	2.640,0
PU8	E-1436	E-1458	5,9	52,8	23	7.164,96
LADO DIREITO						
PU8	E-2000	E-2021	4	52,8	22	4.646,4
PU8	E-2022	E-2041	5,9	52,8	20	6.230,4
PU8	E-2042	E-2101	8	52,8	60	25.344
PU8	E-2102	E-2126	9	52,8	25	11.880,0
PU8	E-2127	E-2141	12	52,8	15	9.504,0
GU8N	E-2142	E-2151	12	48,5	10	5.820,0
GU8N	E-2152	E-2186	13	48,5	35	22.067,5
AZ19	E-2187	E-2242	13	80	56	58.240,0
GU8N	E-2243	E-2312	13	48,5	70	44.135,0
GU8N	E-2313	E-2322	12	48,5	10	5.820,0
PU8	E-2323	E-2337	12	52,8	15	9.504,0
PU8	E-2338	E-2357	10	52,8	20	10.560,0
PU8	E-2358	E-2393	11	52,8	36	20.908,8
PU8	E-2394	E-2423	10	52,8	30	15.840,0
PU8	E-2424	E-2438	12	52,8	15	9.504,0
PU8	E-2439	E-2448	10	52,8	10	5.280,0
PU8	E-2449	E-2458	5,9	52,8	10	3.115,2
TOTAL:					918	533.213,46

FONTE: RELATÓRIO DE PROJETO (2019), não publicado.

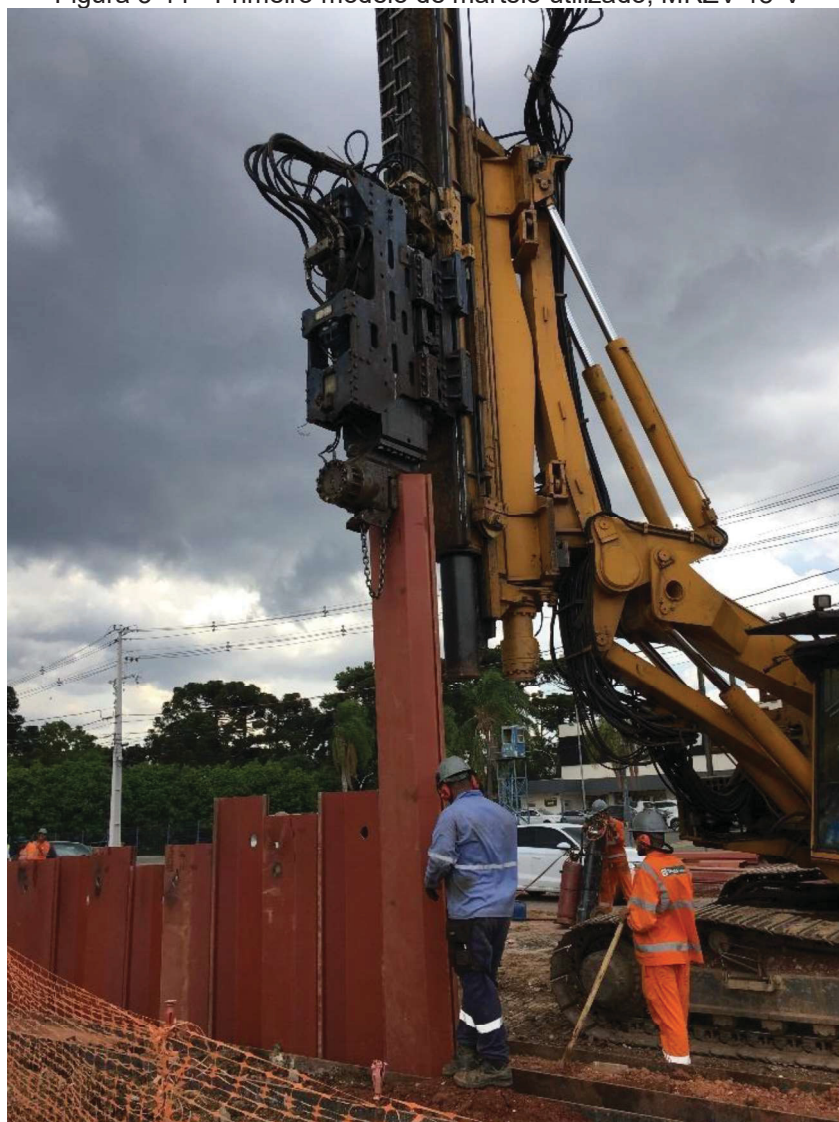
### 3.4 Equipamentos empregados

A obra teve início no dia primeiro do mês de outubro de 2019, onde foram realizadas tentativas de cravação de estacas isoladas do modelo AZ19-700, com martelo ABI modelo MRZV 18-V (Figura 3-18) com suas configurações técnicas apresentadas na Tabela 3-2. Este modelo de martelo foi utilizado para cravação de todas as estacas, obtendo êxito para cravação das estacas modelo PU-8HWS e GU-8N.

Para a cravação das estacas PU-8HWS o martelo ABI teve êxito para cravação até o comprimento total previsto em projeto para essas estacas, porém encontrou dificuldade para cravação das estacas GU-8N para profundidades maiores de 8 m.



Figura 3-11 - Primeiro modelo de martelo utilizado, MRZV 18-V



FONTE: O autor (2019).

Tabela 3-2 - Especificações técnicas do martelo MRZV 18V

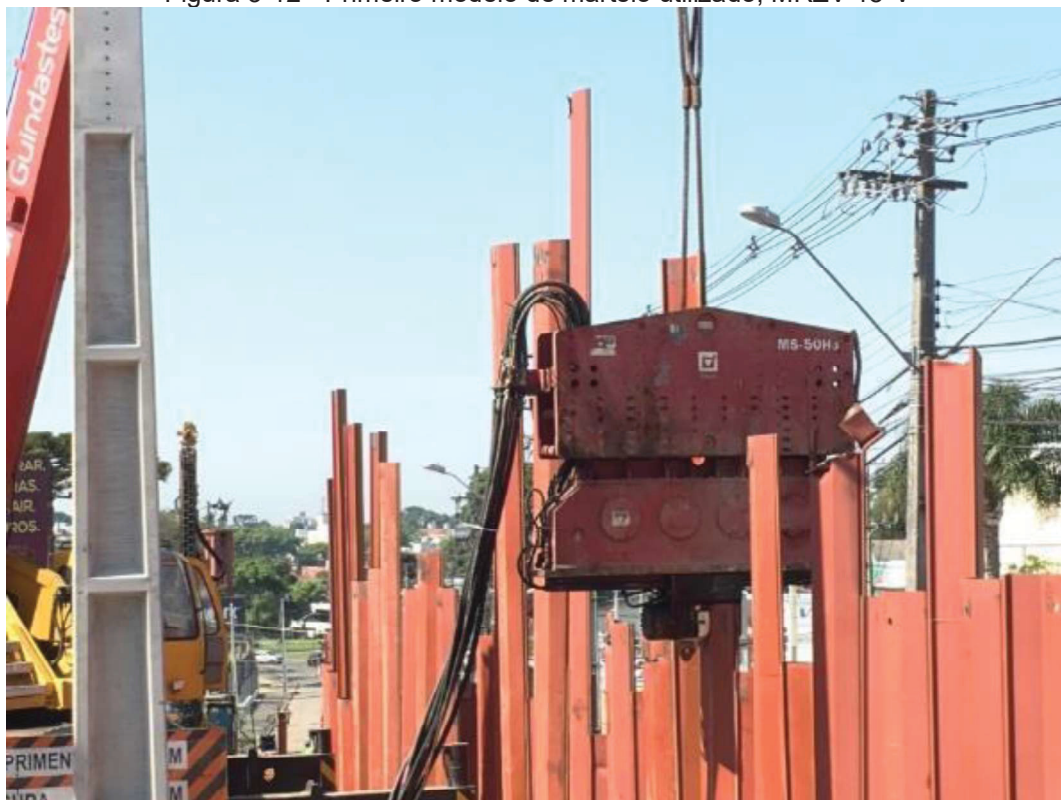
Modelo	ABI - MRZV 18V
Força Centrífuga	925 kN
Momento Excêntrico	18 kg.m
Velocidade	2.160 rpm
Frequência	36 Hz
Peso dinâmico (sem pinça)	2.730 kg
Peso total (sem pinça)	4120 kg
Amplitude	2*13   26 mm

FONTE: ABI (2020).

Percebida pela executora a dificuldade do martelo MRZV 18V para atingir a cota de cravação nas estacas com maior profundidade, foi testada a utilização de um outro martelo vibratório, modelo MS-50 H3, da fabricante Muller,

demonstrado na Figura 3-19, em que é utilizado para continuar a cravação das estacas que o MRZV 18V não conseguiu atingir a profundidade prevista em projeto. Contudo, o martelo MS-50 H3, também não obteve êxito em dar continuidade na cravação das estacas já cravadas com o agravante da necessidade de utilização de um guincho de grande porte para içá-lo, necessitando a interrupção do trânsito da região durante a sua operação.

Figura 3-12 - Primeiro modelo de martelo utilizado, MRZV 18-V



FONTE: O autor (2019).

Tabela 3-3 - Especificações técnicas do martelo MS-50 H3

Modelo	MS-50 H3
Força Centrífuga	1.430 kN
Momento Excêntrico	50 kg.m
Velocidade	1.615 rpm
Frequência	26,9 Hz
Força de cravação	500 kN
Peso dinâmico (sem pinça)	3.820 kg
Peso total (sem pinça)	8.050 kg
Amplitude	26,2 mm

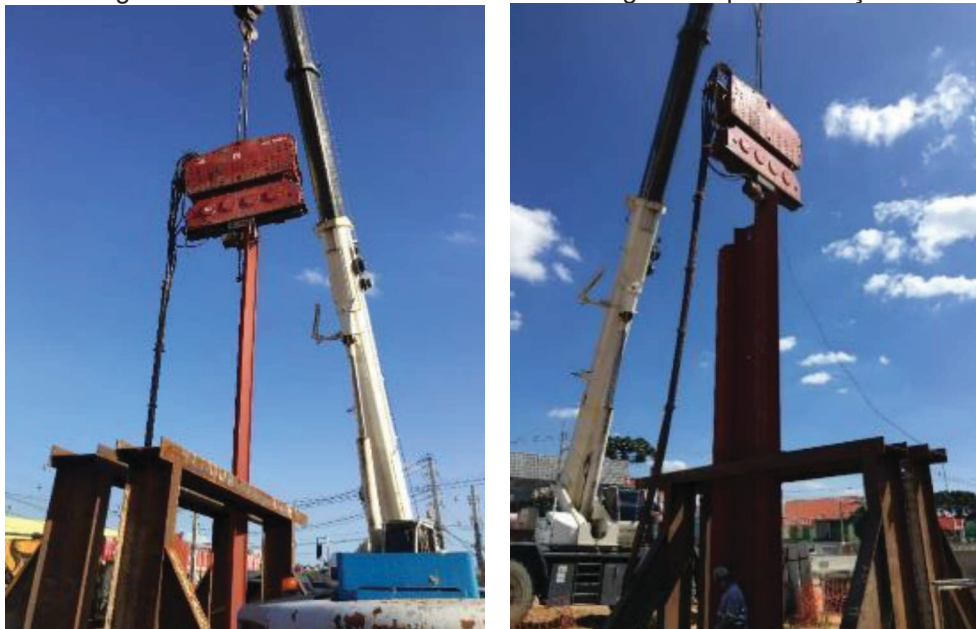
FONTE: MULLER (2017).

Durante a cravação várias formas foram testadas, variando-se a frequência de cravação, a amplitude, cravando estacas individualmente e com

utilização gabarito de cravação, ilustrado na Figura 3-20. Essa última forma de cravação, com uso de gabarito e o martelo MS50-H3, foi uma operação complexa de ser realizada na via, com necessidade de interrupção de tráfego a cada momento de suspensão do martelo, por motivos de segurança. Porém, apesar das variações na forma de cravação não houve sucesso, inclusive, chegando a fundir o aço das estacas, quando insistiu na cravação quando esta já não avançava mais.

A pinça utilizada durante a cravação com o martelo MS50-H3 foi sempre a mesma em todas as situações, destacando a excentricidade gerada por ela, como pode ser observado na Figura 3-21.

Figura 3-13 - Martelo MS-50 H3 com uso de gabarito para cravação



FONTE: O autor (2019).

Figura 3-14 - Detalhe da pinça durante a cravação de uma estaca GU8N

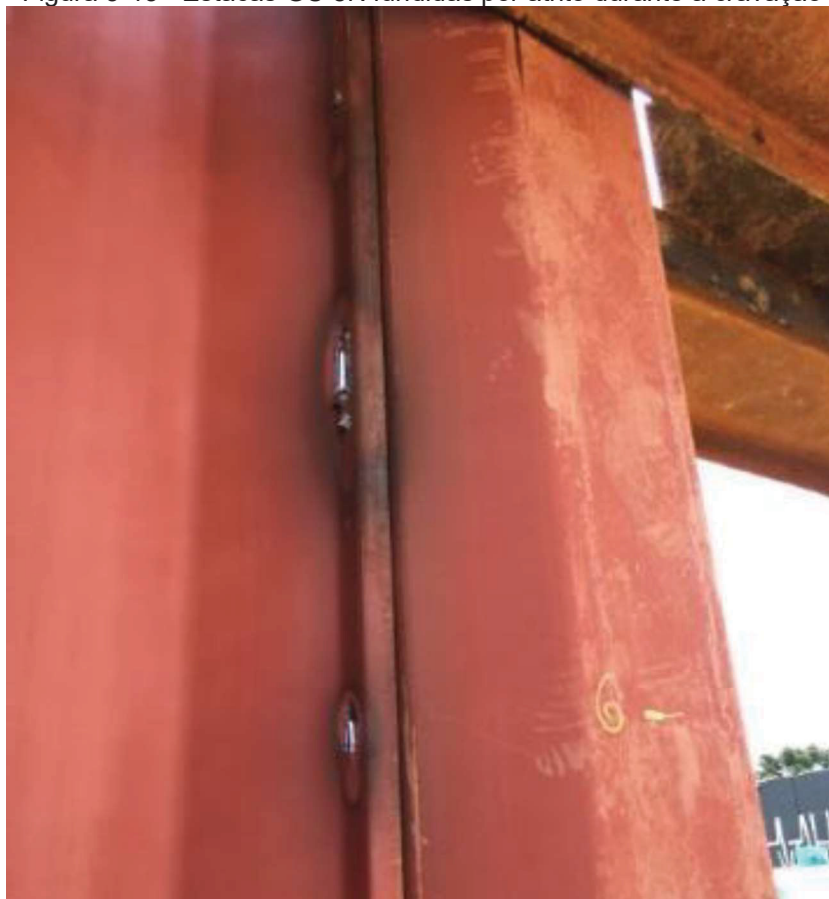


FONTE: O autor (2019).



Como apontado por VIKING (2002), a fricção entre conectores das estacas é uma questão relevante durante a cravação, podendo gerar esforços consideráveis e, como descrito na revisão bibliográfica, a velocidade de cravação abaixo de 8mm/s pode conduzir ao aquecimento dos conectores, situação essa ocorrida com as estacas mostradas na Figura 3-22.

Figura 3-15 - Estacas GU 8N fundidas por atrito durante a cravação



FONTE: O autor (2019).

Notada a dificuldade, foram realizados pré-furos com diâmetro de 30 cm e comprimento até a cota de cravação das estacas, e mesmo assim não houve ganho de produtividade na cravação. A Figura 3-23 ilustra um dos momentos em que a execução de pré-furo era realizada. Devido ao baixo ganho de produtividade, e por impor ainda mais uma etapa ao processo de cravação, a execução dos pré-furos foi abandonada durante o andamento da obra.

Figura 3-16 - Execução de pré-furos



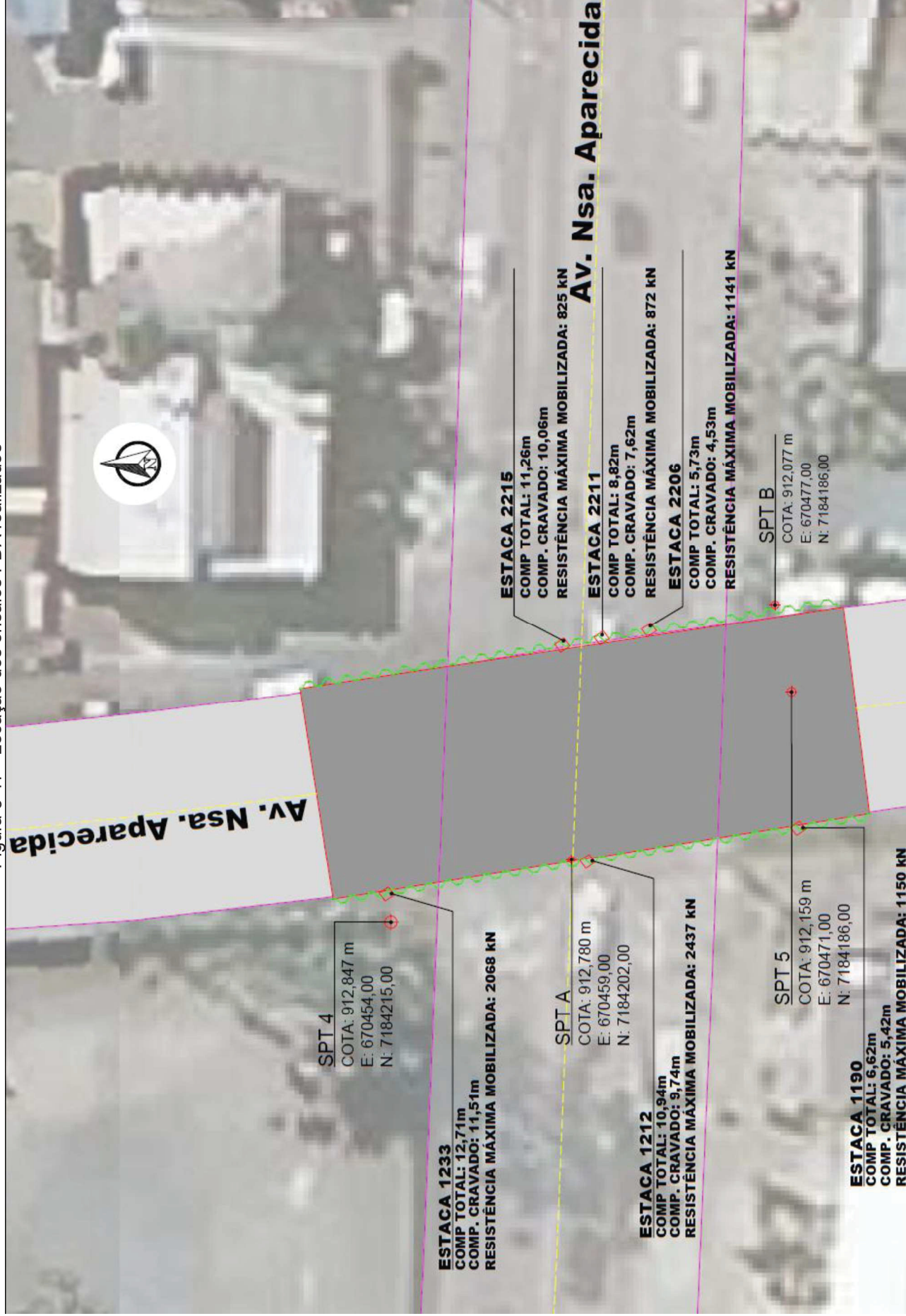
FONTE: O autor (2019).

### 3.5 Ensaio PDA realizado

Entendendo que a obra estava sendo executada em local com particularidades geológico-geotécnicas e existindo dúvidas quanto ao desempenho das estacas quanto a sua capacidade portante da OAE (Obra de Arte Especial – estrutura do tabuleiro da trincheira), foi realizado ensaio PDA nas estacas E1190, E1212, E1233, E2206, E2211, E2215, localizadas conforme ilustrado na Figura 3-24.

Entendendo que apenas estas estacas possuem função de fundação para a OAE com as demais trabalhando como contenção, ao ensaiar 6 das 112 estacas AZ19-700 presentes na obra, atendendo ao mínimo de 5% de estacas a serem ensaiadas (considerando apenas as com função portante da OAE), conforme a NBR 13.208:2007.

Figura 3-17 - Localização dos ensaios PDA realizados



FONTE: O autor (2019).



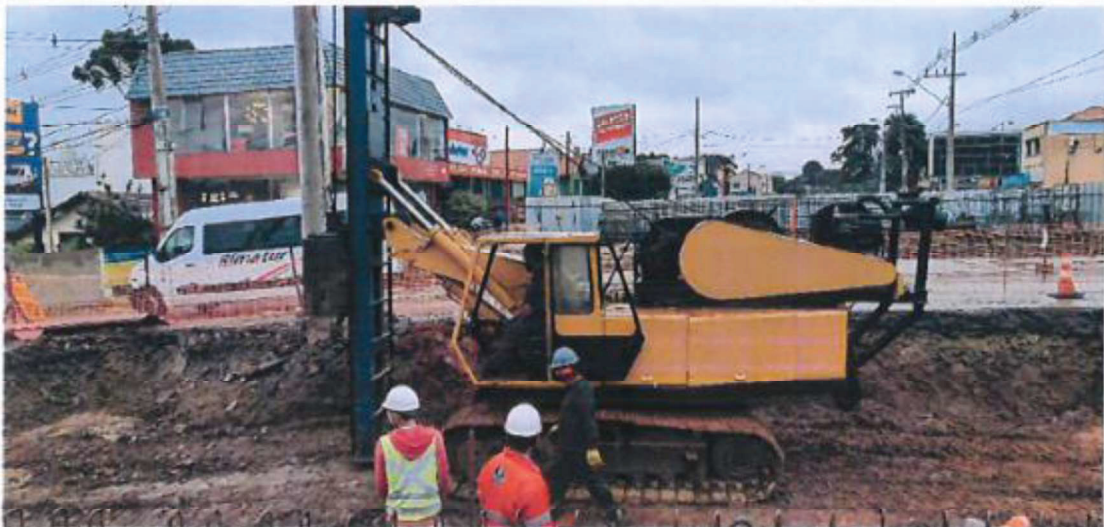
Como descrito no Capítulo 2, o ensaio PDA pode ser empregado como forma de avaliar a capacidade de carga de estacas por meio da teoria de equação da onda. Desta forma, foram realizados ensaios PDA pela Fugro, seguindo a NBR 6122, NBR 13208 e a D 4945 (ASTM, 1989), com 6 estacas ensaiadas de um total de 56 estacas do modelo AZ19-700.

Os equipamentos utilizados foram os seguintes:

- 1 Acelerômetros de PDA nº: K3924(853) e K3925(867);
- 2 Transdutores de Força nº: L520 e L540;
- 3 Aparelho de PDA modelo PAX nº: 3606.

O método de ensaio contou com um bate estaca com martelo de queda livre de 25 kN com altura de queda crescente, de 30cm, 60cm e 90cm. Na Figura 3-25 pode-se observar o equipamento utilizado, com a instalação da instrumentação em uma das estacas ensaiadas, e na sequência a execução do ensaio (Figura 3-26).

Figura 3-18 - Martelo para realização de ensaio PDA



FONTE: BAUER (2020), não publicado.

Figura 3-19 - Instalação da instrumentação e execução do ensaio



FONTE: BAUER (2020), não publicado.

Ao todo foram ensaiadas seis estacas, todas do modelo AZ19 700 uma vez que estas estacas receberiam a estrutura da OAE, bem como seus carregamentos verticais oriundos do peso próprio e carregamento móvel. Na Tabela 3-4 estão listadas as estacas ensaiadas, seguidos do comprimento cravado e a resistência máxima mobilizada, discriminada por fuste, ponta e total. Destaca-se a elevada resistência máxima mobilizada frente a carga de trabalho prevista, não havendo uma relação aparente quanto ao comprimento das estacas.

Tabela 3-4 - Estacas ensaiadas com PDA e resumo de cargas mobilizadas

Local	Estaca	Seção	Comp. Total (m)	Comp. Cravado (m)	Carga de Trabalho (kN)	Carga ao longo do fuste (kN)	Carga de ponta (kN)	Resistência máxima mobilizada <sup>(1)</sup> (kN)
Lado esquerdo	E1190	AZ19-700	6,62	5,42	220	381,5	798,3	1150
Lado esquerdo	E1212 <sup>(2)</sup>	AZ19-700	10,94	9,74	220	2109,6	327,4	2437
Lado esquerdo	E1233	AZ19-700	12,71	11,51	220	1821,9	246,3	2068
Lado Direito	E2206	AZ19-700	5,73	4,53	220	385,2	756,1	1141
Lado Direito	E2211	AZ19-700	8,82	7,62	220	636,5	235	872
Lado Direito	E2215 <sup>(2)</sup>	AZ19-700	11,26	10,06	220	664,8	159,8	825

(1) Método CAPWAP®

(2) Estacas com emenda

FONTE: FUGRO (2020), não publicado.

Com relação a leitura das medições foi utilizado um aparelho da *Pile Driving Analyzer* (PDA) e a avaliação da capacidade de suporte realizado pelos

métodos CASE e CAPWAP. Importante identificar o tempo decorrido desde a cravação da estaca até a data da realização do ensaio (Tabela 3-5), pois como descrito no capítulo 2 deste trabalho existe o efeito da cicatrização do solo (*setup*), sendo um efeito relevante para solos argilosos ou siltosos.

Tabela 3-5 - Tempo decorrido desde a cravação até a data do ensaio

Estaca	Data de cravação	Data do ensaio PDA	Tempo
E1190	28/10/19	04/06/20	220 dias
E1212	28/10/20	04/06/20	220 dias
E1233	05/11/19	04/06/20	212 dias
E2206	15/02/20	04/06/20	110 dias
E2211	15/02/20	04/06/20	110 dias
E2215	15/02/20	04/06/20	110 dias

### 3.5.1 Resultados PDA

A seguir são apresentados os resultados do ensaio PDA, analisado pelo método CASE e CAPWAP para as estacas E1190, E1212, E1233, E2215, E2211 e E2206, para o caso das estacas E1190, E1212, E1233, E2206 e E2215, não foi possível obter um  $J_c$  adequado, sendo que para estas estacas o fator de amortecimento adequado foi obtido através do método CAPWAP apenas, como está apresentado na Figura 3-21 para a estaca E1190, os resultados das demais estacas ensaiadas estão demonstrados no Anexo B.

Na Figura 3-20, estão os resultados da análise CASE para a estaca E1190 com identificação do golpe utilizado na análise CAPWAP apresentada na Figura 3-21. Observa-se que o CAPWAP *match quality*, fator utilizado para avaliar a qualidade da análise, fica próximo a 3 para todas as estacas, indicando boa correspondência entre o que foi medido e calculado pelo CAPWAP.

Na Figura 3-22 está ilustrada a simulação de prova de carga estática realizada pelo CAPWAP para a estaca E1190, destacando que para elaboração de cada simulação de carga x recalque foram utilizados informações de apenas um golpe identificado por “(\*)Análise Capwap” na Figura 3-20.

Não é possível notar o Quake e Damping definidos pelo Software com base na equação de onda e nos resultados medidos em campo da força e velocidade durante o ensaio de carregamento dinâmico. Percebe-se para o caso da esta E1190 um valor de Quake de ponta da estaca, da ordem de 2,115 mm, algo esperado conforme a bibliografia consultada.





Muito embora seja de grande interesse conhecer a curva carga x recalque da estaca ensaiada, pelo método do PDA, o gráfico emitido pelo *software* deve ser tratado com cautela, pois o número de golpes adotado neste ensaio em específico, que foram 3 a alturas variáveis, permitem apenas uma extrapolação da curva.

Na Tabela 3-6, estão resumidas as informações de *quake*, *damping*, resistência total mobilizada, resistência lateral e de ponta calculado para cada uma das estacas ensaiadas no PDA, estando resultados em sua íntegra apresentados no Anexo B, no GRLWEP estes valores foram utilizados como parâmetros de entrada de configuração do solo, influenciando o deslocamento calculado para a carga mobilizada a ser obtida.

Tabela 3-6 - Resumo dos valores calculados pelo CAPWAP

	<b>E1190</b>	<b>E1212</b>	<b>E1233</b>	<b>E2206</b>	<b>E2211</b>	<b>E2215</b>
<b>Shaft quake (mm)</b>	0,995	0,992	0,999		0,825	
<b>Shaft damping (s/m)</b>	1,492	0,257	0,134	0,522	0,154	0,96
<b>Toe quake (mm)</b>	2,115	0,628	1,004		0,288	
<b>Toe damping (s/m)</b>	1,704	0,804	0,358	0,079	0,080	0,3
<b>Jc (damping case)</b>					0,65	
<b>RS (kN)</b>	381,5	2109,6	1821,9	385,2	636,5	664,8
<b>RT (kN)</b>	768,3	327,4	246,3	756,1	235,0	159,8
<b>RU (kN)</b>	1149,8	2437,0	2068,2	1141,3	871,5	824,6

Sendo:

RS = Resistência lateral

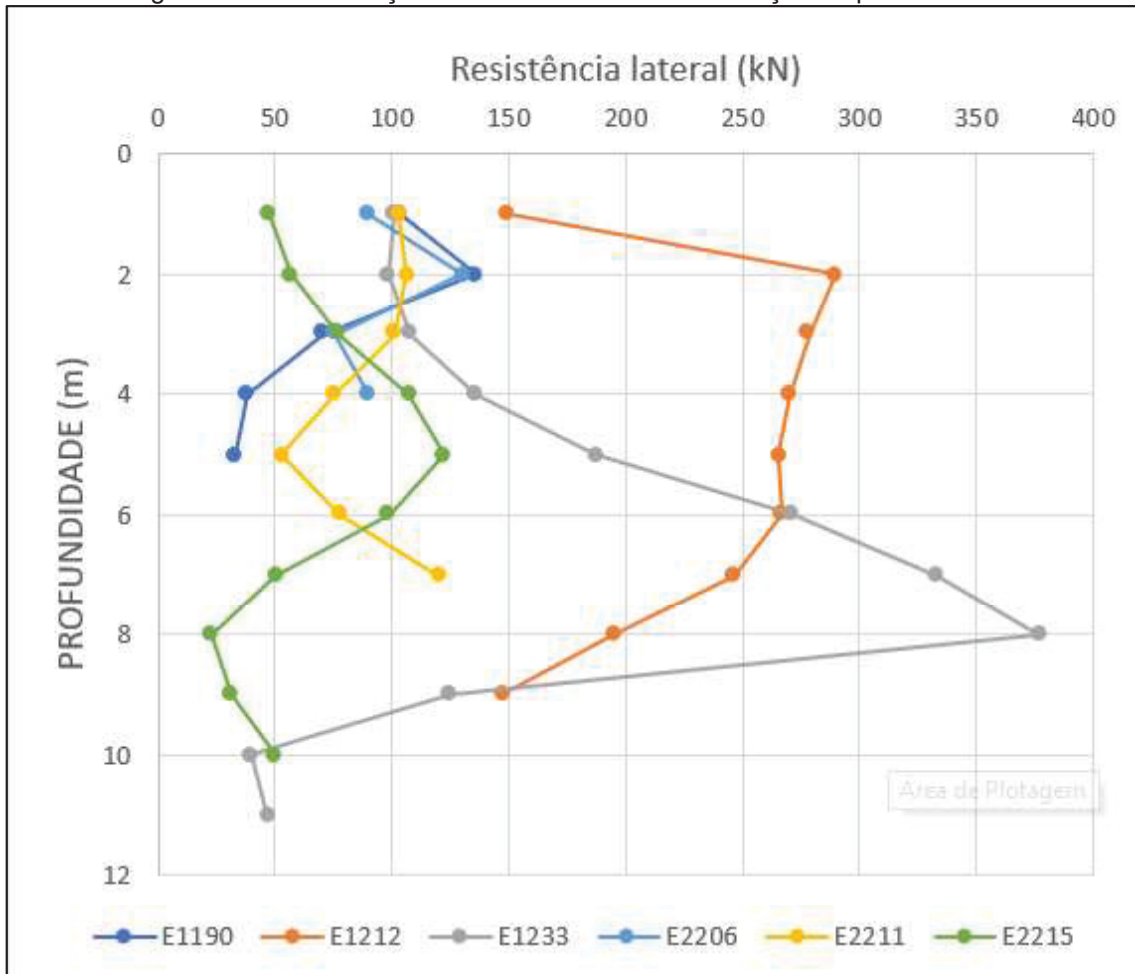
RT= Resistência de ponta

RU = Resistência Total

A fim de compreender a variabilidade dos resultados obtidos, foram elaborados gráficos que ilustram a resistência lateral, de ponta, de *damping* e *quake* em cada uma das estacas ensaiadas.

Na Figura 3-45, a resistência lateral para cada metro de estaca, obtida através do ensaio PDA foram agrupadas. Na Figura 3-46 estão agrupadas as informações de resistência de ponta de cada estaca ensaiada.

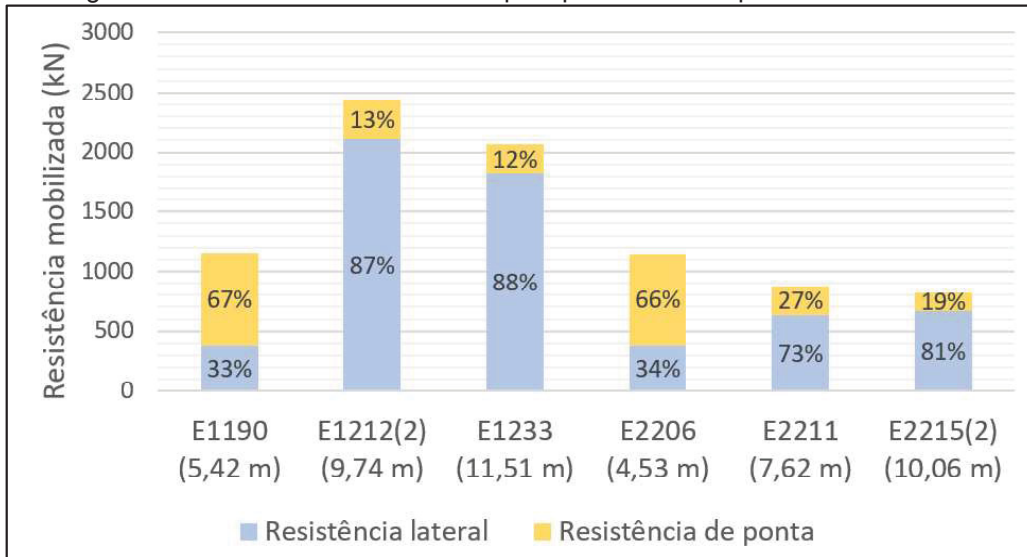
Figura 3-23 - Distribuição da resistência lateral em função da profundidade



As estacas E1190, E2206 e E2211 apresentam semelhança no desenvolvimento da resistência lateral ao longo do fuste não ultrapassando o valor de 150 kN. As estacas E1212 e E1233 apresentaram um descolamento significativo das demais estacas, sendo que a estaca E1212 apresenta um incremento de resistência já nos primeiros metros chegando a cerca de 300 kN, praticamente o dobro das demais, e decrescendo a partir de 2 metros de profundidade. Já a estaca E1233 até os 4 m de profundidade apresenta resistência lateral da mesma ordem de grandeza das estacas E1190, E2206, E2211 e E2215, menos de 150 kN, evoluindo rapidamente até 370 kN em 8 metros de profundidade e decaindo subitamente, chegando a menos de 50 kN, já nos 10 metros cravados.

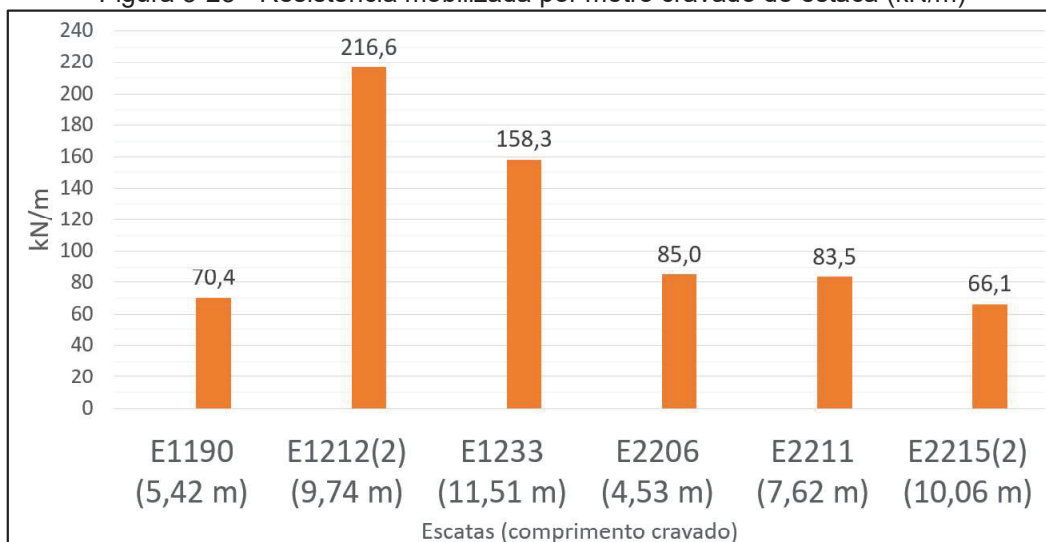
Na Figura 3-24 apresenta a resistência calculada pelo CAPWAP foi distribuída entre fuste e ponta em seu percentual, nota-se que as estacas E1190 e E2206 são as que têm maior parte da carga resistida pela ponta, sendo também as mais curtas.

Figura 3-24 - Resistência mobilizada pela ponta e lateral por estaca ensaiada



Dentre as 5 estacas ensaiada a resistência lateral por metro de estaca cravada varia entre 66 e 85 kN/m, para as estacas E1190, E2206, E2211 e E2215, sendo que as estacas E1212 e E1233, as que foram cravadas a maior profundidade apresentam resistência lateral em kN/m superior as demais, como ilustrado na Figura 3-25.

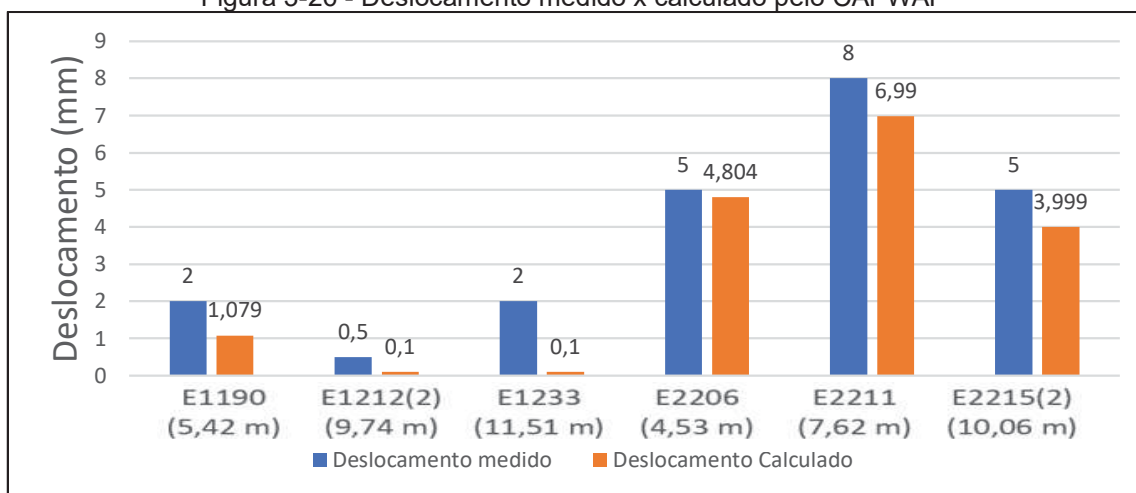
Figura 3-25 - Resistência mobilizada por metro cravado de estaca (kN/m)



Com relação a resistência de ponta, as estacas apresentaram uma variabilidade considerável, havendo estacas com maior profundidade cravada apresentando menor resistência do que estacas mais curtas. Aparentemente as estacas E1190 e E2206 encontraram uma resistência maior de ponta, mesmo com menor profundidade em relação as demais, sem que a resistência lateral pudesse se desenvolver como nas estacas mais longas como pode ser observado na Figura 3-24.

Para o deslocamento permanente medido e calculado pelo método CAPWAP, o gráfico apresentado na Figura 3-47 ajuda a visualizar as estacas que obtiveram os melhores ajustes na modelagem do CAPWAP, sendo que todas tiveram deslocamento calculado e medido abaixo de 10 mm.

Figura 3-26 - Deslocamento medido x calculado pelo CAPWAP



Como pode ser observado as estacas E2206, E2211 e E2215 conseguiram uma modelagem do CAPWAP muito próxima do que foi observado em campo.

### 3.6 Dados de entrada no GRLWEAP-2005

Como demonstrado no capítulo 2, existem algumas formas de realizar a previsão de cravabilidade da estaca, seja utilizando-se a capacidade de carga prevista para a estaca, como descrito por Alonso (2019), podendo-se utilizar a teoria de equação da onda através do *software* GRLWEAP como mecanismos de cálculo ou simplesmente o uso de ábacos fornecidos pelos fabricantes. Neste trabalho será abordada o método utilizando equação de onda com auxílio do GRLWEAP e comparando com os resultados obtidos durante a obra e a análise CAPWAP feita para as prova de carga dinâmica realizadas, como o US COE (2004) prevê como uma prática adequada.

No GRLWEAP os dados do solo foram inseridos no *software* através do método SA, o qual permite o entrar com os valores de  $N_{spt}$  e o *software* realiza os cálculos de correlações de resistência com base nas equações apresentadas no capítulo 2 deste trabalho.

Para correção dos valores do SPT, para valores de  $NSPT_{60}$ , foi considerada uma eficiência de 72%, valor considerado adequado pelas bibliografias consultadas e apresentadas no capítulo 2.

Por ausência de um martelo de queda livre de 25 kN no catálogo do *software* como o utilizado durante o ensaio PDA, foi necessário adaptar um modelo existente, para tal, o BSP SL30 teve o peso alterado. Por falta do modelo e outro tipo de martelo correspondente ao ABI MRZV 18V a análise por vibração foi feita considerando o martelo Muller MS50-H3.

Na fase de verificação dos resultados da análise CAPWAP para o martelo de queda, foi configurada a altura de queda conforme a tabela de resultados da análise por CASE, indicados na Figura 3-27, Figura 3-30, Figura 3-33, Figura 3-36, Figura 3-39, Figura 3-42 que indicam a altura utilizada na análise CAPWAP do ensaio PDA para cada estaca.

Para configuração do valor de “*gain/loss*” a ser considerado pelo *software* na calibração foi utilizado a equação 2-22 e a Tabela 2-13 apresentadas no capítulo 2, fornecendo um valor para o “*gain/loss*” da ordem de 0,4 uma vez que o solo é argiloso e possui camadas de transição para Silte.

Os parâmetros de *quake* e *damping* do solo foram inseridos com valores calculados pelo CAPWAP, com modificações apenas quando os resultados do

GRLWEAP não apresentavam convergência com os valores de deslocamento para a resistência máxima mobilizada calculados pelo CAPWAP.

Os dados da estaca foram inseridos conforme catálogo do próprio software para uma estaca AZ19-700.

Figura 3-27 - Configuração dos dados do martelo, estaca e de fator de "gain/loss"

**Hammer Information**  
Select from following list [28/08/2009-2003]: ID: 2001

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
1335	MENCK MHU3000S	ECH	1647.5170	3006.451
2001	BSP SL30	ECH	25.0000	30.000

**Hammer parameters**  
Efficiency: 0.95  
Stroke: 0.9 m  
Type: ECH, Fixed

**Resistance Gain/Loss Factors**

Shaft		Toe	
1	0.4	1	1.0
2	0.667	2	1.0
3	0.8	3	1.0
4	1.0	4	1.0
5	0.0	5	0.0

Incr.: 0 Action >>

**Soil Parameters**  
Quake: Shaft 2.54 mm Const, Toe 2.54 mm  
Damping: Shaft 0.631 s/m Const, Toe 0.7 s/m Smith  
Shaft Resistance Percentage: 86%  
Dist. Shape Num: 0.0  
Residual Stress Analysis: No

**Cushion Information**

	Hammer	Pile	Unit
Area	1600	0	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	2500	0	MPa
Thickness	200	0	mm
C.O.R.	0.8	0	
Stiffness	0	0	kN/mm
Helmet Weight	9.1		kN

**Pile Information**

Length	12.71	m	Auto	Segments
Penetration	11.51	m	Auto	S-Length
Section Area	206.4	cm <sup>2</sup>	Auto	S-St. Wt
Elast Modulus	210000	MPa		
Spec Weight	77.5	kN/m <sup>3</sup>		
Toe Area	206.4	cm <sup>2</sup>	0	Splices
Perimeter	1.72	m		Pile Type:
Pile Size	0.	mm		Sheet Pile

FONTE: PDI (2005).

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a análise de cravabilidade das estacas AZ19-700, com emprego de martelo vibratório, utilizadas na obra do estudo de caso com uso do *software* GRLWEAP-2005 da PDI, com base nas informações dos ensaios SPT realizados e interpretados conforme orientações do próprio manual do *software* e informações de *quake* e *damping* do CAPWAP.

Primeiramente o ensaio de prova de carga dinâmica (PDA) foi reproduzido, para cada uma das estacas ensaiadas, no GRLWEAP afim de validar os *inputs* utilizados.

### 4.1 Modelagem no GRLWEAP

O ensaio de PDA sobre as estacas E2215, E2211, E2206, E1233, E1212 e E1190, foi simulado no *software* GRLWEAP com base nos relatórios de ensaio PDA e dos ensaios de SPT para configuração do solo. Nesta situação à estaca tem suas propriedades conhecidas como descrito no capítulo 3, o martelo também, o solo também através do SPT. Contudo, as correlações de resistência do solo, da interação solo estaca e a interpretação das condições de contorno que descrevem esta situação são variáveis sob influência do operador do Software. Assim, a modelagem do ensaio PDA foi desenvolvida seguindo o fluxo descrito na Figura 2-35.

Após a reprodução do ensaio PDA, sem alterar as configurações de solo, o martelo foi substituído pelo vibratório MS50-H3 para verificação de taxa de penetração e de resistência máxima.

Na Figura 4-1 estão demonstrados os *inputs* de martelo e estaca, bem como o de solo para modelagem do ensaio de PDA no GRLWEAP, com objetivo de obter valores próximos de carga versus deslocamento medido no ensaio de PDA, com os resultados demonstrados na Figura 4-2, onde pode-se ler os resultados de máxima resistência mobilizada prevista (Rult, kN), máximo deslocamento (Set, mm), golpes/m (Bl/m), máxima força empregada pelo martelo no topo da estaca (TopFx, kN), máxima tensão de compressão (MxCs, Mpa), máxima tensão de tração (MxTS, Mpa), energia empregada (ENTHRU, kJ), resistência buscada (ActRes, kN) e a altura de queda (Stroke, m).



Figura 4-1 - inputs para análise da Estaca 1190 no GRLWEAP

MARTELO DE QUEDA E1190

Hammer Information  
 Select from following list [28/08/2009-2003] ID: 2001

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
1335	MENCK MHL3000S	ECH	1647.517	3006.451
2001	BSP SL30	ECH	25.000	30.000

Hammer parameters  
 Efficiency: 0.52  
 Stroke: 0.3 m  
 Pile material:  Steel  Timber

Cushion Information  
 Hammer  
 Area: 1600. cm<sup>2</sup>  
 Elastic Modulus: 2500. MPa  
 Thickness: 200. mm  
 C.O.R.: 0.8  
 Stiffness: 0. kN/mm  
 Helmet Weight: 9.1 kN

Pile Information  
 Length: 6.62 m  
 Penetration: 5.42 m  
 Section Area: 205.4 cm<sup>2</sup>  
 Elast Modulus: 210000. MPa  
 Spec Weight: 77.5 kN/m<sup>3</sup>  
 Toe Area: 205.4 cm<sup>2</sup>  
 Perimeter: 1.72 m  
 Pile Size: 0. mm

Ultimate Capacity kN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	<span style="background-color: black; color: white; padding: 0 5px;">1149.8</span>	<span style="background-color: black; color: white; padding: 0 5px;">840.0</span>	<span style="background-color: black; color: white; padding: 0 5px;">1260.0</span>	<span style="background-color: black; color: white; padding: 0 5px;">1680.0</span>	<span style="background-color: black; color: white; padding: 0 5px;">2100.0</span>	<span style="background-color: black; color: white; padding: 0 5px;">2520.0</span>	<span style="background-color: black; color: white; padding: 0 5px;">2940.0</span>	<span style="background-color: black; color: white; padding: 0 5px;">3360.0</span>	<span style="background-color: black; color: white; padding: 0 5px;">3780.0</span>	<span style="background-color: black; color: white; padding: 0 5px;">4200.0</span>

Incr.: 0 Action >>

Soil Parameters  
 Quake  
 Shaft: 0.995 mm  
 Toe: 2.115 mm  
 Damping  
 Shaft: 1.492 s/m  
 Toe: 1.704 s/m  
 Shaft Resistance Percentage: 34 %  
 Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

Profile/Resistance Other Parameters SPT N vs. Depth

Layer: 1 of 14

Penetration: 5.42 m

Water Table: 15.002 m

Layer Top Depth: 0. m

Layer Bottom Depth: 1. m

Layer Thickness: 1. m

Soil Type

Gravel Graded: Size: <

Sand: Size: <

Silt: Cohesive <

Clay <

Rock <

Peat or other w/b resistance Description: <

Other: <

SPT N Value: 8.4 <= 60 Interp

Unit Weight: 17.44 kN/m<sup>3</sup>

Update => Ru=362.3; Rs=301.0 kN

Disclaimer  
 The GRLWEAP static analysis helps with filling of the S1 Form. This analysis should only be used by engineers who are familiar with static pile analyses and their limitations. The user should compare results with those from other static analysis methods.

OK Cancelar Ajuda

Figura 4-2 - Resultados obtidos para E1190 – inputs baseados nos resultados do CAPWAP

Rult kN	Set mm	BlCt Bl/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	ENTHRU kJ	ActRes kN	Stroke m
1150.	0.03	9999.0	1237.4	62.978	3.844	3.0	1025.	0.3
1150.	0.27	3643.6	1447.9	73.901	3.539	4.0	1112.	0.4
1150.	0.49	2046.0	1635.2	83.580	3.302	5.0	1150.	0.5
1150.	0.75	1326.5	1806.3	92.359	3.496	5.9	1150.	0.6
1150.	1.07	934.6	1963.9	100.432	3.810	6.9	1150.	0.7
1150.	1.38	727.0	2112.4	108.038	3.974	7.9	1150.	0.8
1150.	1.66	600.9	2252.5	115.160	4.097	8.9	1150.	0.9
1150.	1.94	516.0	2384.2	121.883	4.201	9.9	1150.	1.0
1150.	2.20	454.6	2507.9	128.226	4.295	10.9	1150.	1.1
1150.	2.45	408.5	2625.4	134.161	4.382	12.0	1150.	1.2

Para os valores de *quake* e *damping* baseados no CAPWAP, não foram obtidos os mesmos valores de deslocamento e de golpes por metro quando observados na análise para queda de martelo a 0,3 m, com significativa diferença para os valores máximos de compressão, tensão e de energia calculados pelo CAPWAP e o GRLWEAP.

Reduzindo-se os valores de *damping* de ponta e fuste para 0,1 e 0,4, respectivamente, os valores para máximos de tensão de compressão, tração, energia bem como o número de golpes e de deslocamento calculados pelo GRLWEAP se mostraram mais próximos aos obtidos pelo CAPWAP, como demonstra a Figura 4-3. Porém, esses valores de *damping* são distantes de valores do que seria um solo coesivo conforme recomendações da Tabela 2-14 e aproximando de valores de uma base rochosa, com pouca deslocabilidade.

Figura 4-3 - Resultados obtidos para E1190 – inputs baseados nos resultados do CAPWAP

Rult kN	Set mm	BlCt Bl/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	ENTHRU kJ	ActRes kN	Stroke m
1150.	1.01	986.4	1226.9	59.905	9.534	3.3	1150.	0.3
1150.	1.68	593.8	1434.1	70.301	10.187	4.3	1150.	0.4
1150.	2.30	434.7	1620.4	79.655	11.290	5.4	1150.	0.5
1150.	2.87	348.5	1788.6	88.131	8.307	6.5	1150.	0.6
1150.	3.40	294.0	1948.0	95.873	9.550	7.6	1150.	0.7
1150.	3.90	256.2	2095.5	103.356	11.245	8.7	1150.	0.8
1150.	4.42	226.2	2233.7	110.120	12.954	9.8	1150.	0.9
1150.	4.97	201.3	2365.7	116.804	14.344	10.8	1150.	1.0
1150.	5.51	181.7	2488.8	122.823	15.600	11.9	1150.	1.1
1150.	6.09	164.1	2602.4	128.592	15.974	13.0	1150.	1.2

Definidos os valores de *quake* e *damping*, o martelo de queda livre foi substituído pelo MS50-H3 para dar sequência na análise de carga e taxa de penetração para a estaca E1190, observa-se que com emprego desse modelo de martelo a resistência última de 1150 kN é obtida para cravação a frequência

mínima de 24 Hz sendo atingida a taxa de penetração de aproximadamente 7 mm/s. Entende-se, portanto, que a resistência de 1150 kN para as condições da estaca E1190 seria o limite até o qual o martelo MS-50 H3 seria capaz de cravar à estaca.

Contudo, quando se analisa a cravabilidade da estaca, demonstrado na Figura 4-5, da forma como ela se encontrava quando ensaiada pelo PDA, ou seja, com 5,4 m cravados, a resistência última prevista pelo GRLWEAP seria de 213 kN, considerando o *setup* pleno para o solo (*gain/loss*=1), pois quando o martelo MS50-H3 foi empregado, tratava-se de uma recravação. Portanto, não seria esperado uma resistência de 1050 kN para a estaca cravada até a profundidade de 5,4 m.

Figura 4-4 - Resultados obtidos para E1190 – Análise para martelo MS50-H3

Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1150.	0.11	0.0	93.3	4.533	0.000	0.0	98.	0.3
1150.	0.10	9605.6	1188.4	57.576	67.975	0.0	869.	3.3
1150.	0.10	9999.0	1213.3	58.783	67.148	0.0	909.	6.2
1150.	0.10	9999.0	1253.6	60.735	68.723	0.0	968.	9.2
1150.	0.10	9999.0	1194.1	57.855	69.356	0.0	1066.	12.2
1150.	0.10	9999.0	1160.3	56.215	66.253	0.0	1039.	15.1
1150.	0.10	9999.0	759.9	37.183	25.445	0.3	810.	18.1
1150.	0.32	3163.8	1102.0	54.288	20.441	0.2	1150.	21.1
1150.	6.77	147.6	1306.4	63.976	36.540	5.2	1150.	24.0
1150.	27.70	36.1	1454.8	71.950	42.203	4.4	1150.	27.0

FONTE: O autor, 2021.

Mesmo com o *setup* já desenvolvido a análise demonstrada na Figura 4-5 a resistência oferecida esperada seria de 303,67 kN e, ainda, considerando a resistência oferecida por duas estacas, como analisado na Figura 4-6, a resistência última oferecida seria de 362 kN.

Figura 4-5 - Cravabilidade para E1190 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca simples

Depth m	G-Ls	G-Lt	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00/1.00		11.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00/1.00		27.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00/1.00		67.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
4.0	1.00/1.00		111.	632.25	1.6	441.7	21.401	6.792	2.7	111.	26.00
5.0	1.00/1.00		170.	400.15	2.5	488.6	23.670	14.790	4.2	170.	26.00
5.4	1.00/1.00		213.	303.67	3.3	529.4	25.648	17.203	5.0	213.	26.00

FONTE: O autor, 2021.



Figura 4-6 - Cravabilidade para E1190 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca dupla

Depth m	G-Ls	G-Lt	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00/1.00		15.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00/1.00		46.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00/1.00		119.	568.92	1.8	489.8	23.729	10.308	3.3	119.	26.00
4.0	1.00/1.00		191.	380.36	2.6	579.2	28.060	18.360	4.9	191.	26.00
5.0	1.00/1.00		293.	234.68	4.3	706.7	34.239	27.810	7.5	293.	26.00
5.4	1.00/1.00		362.	175.26	5.7	812.7	39.373	33.692	8.5	362.	26.00

FONTE: O autor, 2021.

Esse processo de análise foi realizado para as demais estacas, variando os valores de *quake* e de *damping* conforme necessário para obter convergência com os valores calculados pelo CAPWAP na análise do ensaio PDA, estando os detalhes de *inputs* e *outputs* desse processo para as demais estacas apresentadas no Apêndice A. O resumo dos resultados da modelagem realizada no GRLWEAP está apresentado na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Resumo dos resultados obtidos da modelagem no GRLWEAP por estaca

Local	Estaca	Seção	Comp. Total (m)	Comp. Cravado (m)	Resistência máxima mobilizada <sup>(1)</sup> (kN)	Penetração (mm/s)	Análise pelo GRLWEAP Gain/loss 1.0			
							Simples		Dupla	
							kN	mm/s	kN	mm/s
Lado esquerdo	E1190	AZ19-700	6,62	5,42	1150	27	213	303	362	175
Lado esquerdo	E1212 <sup>(2)</sup>	AZ19-700	10,94	9,74	2437	0,1	543	121	1003	49
Lado esquerdo	E1233	AZ19-700	12,71	11,51	2068	0,2	761	73	1479	25
Lado Direito	E2206	AZ19-700	5,73	4,53	1141	1	458	405	249	260
Lado Direito	E2211	AZ19-700	8,82	7,62	872	25	391	150	703	76
Lado Direito	E2215 <sup>(2)</sup>	AZ19-700	11,26	10,06	825	81	764	48	1575	0,1

FONTE: O autor, 2021.

A resistência última calculada é dada pelas características do solo (argila, silte ou areia) e o *N<sub>spt</sub>* inserido no software. O *gain/loss* também exerce influência sobre esse valor, uma vez que esse coeficiente traduz a diferença de resistência oferecida pelo solo durante a cravação e o ganho de resistência após a cicatrização do solo. Portanto, manipulando esses valores, a *Rult* calculada se altera.

O *quake* e o *damping* são valores que como visto no capítulo 2 influem na interação solo/estaca durante o processo de cravação. Na análise realizada pelo GRLWEAP a variação desses valores irá impactar na velocidade de cravação e, conseqüentemente, na nega esperada para obter a *Rult* definido em projeto.

Para simular a condição de cravabilidade da estaca até a cota de projeto para as estacas AZ-19 700, ou seja, até 13 m de profundidade foi adotado o

mesmo *Nspt* utilizado nas simulações realizadas até agora e os valores de *quake* e *damping* que retornaram resultados de resistência máxima mobilizada e de deslocamento convergentes com o CAPWAP, a proporção de resistência de fuste e de ponta foram definidos conforme a Figura 3-24. Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Resumo dos resultados obtidos da modelagem no GRLWEAP por estaca

Estaca	Comprimento de projeto (m)	Quake		Damping		Rult. GRLWEAP (kN)	Taxa de penetração (mm/s)
		Fuste	Ponta	Fuste	Ponta		
E1190	13	2.54	2.54	0.648	0.49	1281	23,30
E1212	13	0.992	0.628	0.257	0.804	2065	12,42
E1233	13	0.999	1.004	0.134	0.358	933	52,87
E2206	13	2.5	0.5	0.8	0.2	2461	4,80
E2211	13	0.825	0.288	0.6	0.03	1299	23,67
E2215	13	1	2.3	0.96	0.3	2639	0,10

FONTE: O autor, 2021.

Nota-se que a resistência máxima mobilizada prevista para a situação das estacas serem cravadas até a cota de projeto seria limitada a aproximadamente 2.000 kN, resistência em que a taxa de penetração se aproxima de 10 mm/s. Duas estacas não seriam capazes de atingir a cota de 13 m, a E2206 e E2215.

As estacas E2206 e E2215 foram modeladas com *quake* e *damping* menores que da estaca E1190. Porém, apresentaram maior resistência e taxa de penetração menor para a profundidade de 13 m.

Como o *quake* e *damping* foram ajustados para obterem valores de deslocabilidade e de resistência máxima mobilizada de acordo com a análise CAPWAP estaca à estaca e sabendo que apesar das similaridades cada estaca está submetida a condições próprias e específicas diferentes umas das outras, notavelmente observado pela diferença de cota de cravação atingida por cada estaca, bem como do próprio resultado CAPWAP.

Através do ensaio PDA e análise CAPWAP, não foi possível estabelecer um valor adequado e representativo de *quake* e *damping* que pudesse ser adotado para modelar todas as estacas e obter valores similares. Possivelmente, os resultados do ensaio PDA e, conseqüentemente, a análise CAPWAP tenha sofrido alguma interferência devido a problemas de verticalidade das estacas, de



alteração da geometria durante a cravação e de contato com as estacas adjacentes.

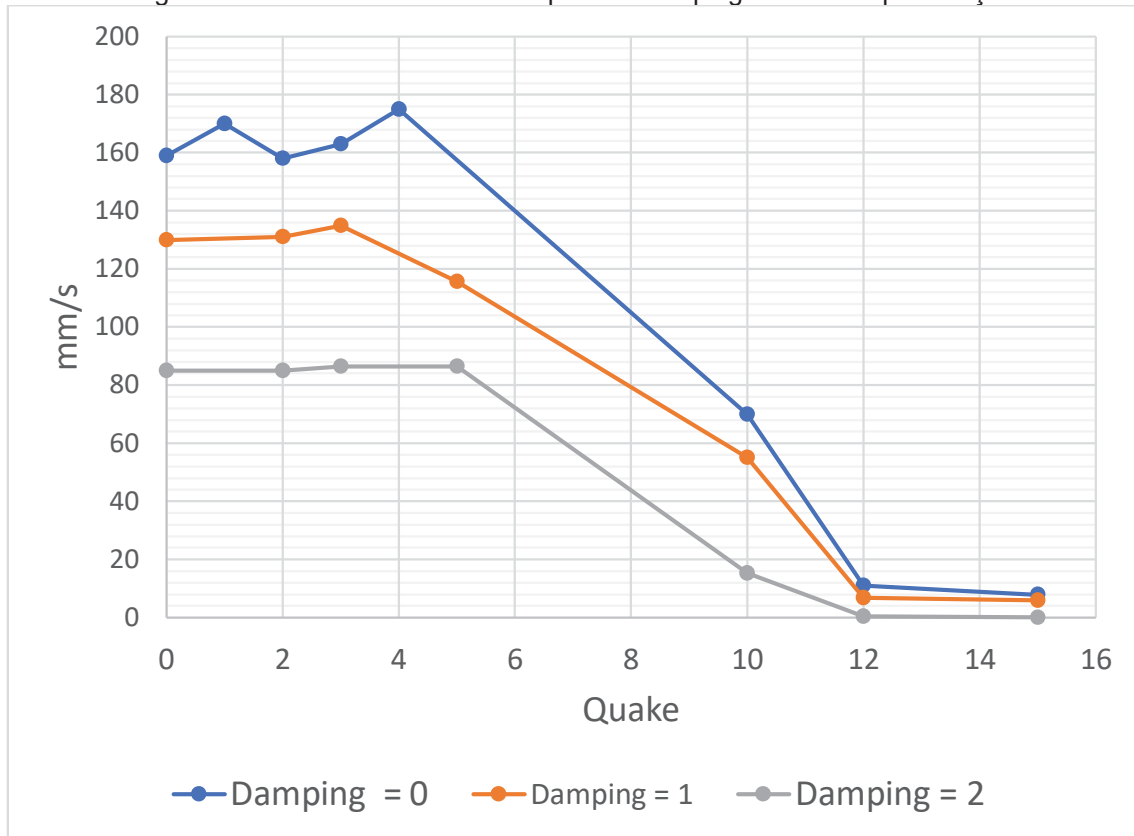
Uma vez que o ensaio PDA depende de medições de velocidade e força e estando as estacas em contato com outras estacas formando a cortina é razoável pensar que essas condições de contorno interferiram nas medições de campo e, logo, nas análises, prejudicando a adoção de valores precisos para *quake* e *damping*.

Experimentalmente, como forma de avaliar a influência dos parâmetros de *quake* e *damping* sobre o modelo de equação de onda, com auxílio do GRLWEAP, foi selecionada a estaca E1233, por essa ter sido a que atingiu maior profundidade cravada para realizar simulações, variando os valores de *quake* desde 0 mm a 15 mm. Mantendo os valores de  $N_{spt}$  já utilizados e a profundidade sendo 13 m para estaca simples, os valores de *damping* como zero para fuste e ponta estando os resultados demonstrados na Tabela 4-3 e representados graficamente na Figura 4-7.

Tabela 4-3 - Variação de quake, damping e influência na taxa de penetração

Profundidade (m)	Quake (mm)	Damping (s/m)	Rult (kN)	Taxa de penetração mm/s
<b>Damping = 0</b>				
13	0	0	374	159
13	1	0	374	170
13	2	0	374	158
13	3	0	374	163
13	4	0	374	175
13	10	0	374	70
11	12	0	289	11
10	15	0	192	7,85
<b>Damping = 1</b>				
13	0	1	374	130
13	2	1	374	131,08
13	3	1	374	134,91
13	5	1	374	115,65
13	10	1	374	55,11
11	12	1	289	6,75
9	15	1	192	5,91
<b>Damping = 2</b>				
13	0	2	374	85
13	2	2	374	85
13	3	2	374	86,48
13	5	2	374	86,37
12	10	2	323	15,19
11	12	2	289	0,42
10	15	2	192	0,1

Figura 4-7 - Influência do valor de quake e damping na taxa de penetração



Como esperado, a medida que o quake é incrementado a taxa de penetração reduz, pois para mobilizar a resistência dinâmica da estaca o deslocamento da estaca deve ser maior, representando um solo argiloso rígido. Os valores usuais de quake da ordem de 1mm a 2,5 mm retornaram valores altos de penetração para o solo modelado, sendo reduzidos com o incremento do *damping*.

Conforme análise da Figura 4-7 os valores de *quake* na ordem de 10 mm a 30 mm, sugeridos Aoki (1991 apud CINTRA, 2013), parecem mais condizentes com o que foi observado em campo durante a cravação, em termos de taxa de penetração. Porém, não há como ter certeza devido a falta de rigor com a verticalidade da estaca e a estaca estar em contato com outras duas por seus conectores.

## 4.2 Cravabilidade com base nos métodos empíricos e semiempíricos

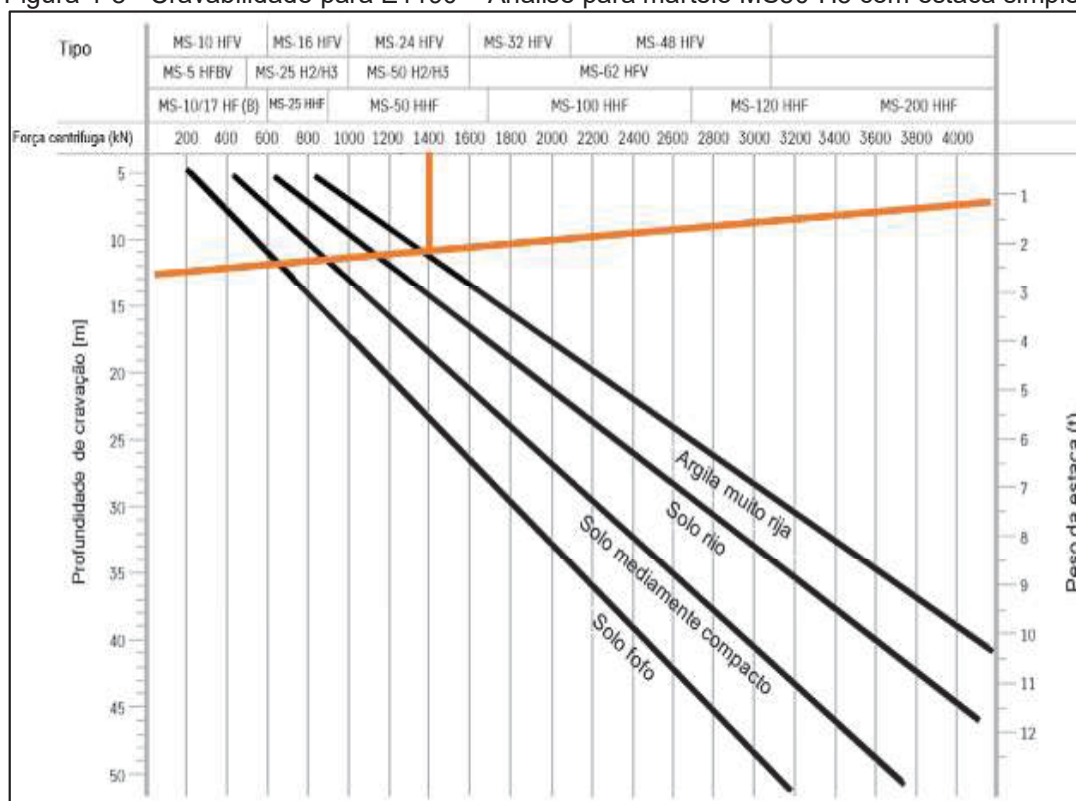
Além do GRLWEAP, pode-se empregar, dadas as limitações desse estudo com relação a ensaios, alguns dos demais métodos apresentados no capítulo 2 para seleção do martelo vibratório.

Começando pelo ábaco fornecido pela Muller, é uma forma bastante simples de selecionar martelos vibratórios desse fabricante, pois basta conhecer o comprimento da estaca, seu peso total e as características do solo facilmente detectáveis através de ensaio SPT, quanto a solo arenoso, argiloso, compacto ou rijo, respectivamente.

Na Figura 4-8, está demonstrado a aplicação para o caso das estacas em AZ19 aplicadas na obra desse estudo de caso, com 13 m de comprimento a ser cravado, com 80 kg/m, com peso total de 1040 kg.

A avaliação demonstra que o martelo MS-50 H3 utilizado para tentar recravar as estacas da obra até atingirem a profundidade de 13 m, seria capaz de tal tarefa mesmo em uma argila muito rija, conforme ábaco do próprio fabricante.

Figura 4-8 - Cravabilidade para E1190 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca simples



FONTE: Adaptado de MULLER (2012).

Pelo método apresentado por Ernst & Sohn (2004) e pelo COE (1997; 2004), aplicando-se a equação 2-7, ambos os martelos, MS-50 H3 e o ABI MRZV-18 V, atenderiam as condições mínimas desse método para julgar o martelo adequado para emprego na obra do estudo de caso.

A verificação pelo método apresentado em CUR166 (2012) descrito no capítulo 2, aplicando a equação 2-11, considerando o peso dinâmico do martelo ABI MRZV – 18V (2.730 kg) e o peso da estaca AZ-19 700 de 1040 kg, temos que essa amplitude mínima requerida seria de 0,5 cm. De acordo com a Tabela 3-2 o martelo ABI MRZV-18V possui amplitude de 2,6 cm, portanto, considerada adequado ao emprego por esse método.

Aplicando-se a mesma metodologia para o martelo MS-50 H3, com peso dinâmico de 3.820 kg, a amplitude requisitada seria de 1,02 cm, inferior à desse modelo de martelo, conforme Tabela 3-3.

Assim, considerando-se a equação proposta em CUR166 (2012) tanto o martelo ABI MRZV 18-V quanto o MS 50 H3 seriam capazes de cravar a estaca AZ 19-700 a profundidade de 13 m.

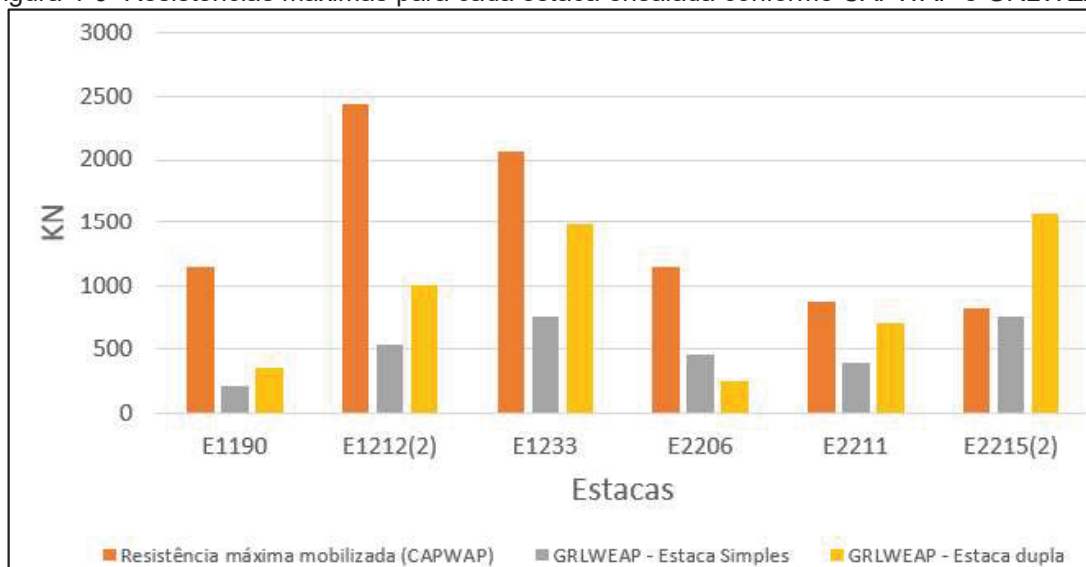
Os métodos Azzouzi e Vibdrive, além de outros parâmetros utilizam resultados de ensaio de cone (CPT), ensaio esse não aplicado no estudo de caso em questão, de maneira que a aplicação desses dois métodos foi impossibilitada.

### **4.3 Discussão dos resultados**

O GRLWEAP é um software de análise de cravabilidade e previsão de resistência de estacas cravadas por martelo de impacto ou de vibração, que pode ser empregado para selecionar o martelo mais adequado para uma determinada obra com base em conceitos de resistência do solo, capacidade do martelo, e interação do conjunto martelo, estaca e solo através da equação de onda solucionada pelo método de Smith (1960), traduzindo todo o conjunto em sistema de amortecedores e molas, de modo que aumentando-se o valor de *quake* a capacidade de penetração diminui, pois a resistência estática considerada aumenta.

Na Figura 4-9 está ilustrado o que a Tabela 4-1 apresenta numericamente para as resistências calculadas pelo CAPWAP e pelo GRLWEAP considerando estacas AZ-19 700 simples e duplas.

Figura 4-9—Resistências máximas para cada estaca ensaiada conforme CAPWAP e GRLWEAP



FONTE: O autor, 2021

Pode-se notar que a resistência calculada pelo CAPWAP com base no ensaio PDA, em geral são superiores ao previsto pelo GRLWEAP, tanto considerando estacas AZ19 700 simples, quanto estacas AZ19 700 duplas, com exceção da estaca E2215, em que a modelagem para estaca simples ficou bem próximo aos valores do CAPWAP e considerando estaca dupla na modelagem do GRLWEAP a resistência foi superior a calculada pelo CAPWAP.

Considerando a estaca simples na modelagem GRLWEAP, o valor previsto de carga última para a estaca com comprimento cravado mais próximo ao previsto em projeto, a E1233, com 12,71 m cravados, seria 761 kN, cerca de 3 vezes a carga de trabalho de projeto (220 kN).

Na análise CAPWAP, para se obter resultados próximos aos medidos em campo, foram utilizados valores de *quake* e *damping* que correspondem aos orientados pelo fabricante do *software* (PDI), próximos aos apresentados na Tabela 2-14.

Conforme bibliografia pesquisada o valor para o *quake* pode ser até mesmo da ordem de 10 a 30 mm, para solos com características mais elásticas, contudo durante a modelagem no GRLWEAP optou-se por manter os valores de *quake* e *damping* mais próximos dos utilizados na análise CAPWAP. Porém,



conforme verificado através da Figura 4-7 os valores de *quake* que melhor representaria um solo siltoso a coesivo da Formação Guabirota seja superior ao utilizado na modelagem pelo CAPWAP e o GRLWEAP, se aproximando de 10 mm.

Para a cota de projeto das referidas estacas a previsão através do GRLWEAP é de que todas atingiriam resistência superior à de trabalho prevista em projeto de 220 kN, convergindo com o que foi verificado no ensaio PDA, embora o GRLWEAP tenha apresentado de maneira geral previsão de carga inferior a verificada pelo PDA.

Observa-se, para o caso em estudo, certa dificuldade em convergir os resultados apresentados pelo *software* GRLWEAP mesmo quando se detém informações do ensaio PDA analisados pelo CAPWAP, ressaltando que os valores apresentados na análise CAPWAP são definidos indiretamente com base nas leituras de campo do ensaio PDA, não sendo, portanto, definitivos.

A análise pelo GRLWEAP, apresentou resultados de resistência consideravelmente menores do que as obtidas pela análise CAPWAP do ensaio PDA, na maior parte dos casos analisados mesmo considerando-se estacas duplas.

O motivo da diferença entre a previsão de carga pelo GRLWEAP e o ensaio PDA pode ser atribuída a alguns fatores com base na pesquisa bibliográfica e observações de campo. No software não há recursos para considerar a excentricidade da estaca, atrito entre conectores das estacas e possíveis deformações existentes na estaca decorrente de manuseio e estoque. Ou seja, o GRLWEAP considera a cravação sem perdas dessas naturezas.

Além da questão da excentricidade uma hipótese é a condição de cortina em que as estacas se encontram em campo, de forma que quando se mobiliza uma estaca no ensaio PDA, as estacas adjacentes à estaca ensaia podem influenciar no resultado.

Existem métodos específicos para seleção de martelos vibratórios, embora alguns sejam simplórios e desenvolvidos por meios empíricos, como o caso do CUR, EAU e ábacos de fabricantes. A critério de comparação foi verificado através desses métodos se os martelos empregados na obra estariam adequados, e por todos os métodos supracitados os martelos seriam capazes de cravar as estacas até a cota prevista no projeto. Ressalta-se que esses

métodos não consideram boa parte das variáveis que ocorrem em campo e podem dificultar a cravação.

Das 918 estacas a serem cravadas, 363 apresentaram maior dificuldade de cravação, ou seja, com cerca de 60% das estacas não tiveram problemas em atingir a cota prevista em projeto, com as estacas sendo cravadas rapidamente pelo ABI MRZV 18 V até a profundidade de 8m, ressalta-se que estes eram perfis GU8N e PU8-HWS, seções com menor excentricidade em relação a seção AZ19-700.

Embora o martelo ABI-MRZV 18V não tenha sido simulado percebe-se a variação de resistência calculadas para as estacas ensaiadas, o que levanta a questão da capacidade do martelo empregado, pois existem estacas com 825 kN a 2437 kN de resistência mobilizada, conforme análise PDA. O que leva a crer que o limite de cravação não se deu por conta da capacidade do martelo, mas sim por fatores envolvendo qualidade da execução em garantir a verticalidade as estacas com uso de gabaritos de cravação e sequência de cravação alternada por painel de estacas.

## 5 CONCLUSÃO

Esse trabalho atendeu aos objetivos de descrever os fatores que influenciam a cravabilidade de estacas prancha metálicas por vibração, relatar a experiência deste método de cravação em solo da Formação Guabirotuba e a avaliação através de prova de carga dinâmica, utilizado para análise de cravabilidade auxílio do *software* GRLWEAP aplicadas a um estudo de caso localizado na cidade de Curitiba-PR.

Através da interpretação dos modelos elaborados com informações advindos do CAPWAP e nos resultados apresentados na Tabela 4-3 e ilustrados na Figura 4-7 bem como da aplicação dos métodos empíricos e semiempíricos conclui-se que os martelos empregados seriam suficientes para cravar as estacas até a cota de projeto. Porém, a facilidade de cravação prevista com auxílio do GRLWEAP ou através dos demais métodos conforme descritos no capítulo anterior, não se apresentou em campo.

Com base na bibliografia estudada e na experiência de campo algumas variáveis podem ter contribuídos para a dificuldade da cravação para ambos os martelos empregados, além das impostas pelo próprio solo, sendo: atrito entre os conectores, excentricidade da estaca em relação a pinça do martelo, falta de cuidado no manuseio das estacas no canteiro podendo causar deformações e rudimentar controle de verticalidade das estacas durante a cravação.

Conforme análise da influência do *quake* e do *damping* sobre a taxa de penetração da estaca, demonstrada na Figura 4-7 os valores dessas variáveis tanto no modelo do GRLWEAP e CAPWAP poderiam ser maiores do que os de fato empregados para o tipo de solo da Formação Guabirotuba.

A formulação de equações e métodos para seleção de martelos vibratórios com precisão é ainda incipiente no Brasil e sem métodos consolidados internacionalmente. Muito embora uns possam ser mais avançados do que outros, ressalta a desconsideração do atrito nos conectores não considerado em diversos métodos de análise de cravabilidade, com exceção ao Vibdrive.

Com relação ao ensaio de PDA, o tempo de realização após a cravação foi de 110 a 220 dias desde a data de cravação, o que influi na cicatrização do solo, e assim as condições do dia em que a estaca foi cravada e no dia em que

foi ensaiada são diferentes. Como é um solo com siltoso a argiloso, rijo inclusive, entende-se que houve um ganho de resistência desde o dia de cravação até o dia do ensaio.

Destaca-se que embora a parada das estacas tenha sido determinada quando instintivamente o operador percebeu a interrupção do avanço da estaca, não houve qualquer tipo de monitoramento quanto ao tempo de avanço da estaca para que se possa estabelecer um comparativo entre as recomendações citadas neste trabalho e o que ocorreu em campo.

Para a calibração de softwares que utilizam equação de onda como modelo matemático como o caso do GRLWEAP, para adequada definição do *quake* e *damping* uma sugestão seria cravar uma estaca teste isoladamente, instrumentá-la para ensaio PDA, realizar as leituras para só então cravar as estacas adjacentes e novamente realizar o ensaio PDA. Dessa forma a influência ou não das estacas adjacentes à estaca ensaiada ficaria evidenciada.

Essa experiência de emprego de martelo vibratório para cravação de estacas prancha na cidade de Curitiba em solo da Formação Guabirota, estando relatada neste trabalho somada às dificuldades encontradas poderão ser comparadas a experiências futuras e assim melhor compreendidas, principalmente se forem mais ricamente instrumentadas, controladas e estudos a fim de estabelecer valores *quake* e *damping* para o solo local forem desenvolvidos.

## REFERÊNCIAS

ABI. Vibratoren MRZV-V. Germany, 2018.

ALONSO, U. R. Primeira tentativa para seleção de martelos vibratórios na cravação de estacas metálicas em solos da costa brasileira e critério de controle durante a cravação dessas estacas usando esse tipo de martelo. In: WORKSHOP ABMS-NRMG, Belo Horizonte. 2019.

ALONSO, U. **II Workshop Brasileiro sobre Cravação de Estacas com Uso de Martelo Vibratório**. 2020. Canal ABMS. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=qxUq6MwxfaU&t=23s&ab\\_channel=CanalABMSCanalABMS](https://www.youtube.com/watch?v=qxUq6MwxfaU&t=23s&ab_channel=CanalABMSCanalABMS). Acesso em: 30 nov. 2020

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 4945**: Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles. Philadelphia: ASTM, 1989.

ARCELORMITTAL (Luxembourg). **Piling Handbook**. 9. ed. Luxembourg: ARCELORMITTAL, p 455. 2016.

ARCELORMITTAL (Luxembourg). **Instalation Guideline**. Luxembourg: ARCELORMITTAL, p. 39, 2018.

ARCELORMITTAL. **Paulo Autran Tunnel**: the first roadworks in Latin America with steel sheet piles. The first roadworks in Latin America with steel sheet piles. 2008. Disponível em: [encurtador.com.br/iuvEW](http://encurtador.com.br/iuvEW). Acesso em: 07 maio 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.208**: Estacas - Ensaio de carregamento dinâmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

BAARS, S. Van. **Design of sheet pile installation by vibration**. **Geotechnical and Geological Engineering**, vol. 22, p. 391-400, 2004.

BARKAN, D. D. **Dynamics of Bases and Foundations**. Nova York: McGraw-Hill Book CoMPany, 1962.

BARROS, M. M. S. B. de. – **Metodologia para implantação de tecnologia construtiva racionalizada na produção de edifícios**, 1996. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo, S.P

BAUER, F. Relatório de acompanhamento. Curitiba, 2020. Não publicado.



BIGARELLA, J.J., SALAMUNI, R. **Caracteres texturais dos sedimentos da Bacia de Curitiba**. *Boletim da Universidade Federal do Paraná*, 7, p.1-164, 1962.

CINTRA, José Carlos A. *et al.* **Fundações**: ensaios estáticos e dinâmicos. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CORPS OF ENGINEERS. Unified Facilities Criteria (UFC): Pile Driving Equipment. Washington, DC. COE, 1997.

CORPS OF ENGINEERS. Unified Facilities Criteria (UFC): Pile Driving Equipment. Washington, DC. COE, 2004.

CUR166. Damwandconstructies, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, CUR, Gouda NL, 1996.

DENIES, N. **Dynamic behavior of vibrated dry sand**: sphere penetration experiments and discrete element modeling of vibrofluidization. 2010. 278 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Université Catholique de Louvain, Bélgica, 2010.

DECKNER, F. **Ground vibrations due to pile and sheet pile driving**: influencing factors, predictions, and measurements. 126 f. TCC (Graduação) – School of Architecture and the Built Environment, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2013.

DELTARES. D-Sheet Piling, **Design of diaphragm and sheet pile walls – User manual**. Netherlands, 2016.

EN 12.063. **Execution of Special Geotechnical Works – Sheet Pile Walls**, 1999

ERNST & SOHN. Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2004. 8 ed, 2004.

FALCÃO, J. M. F. de L. **Driveability Study for XL Offshore Monopile Foundations**. Mestrado. Faculdade de engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 2016.

FALCONI, F. **II Workshop Brasileiro sobre Cravação de Estacas com Uso de Martelo Vibratório**. Canal ABMS. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=qxUq6MwxfU&t=23s&ab\\_channel=CanalABMSCanalABMS](https://www.youtube.com/watch?v=qxUq6MwxfU&t=23s&ab_channel=CanalABMSCanalABMS). Acesso em: 30 nov. 2020

FIORI, A. P.; SALAMUNI, E. **Twin Cities: Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba**. Geologia de Curitiba e Arredores. São Paulo: ABMS, 2012.

FERRON, D. **Eindringveralten von Spundwändenbohlen und Rammbarkeit von Böden bei der Vibrationsrammung**. Diplomarbeit Nr. 326653, Fachgebiet Bodenmechanik und Grundbau, Universität Kaiserslautern, 2001.

- FUGRO. Ensaio de Carregamento Dinâmico. Curitiba, 2020. Não publicado.
- GERDAU. **Estacas metálicas Gerdau**. 8. ed. Brasil: Gerdau, 2015.
- GERSCOVICH, D.; DANZIGER, B.D.; SARAMAGO, R. **Contenções**: teoria e aplicações em obras. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.
- GONÇALVES, C.; ANDREO, C.S.; BERNARDES, G.P. **Ensaio de Carregamento Dinâmico**. Guarulhos São Paulo: Estacas Benaton, 1996.
- GUILLEMET, Claire. **Pile-Soil Interaction during Vibratory Sheet Pile Driving: a full-scale field study**. 2013. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Division of Soil and Rock Mechanics, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2013.
- GUSMÃO, A. D. **II Workshop Brasileiro sobre Cravação de Estacas com Uso de Martelo Vibratório**. Canal ABMS. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=qxUq6MwxfaU&t=23s&ab\\_channel=CanalABMS](https://www.youtube.com/watch?v=qxUq6MwxfaU&t=23s&ab_channel=CanalABMS). Acesso em: 30 nov. 2020.
- HARPOTH, M. H. **Development of driveability model for piles for offshore wind turbines**. Master thesis. Aalborg University, 2017.
- HANNIGAN P. J.; GOBLE, G. G.; LIKINS, G. E; RAUSCHE, F. **Design and Construction of Driven Pile Foundations** - Workshop Manual Volumes 1 and 2. Publication Numbers FHWA-HI-97-013 & 14. Washington, D.C., US Department of Transportation, Federal Highway Administration. v2. 1998.
- HEAD, J.M.; JARDINE, F.M. **Ground-borne vibrations arising from piling**. CIRIA Technical Note 142. CIRIA, London, U.K. 83 p. ISBN 0-86017-351-8, 1992.
- HOLEYMAN A. HIPERVIB-II, **A detailed numerical model proposed for future computer implementation to evaluate the penetration speed of vibratory driven sheet piles**. Research report for BBRI. EarthSpectives, Irvine, Ca, USA, p. 54, 1993.
- HOLEYMAN, A. **Vibratory driven piles, Vibratory pile Driving and Deep Soil Compaction**, Valkema Publishers, Lisse, p. 3-30. 2002.
- HOLEYMAN, A. **Soil Behavior under Vibratory Driving**. Swets & Zeitlinger, Lisse. 2002.
- JIACHEN, N. **A study on pile setup of driven steel pipe in Edmonton Till**. Tese de mestrado. University of Calgary. Calgary, AB. 2018.
- JONKER G. **Vibratory Pile Driving Hammers for Oil Installation and Soil Improvement Projects**. 19th Annual Offshore Technology Conference. Dallas, Texas, 1987.

KORMANN, A. C. M. **Comportamento Geomecânico da Formação Guabirotuba**: estudos de campo e laboratório. 2002. 429 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002

KORMANN, A.C.M.; CHAMECKI, P.R.; BOSZCZOWSKI, P.B.; NASCIMENTO, N.A. **Ensaio de cisalhamento direto em argila rija da Formação Guabirotuba**: Influência da velocidade de deslocamento, In: Mesa redonda características geotécnicas da Formação Guabirotuba, Curitiba, Anais. Curitiba ABMS/UFPR. p.29-36, 1999.

LIMA, F.M., FERNANDES, L.A., MELO, M.S., GÓES, A.M., MACHADO, D. A. M. **Faciologia e contexto deposicional da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba (PR)**. *Brazilian Journal of Geology*, 43(1), p.168-184, 2013.

MASSAD, F. **Escavações a céu aberto em solos tropicais**: região centro-sul do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MASSAD, F., ROCHA, J. L. R., YASSUDA, A. J. Algumas características geotécnicas de solos da Formação Guabirotuba, In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, *Anais. S.L.*: s.n., p. 706-723, 1981.

MASSARSCH, K. R. Vibratorers användningsmöjligheter vid drivning av pålar och spont., Rapport 99, Pålkommissionen, 2010.

MASSARSCH, K.R.; FELLENIUS, B.H.; BODARE, A. Fundamentals of vibratory driving of piles and sheet piles. Geotechnik, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, p. 116, 2017

MILITITSKY, J. **Grandes escavações em perímetro urbano**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MULLER. *Parameters, equipment selection and operating principle*. 24p, 2013

MULLER, *Vibrator technology*, 2017.

O'NEIL, M. W.; CUMARASWAMY V.; WONG, O. D. **Evaluation of bearing capacity of vibro-driven piles from laboratory experiments**. Huston, 2000.

OLAVO, L. H. F.; REGO, A. A.; DEBAS, L. F. **Twin Cities: Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba**. Fundações Profundas, a Experiência Regional. São Paulo: ABMS, 2012.

PASSINI, L. B.; BENETTI, L. B.; KORMANN, A.C.M. **Pile setup over a period of seven years based on dynamic load tests in overconsolidated clay**. Soils and Rocks. São Paulo, 40, p 17-30, 2017.

PDI. GRLWEAP, **Wave Equation Analysis of Pile Driving**: Procedures and Models Version 2005. Ohio, 2005.

PDI. GRLWEAP, **Wave Equation Analysis of Pile Driving**: Procedures and Models Version 2010. Ohio, 2010.

RELATÓRIO DE PROJETO. Curitiba, 2020. Não publicado.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L.G.; FERRARI, A.L. **Evolução geológica do rifte Continental do Sudeste do Brasil**. In: NETO, V. M.; BARTORELLI, A., CARNEIRO, C.D.R., NEVES, B.B.B. (eds). *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, São Paulo, Beca Editora, p. 383–405, 2004

ROODUIJN M. P.; GJIT, J.G. Handboek Hei- en Trilbaarheid. SBRCURnet, 2017.

SEDDOR, F.A.; OLIVEIRA, E.V.; SILVA, D.D., FERNANDES, L.A.; CUNHA, R.F.; RIBEIRO, A.M.; DIAS E.V. **A new South American Paleogene Land Mammal Fauna, Guabirotuba Formation (nouthern Brazil)**. *Journal of Mammalian Evolution*, 24(1), p.39-55, 2017.

SALAMUNI, E. **Tectônica da bacia sedimentar de Curitiba (PR)**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 214p. 1998.

SALAMUNI E.; SALAMUNI R.; EBERT H.D. Contribuição à geologia da Bacia Sedimentar de Curitiba. Boletim Paranaense de Geociências, (47):123-142, 1999

SCI – Steel Construction Institute. **Design Guide for Steel Sheet Pile Bridge Abutments**. Ascot, Berkshire, 1998.

SEDDOR F.A.; DIAS E.V.; FERNANDES L.A.; LIMA F.F.; VARGAS J.C.; SILVA D.D. 2017b. **Geossítio Bacia sedimentar de Curitiba (Formação Guabirotuba)**: características, importância paleontológica e conservação. In: IV Simpósio brasileiro de patrimônio geológico & II Encontro luso-brasileiro de patrimônio geomorfológico e geoconservação. Ponta Grossa, Anais, p. 152-156.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo**: e suas aplicações à engenharia de fundações. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. (2).

SENA, R. D; OLIVEIRA, J.D; GUSMÃO, A. D. O uso de martelo vibratório em obras no Grande Recife. In: COBRAMSEG 2016, 18., 2016, Belo Horizonte. **Congresso**. Belo Horizonte: ABMS, 2016. p. 1-13

SINKE, J. M. **A probabilistic approach to sheet pile driveability predictions by vibro hammers**. Dissertação (Mestrado) – Delft University of Technology. Delft, 2020.

SMITH, E. A. L. Pile Driving Analysis by the Wave Equation. ASCE, 1960.

STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE (SCI). Design Guide for Steel Sheet Pile Bridge Abutments. Berkshire, 1998.

THYSSENKRUPP (Germany). **Sheet Piling Handbook Design**. Essen: Thyssenkrupp, 2008

TROMBELI, G.A. **Contenção com perfis de aço**: comparação entre o sistema tradicional e o sistema com pré-moldado de concreto. 2008. 68 f. Monografia (Especialização) - Curso de MBA, Programa de Educação Continuada em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008

TÜNKERS. **O Nascimento do Projeto Túnel Paulo Autran**. Disponível em: [encurtador.com.br/fqwP4](http://encurtador.com.br/fqwP4). Acesso em: 07 maio 2020.

VANDEN, B. J. F. **Sand Strength Degradation within the Framework of Vibratory Pile Driving**. PhD thesis presented to the Faculty of Applied Science, Université catholique de Louvain, Belgium, 2001.

VANDEN, B. J. F. HOLEYMAN, A. **Application of a hypoplastic constitutive law into a vibratory pile driving model**. International conference on vibratory pile driving and deep soil compaction, Louvain-La Neuve, Belgium, 9-10, p. 61-68, September 2002.

VIKING, K. **Vibro-Driveability**: a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils. 2002. 286 f. Tese (Doutorado) - Division of Soil and Rock Mechanics, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002.

VIKING, K.; GREEN, J.; NILSSON, C. O, **Fältstudier av vibro-installerad spants drivbarhet.**, 13th Nordic Geotechnical Conf. on Geotechnics and Sustainable Development., Helsinki, June 5 - 7, 2000.

VUCETIC, M. DOBRY, R. (1991). **Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response**. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 89-107.

WARRINGTON; D. C. **Driveability of piles by vibration**. Deep Foundation Institute 14th Annual Member Conference, 1989

WHENHAM, V; HOLEYMAN, A. **Vibrodriving prediction models vs. experimental results**. Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. San Diego, 2010.



## APÊNDICE A – ANÁLISES GRLWEAP (2005)

A análise das estacas E1212, E1233, E2206, E2211 e E2215 quanto a resistência última e cravabilidade estão descritos na sequência desse apêndice em complemento ao item 4.1 do capítulo 4.

Da mesma forma que foi realizado a análise da estaca E1190, a modelagem no GRLWEAP foi inicialmente realizada com os dados de *quake* e *damping* conforme análise CAPWAP a fim de se obter resultados similares de deslocamento e de resistência última. Na Figura A 1 estão os valores de inputs no GRLWEAP com base nos resultados do CAPWAP e na Figura A 2 os inputs de solo com base nas sondagens SPT.

Figura A 1 – Inputs para análise da Estaca E1212 no GRLWEAP

MARTELO DE QUEDA E1212

**Hammer Information**  
 Select from following list [28/08/2009-2003]: ID: 2001

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
1335	MENCK MHU3000S	ECH	1647.517	3006.451
2001	BSP SL30	ECH	25.000	30.000

**Hammer parameters**  
 Efficiency 0.3  
 Stroke 0.9 m  
 Type: ECH  
           Insp.

**Pile material**  
 Concrete     Steel     Timber

**Cushion Information**

	Hammer	Pile	
Area	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">1600.</span>	<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">0.</span>	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">2500.</span>	<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">0.</span>	MPa
Thickness	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">200.</span>	<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">0.</span>	mm
C.O.R.	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">0.8</span>	<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">0.</span>	
Stiffness	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">0.</span>	<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">0.</span>	kN/mm
Helmet Weight	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">9.1</span>		kN

**Ultimate Capacity**

	Shaft	kN	Toe
1	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">2437.0</span>		<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">6</span> <span style="background-color: yellow; padding: 2px;">2520.0</span>
2	<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">840.0</span>		<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">7</span> <span style="background-color: yellow; padding: 2px;">2940.0</span>
3	<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">1260.0</span>		<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">8</span> <span style="background-color: yellow; padding: 2px;">3360.0</span>
4	<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">1680.0</span>		<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">9</span> <span style="background-color: yellow; padding: 2px;">3780.0</span>
5	<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">2100.0</span>		<span style="background-color: yellow; padding: 2px;">10</span> <span style="background-color: yellow; padding: 2px;">4200.0</span>

 Incr. 0    Action >>

**Soil Parameters**

**Quake**  
 Shaft 0.992 mm Const  
 Toe 0.628 mm

**Damping**  
 Shaft 0.257 s/m Const  
 Toe 0.804 s/m Smith

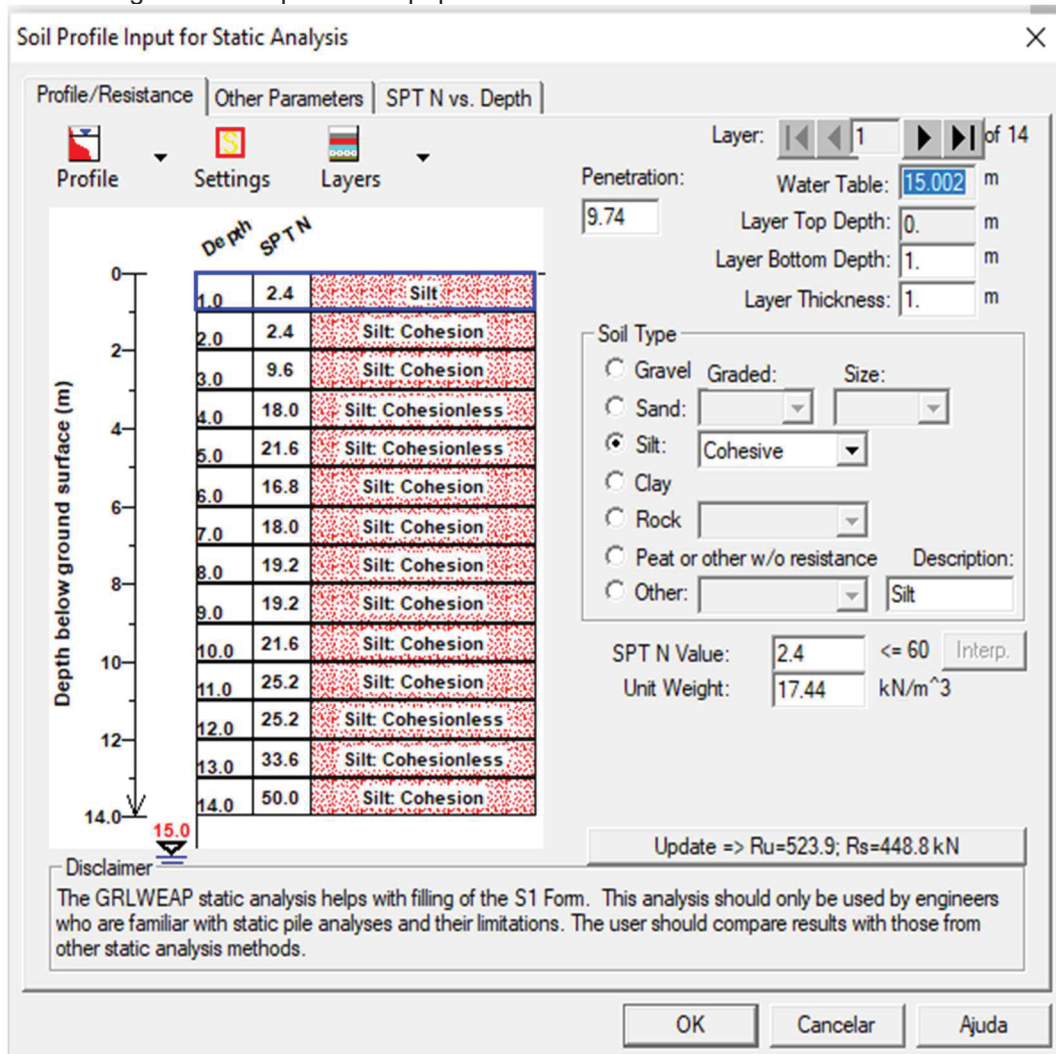
**Shaft Resistance**  
 Percentage 86 %  
 Dist. Shape Num 0.0

**Residual Stress Analysis:** No

**Pile Information**

Length	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">10.94</span> m	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Auto</span>	Segments
Penetration	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">9.74</span> m	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Auto.</span>	S-Length
Section Area	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">206.4</span> cm <sup>2</sup>	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Auto.</span>	S-St. Wt
Elast Modulus	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">210000.</span> MPa		
Spec Weight	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">77.5</span> kN/m <sup>3</sup>		
Toe Area	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">206.4</span> cm <sup>2</sup>	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0</span>	Splices
Perimeter	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">1.72</span> m		Pile Type:
Pile Size	<span style="background-color: black; color: white; padding: 2px;">0.</span> mm		<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Sheet Pile</span>

Figura A 2 – inputs de N<sub>spt</sub> para análise da Estaca E1212 no GRLWEAP



Na Figura A 3 estão os resultados da modelagem no GRLWEAP para a estaca E1212, em que a resistência última de 2.437 kN é obtida com o martelo de queda livre à altura de 0,9 m com deslocamento previsto de 0,12 mm, similar ao previsto pela análise CAPWAP. Portanto, dessa forma foi assumido que os dados de *inputs* estão adequados.

Figura A 3 – Resultados obtidos para E1212 – inputs baseados nos resultados do CAPWAP

Rult kN	Set mm	BlCt Bl/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	ENTHRU kJ	ActRes kN	Stroke m
2437.	0.12	8000.6	1674.3	89.400	21.863	5.1	2437.	0.9
2437.	0.17	5893.3	1691.6	91.056	22.159	5.3	2437.	0.9
2437.	0.21	4654.6	1724.8	92.656	22.317	5.5	2437.	1.0
2437.	0.26	3844.9	1757.6	94.177	22.324	5.6	2437.	1.0
2437.	0.31	3263.2	1789.8	95.681	22.246	5.8	2437.	1.0
2437.	0.35	2839.0	1821.0	97.284	22.003	6.0	2437.	1.1
2437.	0.40	2513.2	1851.2	98.812	21.621	6.2	2437.	1.1
2437.	0.44	2254.2	1880.5	100.300	21.160	6.4	2437.	1.1
2437.	0.49	2039.9	1909.0	101.756	20.504	6.6	2437.	1.2
2437.	0.54	1859.8	1939.6	103.180	19.670	6.8	2437.	1.2

Mantendo-se os *inputs* demonstrados na Figura A 1 e Figura A 2 e substituindo o martelo para o MS50-H3 fica claro que a resistência medida no PDA calculada pelo CAPWAP de 2437 kN, não seria mobilizada pelo martelo vibratório em qualquer variação de sua frequência, como mostrado Figura A 4.

Figura A 4 – Resultados obtidos para E1212 – Análise para martelo MS50-H3

Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
2437.	0.10	9999.0	1078.1	52.236	37.978	0.0	1749.	10.0
2437.	0.10	9999.0	1164.8	56.433	41.667	0.0	1854.	11.9
2437.	0.10	9999.0	1187.6	57.541	44.690	0.0	1823.	13.8
2437.	0.10	9999.0	1323.9	64.141	50.565	0.0	1974.	15.7
2437.	0.10	9999.0	1373.6	66.552	53.826	0.0	1971.	17.6
2437.	0.10	9999.0	1403.0	67.974	56.914	0.1	1888.	19.4
2437.	0.10	9999.0	1417.5	69.404	54.357	0.2	1508.	21.3
2437.	0.10	9999.0	1655.9	81.266	63.592	0.4	1783.	23.2
2437.	0.10	9999.0	1899.7	93.591	88.699	1.0	2059.	25.1
2437.	0.10	9999.0	2149.3	106.168	110.841	3.5	2437.	27.0

Quando analisado a recavação da estaca no GRLWEAP (*gain/loss*=1), como mostrado na Figura A 5 pelo martelo de vibração, demonstra que para a estaca com 9,9 m de comprimento cravado a máxima resistência esperada seria de apenas 543 kN a uma taxa de penetração de 121 mm/s, bem distante dos 2437 kN calculados no CAPWAP e com penetração muito mais fácil do que os 10 mm/s que indicariam parada de cravação conforme Falconi (2020) ou a técnica europeia de 8 mm/s.

Figura A 5 – Cravabilidade para E1212 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca simples

Depth m	G-Ls	G-Lt	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00/1.00		11.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00/1.00		28.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00/1.00		54.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
4.0	1.00/1.00		141.	504.11	2.0	552.2	26.754	12.455	2.6	141.	26.00
5.0	1.00/1.00		225.	298.92	3.3	475.6	23.044	12.265	4.3	225.	26.00
6.0	1.00/1.00		242.	297.46	3.4	581.2	28.157	16.761	5.2	242.	26.00
7.0	1.00/1.00		305.	237.40	4.2	747.5	36.216	23.875	6.7	305.	26.00
8.0	1.00/1.00		377.	189.32	5.3	900.2	43.614	30.795	8.1	377.	26.00
9.0	1.00/1.00		458.	149.77	6.7	1035.9	50.313	37.897	9.1	458.	26.00
9.9	1.00/1.00		543.	121.12	8.3	1167.2	56.550	45.276	10.1	543.	26.00

Ainda que considerando a estaca dupla de AZ19-700 a resistência máxima calculada pelo GRLWEAP foi de 1003 kN quando esta atingisse a taxa de penetração de 49 mm/s (Figura A 6).

Figura A 6 – Cravabilidade para E1212 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca dupla

Depth m	G-Ls	G-Lt	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00/1.00		15.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00/1.00		43.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00/1.00		87.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
4.0	1.00/1.00		224.	332.50	3.0	630.5	30.548	13.140	4.4	224.	26.00
5.0	1.00/1.00		374.	194.21	5.1	872.3	42.261	29.101	7.8	374.	26.00
6.0	1.00/1.00		437.	171.92	5.8	1042.5	50.546	38.306	8.9	437.	26.00
7.0	1.00/1.00		553.	127.90	7.8	1224.2	59.641	49.416	10.3	553.	26.00
8.0	1.00/1.00		689.	95.24	10.5	1418.3	69.243	61.008	11.7	689.	26.00
9.0	1.00/1.00		842.	69.75	14.3	1601.8	78.349	71.115	12.5	842.	26.00
9.9	1.00/1.00		1003.	49.54	20.2	1732.5	84.175	78.055	12.2	1003.	26.00

Realizando a análise considerando a situação de recravação, ou seja, com a cicatrização desenvolvida e a situação em que não há o ganho de resistência pela cicatrização, ou seja, com redução da resistência pelo coeficiente de *gain/loss* definido em 0,4 conforme cálculo baseado nas considerações apresentadas no capítulo 2 desse trabalho. Caso o martelo MS50-H3 fosse empregado não para recravação, mas para a primeira cravação da estaca enfrentaria uma resistência ainda menor, de 263,1 kN, a uma taxa de penetração de 4,1 s/m para a profundidade de 9,9 m, como demonstrado na Figura A 7.



Figura A 7 – Cravabilidade para E1212 – Análise para martelo MS50-H3 para *gain/loss* = 1 e 0,4

Gain/Loss 1 at Shaft and Toe 1.000 / 1.000								
Depth m	Ultimate Capacity kN	Friction kN	End Bearing kN	Penetration Time sec/m	Comp. Stress MPa	Tension Stress MPa	Frequency Hz	Power kw
1.0	11.2	4.0	7.2	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0
2.0	27.9	15.2	12.6	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0
3.0	53.8	33.7	20.1	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0
4.0	140.6	84.1	56.5	2.0	26.754	-12.455	26.0	2.6
5.0	224.6	151.5	73.1	3.3	23.044	-12.265	26.0	4.3
6.0	241.7	197.2	44.6	3.4	28.157	-16.761	26.0	5.2
7.0	304.5	251.9	52.7	4.2	36.216	-23.875	26.0	6.7
8.0	376.6	315.7	60.8	5.3	43.614	-30.795	26.0	8.1
9.0	457.7	388.7	69.0	6.7	50.313	-37.897	26.0	9.1
9.9	542.6	465.8	76.8	8.3	56.556	-45.270	26.0	10.1

Gain/Loss 2 at Shaft and Toe 0.400 / 1.000								
Depth m	Ultimate Capacity kN	Friction kN	End Bearing kN	Penetration Time sec/m	Comp. Stress MPa	Tension Stress MPa	Frequency Hz	Power kw
1.0	8.8	1.6	7.2	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0
2.0	18.7	6.1	12.6	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0
3.0	33.6	13.5	20.1	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0
4.0	90.1	33.6	56.5	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0
5.0	133.7	60.6	73.1	2.1	26.869	-13.101	26.0	2.5
6.0	123.4	78.9	44.6	1.8	27.179	-13.568	26.0	2.5
7.0	153.4	100.7	52.7	2.3	26.608	-9.984	26.0	3.1
8.0	187.1	126.3	60.8	2.8	27.714	-10.282	26.0	3.8
9.0	224.5	155.5	69.0	3.4	23.315	-12.681	26.0	4.5
9.9	263.1	186.3	76.8	4.1	27.351	-16.225	26.0	5.3

Com relação a modelagem da estaca E1233, assim como ocorreu para a estaca E1212, os *inputs* de *quake* e *damping* com base no ensaio PDA e análise CAPWAP, como mostra a Figura A 8, ofereceram valores convergentes de deslocamento calculados pelo GRLWEAP como demonstrado na Figura A 9, porém com certa distância dos valores de tensão de compressão e de tração em relação aos calculados no CAPWAP.

Mantendo-se as mesmas configurações de solo e substituindo o martelo de queda utilizado para simular o ensaio de PDA pelo martelo vibratório MS50-H3 no GRLWEAP tem-se os resultados demonstrados na Figura A 10, verifica-se que o martelo vibratório só seria capaz de atingir a resistência calculada pelo CAPWAP, 2068 kN, operando a frequência máxima e quando a taxa de penetração fosse de 5065 s/m, ou seja, 0,2 mm/s, algo impossível.



Figura A 8 – inputs para análise da Estaca E1233 no GRLWEAP

**MARTELO DE QUEDA 1233**

Hammer Information  
 Select from following list [28/08/2009-2003]: ID: **2001**

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
1335	MENCK.MHU3000S	ECH	1647.517	3006.451
2001	BSP.SL30	ECH	25.000	30.000

Hammer parameters  
 Efficiency: **0.43**    Type: **ECH**    Insp.: **Insp.**

Stroke: **0.6** m

File material:  Steel     Timber

Cushion Information

Hammer		Pile	
Area	<b>1600.</b> cm <sup>2</sup>	<b>0.</b> cm <sup>2</sup>	
Elastic Modulus	<b>2500.</b> MPa	<b>0.</b> MPa	
Thickness	<b>200.</b> mm	<b>0.</b> mm	
C.O.P.	<b>0.8</b>	<b>0.</b>	
Stiffness	<b>0.</b> kN/mm	<b>0.</b> kN/mm	
Helmet Weight	<b>9.1</b> kN		

Ultimate Capacity

Shaft	Toe
1	<b>2069.2</b>
2	<b>840.0</b>
3	<b>1260.0</b>
4	<b>1680.0</b>
5	<b>2100.0</b>
Incr.	<b>0</b>

Soil Parameters

Quake  
 Shaft: **0.959** mm    Const  
 Toe: **1.004** mm    mm

Damping  
 Shaft: **0.134** s/m    Const  
 Toe: **0.358** s/m    Smith

Shaft Resistance Percentage: **88** %

Dist. Shape Num: **0.0**

Residual Stress Analysis: **No**

File Information

Segments	S-Length	S-St. Wt
<b>12.71</b> m	<b>Auto.</b>	<b>Auto.</b>
<b>11.51</b> m	<b>Auto.</b>	<b>Auto.</b>
<b>206.4</b> cm <sup>2</sup>	<b>Auto.</b>	<b>Auto.</b>
<b>210000.</b> MPa		
<b>77.5</b> kN/m <sup>3</sup>		
<b>206.4</b> cm <sup>2</sup>	<b>0</b>	Splices
<b>1.72</b> m		File Type:
<b>0.</b> mm		Sheet Pile

**Soil Profile Input for Static Analysis**

Profile/Resistance | Other Parameters | SPT N vs. Depth

Profile: Settings Layers

Layer: **14** of **14**

Penetration: **11.51** m    Water Table: **15.002** m

Layer Top Depth: **13.** m

Layer Bottom Depth: **14.** m

Layer Thickness: **1.** m

Depth (m)	SPT N	Soil Type
1.0	4.8	Silt. Cohesion
2.0	6.0	Silt. Cohesion
3.0	6.0	Silt. Cohesion
4.0	19.2	Silt. Cohesion
5.0	22.8	Clay
6.0	18.0	Clay
7.0	20.4	Clay
8.0	18.0	Silt. Cohesion
9.0	20.4	Silt. Cohesion
10.0	22.8	Silt. Cohesion
11.0	36.0	Silt. Cohesion
12.0	30.0	Clay
13.0	30.0	Clay
14.0	30.0	Rock

Soil Type:  Gravel Graded:  Sand:  Silt:  Clay:  Rock: **Hard** Description:  Peat or other w/o resistance:  Other:  Rock

SPT N Value: **30.**    Unit Weight: **21.**    For selected soil, you need to specify:    SPT N Value: **<= 60**    Interp.    Unit Weight: **kN/m<sup>3</sup>**

Friction: **0.**    End Bearing: **0.**    kPa

Update => Ru=1479.1; Rs=1445.7 kN

Disclaimer  
 The GRLWEAP static analysis helps with filling of the S1 Form. This analysis should only be used by engineers who are familiar with static pile analyses and their limitations. The user should compare results with those from other static analysis methods.

OK    Cancelar    Ajuda

Figura A 9 – Resultados obtidos para E1233 – inputs baseados nos resultados do CAPWAP

Rult kN	Set mm	BlCt Bl/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	ENTHRU kJ	ActRes kN	Stroke m
2068.	0.92	1092.6	1613.1	83.186	23.976	5.1	2068.	0.6
2068.	1.15	871.3	1708.1	87.725	23.630	5.7	2068.	0.7
2068.	1.37	727.3	1799.6	92.243	22.375	6.2	2068.	0.7
2068.	1.60	625.0	1887.7	96.369	19.154	6.8	2068.	0.8
2068.	1.82	549.5	1969.2	100.610	18.690	7.4	2068.	0.9
2068.	2.03	491.7	2053.4	104.451	25.788	8.1	2068.	0.9
2068.	2.25	445.2	2132.6	108.333	30.603	8.8	2068.	1.0
2068.	2.46	407.3	2206.9	112.146	30.579	9.5	2068.	1.1
2068.	2.66	376.0	2282.2	115.683	32.603	10.1	2068.	1.1
2068.	2.86	350.1	2355.6	119.097	33.150	10.8	2068.	1.2

Figura A 10 – Resultados obtidos para E1233 – Análise para martelo MS50-H3

Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kw	ActRes kN	Freq 1/s
2068.	0.08	0.0	138.0	6.684	0.000	0.0	201.	0.6
2068.	0.25	3997.7	1168.6	56.619	44.287	0.0	2059.	3.5
2068.	0.69	1455.7	1189.3	57.622	45.437	0.0	2068.	6.5
2068.	2.55	391.8	1216.9	58.956	47.313	0.0	2068.	9.4
2068.	3.95	252.9	1254.3	60.768	49.306	0.0	2068.	12.3
2068.	3.32	301.1	1303.4	63.147	52.003	0.1	2068.	15.3
2068.	1.88	530.8	1376.8	66.708	54.716	0.0	2068.	18.2
2068.	3.31	301.7	1447.3	70.121	60.271	0.3	2068.	21.1
2068.	1.94	514.2	1540.6	74.641	66.319	0.5	2068.	24.1
2068.	0.20	5065.3	1680.9	81.438	72.871	0.7	2068.	27.0

Quanto a recavação, ao que indica a análise feita no GRLWEAP o martelo MS 50-H3 seria capaz de realizar, a uma taxa de penetração de 73,29 mm/s ou 13,6 s/m, operando a frequência máxima de 26 Hz, mobilizando uma resistência de 761 kN, como apresentado na Figura A 11 em que é considerada a estaca simples, ou única, sendo cravada.

Figura A 11 – Cravabilidade para E1233 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca simples

Depth m	G-Ls	G-Lt	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kw	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00/1.00		10.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00/1.00		27.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00/1.00		52.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
4.0	1.00/1.00		86.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
5.0	1.00/1.00		156.	479.90	2.1	608.5	29.483	16.873	3.3	156.	26.00
6.0	1.00/1.00		231.	319.22	3.1	702.7	34.044	19.304	5.2	231.	26.00
7.0	1.00/1.00		333.	223.22	4.5	837.5	40.578	32.664	7.7	333.	26.00
8.0	1.00/1.00		434.	154.31	6.5	950.3	46.255	40.004	8.7	434.	26.00
9.0	1.00/1.00		514.	123.30	8.1	1084.7	52.927	47.374	9.6	514.	26.00
10.0	1.00/1.00		614.	95.31	10.5	1242.5	60.685	55.289	10.7	614.	26.00
11.0	1.00/1.00		785.	60.13	16.6	1453.6	71.017	65.791	12.0	785.	26.00
11.5	1.00/1.00		761.	73.29	13.6	1538.5	74.957	68.815	12.0	761.	26.00

Para a estaca dupla, com resultados apresentados na Figura A 12, a taxa de penetração seria menor, 25,43 mm/s ou 39,3 s/m, porém ainda longe

dos 10 mm/s como critério de parada indicado por Falconi (2020) ou os 8 mm/s conforme indicados por Viking (2002).

Figura A 12 – Cravabilidade para E1233 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca dupla

Depth m	G-Ls	G-Lt	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00/1.00		13.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00/1.00		41.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00/1.00		84.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
4.0	1.00/1.00		144.	541.65	1.8	545.3	26.421	17.320	2.8	144.	26.00
5.0	1.00/1.00		285.	263.07	3.8	711.5	34.471	24.286	6.3	285.	26.00
6.0	1.00/1.00		439.	161.96	6.2	1041.7	50.470	43.071	9.0	439.	26.00
7.0	1.00/1.00		639.	97.69	10.2	1375.6	67.171	60.610	11.3	639.	26.00
8.0	1.00/1.00		803.	65.24	15.3	1552.2	76.399	70.957	12.5	803.	26.00
9.0	1.00/1.00		955.	47.06	21.2	1712.9	84.979	79.909	12.8	955.	26.00
10.0	1.00/1.00		1140.	31.83	31.4	1834.0	90.800	85.760	12.1	1140.	26.00
11.0	1.00/1.00		1439.	19.82	53.1	1887.5	92.850	87.348	9.6	1439.	26.00
11.5	1.00/1.00		1479.	25.43	39.3	1920.3	93.844	88.145	8.7	1479.	26.00

Ao considerarmos a perda de resistência no momento da cravação em relação ao *setup* do solo através da aplicação de *gain/loss* de 0,4, a previsão da cravação feita com GRLWEAP para emprego do martelo MS50-H3 é de uma cravação sem dificuldades com taxa de penetração máxima de 167 mm/s ou 6 s/m, já próximo a cota de parada prevista no projeto com resistência de 324 kN no momento da cravação, podendo chegar a 760 kN após o desenvolvimento do *setup*, como demonstra a Figura A 13.

Figura A 13 – Cravabilidade para E1233 – martelo MS50-H3 para gain/loss = 1 e 0,4

Gain/Loss 1 at Shaft and Toe 1.000 / 1.000									
Depth m	Ultimate Capacity kN	Friction kN	End Bearing kN	Penetration Time sec/m	Comp. Stress MPa	Tension Stress MPa	Frequency Hz	Power kw	
1.0	9.7	3.5	6.2	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0	
2.0	27.0	14.2	12.8	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0	
3.0	51.7	32.3	19.4	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0	
4.0	86.3	58.8	27.6	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0	
5.0	155.7	130.3	25.4	2.1	29.483	-16.873	26.0	3.3	
6.0	230.8	210.7	20.1	3.1	34.044	-19.304	26.0	5.2	
7.0	332.6	309.9	22.7	4.5	40.578	-32.664	26.0	7.7	
8.0	433.6	373.2	60.4	6.5	46.255	-40.004	26.0	8.7	
9.0	514.4	445.8	68.6	8.1	52.927	-47.374	26.0	9.6	
10.0	614.3	532.3	82.1	10.5	60.685	-55.289	26.0	10.7	
11.0	785.1	661.3	123.8	16.6	71.017	-65.791	26.0	12.0	
11.5	760.5	727.1	33.4	13.6	74.957	-68.815	26.0	12.0	

Gain/Loss 2 at Shaft and Toe 0.400 / 1.000									
Depth m	Ultimate Capacity kN	Friction kN	End Bearing kN	Penetration Time sec/m	Comp. Stress MPa	Tension Stress MPa	Frequency Hz	Power kw	
1.0	7.6	1.4	6.2	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0	
2.0	18.5	5.7	12.8	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0	
3.0	32.3	12.9	19.4	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0	
4.0	51.1	23.5	27.6	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0	
5.0	77.5	52.1	25.4	0.0	0.000	0.000	26.0	0.0	
6.0	104.3	84.3	20.1	1.6	24.840	-17.503	26.0	2.1	
7.0	146.7	124.0	22.7	2.0	27.842	-17.059	26.0	3.2	
8.0	209.7	149.3	60.4	3.2	31.012	-12.225	26.0	4.2	
9.0	246.9	178.3	68.6	3.8	25.402	-14.772	26.0	4.9	
10.0	295.0	212.9	82.1	4.6	28.194	-20.279	26.0	5.8	
11.0	388.4	264.5	123.8	6.3	35.430	-29.819	26.0	7.4	
11.5	324.3	290.8	33.4	4.5	35.991	-29.610	26.0	7.4	

A estaca E2206 é a com menor comprimento cravado, com a resistência de ponta influenciando mais significativamente sobre a resistência máxima mobilizada, conforme análise do CAPWAP.

Assim, para análise da estaca E2206 no GRLWEAP o uso de valores de *quake* e *damping* calculados pelo CAPWAP, apresentados na Tabela 3-6, forneceram deslocamentos superiores aos calculados pelo CAPWAP, sendo, portanto, os valores alterados para os demonstrados na Figura 4-19, que forneceram valores de deslocamento e resistência (1141 kN) semelhantes aos do CAPWAP, como está demonstrado na Figura A 14.



Figura A 14 – inputs para análise da Estaca E2206 no GRLWEAP

MARTELO DE QUEDA E2206

Hammer Information  
Select from following list [28/08/2009-2003]: ID: 2001

ID	Name	Type	Ram.Wt	Energy/Power
1335	MENCK MHU30005	ECH	1647.517	3006.451
2001	BSP SL30	ECH	25.000	30.000

Hammer parameters

Efficiency: 0.69

Stroke: 0.9 m

File material:  Concrete  Steel  Timber

Ultimate Capacity

Incr.	Shaft	Toe
1	1141.0	6 2520.0
2	840.0	7 2940.0
3	1260.0	8 3360.0
4	1680.0	9 3780.0
5	2100.0	10 4200.0

Incr.: 0

Soil Parameters

Quake:  Shaft 2.5 mm  Toe Const

Damping:  Shaft 0.8 s/m  Toe Const

Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

Cushion Information

Hammer

Area: 1600 cm<sup>2</sup>

Elastic Modulus: 2600 MPa

Thickness: 200 mm

C.O.P.: 0.8

Stiffness: 0 kN/mm

Helmet Weight: 9.1 kN

File Information

Length: 5.73 m

Penetration: 4.53 m

Section Area: 206.4 cm<sup>2</sup>

Elast Modulus: 210000 MPa

Spec Weight: 77.5 kN/m<sup>3</sup>

Toe Area: 206.4 cm<sup>2</sup>

Perimeter: 1.72 m

File Size: 0 mm

Soil Profile Input for Static Analysis

Profile/Resistance: Other Parameters SPT N vs. Depth

Penetration: 4.53

Water Table: 15.002 m

Layer Top Depth: 0 m

Layer Bottom Depth: 1 m

Layer Thickness: 1 m

Layer: 1 of 14

Soil Type:  Gravel  Sand  Silt  Clay  Rock  Peat or other w/o resistance  Other: Silt

Soil Type: Gravel Graded: Size: Cohesive

SPT N Value: 5. <= 60 Interp.

Unit Weight: 15.2 kN/m<sup>3</sup>

Update => Ru=249.4; Rs=183.8 kN

Disclaimer: The GRLWEAP static analysis helps with filling of the ST Form. This analysis should only be used by engineers who are familiar with static pile analyses and their limitations. The user should compare results with those from other static analysis methods.

OK Canceler Ajuda



Para os dados de entrada no GRLWEAP como demonstrados na Figura A 14, foi modelada a simulação do ensaio PDA com martelo de queda obtendo-se os resultados demonstrados na Figura A 15, verificando-se que os deslocamentos e resistência convergiam com o calculado pelo CAPWAP.

Modelando a situação de cravação com o martelo vibratório MS50-H3, para obter a resistência de 1141 kN este teria de operar a 27 Hz com taxa de penetração de 1 mm/s ou 930,7 s/m, muito inferior aos 10 mm/s tidos como critério de parada pelas referências pesquisadas, ou seja, segundo esta análise a resistência de 1141 kN, conforme Figura A 16, ou seja, essa resistência dificilmente seria alcançada com o emprego do martelo MS50-H3 ou outro mais leve, como é o caso do ABI MRZV 18V.

Figura A 15 – Resultados obtidos para E2206 – inputs baseados nos resultados do CAPWAP

Rult kN	Set mm	BlCt Bl/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	ENTHRU kJ	ActRes kN	Stroke m
1141.	5.30	188.6	2598.5	126.505	6.119	13.2	1141.	0.9
1141.	5.49	182.0	2648.9	128.963	6.057	13.7	1141.	0.9
1141.	5.68	176.0	2697.3	131.330	5.979	14.2	1141.	1.0
1141.	5.87	170.4	2743.9	133.614	5.885	14.7	1141.	1.0
1141.	6.05	165.3	2788.9	135.819	5.796	15.2	1141.	1.0
1141.	6.23	160.5	2835.5	138.125	5.698	15.7	1141.	1.1
1141.	6.40	156.2	2882.1	140.408	5.596	16.2	1141.	1.1
1141.	6.58	152.0	2928.1	142.661	5.478	16.7	1141.	1.1
1141.	6.75	148.1	2972.9	144.851	5.329	17.3	1141.	1.2
1141.	6.92	144.5	3016.5	146.985	5.207	17.8	1141.	1.2

Figura A 16 – Resultados obtidos para E2206 – Análise para martelo MS50-H3

Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1141.	0.10	9999.0	465.9	22.957	23.328	0.0	439.	10.0
1141.	0.10	9999.0	487.3	23.609	21.763	0.0	459.	11.9
1141.	0.10	9999.0	467.5	23.192	8.178	0.0	514.	13.8
1141.	0.10	9999.0	701.6	34.390	13.228	0.0	753.	15.7
1141.	0.10	9999.0	1072.7	52.072	20.112	0.2	1074.	17.6
1141.	5.67	176.4	1151.7	56.215	18.730	0.5	1141.	19.4
1141.	16.10	62.1	1335.1	66.357	29.007	2.5	1141.	21.3
1141.	8.92	112.1	1252.7	62.982	36.081	5.4	1141.	23.2
1141.	4.07	245.8	1185.9	60.153	45.195	6.7	1141.	25.1
1141.	1.07	930.7	1130.1	57.336	45.876	6.3	1141.	27.0

Quanto a cravabilidade até a cota em que se obteve em campo, o GRLWEAP indica ser uma cota que martelo MS50-H3 não teria dificuldade para cravar a estaca, pois mesmo considerando a condição de recravação com *gain/loss* = 1, a taxa de penetração seria 405 mm/s como demonstrado na Figura A 17.

Considerando a cravação para estaca dupla, como demonstrado na Figura A 18 ainda assim não haveria resistência suficiente para impedir a penetração da estaca conforme análise do GRLWEAP além dos 4,5 m obtidos em campo.

Figura A 17 – Cravabilidade para E2206 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca simples

Depth m	G- <i>Ls</i> G- <i>Lt</i>	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00/1.00	10.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00/1.00	26.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00/1.00	52.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
4.0	1.00/1.00	87.	777.90	1.3	350.5	16.983	4.625	2.1	87.	26.00
4.5	1.00/1.00	158.	405.67	2.5	449.5	21.777	10.227	3.7	158.	26.00

Figura A 18 – Cravabilidade para E2206 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca dupla

Depth m	G- <i>Ls</i> G- <i>Lt</i>	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00/1.00	13.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00/1.00	40.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00/1.00	83.	763.34	1.3	364.7	17.670	4.706	2.3	83.	26.00
4.0	1.00/1.00	145.	507.89	2.0	426.7	20.673	11.150	3.7	145.	26.00
4.5	1.00/1.00	249.	260.10	3.8	568.3	27.535	19.895	6.0	249.	26.00

Na Figura A 19, está demonstrando os *inputs* para análise da estaca E2211 no GRLWEAP, sendo que mantendo-se os valores de *quake* e *damping* para este caso, os resultados de deslocamentos previstos para a estaca quando esta alcança a resistência máxima de 841,5 kN, como demonstra a Figura A 20, ou seja, existe convergência entre o que foi calculado pelo CAPWAP e o que o GRLWEAP obteve com os dados de entrada.

Figura A 19 – inputs para análise da Estaca E2211 no GRLWEAP

**Hammer Information**  
Select from following list [28/08/2009-2003]: ID: 2001

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
1335	MENCK MHU3000S	ECH	1647 517	3006.451
2001	BSP SL30	ECH	25.000	30.000

**Hammer parameters**  
Efficiency: 0.73  
Stroke: 0.9 m  
Pile material:  Steel  Timber

**Cushion Information**  
Hammer: Area 1600 cm<sup>2</sup>, Elastic Modulus 2500 MPa, Thickness 200 mm, C.O.R. 0.8, Stiffness 0 kN/mm, Helmet Weight 9.1 kN  
Pile: Area 0 cm<sup>2</sup>, Elastic Modulus 0 MPa, Thickness 0 mm, C.O.R. 0, Stiffness 0 kN/mm

**File Information**  
Length 8.82 m, Penetration 7.62 m, Section Area 206.4 cm<sup>2</sup>, Elast Modulus 2100000 MPa, Spec Weight 77.5 kN/m<sup>3</sup>, Toe Area 206.4 cm<sup>2</sup>, Perimeter 1.72 m, Pile Type: Sheet Pile

**Ultimate Capacity**

Shaft	Toe
1 871.5	6 2520.0
2 840.0	7 2940.0
3 1260.0	8 3360.0
4 1680.0	9 3780.0
5 2100.0	10 4200.0

Incr. 0 Action >>>

**Soil Parameters**  
Quake: Shaft 0.825 mm, Toe 0.288 mm  
Damping: Shaft 0.6 s/m, Toe 0.03 s/m

Shaft Resistance Percentage: 73%  
Dist. Shape Num: 0.0  
Residual Stress Analysis: No

**Soil Profile Input for Static Analysis**

Profile/Resistance: Other Parameters | SPT N vs. Depth

Layer: 1 of 14  
Penetration: 7.62 m  
Water Table: 15.002 m  
Layer Top Depth: 0 m  
Layer Bottom Depth: 1 m  
Layer Thickness: 1 m

Depth (m)	SPT N	Soil Type
1.0	5.0	Silt
2.0	3.5	Silt Cohesion
3.0	13.2	Silt Cohesion
4.0	21.0	Silt Cohesion
5.0	35.0	Silt Cohesion
6.0	27.6	Silt Cohesion
7.0	27.0	Silt Cohesion
8.0	25.2	Silt Cohesion
9.0	25.2	Silt Cohesion
10.0	23.4	Silt Cohesionless
11.0	36.0	Silt Cohesionless
12.0	36.0	Silt Cohesionless
13.0	36.0	Silt
14.0	50.0	Silt

Soil Type:  Gravel Graded:  Sand:  Silt:  Cohesive  Clay  Rock  Peat or other w/o resistance  Other:  Silt Description:   
SPT N Value: 5. <= 60 Interp.  
Unit Weight: 15.2 kN/m<sup>3</sup>

Update => Ru=390.9; Rs=315.8 kN

Disclaimer: The GRLWEAP static analysis helps with filling of the S1 Form. This analysis should only be used by engineers who are familiar with static pile analyses and their limitations. The user should compare results with those from other static analysis methods.

OK Cancelar Ajuda



Figura A 20 – Resultados obtidos para E2211 – inputs baseados nos resultados do CAPWAP

Rult kN	Set mm	BlCt Bl/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	ENTHRU kJ	ActRes kN	Stroke m
872.	8.05	124.3	2677.2	133.555	10.563	14.5	872.	0.9
872.	8.29	120.6	2728.7	136.181	10.469	15.0	872.	0.9
872.	8.52	117.3	2778.1	138.704	10.674	15.5	872.	1.0
872.	8.76	114.1	2826.2	141.138	10.899	16.0	872.	1.0
872.	9.00	111.2	2872.5	143.488	11.026	16.5	872.	1.0
872.	9.23	108.4	2918.6	145.766	11.069	17.1	872.	1.1
872.	9.45	105.8	2967.5	147.978	11.184	17.6	872.	1.1
872.	9.68	103.3	3015.0	150.149	11.221	18.1	872.	1.1
872.	9.90	101.0	3061.1	152.491	11.241	18.6	872.	1.2
872.	10.12	98.8	3106.0	154.777	11.391	19.1	872.	1.2

Mantido a configuração do solo e estaca, foi alterado o martelo para o vibratório MS50-H3 obtendo-se os valores apresentados na

Figura A 21, em que se observa a resistência de 871,5 kN sendo obtida quando com o martelo operando a no mínimo 21 Hz cravasse a estaca a uma taxa de penetração de 20,8 mm/s.

Figura A 21 – Resultados obtidos para E2211– Análise para martelo MS50-H3

Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
872.	0.10	0.0	212.5	10.294	2.167	0.0	228.	0.9
872.	0.10	9999.0	638.5	30.935	16.182	0.0	511.	3.8
872.	0.14	7121.9	658.6	31.910	20.778	0.0	548.	6.7
872.	0.10	9999.0	660.1	31.980	26.236	0.0	597.	9.6
872.	0.10	9999.0	619.7	30.026	21.570	0.0	573.	12.5
872.	0.10	9999.0	552.2	27.047	18.171	0.0	585.	15.4
872.	0.10	9999.0	750.4	36.767	28.459	0.1	787.	18.3
872.	20.81	48.1	1029.5	49.943	35.065	1.8	872.	21.2
872.	42.12	23.7	1142.2	55.338	55.368	7.6	872.	24.1
872.	39.00	25.6	1192.4	57.770	56.577	8.3	872.	27.0

Porém, verifica-se que para a cota em que a estaca foi cravada, seria esperada uma resistência bem menor, da ordem de 391 kN a uma taxa de penetração de 150 mm/s como explicita a Figura A 22.

Figura A 22 – Cravabilidade para E2211 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca simples

Depth m	G-Ls	G-Lt	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00/1.00		10.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00/1.00		26.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00/1.00		52.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
4.0	1.00/1.00		87.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
5.0	1.00/1.00		200.	332.97	3.0	572.4	27.731	12.649	4.5	200.	26.00
6.0	1.00/1.00		258.	255.20	3.9	606.8	29.397	20.599	6.2	258.	26.00
7.0	1.00/1.00		344.	175.90	5.7	764.1	37.019	33.313	8.2	344.	26.00
7.6	1.00/1.00		391.	150.15	6.7	864.6	41.891	38.471	9.0	391.	26.00

Mesmo considerando a cravação de estacas duplas, a taxa de penetração prevista seria de 76,59 mm/s conforme Figura A 23 , indicando que a estaca poderia continuar a ser cravada além da cota em que foi sessada a cravação (7,6 m).

Figura A 23 – Cravabilidade para E2211 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca dupla

Depth m	G-Is m	G-Lt m	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00/1.00		13.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00/1.00		40.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00/1.00		83.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
4.0	1.00/1.00		145.	532.86	1.9	481.3	23.317	10.088	3.5	145.	26.00
5.0	1.00/1.00		326.	195.52	5.1	733.1	35.521	30.718	7.9	326.	26.00
6.0	1.00/1.00		447.	132.89	7.5	1009.2	48.895	44.503	9.8	447.	26.00
7.0	1.00/1.00		608.	91.06	11.0	1288.6	62.434	58.035	11.8	608.	26.00
7.6	1.00/1.00		703.	76.59	13.1	1434.3	69.489	64.888	12.6	703.	26.00

Quando comparadas as cargas e deslocamentos calculados tanto no CAPWAP quanto no GRLWEAP, estes apresentaram convergência com *quake* e *damping* idênticos. Contudo, para o comprimento de estaca cravado o GRLWEAP obteve uma resistência de 391 kN para estaca única com o *setup* totalmente desenvolvido, divergente dos 871 kN calculados pelo CAPWAP. Porém, quando se considera a análise para estaca dupla, obtém-se a resistência de 703 kN no GRLWEAP para a cota em que a estaca se encontra cravada, mesmo que a taxa de penetração de 76 mm/s não indicando que a cravação deveria ser encerrada a 7,6 m.

Para a estaca E2215, com os valores de *quake* e *damping* calculados pelo CAPWAP, com os inputs demonstrados na Figura A 24, o deslocamento previsto para a carga de 825 kN foi ligeiramente divergentes dos previstos pelo GRLWEAP, como demonstra a Figura A 25, apresentando deslocamentos menores.

Modificando o *damping* para 0,1 s/m o deslocamento calculado do GRLWEAP se aproxima do calculado pelo CAPWAP para a carga de 825 kN, os resultados estão demonstrados na Figura A 26, ou seja, restringiu-se os deslocamentos.



Figura A 24 – inputs para análise da Estaca 2215 no GRLWEAP

**Hammer Information**  
Select from following list (28/08/2008-2003): ID: 2001

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
1335	MENCK MHU3000S	ECH	1647.517	3006.451
2001	BSP SL30	ECH	25.000	30.000

**Hammer parameters**

Efficiency: 0.37

Stroke: 0.6 m

Soil material:  Steel  Timber

**Ultimate Capacity** kN

Incr.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0	825.0	840.0	1260.0	1680.0	2100.0	2520.0	2940.0	3360.0	3780.0	4200.0

Incr. 0 Action >>

**Cushion Information**

Hammer:  Steel  Timber

Area	Elastic Modulus	Thickness	C.O.R.	Stiffness	Helmet Weight
1600	2500	200	0.8	0	9.1

**Pile**

Area	Elastic Modulus	Thickness	C.O.R.	Stiffness	Helmet Weight
0	0	0	0	0	0

**Pile Information**

Length	Penetration	Section Area	Elast Modulus	Spec Weight	Toe Area	Perimeter	Pile Size
11.26	10.26	206.4	2100000	77.5	206.4	1.72	0

**Segments**

Auto	S-Length	S-St. Wt
Auto	Auto	Auto

**Splices**

cm^2	Splices
0	0

**Residual Stress Analysis:**  No

**Soil Profile Input for Static Analysis**

Profile/Resistance: Other Parameters | SPT N vs. Depth

Layer: 1 of 14

Penetration: 10.26 m

Water Table: 15.002 m

Layer Top Depth: 0 m

Layer Bottom Depth: 1 m

Layer Thickness: 1 m

**Soil Type**

Gravel:  Sand:  Silt:  Clay:  Rock:  Peat or other w/o resistance:  Other:

Graded:  Size:

Cohesive:  Description:

SPT N Value: 5. <= 60 Interp.

Unit Weight: 15.2 kN/m^3

Update => Ru=1396.7; Rs=1272.9 kN

**Disclaimer**  
The GRLWEAP static analysis helps with filling of the S1 Form. This analysis should only be used by engineers who are familiar with static pile analyses and their limitations. The user should compare results with those from other static analysis methods.

OK Cancel Ajuda

Figura A 25 – Resultados obtidos para E2215 – inputs baseados nos resultados do CAPWAP

Rult kN	Set mm	BlCt Bl/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	ENTHRU kJ	ActRes kN	Stroke m
825.	2.05	487.7	1484.7	74.389	7.592	4.9	825.	0.6
825.	2.31	432.5	1573.1	78.655	7.869	5.4	825.	0.7
825.	2.58	388.3	1656.1	82.820	8.095	6.0	825.	0.7
825.	2.84	351.8	1739.1	86.757	8.274	6.5	825.	0.8
825.	3.11	321.1	1814.9	90.632	8.385	7.1	825.	0.9
825.	3.38	295.8	1890.8	94.242	8.489	7.6	825.	0.9
825.	3.64	274.5	1965.3	97.878	8.589	8.2	825.	1.0
825.	3.90	256.6	2035.1	101.440	8.700	8.7	825.	1.1
825.	4.14	241.6	2100.6	104.757	8.809	9.3	825.	1.1
825.	4.38	228.3	2170.9	107.898	8.899	9.9	825.	1.2

Figura A 26 – Resultados obtidos para E2215 – *damping do shaft* = 0,1 s/m

Rult kN	Set mm	BlCt Bl/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	ENTHRU kJ	ActRes kN	Stroke m
825.	4.01	249.7	1483.2	73.221	16.630	4.9	825.	0.6
825.	4.51	221.7	1571.3	77.500	20.292	5.4	825.	0.7
825.	5.02	199.3	1654.7	81.601	22.636	6.0	825.	0.7
825.	5.52	181.1	1737.4	85.576	25.724	6.6	825.	0.8
825.	6.01	166.5	1812.8	89.258	17.513	7.1	825.	0.9
825.	6.48	154.2	1889.3	93.082	18.809	7.7	825.	0.9
825.	6.95	143.8	1963.6	96.633	17.527	8.2	825.	1.0
825.	7.41	134.9	2033.1	99.956	17.623	8.8	825.	1.1
825.	7.86	127.1	2099.3	103.434	19.816	9.4	825.	1.1
825.	8.33	120.0	2169.4	106.789	23.304	9.9	825.	1.2

Mantendo-se as configurações de solo e trocando o martelo para o vibratório o GRLWEAP foi realizada a análise de carga variando a frequência, conforme Figura A 27. Assim, nota-se que só com uma frequência superior a 18Hz o martelo consegue cravar a estaca a taxa de 9,02 mm/s com resistência máxima de 825 kN. Com o martelo operando a frequência máxima para o modelo do equipamento a taxa de penetração passa a ser de 81,6 mm/s.

Figura A 27 – Resultados obtidos para E2211– Análise para martelo MS50-H3

Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
825.	0.10	9999.0	569.9	27.935	17.214	0.0	619.	13.5
825.	0.10	9999.0	672.1	32.996	22.688	0.1	731.	15.0
825.	0.10	9999.0	758.6	37.110	29.220	0.2	777.	16.5
825.	9.02	110.9	823.5	40.115	34.860	1.3	825.	18.0
825.	38.39	26.0	1029.4	50.099	48.571	5.9	825.	19.5
825.	53.03	18.9	1144.4	55.446	55.012	8.9	825.	21.0
825.	57.74	17.3	1197.6	58.025	57.615	10.7	825.	22.5
825.	63.86	15.7	1269.8	61.670	57.840	11.1	825.	24.0
825.	72.01	13.9	1362.5	66.246	59.767	11.5	825.	25.5
825.	81.59	12.3	1488.8	72.165	-66.395	12.3	825.	27.0

Com a análise de cravabilidade com auxílio do GRLWEAP verificou-se que a estaca com 10,3 m cravados com frequência de 26 Hz apresentaria uma resistência máxima de 764 kN com taxa de penetração de 48,3 mm/s. Ao considerarmos a cravação de estaca dupla a análise auxiliada pelo GRLWEAP sugere que a cravação seja interrompida a profundidade entre 9 e 10 m, como demonstrado na Figura A 28.

Figura A 28 – Cravabilidade para E2215 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca simples

Depth m	G-LS	G-Lt	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00	1.00	10.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00	1.00	26.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00	1.00	52.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
4.0	1.00	1.00	87.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
5.0	1.00	1.00	200.	212.47	4.7	396.5	19.562	5.630	1.5	200.	26.00
6.0	1.00	1.00	258.	169.05	5.9	458.0	22.637	10.291	2.2	258.	26.00
7.0	1.00	1.00	344.	130.07	7.7	550.4	27.520	17.589	3.0	344.	26.00
8.0	1.00	1.00	427.	111.68	9.0	696.6	34.178	24.284	3.9	427.	26.00
9.0	1.00	1.00	530.	85.26	11.7	871.4	42.733	32.543	4.8	530.	26.00
10.0	1.00	1.00	720.	53.14	18.8	1053.6	51.637	42.101	5.7	720.	26.00
10.3	1.00	1.00	764.	48.28	20.7	1095.2	53.578	44.413	5.8	764.	26.00

Mantendo-se as configurações de solo e de estaca, porém realizando a análise para cravação de estaca dupla, nota-se através dos resultados apresentados na Figura A 29 que incremento na resistência com indicação de que para essa situação o limite da cravação se daria a cota próxima da que a estaca de fato foi cravada em campo.

Figura A 29 – Cravabilidade para E2215 – Análise para martelo MS50-H3 com estaca dupla

Depth m	G-LS	G-Lt	Rult kN	PenRate mm/s	PenTime s/m	TopFx kN	MxCS MPa	MxTS MPa	Power kW	ActRes kN	Freq 1/s
1.0	1.00	1.00	13.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
2.0	1.00	1.00	40.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
3.0	1.00	1.00	83.	1000.00	1.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.	26.00
4.0	1.00	1.00	145.	263.10	3.8	339.6	16.451	4.557	1.1	145.	26.00
5.0	1.00	1.00	326.	130.93	7.6	553.4	27.565	17.607	2.9	326.	26.00
6.0	1.00	1.00	513.	80.20	12.5	878.0	43.099	34.327	4.8	513.	26.00
7.0	1.00	1.00	737.	49.18	20.3	1107.0	54.945	47.642	5.8	737.	26.00
8.0	1.00	1.00	994.	27.07	36.9	1270.8	63.416	57.884	5.8	994.	26.00
9.0	1.00	1.00	1143.	24.68	40.5	1370.3	68.121	60.721	4.8	1143.	26.00
10.0	1.00	1.00	1489.	0.10	9999.0	1476.1	72.445	67.287	1.2	1489.	26.00
10.3	1.00	1.00	1575.	0.10	9999.0	1451.3	71.141	67.073	0.8	1567.	26.00

## ANEXO A – SONDAGENS SPT



CLIENTE: AZIMUTE ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA  
 OBRA: TRINCHEIRA (R MARIO TOURINHOXAV NSA SRª APARECIDA)  
 LOCAL: CURITIBA / PR

SONDAGEM A PERCUSSÃO  
 SP-01  
 INÍCIO: 27/08/08  
 TÉRMINO: 28/08/08  
 COTA: 913,36

Amostragem	Profundidade da Camada	REVESTIMENTO: Ø 63,5 mm AMOSTRADOR: { Ø INTERNO: 24,9 mm Ø EXTERNO: 50,8 mm PESO: 66 Kg ALTURA DA QUEDA: 75 cm	CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA	ENSAIO PENETRO MÉTRICO (Golpes/cm)	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK No. DE GOLPES		
					10	20	30
	0.15		CALÇADA DE PEDRA				
	1.00		ATERRO DE SAIBRO				
1	1.00		passagem de aterro para ARGILA SILTOSA, MUITO MOLE, AMARELA E MARROM	1 1 1 1 5 1 5 1 5			
2	2.00		idem, mole	1 1 2 1 5 1 5 1 5			
3	3.00		SILTE ARGILOSO, MÉDIO, AMARELO E CINZA	2 3 4 1 5 1 5 1 5			
4	4.00		idem, mole	2 2 3 1 5 1 5 1 5			
5	5.00		idem, mole	1 2 2 1 5 1 5 1 5			
6	6.00		idem, mole	2 2 4 1 5 1 5 1 5			
7	7.00		idem, médio	2 3 4 1 5 1 5 1 5			
8	8.00		idem, médio	3 3 4 1 5 1 5 1 5			
9	9.00		idem, médio	4 6 8 1 5 1 5 1 5			
10	10.00		idem, rijo, amarelo	4 7 9 1 5 1 5 1 5			
11	11.00		idem, rijo, amarelo	5 7 10 1 5 1 5 1 5			
12	12.00		idem, rijo	5 9 13 1 5 1 5 1 5			
13	13.00		SILTE ARENOSO, COMPACTO, AMARELO	8 12 16 1 5 1 5 1 5			
14	14.00		idem, muito compacto	1 0 1 4 28 1 5 1 5 1 5			
15	15.00		idem, compacto	1 0 20 1 5 1 5 1 5 1 5			
16	16.00		idem, compacto	12 25 - 1 5 1 5 1 5			
17	17.00		idem, muito compacto	12 30 - 1 5 1 5 1 5			
	17.30		LIMITE DE SONDAGEM				

PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA: INICIAL: 7,50m em 27/08/08 FINAL: 7,50m em 28/08/08  
 AVANÇO A TRADO: 0,00m a 5,00m  
 AVANÇO POR LAVAGEM:  
 PROF. DO REVESTIMENTO: 4,00m  
 SPT30 cm INICIAIS  
 SPT30 cm FINAIS

<h1>AZIMUTE</h1>	REFERÊNCIA: 11676	LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)			DESENHO No.: JULYANA
	DATA: 29/08/08	TEMPO	DE	PARA	FOLHA No.: 02
	ESCALA VERT.: 1/100				RESP. TÊC.:



<b>CLIENTE:</b> AZIMUTE ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA	<b>SONDAGEM A PERCUSSÃO</b>
<b>OBRA:</b> TRINCHEIRA (R MARIO TOURINHOXAV NSA SRª APARECIDA)	<b>SP-02</b>
<b>LOCAL:</b> CURITIBA / PR	<b>INÍCIO:</b> 27/08/08 <b>TÉRMINO:</b> 28/08/08 <b>COTA:</b> 913,96

Amostragem	Profundidade da Camada	REVESTIMENTO: Ø 63,5mm AMOSTRADOR: { Ø INTERNO: 34,9mm Ø EXTERNO: 50,8mm PESO: 65 Kg    ALTURA DA QUEDA: 75 cm	CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA	ENSAIO PENETROMÉTRICO (Golpes/cm)	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK No. DE GOLPES		
					10	20	30
	0.60		PISO E BRITA				
1			ARGILA SILTOSA, MOLE, ROXA  idem, média, marrom e cinza  idem, rija  idem, média    idem, rija	1/15	2/15	2/15	
2		2/15		2/15	3/15		
3	3.00	3/15		5/15	5/15		
4	4.00	4/15		6/15	7/15		
5	5.00	3/15		4/15	5/15		
6	6.00	4/15		6/15	6/15		
7		5/15		5/15	7/15		
8		7/15		8/15	10/15		
9		9/15		11/15	13/15		
10		10/15		12/15	14/15		
11		16/15		22/15	25/15		
12	12.07		MATERIAL NÃO PERFURÁVEL PELA SONDA A PERCUSSÃO (Provavelmente em camadas de pedras soltas e/ou matacões)	32/3	-	-	

<b>PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA</b> INICIAL: 6,25m em 27/08/08 FINAL: 6,26m em 28/08/08	***** SPT30 cm INICIAIS ———— SPT30 cm FINAIS	<b>AVANÇO A TRADO:</b> AVANÇO POR LAVAGEM: 12,03m a 12,07m PROF. DO REVESTIMENTO: 4,00m
-----------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------

<b>AZIMUTE</b>	<b>REFERÊNCIA:</b> 11676	<b>LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)</b>			<b>DESENHO No.:</b> JULYANA
	<b>DATA:</b> 29/08/08	<b>TEMPO</b>	<b>DE</b>	<b>PARA</b>	<b>FOLHA No.:</b> 03
	<b>ESCALA VERT.:</b> 1/100	10	12,03	12,06	<b>RESP. TÉCN.:</b>
		10	12,06	12,07	

<b>CLIENTE:</b> AZIMUTE ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA	<b>SONDAGEM A PERCUSSÃO</b>
<b>OBRA:</b> TRINCHEIRA (R MARIO TOURINHOXAV NSA SRª APARECIDA)	<b>SP-03</b>
<b>LOCAL:</b> CURITIBA / PR	<b>INÍCIO:</b> 26/08/08 <b>TÉRMINO:</b> 27/08/08 <b>COTA:</b> 913,62

Amostr. Profun- didade da Camada	REVESTIMENTO: 8 63 5 mm AMOSTRADOR: { 8 INTERNO: 249 mm 8 EXTERNO: 50 8 mm PESO: 65 Kg ALTURA DA QUEDA: 75 cm	CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA	ENSAIO PENETRO MÉTRICO (Golpes/cm)			RESISTÊNCIA 2 PENETRAÇÃO AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK No. DE GOLPES		
			10	20	30	10	20	30
0.10	PISO							
0.60	ATERRO DE BRITA							
1	passagem de atrozto para ARGILA SILTOSA, MÉDIA, VERMELHA		3 15	3 15	4 15			
2	idem, rija		4 15	5 15	7 15			
3	idem, vermelha e cinza		6 15	7 15	7 15			
4	idem, arenosa, dura		7 15	9 15	11 15			
5	idem, arenosa, dura		10 15	11 15	12 15			
6	idem, siltosa, rija, marrom		6 15	7 15	9 15			
7	idem, dura		8 15	9 15	11 15			
8	idem, dura		10 15	12 15	14 15			
9	idem, marrom e cinza		12 15	14 15	16 15			
10	idem, marrom e cinza		11 15	18 15	22 15			
11	idem, arenosa		13 15	16 15	20 15			
12	idem, arenosa		32 15	-	-			
13	idem, arenosa		36 15	-	-			
13.83	MATERIAL NÃO PERFURÁVEL PELA SONDA A PERCUSSÃO (Provavelmente em camadas de pedras soltas e/ou matacões)							

<b>PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA</b> INICIAL: 1,20m em 27/08/08 FINAL: 7,90m em 28/08/08	***** SPT 30 cm INICIAIS ———— SPT 30 cm FINAIS	<b>AVANÇO A TRADO:</b> AVANÇO POR LAVAGEM: 13,80m a 13,83m PROF. DO REVESTIMENTO: 2,00m
-----------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------

<b>AZIMUTE</b>	<b>REFERÊNCIA:</b> 11676	<b>LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)</b>			<b>DESENHO No.:</b> JULYANA
	<b>DATA:</b> 29/08/08	<b>TEMPO</b>	<b>DE</b>	<b>PARA</b>	<b>FOLHA No.:</b> 04
	<b>ESCALA VERT.:</b> 1/100	10	13,80	13,82	<b>RESP. TÉCN.:</b>
		10	13,82	13,83	



<b>CLIENTE:</b> AZIMUTE ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA	<b>SONDAGEM A PERCUSSÃO</b>
<b>OBRA:</b> TRINCHEIRA (R MARIO TOURINHOXAV NSA SRª APARECIDA)	<b>SP-04</b>
<b>LOCAL:</b> CURITIBA / PR	<b>INÍCIO:</b> 26/08/08 <b>TÉRMINO:</b> 28/08/08 <b>COTA:</b> 91285

Amostragem	Profundidade da Camada	REVESTIMENTO: 8 63 5mm AMOSTRADOR: { S INTERNO: 34,9 mm S EXTERNO: 50,2 mm PESO: 65 Kg    ALTURA DA QUEDA: 75 cm	ENSAIO PENETRO MÉTRICO (Golpes/cm)	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK No. DE GOLPES		
				10	20	30
		CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA				
	0.60	ATERRO DE ARGILA ARENOSA, MARROM ESCURA	1/15   2/15   2/15			
1		passagem de aterro para ARGILA SILTOSA, MOLE, VERMELHA E CINZA	1/15   2/15   3/15			
2			2/15   2/15   3/15			
3						
	4.00	idem, arenosa, rija, cinza	5/15   6/15   10/15			
4		idem, arenosa, rija, cinza	5/15   7/15   12/15			
5			6/15   6/15   9/15			
6						
	7.00	idem, siltosa	5/15   7/15   10/15			
7			4/15   6/15   9/15			
8			5/15   7/15   10/15			
	11.00	idem, arenosa, dura	6/15   8/15   11/15			
9			10/15   14/15   16/15			
10			6/15   10/15   15/15			
	14.43	MATERIAL NÃO PERFURÁVEL PELA SONDA A PERCUSSÃO (Provavelmente em camadas de pedras soltas e/ou matacões)	31/15   -   - 35/10			
11						
12						
13						
14						

**PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA:**  
 INICIAL: 6,76m em 26/08/08      \*\*\*\*\* SPT30 cm INICIAIS  
 FINAL: 6,76m em 28/08/08      ————— SPT30 cm FINAIS

**AVANÇO A TRADO:** 0,00 m e 2,00 m  
**AVANÇO POR LAVAGEM:** 14,40 m a 14,43 m  
**PROF. DO REVESTIMENTO:** 2,00 m

<h1>AZIMUTE</h1>	<b>REFERÊNCIA:</b> 11676	<b>LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)</b>			<b>DESENHO No.:</b> JULYANA
	<b>DATA:</b> 29/08/08	<b>TEMPO</b>	<b>DE</b>	<b>PARA</b>	<b>FOLHA No.:</b> 05
	<b>ESCALA VERT.:</b> 1/100	10	14,40	14,42	<b>RESP. TÉCN.:</b>
		10	14,42	14,43	
		10	14,43	14,43	

<b>CLIENTE:</b> AZIMUTE ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA	<b>SONDAGEM A PERCUSSÃO</b>
<b>OBRA:</b> TRINCHEIRA (R MARIO TOURINHOXAV NSA SRª APARECIDA)	<b>SP-05</b>
<b>LOCAL:</b> CURITIBA / PR	<b>INÍCIO:</b> 25/08/08 <b>TÉRMINO:</b> 26/08/08 <b>COTA:</b> 912,16

Amostragem	Profundidade da Camada	REVESTIMENTO: Ø 63,5 mm AMOSTRADOR: { Ø INTERNO: 24,9 mm Ø EXTERNO: 50,8 mm PESO: 65 Kg    ALTURA DA QUEDA: 75 cm	CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA	ENSAIO PENETRO-MÉTRICO (Golpes/cm)			RESISTÊNCIA DE PENETRAÇÃO AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK No. DE GOLPES		
				1	2	3	10	20	30
			ATERRO DE SAIBRO COM PEDRAS						
1	1.10		ATERRO DE ARGILA ARENOSA, MÉDIA, MARROM ESCURA	2	3	4			
	1.60			15	15	15			
2			passagem de aterro para ARGILA SILTOSA, MOLE, ROXA	1	2	3			
				15	15	15			
3	3.00		idem, rija	2	5	6			
				15	15	15			
4	4.00		idem, arenosa, cinza	3	6	10			
				15	15	15			
5	5.00			5	8	12			
				15	15	15			
6				6	10	13			
				15	15	15			
7				7	11	14			
				15	15	15			
8				8	13	15			
				15	15	15			
9			idem, dura	8	10	14			
				15	15	15			
10				9	10	10			
				15	15	15			
11				7	9	15			
				15	15	15			
12				9	13	17			
				15	15	15			
13				9	18	15			
				15	15	9			
14	14.50			10	15	21			
				15	15	15			
15	15.37		SILTE ARENOSO, MUITO COMPACTO, CINZA E VERDE	45	-	-			
			LIMITE DE SONDAGEM	12					

PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA	***** SPT 30 cm INICIAIS	AVANÇO A TRADO: 0,00 m a 2,00 m
INICIAL: 8,90m em 25/08/08	———— SPT 30 cm FINAIS	AVANÇO POR LAVAGEM: 15,35 m a 15,37 m
FINAL: 8,90m em 26/08/08		PROF. DO REVESTIMENTO: 2,00 m

<b>AZIMUTE</b>	REFERÊNCIA: 11576	LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)			DESENHO No.: JULYANA
	DATA: 29/08/08	TEMPO	DE	PARA	FOLHA No.: 06
	ESCALA VERT.: 1/100	10	15:35	15:36	RESP. TÊC.:
		10	15:36	15:37	
		10	15:37	15:37	



<b>CLIENTE:</b> AZIMUTE ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA	<b>SONDAGEM A PERCUSSÃO</b>
<b>OBRA:</b> TRINCHEIRA (R MARIO TOURINHOXAV NSA SRª APARECIDA)	<b>SP-06</b>
<b>LOCAL:</b> CURITIBA / PR	<b>INÍCIO:</b> 25/08/08 <b>TÉRMINO:</b> 26/08/08
	<b>COTA:</b> 910,05

Amostragem	Profundidade da Camada	REVESTIMENTO: Ø 63,5 mm AMOSTRADOR: { Ø INTERNO: 24,9 mm Ø EXTERNO: 50,8 mm PESO: 46 Kg    ALTURA DA QUEDA: 75 cm	ENSAIO PENETRO MÉTRICO			RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO		
						AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK		
			(Golpes/cm)			No. DE GOLPES		
		CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA				10	20	30
	0.30	ATERRO DE ARGILA SILTOSA, COM RAIZES, MARROM ESCURA						
1		ATERRO DE ARGILA SILTOSA, MÉDIA, MARROM ESCURA	2	4	4			
	1.60		15	15	15			
2		passagem de aterro para ARGILA ARENOSA, RIJA, ROXA	4	7	12			
	3.00		15	15	15			
3		idem, siltosa, dura, roxa e cinza	8	15	21			
	4.00		15	15	15			
4		idem, marrom e cinza	8	14	18			
	5.00		15	15	15			
5			7	11	17			
	6.00		15	15	15			
6		idem, arenosa, cinza	8	11	18			
	7.00		15	15	15			
7			8	11	15			
	8.00		15	15	15			
8			7	9	11			
	9.00		15	15	15			
9			10	16	22			
	10.00		15	15	15			
10		idem, siltosa	10	15	21			
	11.00		15	15	15			
11			9	14	24			
	12.00		15	15	15			
12			11	16	26			
	13.00		15	15	15			
13			35	-	-			
	13.63	MATERIAL NÃO PERFURÁVEL PELA SONDA A PERCUSSÃO (Provavelmente em camadas de pedras soltas e/ou matacões)						

<b>PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA</b>	***** SPT30 cm INICIAIS	<b>AVANÇO A TRADO:</b> 0,00 m a 2,00 m
<b>INICIAL:</b> 8,00m em 25/08/08	———— SPT30 cm FINAIS	<b>AVANÇO POR LAVAGEM:</b> 13,60m a 13,63m
<b>FINAL:</b> 8,00m em 26/08/08		<b>PROF. DO REVESTIMENTO:</b> 2,00 m

<b>AZIMUTE</b>	<b>REFERÊNCIA:</b> 11676	<b>LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)</b>			<b>DESENHO No.:</b> JULYANA
	<b>DATA:</b> 29/08/08	<b>TEMPO</b>	<b>DE</b>	<b>PARA</b>	<b>FOLHA No.:</b> 07
	<b>ESCALA VERT.:</b> 1/100	10	13,60	13,62	<b>RESP. TÊC.:</b>
		10	13,62	13,63	
		10	13,63	13,63	



**CLIENTE:** AZIMUTE ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA  
**OBRA:** TRINCHEIRA (R MARIO TOURINHOXAV NSA SRª APARECIDA)  
**LOCAL:** CURITIBA / PR

**SONDAGEM A PERCUSSÃO**  
**SP-07**  
**INÍCIO:** 25/08/08      **TÉRMINO:** 25/08/08  
**COTA:** 907,59

Amostragem	Profundidade da Camada	REVESTIMENTO: Ø 63,5 mm AMSTRADOR: { Ø INTERNO: 24,9 mm Ø EXTERNO: 50,8 mm PESO: 45 Kg    ALTURA DA QUEDA: 75 cm	CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA	ENSAIO PENETRO MÉTRICO (Golpes/cm)	RESISTÊNCIA / PENETRAÇÃO		
					AMSTRADOR TIPO TERZAGHI & PECK		
					No. DE GOLPES		
					10	20	30
1	1.00		ATERRO DE ARGILA SILTOSA, COM RAIZES, PRETA	1/15   3/15   3/15			
2	2.00		ATERRO DE ARGILA SILTOSA, MÉDIA, MARROM				
	2.60		idem, arenosa, roxa e cinza	3/15   3/15   4/15			
3	4.00		passagem de aterro para ARGILA ARENOSA, DURA, MARROM E ROSA	8/15   11/15   15/15			
4	5.00		idem, cinza e marrom	8/15   12/15   16/15			
5	6.00		idem, siltosa, rija	6/15   8/15   10/15			
6	7.00		idem, dura	6/15   9/15   11/15			
7				9/15   13/15   20/15			
8			idem, arenosa, cinza	10/15   15/15   21/15			
9				12/15   22/15   24/15			
10	10.15		LIMITE DE SONDAGEM	33/15   -   -			

**PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA:**  
 INICIAL: 7,40m em 25/08/08      \*\*\*\*\* SPT 30 cm INICIAIS  
 FINAL: 7,40m em 25/08/08      ——— SPT 30 cm FINAIS

**AVANÇO A TRADO:** 0,00m a 3,00m  
**AVANÇO POR LAVAGEM:**  
**PROF. DO REVESTIMENTO:** 2,00m

<h1>AZIMUTE</h1>	REFERÊNCIA:	LAVAGEM POR TEMPO (30 Min.)			DESENHO No.:
	11576	TEMPO	DE	PARA	JULYANA
	DATA:				FOLHA No.:
	29/08/08				02
ESCALA VERT.:					RESP. TÊC.:

# SONDAR

SERVIÇOS E EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA.

<b>Cliente:</b> Consórcio Falcão Bauer – ECR				<b>Ref:</b> 6402/2019	
<b>Local de serviço:</b> Av. Nossa Senhora Aparecida esq. com Rua Mário Tourinho, em Curitiba, PR				<b>Escala:</b> 1:100	
<b>Sondagem:</b> SP - A		<b>Data:</b> 10/10/2019		<b>Resp.Técnico:</b> Engº James	
				<b>Prof. N.A.:</b> sêco	
Prof. (mts)	Nível d'água	Ensaio de Penetração		Profun- didade das camadas	Cota em relação ao RN
		GRÁFICO			
		Golpes / 30cm			
		-----			
		1º+2º			
		2º+3º			
				0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50	
1,00		2	2	1	Aterro (argila siltosa, preta e marrom).
2,00		2	2	2	
3,00		4	8	3	
4,00		9	15	4	3,15 3,73 Argila siltosa, rosada, média.
5,00		12	18	5	
6,00		10	14	6	
7,00		10	15	7	Argila siltosa, cinza, rija.
8,00		11	16	8	
9,00		12	16	9	
10,00		14	18	10	
11,00		16	21	11	11,20
12,00		20	28	12	Idem, dura. 12,68
13,00		30/6	-	13	Silte arenoso com pedregulhos, cinza, compacto. 13,67
				14	IMPENETRÁVEL À PERCUSSÃO.
				15	
				16	
				17	
				18	TREPANAÇÃO:
				19	1º 10 min. desceu 3 cm.
				20	2º 10 min. desceu 1 cm.
				21	3º 10 min. desceu 0 cm.
				<b>Obs:</b>	

# SONDAR

SERVIÇOS E EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA.

<b>Cliente:</b> Consórcio Falcão Bauer – ECR				<b>Ref:</b> 6402/2019		
<b>Local de serviço:</b> Av. Nossa Senhora Aparecida esq. com Rua Mário Tourinho, em Curitiba, PR				<b>Escala:</b> 1:100		
<b>Sondagem:</b> SP - B		<b>Data:</b> 10/10/2019		<b>Resp.Técnico:</b> Engº James		
				<b>Prof. N.A.:</b> sêco		
Prof. (mts)	Nível d'água	Ensaio de Penetração		Profun- didade das camadas	Cota em relação ao RN	Cota: 912,077
		GRÁFICO				
		Golpes / 30cm				
		-----				
		1º+2º				
		2º+3º				
1,00		5	6		Aterro.	
2,00		5	5		1,15	
3,00		9	14		Argila arenosa, marrom, média.	
4,00		14	20		3,10	
5,00		30	20/15		Idem rosada e cinza, de rija à dura.	
6,00		23	30/28		5,20	
7,00		20	30		5,70	Argila arenosa com pedregulhos, cinza, dura.
8,00		19	26			Argila arenosa, cinza, dura.
9,00		18	27			
10,00		16	21		10,20	
11,00		21	30		Argila siltosa, cinza, dura.	
12,00		30/28	-		12,10	
13,00		30/27	-		Silte arenoso, cinza, compacto.	
14,00		30/25	-		14,60	
						IMPENETRÁVEL À PERCUSSÃO.
						TREPANAÇÃO: 1º 10 min. desceu 2 cm. 2º 10 min. desceu 2 cm. 3º 10 min. desceu 1 cm.
				<b>Obs:</b>		



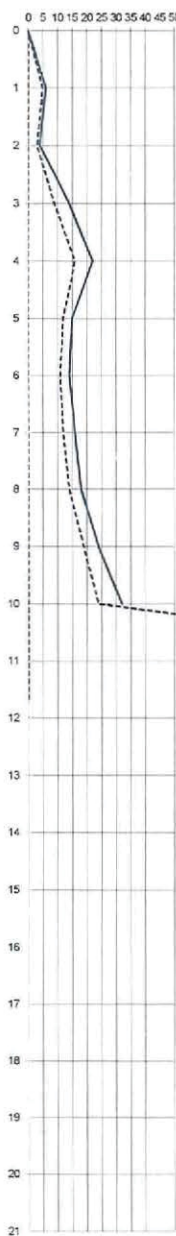
# SONDAR

SERVIÇOS E EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA.

<b>Cliente:</b> Consórcio Falcão Bauer – ECR				<b>Ref:</b> 6407/2019	
<b>Local de serviço:</b> Av. Nossa Senhora Aparecida esq. com Rua Mário Tourinho, em Curitiba, PR				<b>Escala:</b> 1:100	
<b>Sondagem:</b> SP - C		<b>Data:</b> 28/10/2019		<b>Resp.Técnico:</b> Engº James	
				<b>Prof. N.A.:</b> sêco	
Prof. (mts)	Nível d'água	<b>Ensaio de Penetração</b>		Profun- didade das camadas	Cota em relação ao RN
		<b>GRÁFICO</b>			
		Golpes / 30cm			
		1º+2º	2º+3º		
1,00		6	10		Argila siltosa, marrom, média.
2,00		7	19	2,20	
3,00		20	27	3,30	Argila arenosa, rosada, rija.
4,00		30	-		Argila arenosa, cinza, dura.
5,00		17	22	4,80	
6,00		20	27		Argila siltosa, cinza, dura.
7,00		25	30/28		
8,00		25	30/27		
9,00		26	30/25		
10,00		30/18	-	10,00	
11,00		30/15	-	11,15	Argila arenosa, cinza, dura.
				LIMITE DE SONDAGEM.	
<b>Obs:</b>					

# SONDAR

SERVIÇOS E EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA.

<b>Cliente:</b> Consórcio Falcão Bauer – ECR				<b>Ref:</b> 6407/2019		
<b>Local de serviço:</b> Av. Nossa Senhora Aparecida esq. com Rua Mário Tourinho, em Curitiba, PR				<b>Escala:</b> 1:100		
<b>Sondagem:</b> SP - D		<b>Data:</b> 28/10/2019		<b>Resp.Técnico:</b> Engº James		
				<b>Prof. N.A.:</b> sêco		
<b>Prof.</b> (mts)	<b>Nível</b> d'água	<b>Ensaio de Penetração</b>		<b>Profun-</b> <b>didade</b> <b>das</b> <b>camadas</b>	<b>Cota em relação ao RN</b>	<b>Cota:</b> 908,076
		<b>GRÁFICO</b>			<b>Revestimento:</b> 2,00	
		<b>Golpes / 30cm</b>			<b>CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRAS</b>	
		<b>1º+2º</b>	<b>2º+3º</b>			
1,00		5	6			Aterro (argila siltosa, marrom).
2,00		3	4		2,58	
3,00		9	14			Argila siltosa, marrom e cinza, rija.
4,00		16	22		4,00	
5,00		12	15		4,60	Idem, dura.
6,00		11	14			
7,00		12	16			Argila siltosa, cinza, rija.
8,00		14	18			
9,00		19	24			
10,00		24	32		10,15	
11,00		30/5	-		11,09	Argila arenosa, cinza, dura.
						IMPENETRÁVEL À PERCUSSÃO.
						TREPANAÇÃO: 1º 10 min. desceu 2 cm. 2º 10 min. desceu 1 cm. 3º 10 min. desceu 1 cm.
				<b>Obs:</b>		



# SONDAR

SERVIÇOS E EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA.

<b>Cliente:</b> Consórcio Falcão Bauer – ECR					<b>Ref:</b> 6407/2019	
<b>Local de serviço:</b> Av. Nossa Senhora Aparecida esq. com Rua Mário Tourinho, em Curitiba, PR					<b>Escala:</b> 1:100	
<b>Sondagem:</b> SP - E		<b>Data:</b> 29/10/2019		<b>Resp.Técnico:</b> Engº James		<b>Prof. N.A.:</b> sêco
<b>Prof.</b> (mts)	<b>Nível</b> d'água	<b>Ensaio de Penetração</b>		<b>Profun-</b> <b>didade</b> <b>das</b> <b>camadas</b>	<b>Cota em relação ao RN</b>	<b>Cota:</b> 914,174
		<b>GRÁFICO</b>				<b>Revestimento:</b> 2,00
				<b>CLASSIFICAÇÃO DA AMOSTRAS</b>		
		-----	-----			
		<b>1º+2º</b>	<b>2º+3º</b>			
1,00		9	11		0,60	Aterro.
2,00		12	14			Argila siltosa, marrom e cinza, rija.
3,00		7	9		2,80	
4,00		8	10			Idem, média.
5,00		9	13		4,70	
6,00		10	14			Argila siltosa, marrom, rija.
7,00		12	14			
8,00		12	16		8,63	
9,00		16	20			Silte arenoso, cinza, compacto.
10,00		22	26			
11,00		22	30/19			
12,00		30	-		12,00	
13,00		30/18	-			Idem.
14,00		30/10	-			
15,00		30/3	-		15,03	
						LIMITE DE SONDAAGEM.
				<b>Obs:</b>		



## **ANEXO B – ENSAIO PDA**

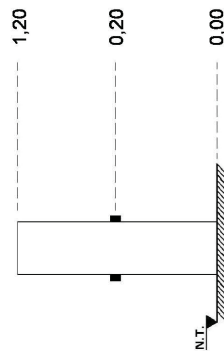
ANEXO I  
PROVA DE CARGA DINÂMICA (PDA) - RESUMO DOS RESULTADOS

Estaca:	E1190	Trincheira da Avenida Nossa Senhora Aparecida
Tipo:	Prancha metálica	Thyssenkrupp ABT 14/17
Seção (cm):	AZ 19-700	N.I.
Comprimento Total (m):	6,62	N.I.
Composição (m):	(7+6)-6,38	N.I.
Emenda:	sem emenda	N.I.
Cota do Terreno Adjacente (m):	0,00	28/10/19
Cota de Topo (m):	1,20	04/06/20
Cota de Instalação dos Sensores (m):	0,20	Buena (Maggi)
Cota da Ponta (m):	-5,42	25,00
Comprimento Cravado (m):	5,42	Peso de Martelo no Ensaio (kN):
Escavação Adicional (m):	0,00	Carga de Trabalho (kN):
		Sondagem Próxima:
		SP-5
		Cota de sondagem:
		912,16

Método CASE Jc = CASE não se aplica

Golpe	Altura de Queda (m)	RMX (kN)	EMX (kN.m)	DMX (mm)	Nega (mm)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência
1	0,30	1150 <sup>(*)</sup>	3,9	4,0	2,0	112,4	2,7	52%
2	0,60		13,8	9,0	7,0	135,1	2,3	92%
3	0,90		28,6	25,0	19,0	177,2	3,3	127%

<sup>(\*)</sup>Análise Capwap



COTAS DO ENSAIO  
N.T. = 0,00

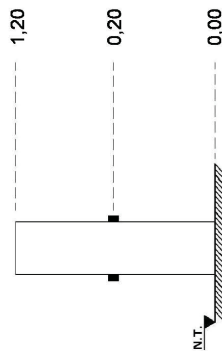
ANEXO I  
PROVA DE CARGA DINÂMICA (PDA) - RESUMO DOS RESULTADOS

Estaca:	E1212	Trincheira da Avenida Nossa Senhora Aparecida
Tipo:	Prancha metálica	Thyssenkrupp APT 14/17
Seção (cm):	AZ 19-700	N.I.
Comprimento Total (m):	10,94	N.I.
Composição (m):	(9+4)-2,06	N.I.
Emenda:	Emenda soldada	N.I.
Cota do Terreno Adjacente (m):	0,00	28/10/20
Cota de Topo (m):	1,20	Data do Ensaio:
Cota de Instalação dos Sensores (m):	0,20	Bate-Estacas do Ensaio:
Cota da Ponta (m):	-9,74	Buena (Maggi)
Comprimento Cravado (m):	9,74	Peso de Martelo no Ensaio (kN):
Escavação Adicional (m):	0,00	Carga de Trabalho (kN):
		Sondagem Próxima:
		SP-A
		Cota de sondagem:
		912,78

Método CASE Jc = CASE não se aplica - ver análise CAPWAP

Golpe	Altura de Queda (m)	RMX (kN)	EMX (kN.m)	DMX (mm)	Nega (mm)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência
1	0,30		1,1	2,0	0,0	58,4	8,5	15%
2	0,60		3,3	4,0	0,0	108,1	9,0	22%
3	0,90	2437(*)	6,8	5,0	0,0	156,4	14,3	30%

(\*) Análise Capwap



COTAS DO ENSAIO  
N.T. = 0,00



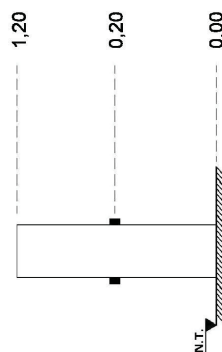
ANEXO I  
PROVA DE CARGA DINÂMICA (PDA) - RESUMO DOS RESULTADOS

Estaca:	E1233	Trincheira da Avenida Nossa Senhora Aparecida
Tipo:	Prancha metálica	Thyssenkrupp APT 14/17
Seção (cm):	AZ 19-700	N.I.
Comprimento Total (m):	12,71	N.I.
Composição (m):	13-0,29	N.I.
Emenda:	sem emenda	N.I.
Cota do Terreno Adjacente (m):	0,00	05/11/19
Cota de Topo (m):	1,20	04/06/20
Cota de Instalação dos Sensores (m):	0,20	Buena (Maggi)
Cota da Ponta (m):	-11,51	25,00
Comprimento Cravado (m):	11,51	220,00
Escavação Adicional (m):	0,00	SP-4
		Cota de sondagem: 912,85

Método CASE Jc = CASE não se aplica - ver análise CAPWAP

Golpe	Altura de Queda (m)	RMX (kN)	EMX (kN.m)	DMX (mm)	Nega (mm)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência
1	0,30		4,5	3,0	0,0	109,8	14,3	60%
2	0,60	2068 <sup>(*)</sup>	6,4	5,0	2,0	134,1	17,4	43%
3	0,90		18,4	10,0	8,0	182,1	5,9	82%

(\*)Análise Capwap



COTAS DO ENSAIO  
N.T.= 0,00

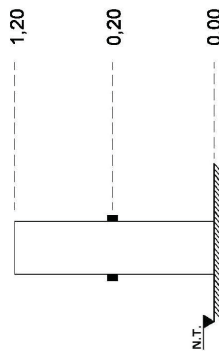
ANEXO I  
PROVA DE CARGA DINÂMICA (PDA) - RESUMO DOS RESULTADOS

Estaca:	E2206	Setor / Prédio:	Trincheira da Avenida Nossa Senhora Aparecida
Tipo:	Francha metálica	Bate-Estacas na Cravação:	Thyssenkrupp ABT 14/17
Seção (cm):	AZ 19-700	Peso de Martelo na Cravação (kN):	N.I.
Comprimento Total (m):	5,73	Altura de Queda na Cravação (m):	N.I.
Composição (m):	(8+5)-7,27	Nega ao final de cravação (mm/golpe):	N.I.
Emenda:	sem emenda	Data da Cravação:	15/02/20
Cota do Terreno Adjacente (m):	0,00	Data do Ensaio:	04/06/20
Cota de Topo (m):	1,20	Bate-Estacas do Ensaio:	Bueno (Maggi)
Cota de Instalação dos Sensores (m):	0,20	Peso de Martelo no Ensaio (kN):	25,00
Cota da Ponta (m):	-4,53	Carga de Trabalho (kN):	220,00
Comprimento Cravado (m):	4,53	Sondagem Próxima:	SP-B
Escavação Adicional (m):	0,00	Cota de sondagem:	912,077

Método CASE Jc = CASE não se aplica - ver análise CAPWAP

Golpe	Altura de Queda (m)	RMX (kN)	EMX (kN.m)	DMX (mm)	Nega (mm)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência
1	0,30		1,0	2,0	0,0	54,0	9,9	13%
2	0,60		8,2	7,0	5,0	104,6	7,2	55%
3	0,90	1141(*)	15,5	14,0	10,0	125,6	8,8	69%

(\*) Análise Capwap



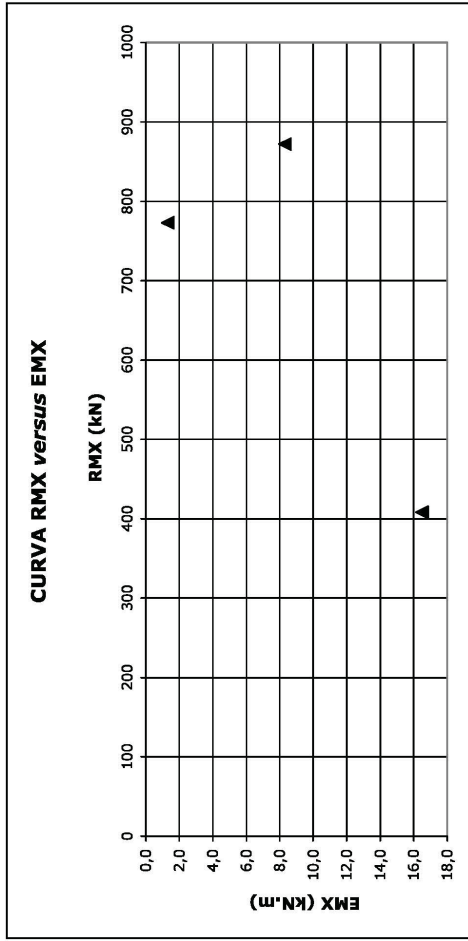
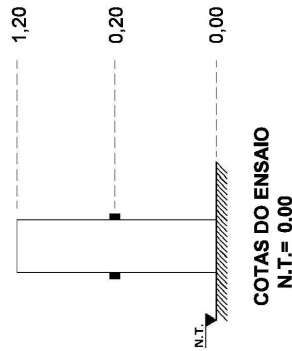
COTAS DO ENSAIO  
N.T.= 0,00

ANEXO I  
PROVA DE CARGA DINÂMICA (PDA) - RESUMO DOS RESULTADOS

Estaca:	E2211	Trincheira da Avenida Nossa Senhora Aparecida
Tipo:	Prancha metálica	Thyssenkrupp ABT 14/17
Seção (cm):	AZ 19-700	N.I.
Comprimento Total (m):	8,82	N.I.
Composição (m):	13-4,18	N.I.
Emenda:	sem emenda	
Cota do Terreno Adjacente (m):	0,00	15/02/20
Cota de Topo (m):	1,20	04/06/20
Cota de Instalação dos Sensores (m):	0,20	Buena (Maggi)
Cota da Ponta (m):	-7,62	Peso de Martelo no Ensaio (kN):
Comprimento Cravado (m):	7,62	220,00
Escavação Adicional (m):	0,00	Carga de Trabalho (kN):
		220,00
		Sondagem Próxima:
		SP-B
		Cota de sondagem:
		912,077

Método CASE Jc = 0,65

Golpe	Altura de Queda (m)	RMX (kN)	EMX (kN.m)	DMX (mm)	Nega (mm)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência
1	0,30	773	1,3	2,0	0,0	54,3	5,8	17%
2	0,60	872	8,3	9,0	8,0	91,9	1,9	55%
3	0,90	408	16,5	26,0	22,0	96,9	2,5	73%



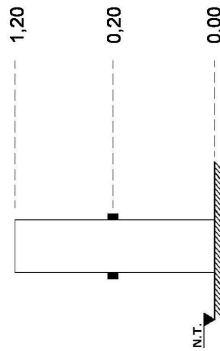
ANEXO I  
PROVA DE CARGA DINÂMICA (PDA) - RESUMO DOS RESULTADOS

Estaca:	E2215	Trincheira da Avenida Nossa Senhora Aparecida
Tipo:	Prancha metálica	Thyssenkrupp ABT 14/17
Seção (cm):	AZ 19-700	N.I.
Comprimento Total (m):	11,26	N.I.
Composição (m):	(9+4)-1,74	N.I.
Emenda:	Emenda Soldada	N.I.
Cota do Terreno Adjacente (m):	0,00	15/02/20
Cota de Topo (m):	1,20	04/06/20
Cota de Instalação dos Sensores (m):	0,20	Buena (Maggi)
Cota da Ponta (m):	-10,06	25,00
Comprimento Cravado (m):	10,06	220,00
Escavação Adicional (m):	0,00	Sondagem Próxima: Cota de sondagem: 912,077

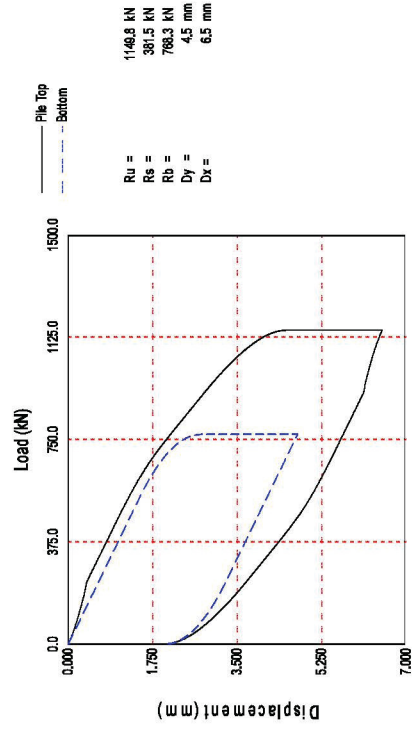
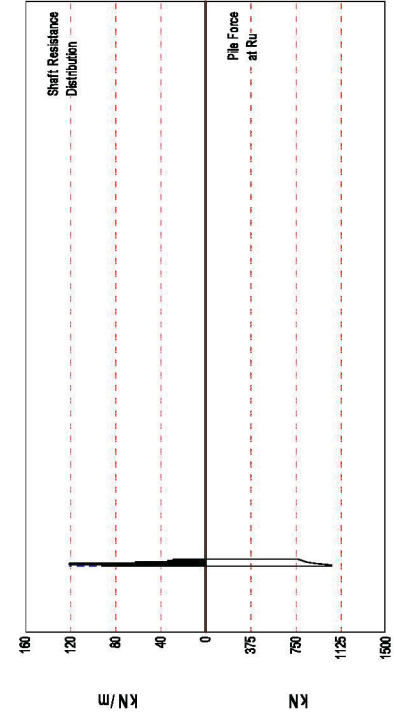
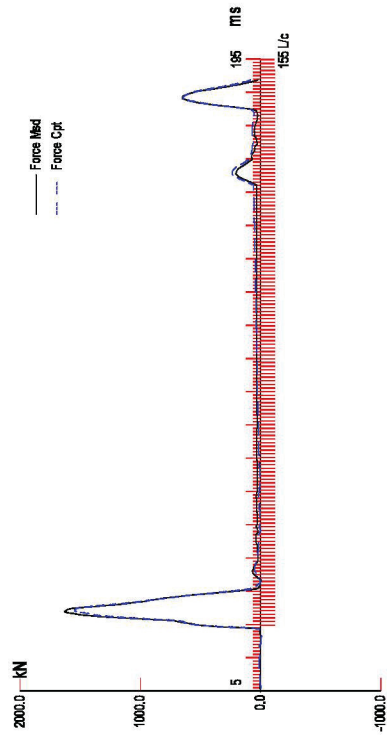
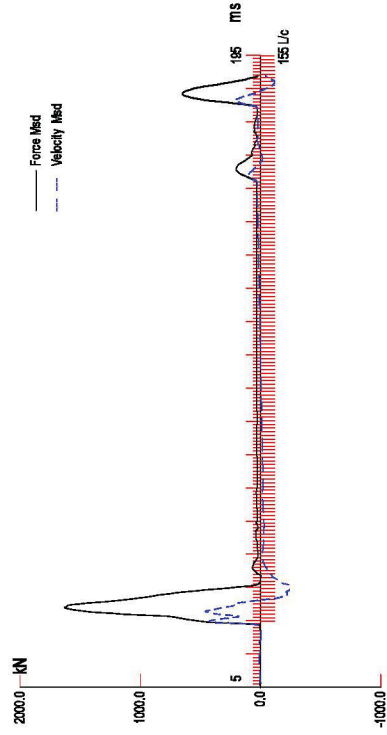
Método CASE Jc = CASE não se aplica

Golpe	Altura de Queda (m)	RMX (kN)	EMX (kN.m)	DMX (mm)	Nega (mm)	CSX (MPa)	TSX (MPa)	Eficiência
1	0,30	1,9	1,9	2,0	1,5	56,2	16,5	25%
2	0,60	825 <sup>(*)</sup>	5,5	6,0	5,0	81,6	15,2	37%
3	0,90		19,6	19,0	17,0	112,1	5,5	87%

(\*) Análise Capwap



COTAS DO ENSAIO  
N.T. = 0,00





TNA-01; Pile: E1190  
 TRINCHEIRA; Blow: 1  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 11:56:  
 CAPWAP(R) 2006  
 OP: AM

**CAPWAP SUMMARY RESULTS**

Total CAPWAP Capacity: 1149.8; along Shaft 381.5; at Toe 768.3 kN									
Soil Sgmnt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa	Smith Damping Factor s/m	Quake mm
				1149.8					
1	1.1	1.1	103.5	1046.3	103.5	92.08	49.51	1.492	1.004
2	2.2	2.2	136.4	909.9	239.9	121.35	65.24	1.492	1.004
3	3.4	3.4	70.5	839.4	310.4	62.72	33.72	1.492	1.004
4	4.5	4.5	38.3	801.1	348.7	34.07	18.32	1.492	1.004
5	5.6	5.6	32.8	768.3	381.5	29.18	15.69	1.492	0.895
Avg. Shaft			76.3			67.88	36.50	1.492	0.995
Toe			768.3				52229.78	1.704	2.115

Soil Model Parameters/Extensions		Shaft	Toe
Case Damping Factor		0.958	2.204
Unloading Quake	(% of loading quake)	47	84
Reloading Level	(% of Ru)	100	100
Unloading Level	(% of Ru)	53	
Soil Plug Weight	(kN)		3.83

CAPWAP match quality	= 3.36	(Wave Up Match) ; RSA = 0
Observed: final set	= 2.000 mm;	blow count = 500 b/m
Computed: final set	= 1.079 mm;	blow count = 927 b/m
max. Top Comp. Stress	= 107.92 MPa	(T= 29.4 ms, max= 1.000 x Top)
max. Comp. Stress	= 107.92 MPa	(Z= 1.1 m, T= 29.4 ms)
max. Tens. Stress	= -0.8 MPa	(Z= 1.1 m, T= 38.0 ms)
max. Energy (EMX)	= 4.05 kJ;	max. Measured Top Displ. (DMX)= 3.52 mm

TNA-01; Pile: E1190  
 TRINCHEIRA; Blow: 1  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 11:56:  
 CAPWAP(R) 2006  
 OP: AM

EXTREMA TABLE

Pile Sgmt No.	Dist. Below Gages m	max. Force kN	min. Force kN	max. Comp. Stress MPa	max. Tens. Stress MPa	max. Trnsfd. Energy kJ	max. Veloc. m/s	max. Displ. mm
1	1.1	1587.5	-12.4	107.92	-0.8	4.05	0.9	3.535
2	2.2	1435.8	-10.5	97.61	-0.7	3.22	0.7	3.116
3	3.4	1228.5	-8.6	83.52	-0.6	2.42	0.6	2.745
4	4.5	1126.7	-8.0	76.60	-0.5	2.02	0.5	2.426
5	5.6	1086.5	-7.6	73.86	-0.5	1.75	0.5	2.142
Absolute	1.1			107.92			(T =	29.4 ms)
	1.1				-0.8		(T =	38.0 ms)

CASE METHOD

J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	857.6	849.9	842.3	834.7	827.0	819.4	811.8	804.1	796.5	788.9
RX	1630.1	1597.7	1568.4	1545.1	1521.8	1498.5	1475.2	1455.9	1439.3	1422.7
RU	857.6	849.9	842.3	834.7	827.0	819.4	811.8	804.1	796.5	788.9

RAU = 956.5 (kN); RA2 = 899.2 (kN)

Current CAPWAP Ru = 1149.8 (kN); Corresponding J(RP) = 0.00;

RMX requires higher damping; see PDA-W

VMX	VFN	VT1*Z	FT1	FMX	DMX	DFN	SET	EMX	QUS
m/s	m/s	kN	kN	kN	mm	mm	mm	kJ	kN
0.80	-0.00	434.5	499.4	1653.6	3.518	2.004	2.000	3.9	1419.8

Peak Velocity Time = 25.01 ms.

PILE PROFILE AND PILE MODEL

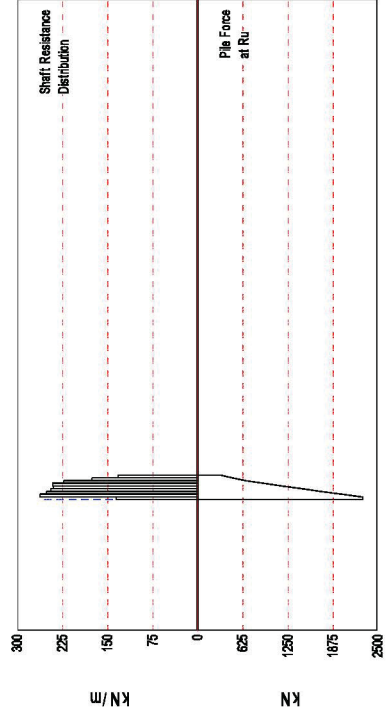
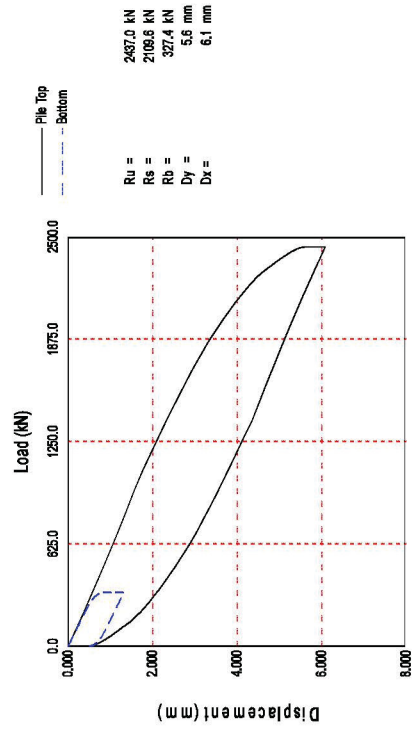
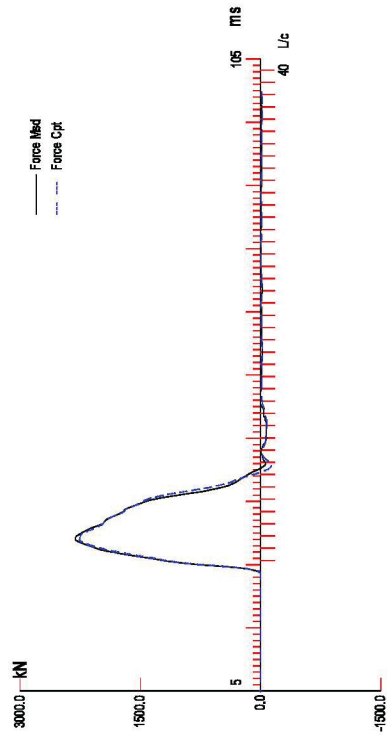
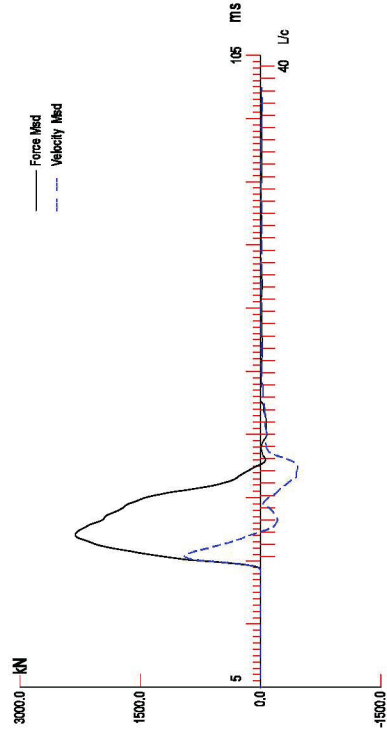
Depth m	Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Spec. Weight kN/m <sup>3</sup>	Perim. m
0.00	147.10	206840.0	77.287	1.860
5.62	147.10	206840.0	77.287	1.860
Toe Area	0.015	m <sup>2</sup>		

TNA-01; Pile: E1190  
TRINCHEIRA; Blow: 1  
IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 11:56:  
CAPWAP(R) 2006  
OP: AM

Segmnt Number	Dist. B.G. m	Impedance kN/m/s	Imped. Change %	Slack mm	Tension Eff.	Compression Slack mm	Eff.	Perim. m	Soil Plug kN
1	1.12	593.91	0.00	0.000	0.000	-0.000	0.000	1.860	0.00
2	2.25	593.91	0.00	0.000	0.000	-0.000	0.000	1.860	0.01
5	5.62	593.91	0.00	0.000	0.000	-0.000	0.000	1.860	0.01

File Damping 1.0 %, Time Incr 0.219 ms, Wave Speed 5123.0 m/s, 2L/c 2.2 ms



TNA-01; Pile: E1212  
 TRINCHEIRA; Blow: 3  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 11:10:  
 CAPWAP (R) 2006  
 OP: AM

**CAPWAP SUMMARY RESULTS**

Total CAPWAP Capacity: 2437.0; along Shaft 2109.6; at Toe 327.4 kN

Soil Sgmnt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa	Smith Damping Factor s/m	Quake mm
				2437.0					
1	1.1	0.9	150.1	2286.9	150.1	165.96	89.22	0.257	1.717
2	2.2	2.0	289.8	1997.1	439.9	262.39	141.07	0.257	1.667
3	3.3	3.1	278.4	1718.7	718.3	252.07	135.52	0.257	1.353
4	4.4	4.2	270.6	1448.1	988.9	245.01	131.73	0.257	1.139
5	5.5	5.3	265.3	1182.8	1254.2	240.21	129.15	0.257	0.915
6	6.6	6.4	266.8	916.0	1521.0	241.57	129.88	0.257	0.688
7	7.7	7.5	246.5	669.5	1767.5	223.19	119.99	0.257	0.517
8	8.8	8.6	194.8	474.7	1962.3	176.38	94.83	0.257	0.384
9	9.9	9.7	147.3	327.4	2109.6	133.37	71.70	0.257	0.260
Avg. Shaft			234.4			216.59	116.45	0.257	0.992
Toe			327.4				22256.97	0.804	0.628

**Soil Model Parameters/Extensions**

	Shaft	Toe
Case Damping Factor	0.914	0.443
Unloading Quake (% of loading quake)	72	100
Reloading Level (% of Ru)	100	100
Unloading Level (% of Ru)	0	
Soil Plug Weight (kN)		0.92

CAPWAP match quality = 1.94 (Wave Up Match) ; RSA = 0  
 Observed: final set = 0.500 mm; blow count = 2000 b/m  
 Computed: final set = 0.100 mm; blow count = 9999 b/m  
 max. Top Comp. Stress = 157.15 MPa (T= 29.8 ms, max= 1.000 x Top)  
 max. Comp. Stress = 157.15 MPa (Z= 1.1 m, T= 29.8 ms)  
 max. Tens. Stress = -11.0 MPa (Z= 1.1 m, T= 41.2 ms)  
 max. Energy (EMX) = 6.44 kJ; max. Measured Top Displ. (DMX) = 4.70 mm



TNA-01; Pile: E1212  
 TRINCHEIRA; Blow: 3  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 11:10:  
 CAPWAP (R) 2006  
 OP: AM

EXTREMA TABLE

Pile Sgmt No.	Dist. Below Gages m	max. Force kN	min. Force kN	max. Comp. Stress MPa	max. Tens. Stress MPa	max. Trnsfd. Energy kJ	max. Veloc. m/s	max. Displ. mm
1	1.1	2311.7	-162.0	157.15	-11.0	6.44	1.5	4.259
2	2.2	2212.6	-160.2	150.42	-10.9	4.97	1.3	3.475
3	3.3	1956.5	-143.8	133.01	-9.8	3.50	1.1	2.816
4	4.4	1687.3	-127.6	114.71	-8.7	2.40	0.9	2.252
5	5.5	1415.1	-118.2	96.20	-8.0	1.61	0.8	1.770
6	6.6	1156.2	-115.8	78.60	-7.9	1.04	0.7	1.372
7	7.7	895.5	-118.4	60.88	-8.1	0.64	0.6	1.059
8	8.8	671.3	-110.0	45.64	-7.5	0.38	0.5	0.827
9	9.9	490.8	-92.1	33.36	-6.3	0.16	0.4	0.660
Absolute	1.1			157.15			(T =	29.8 ms)
	1.1				-11.0		(T =	41.2 ms)

CASE METHOD

J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	2204.7	2210.1	2215.6	2221.0	2226.4	2231.9	2237.3	2242.8	2248.2	2253.7
RX	2404.0	2395.5	2388.1	2380.7	2375.2	2370.5	2365.8	2361.1	2356.4	2351.7
RU	2204.7	2210.1	2215.6	2221.0	2226.4	2231.9	2237.3	2242.8	2248.2	2253.7

RAU = 2204.7 (kN); RA2 = 2204.7 (kN)

Current CAPWAP Ru = 2437.0 (kN); Corresponding J(RP) = 0.00; J(RX) = 0.00

VMX	VFN	VT1+Z	FT1	FMX	DMX	DFN	SET	EMX	QUS
m/s	m/s	kN	kN	kN	mm	mm	mm	kJ	kN
1.62	-0.00	961.2	1189.0	2318.4	4.703	0.519	0.500	6.9	2661.4

Peak Velocity Time = 25.87 ms.

PILE PROFILE AND PILE MODEL

Depth m	Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Spec. Weight kN/m <sup>3</sup>	Perim. m
0.00	147.10	206840.0	77.287	1.860
9.94	147.10	206840.0	77.287	1.860

Toe Area 0.015 m<sup>2</sup>

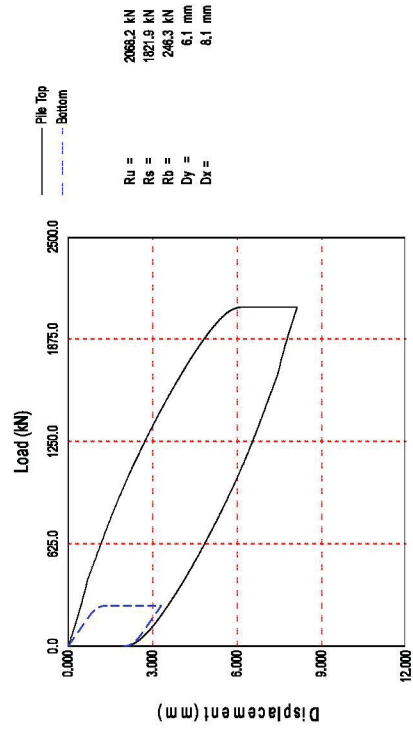
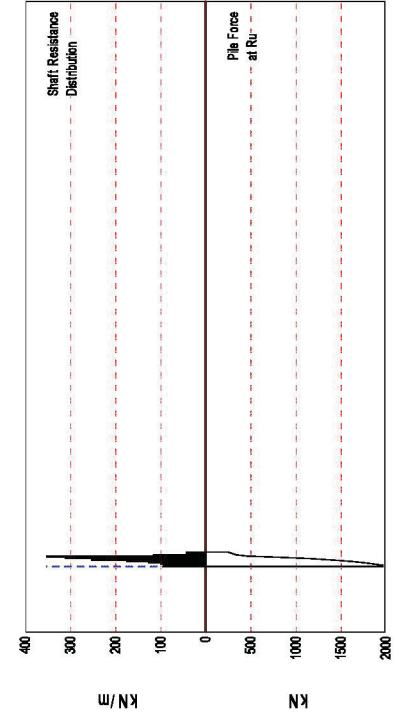
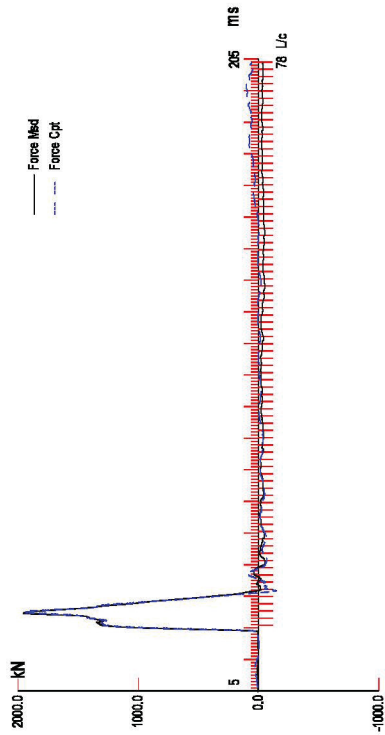
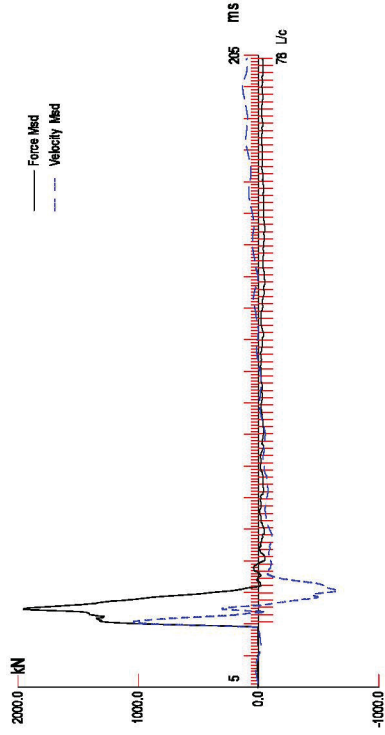
Top Segment Length 1.10 m, Top Impedance 593.91 kN/m/s

TNA-01; Pile: E1212  
TRINCHEIRA; Blow: 3  
IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 11:10:  
CAPWAP(R) 2006  
OP: AM

---

Pile Damping 1.0 %, Time Incr 0.216 ms, Wave Speed 5123.0 m/s, 2L/c 3.9 ms



TNA-01; Pile: E1233  
 TRINCHEIRA; Blow: 2  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 09:50:  
 CAPWAP(R) 2006  
 OP: AM

CAPWAP SUMMARY RESULTS

Total CAPWAP Capacity: 2068.2; along Shaft 1821.9; at Toe 246.3 kN

Soil Sgmnt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa	Smith Damping Factor s/m	Quake mm
				2068.2					
1	1.1	0.9	101.2	1967.0	101.2	117.06	62.93	0.134	1.005
2	2.1	1.9	98.5	1868.5	199.7	92.53	49.75	0.134	1.005
3	3.2	3.0	107.5	1761.0	307.2	100.98	54.29	0.134	1.005
4	4.3	4.1	136.0	1625.0	443.2	127.75	68.68	0.134	1.005
5	5.3	5.1	187.1	1437.9	630.3	175.76	94.49	0.134	1.005
6	6.4	6.2	270.9	1167.0	901.2	254.47	136.81	0.134	1.005
7	7.5	7.3	332.9	834.1	1234.1	312.72	168.13	0.134	1.005
8	8.5	8.3	376.5	457.6	1610.6	353.67	190.15	0.134	1.005
9	9.6	9.4	124.9	332.7	1735.5	117.33	63.08	0.134	1.005
10	10.6	10.4	39.6	293.1	1775.1	37.20	20.00	0.134	0.939
11	11.7	11.5	46.8	246.3	1821.9	43.96	23.64	0.134	0.843
Avg. Shaft			165.6			158.29	85.10	0.134	0.999
Toe			246.3				16743.71	0.358	1.004

Soil Model Parameters/Extensions

	Shaft	Toe
Case Damping Factor	0.411	0.148
Unloading Quake (% of loading quake)	33	78
Reloading Level (% of Ru)	100	100
Unloading Level (% of Ru)	0	
Soil Plug Weight (kN)		0.53

CAPWAP match quality = 3.48 (Wave Up Match) ; RSA = 0  
 Observed: final set = 2.000 mm; blow count = 500 b/m  
 Computed: final set = 0.100 mm; blow count = 9999 b/m  
 max. Top Comp. Stress = 136.85 MPa (T= 30.3 ms, max= 1.000 x Top)  
 max. Comp. Stress = 136.85 MPa (Z= 1.1 m, T= 30.3 ms)  
 max. Tens. Stress = -15.0 MPa (Z= 5.3 m, T= 38.7 ms)  
 max. Energy (EMX) = 6.09 kJ; max. Measured Top Displ. (DMX) = 5.07 mm

TNA-01; Pile: E1233  
 TRINCHEIRA; Blow: 2  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 09:50:  
 CAPWAP (R) 2006  
 OP: AM

EXTREMA TABLE

Pile Sgmt No.	Dist. Below Gages m	max. Force kN	min. Force kN	max. Comp. Stress MPa	max. Tens. Stress MPa	max. Trnsfd. Energy kJ	max. Veloc. m/s	max. Displ. mm
1	1.1	2013.1	-120.2	136.85	-8.2	6.09	1.7	4.651
2	2.1	1901.9	-131.9	129.29	-9.0	5.25	1.6	4.159
3	3.2	1713.7	-177.8	116.50	-12.1	4.49	1.5	3.665
4	4.3	1540.7	-211.3	104.74	-14.4	3.78	1.3	3.187
5	5.3	1471.1	-220.3	100.01	-15.0	3.10	1.2	2.737
6	6.4	1338.4	-216.3	90.98	-14.7	2.44	1.0	2.338
7	7.5	1102.2	-186.0	74.93	-12.6	1.79	0.9	2.027
8	8.5	836.9	-136.8	56.90	-9.3	1.25	0.8	1.845
9	9.6	531.1	-109.6	36.11	-7.5	0.73	0.8	1.779
10	10.6	439.6	-82.9	29.89	-5.6	0.57	1.0	1.720
11	11.7	383.7	-63.9	26.08	-4.3	0.52	1.1	1.648
Absolute	1.1			136.85			(T =	30.3 ms)
	5.3				-15.0		(T =	38.7 ms)

CASE METHOD

J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	1980.8	1944.5	1908.1	1871.8	1835.4	1799.0	1762.7	1726.3	1690.0	1653.6
RX	1993.9	1954.2	1914.6	1874.9	1835.4	1799.0	1762.7	1726.3	1693.8	1662.2
RU	2225.2	2213.3	2201.4	2189.5	2177.6	2165.7	2153.7	2141.8	2129.9	2118.0

RAU = 1414.1 (kN); RA2 = 1946.2 (kN)

Current CAPWAP Ru = 2068.2 (kN); Corresponding J(RP) = 0.00; J(RX) = 0.00

VMX	VFN	VT1*Z	FT1	FMX	DMX	DFN	SET	EMX	QUS
m/s	m/s	kN	kN	kN	mm	mm	mm	kJ	kN
1.79	-0.00	1064.8	1279.6	1972.3	5.073	2.010	2.000	6.4	1822.4

Peak Velocity Time = 25.97 ms.

PILE PROFILE AND PILE MODEL

Depth m	Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Spec. Weight kN/m <sup>3</sup>	Perim. m
0.00	147.10	206840.0	77.287	1.860
11.71	147.10	206840.0	77.287	1.860
Toe Area	0.015	m <sup>2</sup>		



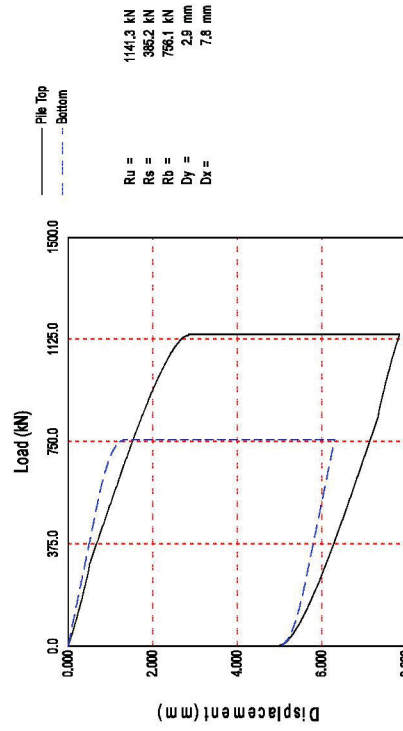
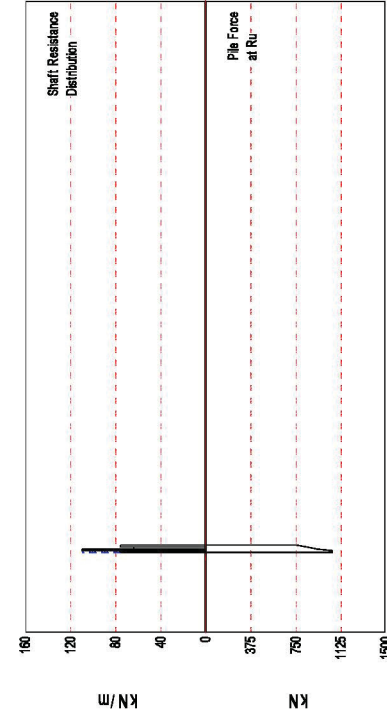
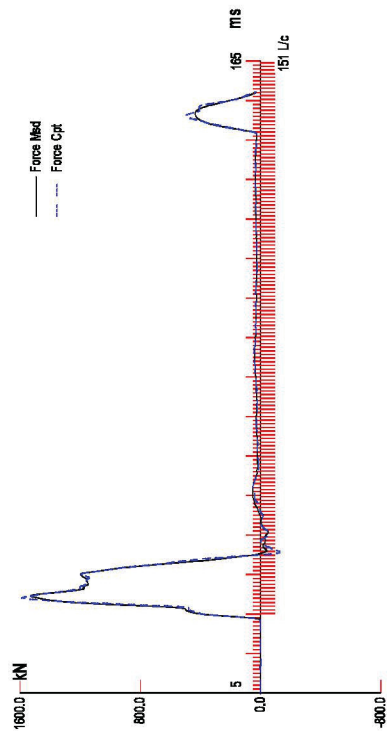
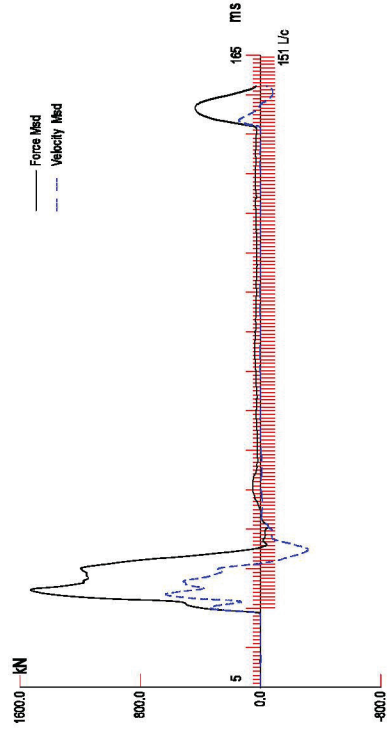
TNA-01; Pile: E1233  
TRINCHEIRA; Blow: 2  
IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 09:50:  
CAPWAP(R) 2006  
OP: AM

---

Top Segment Length      1.06 m, Top Impedance      593.91 kN/m/s

File Damping      1.0 %, Time Incr      0.208 ms, Wave Speed      5123.0 m/s, 2L/c      4.6 ms



TNA-01; Pile: E2206  
 TRINCHEIRA; Blow: 2  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 14:47:  
 CAPWAP (R) 2006  
 OP: AM

CAPWAP SUMMARY RESULTS

Total CAPWAP Capacity: 1141.3; along Shaft 385.2; at Toe 756.1 kN

Soil Sgmt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa	Smith Damping Factor s/m
				1141.3				
1	1.2	1.0	89.8	1051.5	89.8	91.40	49.14	0.522
2	2.4	2.2	130.0	921.5	219.8	109.94	59.11	0.522
3	3.5	3.3	75.6	845.9	295.4	63.93	34.37	0.522
4	4.7	4.5	89.8	756.1	385.2	75.94	40.83	0.522
Avg. Shaft			96.3			85.03	45.72	0.522
Toe			756.1				51400.41	0.079

Soil Model Parameters/Extensions

	Shaft	Toe
Quake	1.004	1.005
Case Damping Factor	0.339	0.100
Unloading Quake (% of loading quake)	30	34
Reloading Level (% of Ru)	100	100
Unloading Level (% of Ru)	8	
Resistance Gap (included in Toe Quake)		0.001
Soil Plug Weight (kN)		3.72

CAPWAP match quality = 2.80 (Wave Up Match) ; RSA = 0  
 Observed: final set = 5.000 mm; blow count = 200 b/m  
 Computed: final set = 4.804 mm; blow count = 208 b/m  
 max. Top Comp. Stress = 108.31 MPa (T= 29.1 ms, max= 1.000 x Top)  
 max. Comp. Stress = 108.31 MPa (Z= 1.2 m, T= 29.1 ms)  
 max. Tens. Stress = -9.2 MPa (Z= 1.2 m, T= 40.9 ms)  
 max. Energy (EMX) = 7.99 kJ; max. Measured Top Displ. (DMX) = 7.27 mm

EXTREMA TABLE

Pile Sgmt No.	Dist. Below Gages m	max. Force kN	min. Force kN	max. Comp. Stress MPa	max. Tens. Stress MPa	max. Trnsfd. Energy kJ	max. Veloc. m/s	max. Displ. mm
1	1.2	1593.3	-134.9	108.31	-9.2	7.99	0.8	7.050
2	2.4	1449.9	-105.0	98.57	-7.1	7.07	0.9	6.718
3	3.5	1262.1	-83.7	85.80	-5.7	5.94	1.0	6.449
4	4.7	1110.6	-65.1	75.50	-4.4	4.57	1.0	6.195
Absolute	1.2			108.31			(T =	29.1 ms)
	1.2				-9.2		(T =	40.9 ms)

CASE METHOD

J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	596.9	583.1	569.3	555.5	541.7	527.8	514.0	500.2	486.4	472.6
RX	1541.1	1501.1	1461.0	1421.0	1381.0	1340.9	1300.9	1263.3	1228.2	1193.2
RU	596.9	583.1	569.3	555.5	541.7	527.8	514.0	500.2	486.4	472.6

RAU = 678.2 (kN); RA2 = 670.5 (kN)

Current CAPWAP Ru = 1141.3 (kN); Corresponding J(RP) = 0.00

J(RX) = 0.9 matches RX9 within 5%

VMX	VFN	VT1+Z	FT1	FMX	DMX	DFN	SET	EMX	QUS
m/s	m/s	kN	kN	kN	mm	mm	mm	kJ	kN
1.08	-0.00	343.7	391.2	1538.7	7.274	5.005	5.000	8.2	1341.5

Peak Velocity Time = 25.39 ms.

PILE PROFILE AND PILE MODEL

Depth m	Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Spec. Weight kN/m <sup>3</sup>	Perim. m
0.00	147.10	206840.0	77.287	1.860
4.73	147.10	206840.0	77.287	1.860

Toe Area 0.015 m<sup>2</sup>

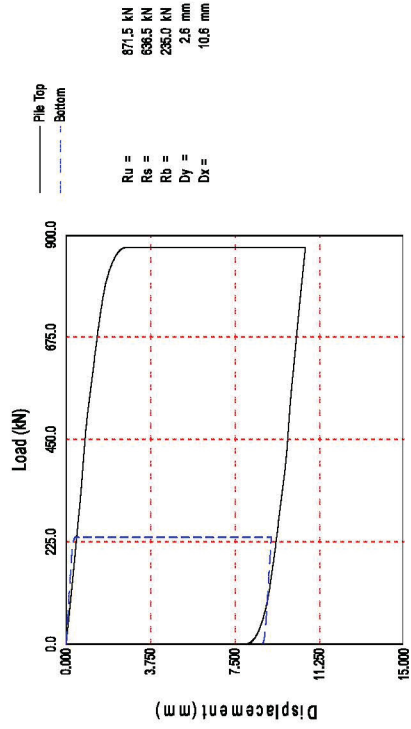
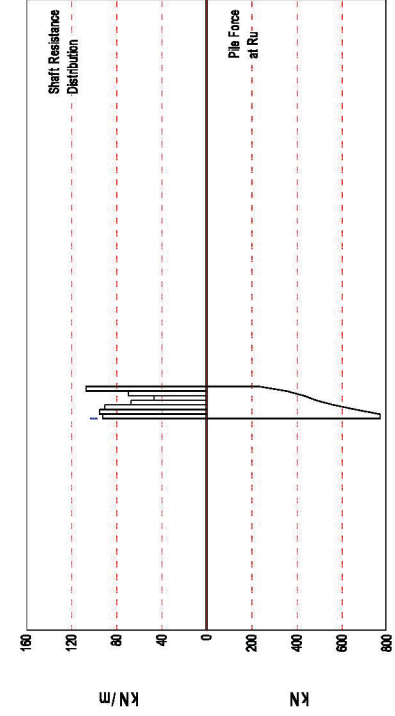
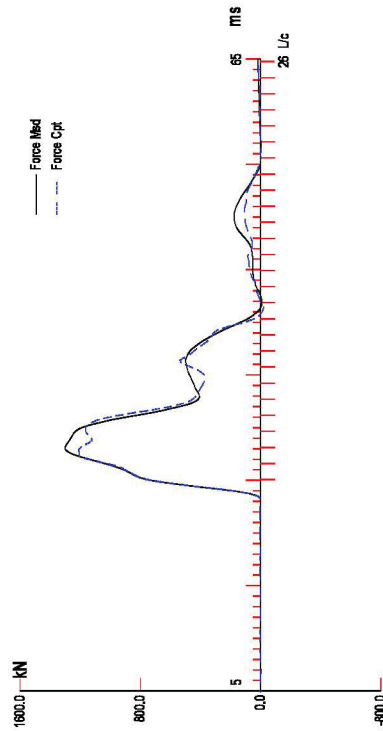
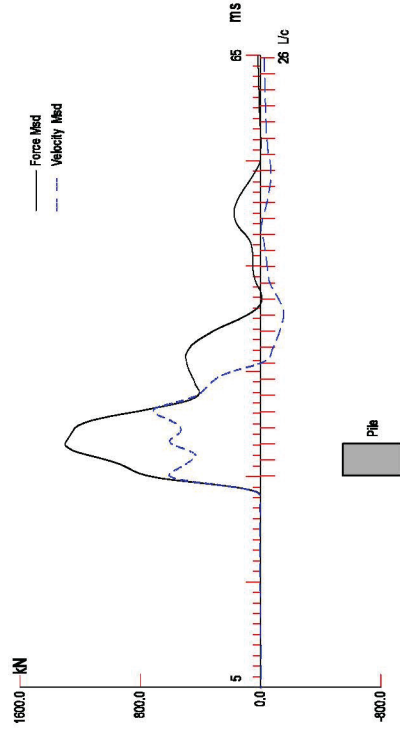
TNA-01; Pile: E2206  
TRINCHEIRA; Blow: 2  
IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 14:47:  
CAPWAP(R) 2006  
OP: AM

Segmnt Number	Dist. B.G. m	Impedance kN/m/s	Imped. Change %	Slack mm	Tension Eff.	Compression Slack mm	Eff.	Perim. m	Soil Plug kN
1	1.18	593.91	0.00	0.000	0.000	-0.000	0.000	1.860	0.00
2	2.37	593.91	0.00	0.000	0.000	-0.000	0.000	1.860	0.02
4	4.73	593.91	0.00	0.000	0.000	-0.000	0.000	1.860	0.02

File Damping 1.0 %, Time Incr 0.231 ms, Wave Speed 5123.0 m/s, 2L/c 1.8 ms





TNA-01; Pile: E2211  
 TRINCHEIRA; Blow: 2  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 15:17:  
 CAPWAP (R) 2006  
 OP: AM

CAPWAP SUMMARY RESULTS

Total CAPWAP Capacity: 871.5; along Shaft 636.5; at Toe 235.0 kN									
Soil Sgmnt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa	Smith Damping Factor s/m	Quake mm
				871.5					
1	1.1	0.9	103.2	768.3	103.2	112.52	60.50	0.154	1.004
2	2.2	2.0	106.4	661.9	209.6	95.24	51.21	0.154	1.004
3	3.4	3.2	101.3	560.6	310.9	90.68	48.75	0.154	1.004
4	4.5	4.3	75.3	485.3	386.2	67.40	36.24	0.154	1.004
5	5.6	5.4	52.8	432.5	439.0	47.26	25.41	0.154	1.004
6	6.7	6.5	77.7	354.8	516.7	69.55	37.39	0.154	1.004
7	7.8	7.6	119.8	235.0	636.5	107.24	57.65	0.154	0.050
Avg. Shaft			90.9			83.53	44.91	0.154	0.825
Toe			235.0				15975.53	0.080	0.288

Soil Model Parameters/Extensions		Shaft	Toe
Case Damping Factor		0.165	0.032
Damping Type		Smith	Smith
Unloading Quake	(% of loading quake)	114	57
Reloading Level	(% of Ru)	100	100
Unloading Level	(% of Ru)	0	
Soil Plug Weight	(kN)		0.00
Soil Support Dashpot		0.761	0.000
Soil Support Weight	(kN)	10.39	0.00

CAPWAP match quality = 4.57 (Wave Up Match) ; RSA = 0  
 Observed: final set = 8.000 mm; blow count = 125 b/m  
 Computed: final set = 6.990 mm; blow count = 143 b/m  
 max. Top Comp. Stress = 79.86 MPa (T= 29.4 ms, max= 1.000 x Top)  
 max. Comp. Stress = 79.86 MPa (Z= 1.1 m, T= 29.4 ms)  
 max. Tens. Stress = -3.6 MPa (Z= 6.7 m, T= 172.7 ms)  
 max. Energy (EMX) = 8.40 kJ; max. Measured Top Displ. (DMX) = 9.39 mm

EXTREMA TABLE

Pile Sgmt No.	Dist. Below Gages m	max. Force kN	min. Force kN	max. Comp. Stress MPa	max. Tens. Stress MPa	max. Trnsfd. Energy kJ	max. Veloc. m/s	max. Displ. mm
1	1.1	1174.8	-14.9	79.86	-1.0	8.40	1.3	9.549
2	2.2	1091.6	-7.1	74.21	-0.5	7.34	1.3	9.374
3	3.4	1008.7	-19.2	68.57	-1.3	6.28	1.3	9.206
4	4.5	908.1	-19.4	61.73	-1.3	5.29	1.4	9.077
5	5.6	796.3	-25.9	54.13	-1.8	4.57	1.4	8.984
6	6.7	654.9	-53.4	44.52	-3.6	4.09	1.4	8.895
7	7.8	404.3	-0.3	27.49	-0.0	2.24	1.4	8.800
Absolute	1.1			79.86			(T = 29.4 ms)	
	6.7				-3.6		(T = 172.7 ms)	

CASE METHOD

J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	1044.4	1012.4	980.3	948.2	916.2	884.1	852.1	820.0	788.0	755.9
RX	1108.4	1058.4	1019.5	981.3	944.5	907.8	871.1	834.4	797.6	760.9
RU	1044.4	1012.4	980.3	948.2	916.2	884.1	852.1	820.0	788.0	755.9
RAU =	91.7 (kN);		RA2 = 1067.6 (kN)							

Current CAPWAP Ru = 871.5 (kN); Corresponding J(RP) = 0.54; J(RX) = 0.60

VMX	VFN	VT1*Z	FT1	FMX	DMX	DFN	SET	EMX	QUS
m/s	m/s	kN	kN	kN	mm	mm	mm	kJ	kN
1.22	-0.00	622.3	742.6	1308.2	9.393	8.087	8.000	8.2	944.6

Peak Velocity Time = 25.30 ms.

PILE PROFILE AND PILE MODEL

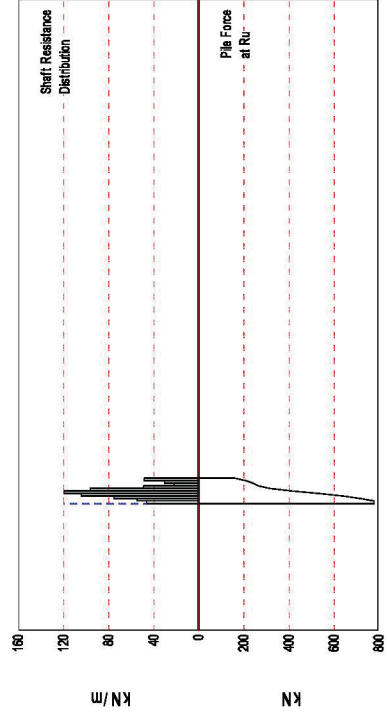
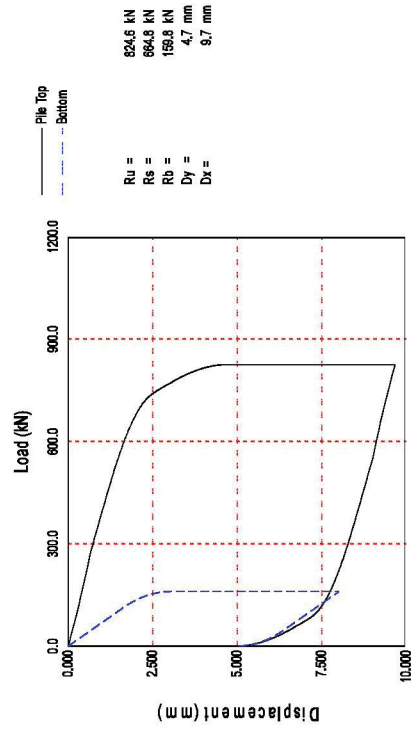
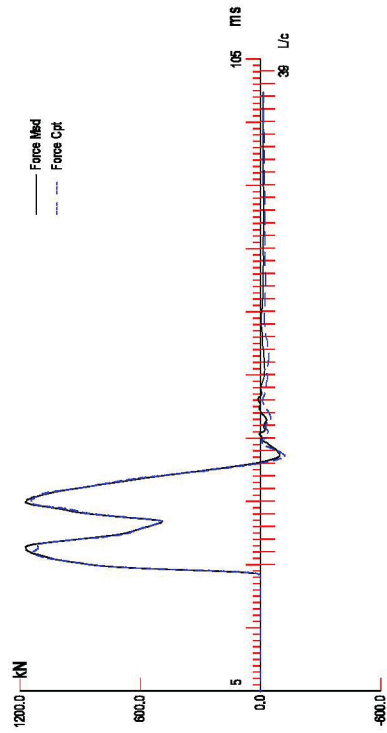
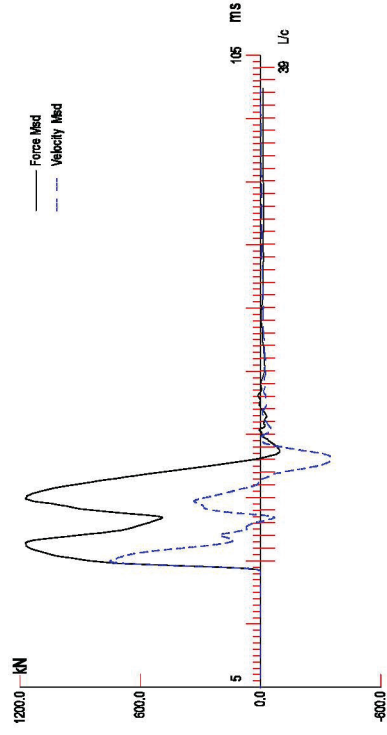
Depth m	Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Spec. Weight kN/m <sup>3</sup>	Perim. m
0.00	147.10	206840.0	77.287	1.860
7.82	147.10	206840.0	77.287	1.860
Toe Area	0.015	m <sup>2</sup>		

TNA-01; Pile: E2211  
 TRINCHEIRA; Blow: 2  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 15:17:  
 CAPWAP(R) 2006  
 OP: AM

Segmnt Number	Dist. B.G. m	Impedance kN/m/s	Imped. Change %	Slack mm	Tension Eff.	Compression Slack mm	Eff.	Perim. m	Soil Plug kN
1	1.12	593.91	0.00	0.000	0.000	-0.000	0.000	1.860	0.00
2	2.23	593.91	0.00	0.200	0.500	-0.000	0.000	1.860	0.43
3	3.35	593.91	0.00	0.500	1.000	-0.000	0.000	1.860	0.43
4	4.47	593.91	0.00	0.050	0.200	-0.000	0.000	1.860	0.43
5	5.59	593.91	0.00	0.200	0.200	-0.000	0.000	1.860	1.07
6	6.70	593.91	0.00	1.000	1.000	-0.000	0.000	1.860	1.60
7	7.82	593.91	0.00	0.000	0.000	-0.000	0.000	1.860	0.00

File Damping 1.0 %, Time Incr 0.218 ms, Wave Speed 5123.0 m/s, 2L/c 3.1 ms





TNA-01; Pile: E2215  
 TRINCHEIRA; Blow: 2  
 IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 15:44:  
 CAPWAP(R) 2006  
 OP: AM

CAPWAP SUMMARY RESULTS

Total CAPWAP Capacity: 824.6; along Shaft 664.8; at Toe 159.8 kN

Soil Sgmt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa	Smith Damping Factor s/m
				824.6				
1	1.0	0.8	47.7	776.9	47.7	57.75	31.05	0.960
2	2.1	1.9	56.6	720.3	104.3	55.17	29.66	0.960
3	3.1	2.9	77.3	643.0	181.6	75.34	40.51	0.960
4	4.1	3.9	107.2	535.8	288.8	104.48	56.17	0.960
5	5.1	4.9	122.8	413.0	411.6	119.69	64.35	0.960
6	6.2	6.0	99.0	314.0	510.6	96.49	51.88	0.960
7	7.2	7.0	50.5	263.5	561.1	49.22	26.46	0.960
8	8.2	8.0	22.6	240.9	583.7	22.03	11.84	0.960
9	9.2	9.0	31.3	209.6	615.0	30.51	16.40	0.960
10	10.3	10.1	49.8	159.8	664.8	48.54	26.10	0.960
Avg. Shaft			66.5			66.08	35.53	0.960
Toe			159.8				10863.36	0.300

Soil Model Parameters/Extensions

	Shaft	Toe
Quake	1.004	2.308
Case Damping Factor	1.075	0.081
Unloading Quake (% of loading quake)	32	69
Reloading Level (% of Ru)	100	100
Unloading Level (% of Ru)	22	
Resistance Gap (included in Toe Quake)		0.304
Soil Plug Weight (kN)		3.37

CAPWAP match quality = 2.73 (Wave Up Match) ; RSA = 0  
 Observed: final set = 5.000 mm; blow count = 200 b/m  
 Computed: final set = 3.999 mm; blow count = 250 b/m  
 max. Top Comp. Stress = 80.36 MPa (T= 27.0 ms, max= 1.000 x Top)  
 max. Comp. Stress = 80.36 MPa (Z= 1.0 m, T= 27.0 ms)  
 max. Tens. Stress = -10.6 MPa (Z= 1.0 m, T= 42.5 ms)  
 max. Energy (EMX) = 5.56 kJ; max. Measured Top Displ. (DMX) = 5.74 mm

EXTREMA TABLE

Pile Sgmt No.	Dist. Below Gages m	max. Force kN	min. Force kN	max. Comp. Stress MPa	max. Tens. Stress MPa	max. Trnsfd. Energy kJ	max. Veloc. m/s	max. Displ. mm
1	1.0	1182.0	-155.8	80.36	-10.6	5.56	1.2	5.699
2	2.1	1139.5	-152.8	77.47	-10.4	5.08	1.1	5.475
3	3.1	1103.4	-139.2	75.01	-9.5	4.60	1.0	5.307
4	4.1	1023.8	-107.1	69.60	-7.3	4.01	0.9	5.176
5	5.1	881.3	-54.6	59.91	-3.7	3.28	0.8	5.079
6	6.2	698.1	-7.2	47.46	-0.5	2.47	0.8	5.016
7	7.2	544.3	-0.3	37.00	-0.0	1.81	0.9	4.975
8	8.2	509.6	-0.2	34.64	-0.0	1.46	0.9	4.942
9	9.2	477.8	-0.3	32.48	-0.0	1.30	0.9	4.904
10	10.3	383.7	-0.3	26.09	-0.0	0.72	0.9	4.866
Absolute	1.0			80.36			(T =	27.0 ms)
	1.0				-10.6		(T =	42.5 ms)

CASE METHOD

J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	1181.5	1141.9	1102.3	1062.7	1023.1	983.5	943.9	904.3	864.7	825.1
RX	1181.5	1141.9	1102.3	1062.7	1023.1	983.5	959.1	951.6	944.2	941.3
RU	1181.5	1141.9	1102.3	1062.7	1023.1	983.5	943.9	904.3	864.7	825.1

RAU = 744.7 (kN); RA2 = 1098.4 (kN)

Current CAPWAP Ru = 824.6 (kN);

Case Method matching requires higher damping factor - please check with PDA-W

VMX	VFN	VT1*Z	FT1	FMX	DMX	DFN	SET	EMX	QUS
m/s	m/s	kN	kN	kN	mm	mm	mm	kJ	kN
1.30	-0.00	773.2	804.2	1199.8	5.743	5.016	5.000	5.5	1029.0

Peak Velocity Time = 25.23 ms.

PILE PROFILE AND PILE MODEL

Depth m	Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Spec. Weight kN/m <sup>3</sup>	Perim. m
0.00	147.10	206840.0	77.287	1.860
10.26	147.10	206840.0	77.287	1.860
Toe Area	0.015	m <sup>2</sup>		

TNA-01; Pile: E2215  
TRINCHEIRA; Blow: 2  
IN SITU GEOTECNIA S/C

Test: 04-Jun-2020 15:44:  
CAPWAP(R) 2006  
OP: AM

---

Top Segment Length      1.03 m, Top Impedance      593.91 kN/m/s

File Damping      1.0 %, Time Incr      0.200 ms, Wave Speed      5123.0 m/s, 2L/c      4.0 ms

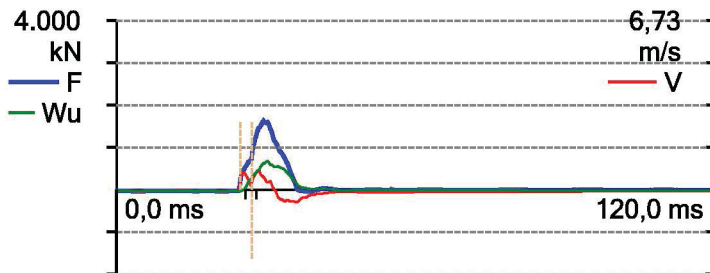
Os gráficos nas folhas a seguir apresentam as informações:

- 1) Força (F) e Velocidade (V) medidas no nível dos sensores;
- 2) Onda Ascendente (WU) e deslocamento (D) no nível dos sensores, ao longo do tempo

## CONVENÇÕES

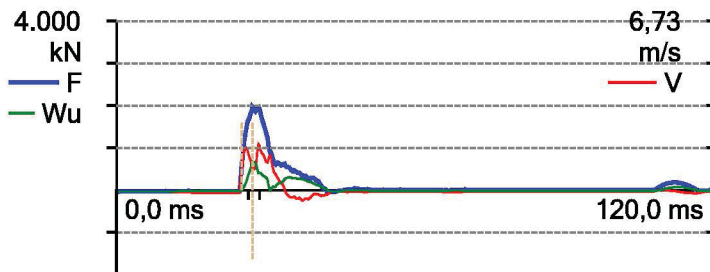
<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
<b>2L/c</b>	Tempo de retorno da onda gerada pelo impacto do martelo à região dos sensores
<b>AR</b>	Área de seção efetiva da estaca
<b>CSB</b>	Tensão máxima de compressão na ponta da estaca
<b>CSI</b>	Tensão máxima de compressão na região dos sensores; valor calculado a partir do maior dos sinais de força.
<b>CSX</b>	Tensão máxima de compressão na região dos sensores; valor calculado a partir da média dos sinais de força ( $CSX=FMX/AR$ )
<b>DFN</b>	Deslocamento permanente ao final do golpe
<b>DMX</b>	Deslocamento máximo da estaca durante o golpe
<b>EA/c</b>	Impedância da estaca
<b>EM</b>	Módulo de elasticidade dinâmico do material da estaca
<b>EMX</b>	Energia máxima transferida para a estaca durante o golpe, na região dos sensores
<b>ETR</b>	Eficiência = $EMX /$ Energia disponível do martelo
<b>FMX</b>	Força dinâmica aplicada à estaca, medida na região dos sensores
<b>FR</b>	Frequência
<b>JC</b>	<i>Damping</i> do método CASE (fator de amortecimento do solo)
<b>LE</b>	Comprimento de estaca abaixo dos sensores
<b>LP</b>	Comprimento da estaca embutido no solo
<b>RMX</b>	Resistência mobilizada calculada pelo método CASE, para um fator de amortecimento ( $Jc$ ) adotado com base nas análises CAPWAP®
<b>SP</b>	Peso específico do material da estaca
<b>STK</b>	<i>Stroke</i> (elevação do martelo)
<b>TSX</b>	Máxima tensão de tração calculada ao longo do fuste da estaca
<b>WC</b>	Velocidade média de propagação da onda na estaca, obtida através do ajuste do sinal, observando-se a resposta de ponta
<b>WS</b>	Velocidade de propagação de onda na região onde os sensores são fixados na estaca

Project: TNA-01  
 Pile: E1190 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM - Comment: CASE não se aplica



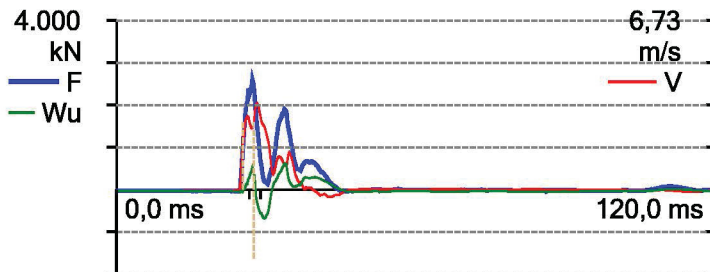
BN 1  
 04/06/2020 11:56:19  
 LP 5,4 m LE 5,6 m  
 EMX 3,9 kN-m AR 147,10 cm<sup>2</sup>  
 CSX 112,4 MPa EM 206.840 MPa  
 CSI 183,3 MPa SP 77,3 kN/m<sup>3</sup>  
 TSX 2,7 MPa WS 5.123,0 m/s  
 DMX 4 mm WC 5.109,1 m/s  
 DFN 2 mm 2L/c 2,20 ms  
 FMX 1.654 kN EA/c 594 kN-s/m  
 ETR 16,4 (%) FR 5,000 kHz  
 CSB 80,7 MPa  
 FMX 1.654 kN

Project: TNA-01  
 Pile: E1190 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



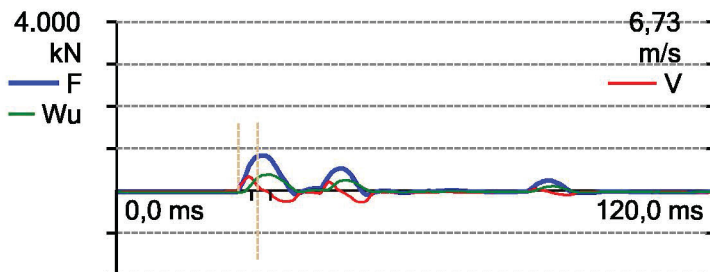
BN 2  
 04/06/2020 11:59:25  
 LP 5,4 m LE 5,6 m  
 EMX 13,8 kN-m AR 147,10 cm<sup>2</sup>  
 CSX 135,1 MPa EM 206.840 MPa  
 CSI 175,5 MPa SP 77,3 kN/m<sup>3</sup>  
 TSX 2,3 MPa WS 5.123,0 m/s  
 DMX 9 mm WC 5.109,1 m/s  
 DFN 7 mm 2L/c 2,20 ms  
 FMX 1.988 kN EA/c 594 kN-s/m  
 ETR 57,8 (%) FR 5,000 kHz  
 CSB 83,8 MPa  
 FMX 1.988 kN

Project: TNA-01  
 Pile: E1190 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



BN 3  
 04/06/2020 12:00:48  
 LP 5,4 m LE 5,6 m  
 EMX 28,6 kN-m AR 147,10 cm<sup>2</sup>  
 CSX 177,2 MPa EM 206.840 MPa  
 CSI 202,1 MPa SP 77,3 kN/m<sup>3</sup>  
 TSX 3,3 MPa WS 5.123,0 m/s  
 DMX 25 mm WC 5.109,1 m/s  
 DFN 19 mm 2L/c 2,20 ms  
 FMX 2.607 kN EA/c 594 kN-s/m  
 ETR 119,8 (%) FR 5,000 kHz  
 CSB 74,8 MPa  
 FMX 2.607 kN

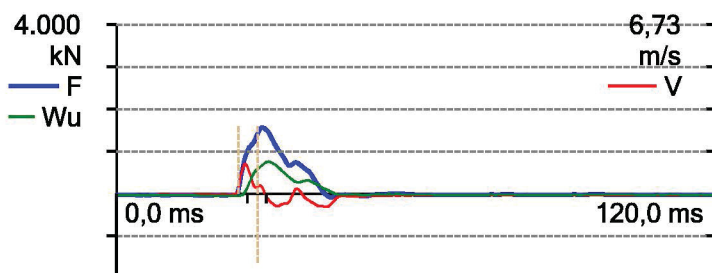
Project: TNA-01  
 Pile: E1212 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM - Comment: CASE não se aplica



BN 1  
 04/06/2020 11:05:46  
 LP 9,7 m LE 9,9 m  
 EMX 1,1 kN-m AR 147,10 cm<sup>2</sup>  
 CSX 58,4 MPa EM 206.840 MPa  
 CSI 81,9 MPa SP 77,3 kN/m<sup>3</sup>  
 TSX 8,5 MPa WS 5.123,0 m/s  
 DMX 2 mm WC 5.231,6 m/s  
 DFN 0 mm 2L/c 3,80 ms  
 FMX 859 kN EA/c 594 kN-s/m  
 ETR 4,7 (%) FR 5,000 kHz  
 CSB 43,5 MPa  
 FMX 859 kN



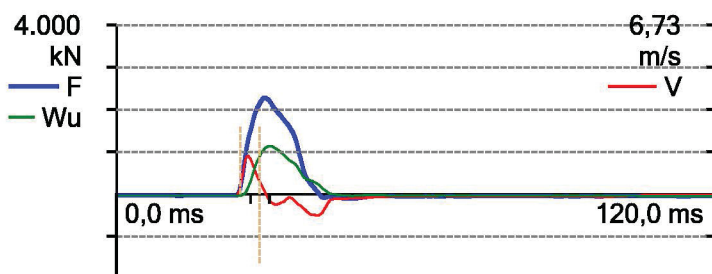
Project: TNA-01  
 Pile: E1212 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



BN 2  
 04/06/2020 11:06:59

LP	9,7 m	LE	9,9 m
EMX	3,3 kN-m	AR	147,10 cm <sup>2</sup>
CSX	108,1 MPa	EM	206.840 MPa
CSI	163,2 MPa	SP	77,3 kN/m <sup>3</sup>
TSX	9,0 MPa	WS	5.123,0 m/s
DMX	4 mm	WC	5.231,6 m/s
DFN	0 mm	2L/c	3,80 ms
FMX	1.591 kN	EA/c	594 kN-s/m
ETR	14,0 (%)	FR	5,000 kHz
CSB	55,5 MPa		
FMX	1.591 kN		

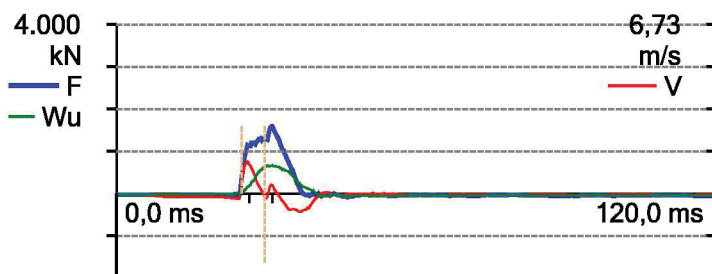
Project: TNA-01  
 Pile: E1212 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



BN 3  
 04/06/2020 11:10:24

LP	9,7 m	LE	9,9 m
EMX	6,8 kN-m	AR	147,10 cm <sup>2</sup>
CSX	156,4 MPa	EM	206.840 MPa
CSI	256,7 MPa	SP	77,3 kN/m <sup>3</sup>
TSX	14,3 MPa	WS	5.123,0 m/s
DMX	5 mm	WC	5.231,6 m/s
DFN	1 mm	2L/c	3,80 ms
FMX	2.300 kN	EA/c	594 kN-s/m
ETR	28,5 (%)	FR	5,000 kHz
CSB	81,5 MPa		
FMX	2.300 kN		

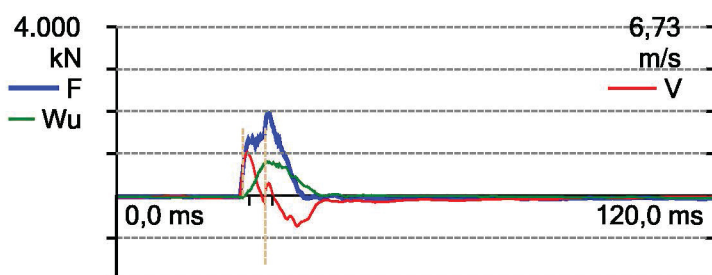
Project: TNA-01  
 Pile: E1233 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM - Comment: CASE não se aplica



BN 1  
 04/06/2020 09:49:21

LP	11,5 m	LE	11,7 m
EMX	4,5 kN-m	AR	147,10 cm <sup>2</sup>
CSX	109,8 MPa	EM	206.840 MPa
CSI	171,1 MPa	SP	77,3 kN/m <sup>3</sup>
TSX	14,3 MPa	WS	5.123,0 m/s
DMX	3 mm	WC	5.091,3 m/s
DFN	0 mm	2L/c	4,60 ms
FMX	1.615 kN	EA/c	594 kN-s/m
ETR	18,7 (%)	FR	5,000 kHz
CSB	56,3 MPa		
FMX	1.615 kN		

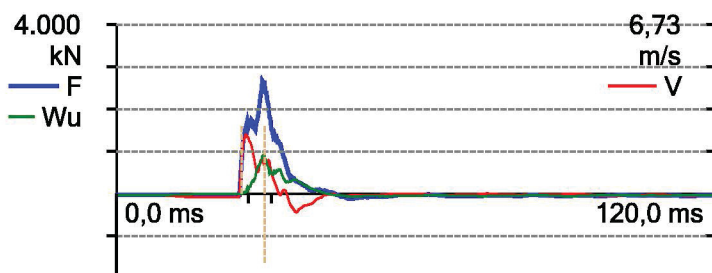
Project: TNA-01  
 Pile: E1233 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



BN 2  
 04/06/2020 09:50:45

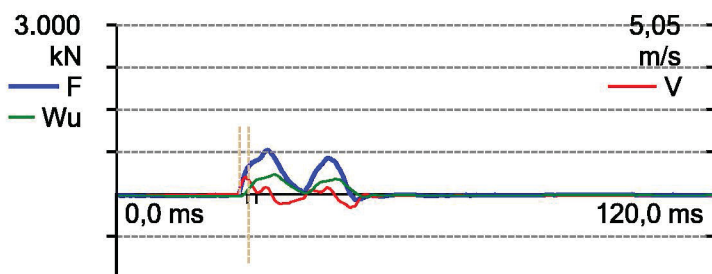
LP	11,5 m	LE	11,7 m
EMX	6,4 kN-m	AR	147,10 cm <sup>2</sup>
CSX	134,1 MPa	EM	206.840 MPa
CSI	222,5 MPa	SP	77,3 kN/m <sup>3</sup>
TSX	17,4 MPa	WS	5.123,0 m/s
DMX	5 mm	WC	5.091,3 m/s
DFN	2 mm	2L/c	4,60 ms
FMX	1.972 kN	EA/c	594 kN-s/m
ETR	27,0 (%)	FR	5,000 kHz
CSB	67,8 MPa		
FMX	1.972 kN		

Project: TNA-01  
 Pile: E1233 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



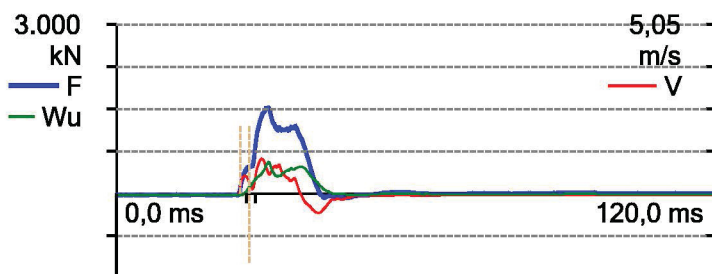
BN 3  
 04/06/2020 09:55:14  
 LP 11,5 m LE 11,7 m  
 EMX 18,4 kN-m AR 147,10 cm<sup>2</sup>  
 CSX 182,1 MPa EM 206.840 MPa  
 CSI 281,7 MPa SP 77,3 kN/m<sup>3</sup>  
 TSX 5,9 MPa WS 5.123,0 m/s  
 DMX 10 mm WC 5.091,3 m/s  
 DFN 9 mm 2L/c 4,60 ms  
 FMX 2.679 kN EA/c 594 kN-s/m  
 ETR 77,1 (%) FR 5,000 kHz  
 CSB 72,3 MPa  
 FMX 2.679 kN

Project: TNA-01  
 Pile: E2206 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM - Comment: CASE não se aplica



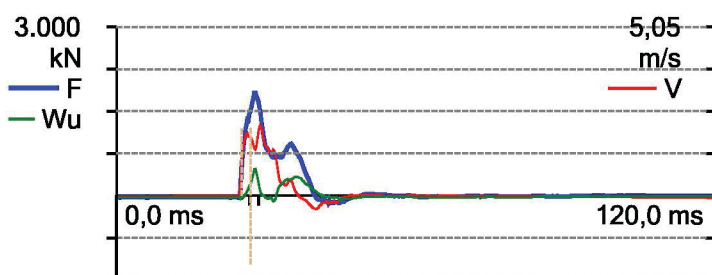
BN 1  
 04/06/2020 14:45:57  
 LP 4,5 m LE 4,7 m  
 EMX 1,0 kN-m AR 147,10 cm<sup>2</sup>  
 CSX 54,0 MPa EM 206.840 MPa  
 CSI 79,6 MPa SP 77,3 kN/m<sup>3</sup>  
 TSX 9,9 MPa WS 5.123,0 m/s  
 DMX 2 mm WC 5.255,6 m/s  
 DFN 0 mm 2L/c 1,80 ms  
 FMX 795 kN EA/c 594 kN-s/m  
 ETR 4,1 (%) FR 5,000 kHz  
 CSB 52,2 MPa  
 FMX 795 kN

Project: TNA-01  
 Pile: E2206 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



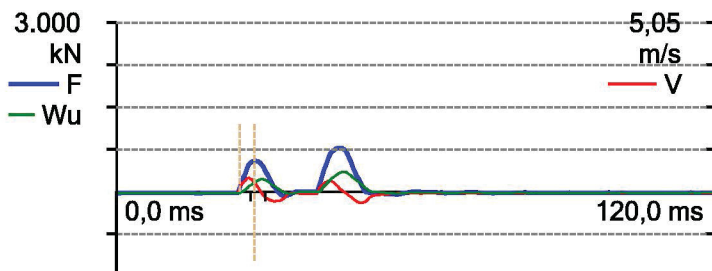
BN 2  
 04/06/2020 14:47:49  
 LP 4,5 m LE 4,7 m  
 EMX 8,2 kN-m AR 147,10 cm<sup>2</sup>  
 CSX 104,6 MPa EM 206.840 MPa  
 CSI 150,2 MPa SP 77,3 kN/m<sup>3</sup>  
 TSX 7,2 MPa WS 5.123,0 m/s  
 DMX 7 mm WC 5.255,6 m/s  
 DFN 5 mm 2L/c 1,80 ms  
 FMX 1.539 kN EA/c 594 kN-s/m  
 ETR 34,5 (%) FR 5,000 kHz  
 CSB 98,7 MPa  
 FMX 1.539 kN

Project: TNA-01  
 Pile: E2206 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



BN 3  
 04/06/2020 14:49:03  
 LP 4,5 m LE 4,7 m  
 EMX 15,5 kN-m AR 147,10 cm<sup>2</sup>  
 CSX 125,6 MPa EM 206.840 MPa  
 CSI 172,4 MPa SP 77,3 kN/m<sup>3</sup>  
 TSX 8,8 MPa WS 5.123,0 m/s  
 DMX 14 mm WC 5.255,6 m/s  
 DFN 10 mm 2L/c 1,80 ms  
 FMX 1.848 kN EA/c 594 kN-s/m  
 ETR 65,1 (%) FR 5,000 kHz  
 CSB 105,4 MPa  
 FMX 1.848 kN

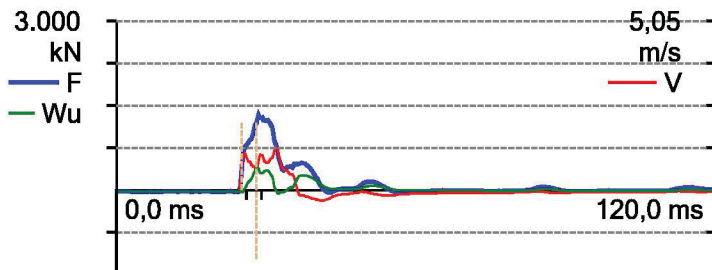
Project: TNA-01  
 Pile: E2211 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



BN 1  
 04/06/2020 15:16:02

LP 7,6 m	LE 7,8 m
RMX 773 kN	AR 147,10 cm <sup>2</sup>
EMX 1,3 kN-m	EM 206.840 MPa
CSX 54,3 MPa	SP 77,3 kN/m <sup>3</sup>
CSI 71,4 MPa	WS 5.123,0 m/s
TSX 5,8 MPa	WC 5.213,3 m/s
DMX 2 mm	JC 0,65 []
DFN 0 mm	2L/c 3,00 ms
FMX 799 kN	EA/c 594 kN-s/m
ETR 5,2 (%)	FR 5,000 kHz
CSB 45,7 MPa	

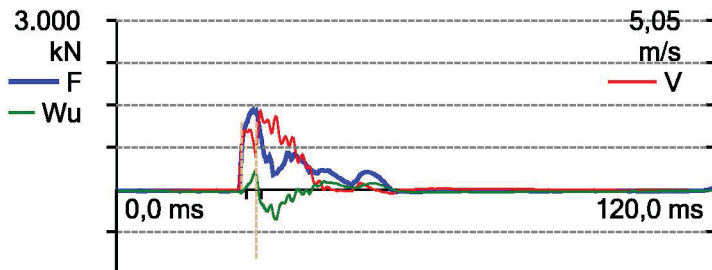
Project: TNA-01  
 Pile: E2211 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



BN 2  
 04/06/2020 15:17:00

LP 7,6 m	LE 7,8 m
RMX 872 kN	AR 147,10 cm <sup>2</sup>
EMX 8,3 kN-m	EM 206.840 MPa
CSX 91,9 MPa	SP 77,3 kN/m <sup>3</sup>
CSI 184,2 MPa	WS 5.123,0 m/s
TSX 1,9 MPa	WC 5.213,3 m/s
DMX 9 mm	JC 0,65 []
DFN 8 mm	2L/c 3,00 ms
FMX 1.352 kN	EA/c 594 kN-s/m
ETR 34,8 (%)	FR 5,000 kHz
CSB 42,4 MPa	

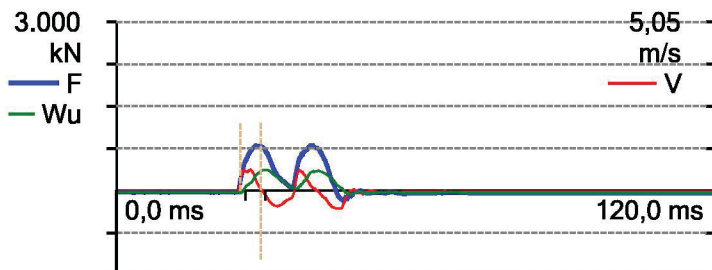
Project: TNA-01  
 Pile: E2211 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



BN 3  
 04/06/2020 15:18:37

LP 7,6 m	LE 7,8 m
RMX 408 kN	AR 147,10 cm <sup>2</sup>
EMX 16,5 kN-m	EM 206.840 MPa
CSX 96,9 MPa	SP 77,3 kN/m <sup>3</sup>
CSI 175,0 MPa	WS 5.123,0 m/s
TSX 2,5 MPa	WC 5.213,3 m/s
DMX 26 mm	JC 0,65 []
DFN 22 mm	2L/c 3,00 ms
FMX 1.425 kN	EA/c 594 kN-s/m
ETR 69,2 (%)	FR 5,000 kHz
CSB 32,8 MPa	

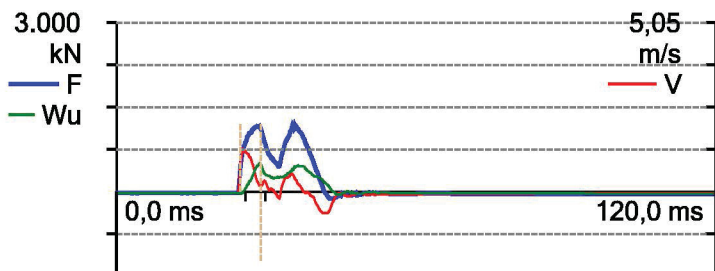
Project: TNA-01  
 Pile: E2215 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM - Comment: CASE não se aplica



BN 1  
 04/06/2020 15:43:00

LP 10,1 m	LE 10,3 m
EMX 1,9 kN-m	AR 147,10 cm <sup>2</sup>
CSX 56,2 MPa	EM 206.840 MPa
CSI 86,6 MPa	SP 77,3 kN/m <sup>3</sup>
TSX 16,5 MPa	WS 5.123,0 m/s
DMX 2 mm	WC 5.130,0 m/s
DFN 1 mm	2L/c 4,00 ms
FMX 826 kN	EA/c 594 kN-s/m
ETR 8,0 (%)	FR 5,000 kHz
CSB 32,3 MPa	
FMX 826 kN	

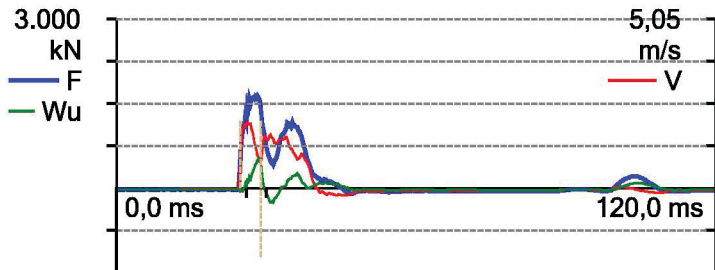
Project: TNA-01  
 Pile: E2215 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



BN 2  
 04/06/2020 15:44:11

LP 10,1 m	LE 10,3 m
EMX 5,5 kN-m	AR 147,10 cm <sup>2</sup>
CSX 81,6 MPa	EM 206.840 MPa
CSI 131,9 MPa	SP 77,3 kN/m <sup>3</sup>
TSX 15,2 MPa	WS 5.123,0 m/s
DMX 6 mm	WC 5.130,0 m/s
DFN 5 mm	2L/c 4,00 ms
FMX 1.200 kN	EA/c 594 kN-s/m
ETR 23,2 (%)	FR 5,000 kHz
CSB 40,2 MPa	
FMX 1.200 kN	

Project: TNA-01  
 Pile: E2215 - Description: TRINCHEIRA  
 Operator: AM



BN 3  
 04/06/2020 15:45:35

LP 10,1 m	LE 10,3 m
EMX 19,6 kN-m	AR 147,10 cm <sup>2</sup>
CSX 112,1 MPa	EM 206.840 MPa
CSI 159,0 MPa	SP 77,3 kN/m <sup>3</sup>
TSX 5,5 MPa	WS 5.123,0 m/s
DMX 19 mm	WC 5.130,0 m/s
DFN 16 mm	2L/c 4,00 ms
FMX 1.649 kN	EA/c 594 kN-s/m
ETR 82,1 (%)	FR 5,000 kHz
CSB 42,0 MPa	
FMX 1.649 kN	