

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANILO PITZ

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE USO DE ESTACAS EM PLÁSTICO  
RECICLADO PARA APLICAÇÃO EM FUNDAÇÕES PROFUNDAS

CURITIBA  
2014

DANILO PITZ

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE USO DE ESTACAS EM PLÁSTICO  
RECICLADO PARA APLICAÇÃO EM FUNDAÇÕES PROFUNDAS

Dissertação apresentada como quesito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Construção Civil, no Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Dell'Avanzi.  
Co-orientador: Prof. Dr. George de Paula Bernardes.

CURITIBA  
2014

---

P692a

Pitz, Danilo

Avaliação do potencial de uso de estacas em plástico reciclado para aplicações em fundações profundas / Danilo Pitz. – Curitiba, 2014.

173f. : il. [algumas color.]; 30 cm.

Dissertação (Mestre) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Construção Civil, 2014.

**Orientador: Eduardo Dell’Avanzi. Co-Orientador: George de Paula Bernardes.**

Bibliografia: p. 125-131.

1. Fundações - Engenharia. 2. Estacaria – Engenharia Civil. 3. Plásticos – Reciclagem. I. Dell’Avanzi, Eduardo. II. Bernardes, George de Paula. III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

---

CDD: 624.151

## TERMO DE APROVAÇÃO

**DANILO PITZ**

### **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE USO DE ESTACAS EM PLÁSTICO RECICLADO PARA APLICAÇÃO EM FUNDAÇÕES PROFUNDAS.**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós Graduação em Construção Civil, Área de Concentração, Geotecnia, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

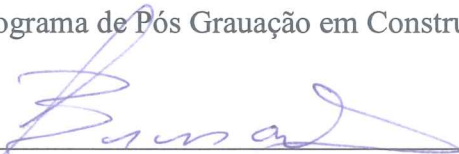
Orientador:



Prof. Dr. Eduardo Dell'Avanzi

Programa de Pós Graduação em Construção Civil – UFPR

Co-orientador:



Prof. Dr. George de Paula Bernardes

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho- UNESP

Examinadores:



Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira

Universidade Federal do Paraná- UFPR

Examinadores:



Prof. Dr. Roberto Dalledone Machado

Universidade Federal do Paraná- UFPR

Curitiba, 20 de maio de 2014

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Eduardo Dell'Avanzi, pelo estímulo, exemplo de dedicação, integridade e conhecimento da área geotécnica.

Ao Prof. George de Paula Bernardes pela orientação em laboratório, compartilhando seu grande conhecimento no assunto, apesar da distância e dificuldades.

À minha esposa Cintia Gaya Pitz pelo apoio e estímulo e aos meus filhos Felipe, Júlia e Maria Helena pelo incentivo.

Aos professores do curso, e em especial o professor Sidney Helder Cardoso Teixeira.

Aos amigos Paulo Sedrez de Souza e Rafael Petronilho da Rocha pela colaboração.

À minha mãe Léa de Oliveira Pitz, minha avó Maria Santos de Oliveira meus irmãos Silvana, André, Débora.

Aos cunhados Edson Costa e Dênio Gaya. Ao meu sogro Air e sogra Vanir.

Aos amigos Wilson e Fádua Krause pelo grande estímulo e amizade. Por terem me acolhido quando precisei em Curitiba.

Aos amigos de turma Thiago Bueno, Carlos Wosniacki, Antonio Narel, Juliana Reinert e Adhara Guizelini, pelo companheirismo e amizade.

Aos alunos de graduação, Marcus Adriano, Ananda Fidalgo e João Sachet, pela contribuição nos ensaios.

Ao amigo Mayckon Rossi pela contribuição nas amostras.

*“O rio ganha força nas suas quedas”*

## RESUMO

O uso de modelagem física reduzida para estudo do desempenho de fundações profundas ainda é pouco difundido no Brasil. Este trabalho analisa, a partir de ensaios em modelos físicos reduzidos, o potencial de utilização de estacas confeccionadas com plástico reciclado à base de PET. Primeiramente, avaliaram-se as características físicas e mecânicas do material reciclado, levando-se em consideração o efeito de degradação térmica e por ataque químico (visando representar um ambiente salino). Subsequentemente, definiram-se modelos reduzidos de estacas em plástico reciclado e em aço para teste em ambiente laboratorial controlado. Os ensaios de laboratório consistiram na cravação controlada dos modelos em uma caixa forte preenchida por areia, com medição do repique elástico seguido por provas de carga estáticas. Os ensaios dinâmicos e estáticos foram comparados e analisados com relação à cravabilidade dos elementos, desempenho durante o carregamento estático e respectivas capacidades máximas de carga. Ao final foram executados ensaios com protótipos de plástico e aço em solo arenoso compacto, visando comparar os desempenhos em escala de campo. Os resultados indicaram que, durante as cravações, as estacas de plástico apresentaram perdas de energia maiores que as estacas de aço, refletido no maior número de golpes necessários à cravação. Observou-se que a capacidade de carga à compressão do protótipo de plástico é limitada em solos compactos, devido à relativa baixa resistência à compressão do material constituinte simultâneo à baixa magnitude do módulo de elasticidade.

Palavras-Chave: Modelo reduzido. Provas de carga estática. Ensaio dinâmico. PET reciclado.

## ABSTRACT

The use of reduced physical modeling to study the performance of deep foundations is still not widespread in Brazil. This paper analyzes from trials in reduced physical models, the potential use of piles of recycled plastic based PET. First, we analyzed the mechanical and physical characteristics of the recycled material taking into account the effect of thermal degradation and chemical attack (targeting represent a saline environment). Subsequently, it was defined scale models of pile made from recycled plastic and stainless steel for testing in a controlled laboratory environment. Laboratory tests consisted of pile drive controlled models in a strong box filled with sand, with measurement of the elastic rebound followed by static load tests. Dynamic and static tests were compared and analyzed with respect to drive ability of the elements, performance during static and its maximum load capacity. At the end of tests with prototypes of plastic and steel, compact sandy soil in order to compare the performances of field scale were performed. The results indicated that during the drive of the plastic piles had losses greater than the steel piles energy, reflected in the greater number of blows required for driving. It was observed that the loading capacity of the compression of the plastic prototype compact soil is limited due to the relative low compressive strength of the low simultaneous magnitude of the modulus of elasticity of the constituent material.

**Key-words:** Reduced Model. Static load tests. Dynamic test. Recycled PET.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	- ESTACAS COM PATOLOGIAS. (a) ESTACAS DE CONCRETO DEGRADADAS NA AUSTRÁLIA. (b) ESTACAS DE AÇO COM FERRUGEM NA AUSTRÁLIA. (c) ESTACAS DE MADEIRA DETERIORADAS NOS ESTADOS UNIDOS .....23
FIGURA 1.2	- (a) ESTACAS DE CONCRETO QUE SOFRERAM IMPACTOS DE BARCOS. (b) EXEMPLO DE ESTACAS DETERIORADA PELA BROCA DA MADEIRA ( <i>TEREDO NAVALIS</i> ). OBRAS EM ITAJAÍ-SC .....23
FIGURA 2.1	- (a) e (b) CRAVAÇÃO DE ESTACAS FRP – (AUSTRÁLIA). (c) ESTACAS ARMADAS COM PROTEÇÃO EXTERNA DE PVC – (EUA) .....26
FIGURA 2.2	- UTILIZAÇÃO DE ESTACAS DE PLÁSTICO COMO DEFENSAS (VENEZA - ITÁLIA, 2012) .....26
FIGURA 2.3	- SEÇÃO TRANSVERSAL DAS ESTACAS POLIMÉRICAS (COMPÓSITOS) UTILIZADAS NO MERCADO NORTE AMERICANO .....27
FIGURA 2.4	- SUPERFÍCIE DE RUPTURA POR TERZAGHI .....33
FIGURA 2.5	- SUPERFÍCIES DE RUPTURA ASSUMIDAS POR JANBU (1976), À ESQUERDA, E POR VESIC (1975) .....34
FIGURA 2.6	- VALORES CALCULADOS PARA $N_q$ DE ACORDO COM $\eta$ DE 75°, 90° E 105° .....36
FIGURA 2.7	- AUMENTO DO VALOR DE $RL$ ATÉ PROFUNDIDADE CRÍTICA $L'$ .....37
FIGURA 2.8	- FIGURA 2.8 - ESQUEMA PARA DETERMINAÇÃO DO REPIQUE E NEGA .....40
FIGURA 2.9	- ESQUEMA BÁSICO DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA ....42
FIGURA 2.10	- FOTO DO EQUIPAMENTO DE MONITORAMENTO DO ENSAIO DLT .....47
FIGURA 2.11	- COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS TNOWAVE E LUMPED (AGLOMERADO) - MODELO DE SMITH .....54

FIGURA 2.12	- ALGORITMO E REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA METODO TNOWAVE .....	55
FIGURA 2.13	- ESTIMATIVA DE $P$ ÚLTIMO - MÉTODO DE VAN DER VEEN .	58
FIGURA 3.1	- CAIXA FORTE PROJETADA E CONSTRUÍDA COM VIDRO FRONTAL PARA ACOMPANHAMENTO VISUAL .....	61
FIGURA 3.2	- RUPTURA TEÓRICA POR TERZAGUI UTILIZANDO A ESCALA DO MODELO .....	62
FIGURA 3.3	- LOCAÇÃO DAS ESTACAS NA CAIXA DE AREIA DURANTE PRIMEIRA BATERIA DE ENSAIOS EM PLANTA BAIXA ESQUEMÁTICA .....	63
FIGURA 3.4	- LOCAÇÃO DAS ESTACAS NA CAIXA DE AREIA DURANTE PRIMEIRA BATERIA DE ENSAIOS .....	63
FIGURA 3.5	- LOCAÇÃO DAS ESTACAS NA CAIXA DE AREIA DURANTE SEGUNDA BATERIA DE ENSAIOS EM PLANTA BAIXA ESQUEMÁTICA .....	64
FIGURA 3.6	- LOCAÇÃO DAS ESTACAS NA CAIXA DE AREIA DURANTE SEGUNDA BATERIA DE ENSAIOS .....	64
FIGURA 3.7	- PERSPECTIVA DO MODELO EXECUTADO .....	66
FIGURA 3.8	- CORTE DO MODELO EXECUTADO .....	66
FIGURA 3.9	- POLIA DE DIÂMETRO 10 cm INSTALADA SOBRE A VIGA PRINCIPAL FIXA, QUE SUSTENTA TODO SISTEMA .....	67
FIGURA 3.10	- DETALHES EXECUTIVOS DO MODELO: MARTELO DE 2 kgf, CAPACETE, CEPO DE MADEIRA, HASTES GUIAS DE 12,5 mm, CABO DE AÇO DE 3 mm, ESCALA CENTIMÉTRICA E TODO SISTEMA OPERANDO, INCLUSIVE COM A MEDIÇÃO DO REPIQUE .....	68
FIGURA 3.11	- GRÁFICO DA AFERIÇÃO DA PRENSA UTILIZADA .....	69
FIGURA 3.12	- RESULTADOS PROVENIENTES DO PROGRAMA LABVIEW (CARGA X TEMPO) .....	70
FIGURA 3.13	- DETALHE DA CÉLULA DE CARGA E ESQUEMA DE LIGAÇÃO, COM O PROGRAMA LABVIEW .....	70
FIGURA 3.14	- PRENSA (MARCON), ADAPTADA E CALIBRADA PARA O SISTEMA, COLOCADA SOBRE VIGAS DE REAÇÃO .....	72

FIGURA 3.15	- PRENSA INSTALADA SOBRE AS VIGAS DE REAÇÃO E CÉLULA DE CARGA SOBRE O “CAP”, LIGADO AO DISPOSITIVO DE APLICAÇÃO DO LABVIEW .....	72
FIGURA 3.16	- DETALHE DO EXTENSÔMETRO LIGADO AO “CAP” INSTALADO SOB A ESTACA DE AÇO 1 DA 2ª BATERIA DE ENSAIOS .....	72
FIGURA 3.17	- EXTENSÔMETROS INSTALADOS SOBRE O CAP, E FIXADOS A ESTRUTURA INDEPENDENTE A ESTACA, DURANTE A PRIMEIRA BATERIA DE ENSAIOS. PRENSA FIXADA AO SISTEMA DE REAÇÃO POR CHAPA PARAFUSADA ABAIXO DO SISTEMA .....	73
FIGURA 3.18	- ESQUEMA GERAL DA PROVA DE CARGA COM A INSTALAÇÃO LIGADA AO COMPUTADOR DO LAGEMA, DETALHES DA INSTALAÇÃO E DO COMPUTADOR DURANTE O ENSAIO ESTÁTICO .....	73
FIGURA 3.19	- JAZIDA FONTE DA AREIA DO EXPERIMENTO .....	74
FIGURA 3.20	- ENSAIO DE GRANULOMETRIA AREIA DE SANTA LÍDEA ....	75
FIGURA 3.21	- DENSIDADE RELATIVA X ALTURA DE QUEDA .....	77
FIGURA 3.22	- FOTOS DA SEGUNDA ETAPA DO EXPERIMENTO DETALHES DA EXECUÇÃO .....	79
FIGURA 3.23	- FOTOS DA MOLDAGEM DE UM DOS PROTÓTIPOS (14,5X14,5cmX3m) EM FÁBRICA DE ITAJAÍ .....	80
FIGURA 3.24	- (a) ESTACA MODELO EM AÇO ABERTA E FECHADA; (b) ESTACA MODELO DE ESTAPET COM COMPRIMENTO DE 80 cm .....	80
FIGURA 3.25	- PREPARAÇÃO DOS PROTÓTIPOS ESTAPET (MARCAÇÃO CONTAGEM DE GOLPES, INSTALAÇÃO DE SENSORES E ESTACA DE AÇO 05/04/2013) – ITAPEMA (SC) .....	82
FIGURA 3.26	- MAPA DA SONDAGEM CPT, SPT E LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS (RUA 248-ITAPEMA – SC) .....	83
FIGURA 3.27	- CRAVAÇÃO DO PROTÓTIPO UTILIZANDO MARTELO HIDRÁULICO .....	83
FIGURA 3.28	- ADAPTAÇÃO UTILIZADA EM SONDA SPT .....	84

FIGURA 3.29	- LEITOR DIGITAL A ESQUERDA E CÉLULA DE CARGA À DIREITA (EM APLICAÇÃO NO EXPERIMENTO) .....	86
FIGURA 3.30	- CROQUI ESQUEMÁTICO DO ENSAIO DE CARGA ESTÁTICO DOS PROTÓTIPOS .....	87
FIGURA 3.31	- PRENSA (PONTEMAC), ADAPTADA E CALIBRADA PARA O SISTEMA, COLOCADA SOBRE VIGAS DE REAÇÃO .....	87
FIGURA 3.32	- DETALHE DO EXTENSÔMETRO LIGADO AO “CAP” INSTALADO SOB A ESTACA DE AÇO À ESQUERDA E A ESTAPET À DIREITA .....	88
FIGURA 3.33	- ESQUEMA GERAL DA PROVA DE CARGA NA ESTACA DE AÇO A ESQUERDA E NA ESTAPET À DIREITA, COM MONITORAMENTO .....	88
FIGURA 4.1	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTAPET 1- ETAPA I .....	92
FIGURA 4.2	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE – ESTAPET 2- ETAPA I .....	93
FIGURA 4.3	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE – ESTAPET 04 - ETAPA .....	93
FIGURA 4.4	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE (ESTAPET 04 -80 cm - ETAPA II) .....	94
FIGURA 4.5	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE ESTAPET 6 - (100 cm) - ETAPA II .....	94
FIGURA 4.6	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE (ESTAPET 07- ETAPA II) .....	95
FIGURA 4.7	- RESULTADO MÉDIO ECD – ESTAPETS (ESTACAS MODELO COM L=120 cm) .....	95
FIGURA 4.8	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET I – ETAPA I .....	96
FIGURA 4.9	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET 2 – ETAPA I .....	97
FIGURA 4.10	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET 4 - ETAPA I .....	97

FIGURA 4.11	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET 4 (80 cm) – ETAPA II .....	98
FIGURA 4.12	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET 6 (100 cm) – ETAPA II .....	98
FIGURA 4.13	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET 7 – ETAPA II .....	99
FIGURA 4.14	- RESULTADOS AGRUPADOS ECE PARA AS ESTAPETS (ETAPAS I E II) .....	100
FIGURA 4.15	- COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS ECE X ECD PARA A ESTAPET .....	101
FIGURA 4.16	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTACA DE AÇO 3 - ETAPA I .....	102
FIGURA 4.17	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTACA DE AÇO 5 – ETAPA I .....	102
FIGURA 4.18	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTAPET 01- ETAPA II .....	103
FIGURA 4.19	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTACA DE AÇO 2 (100 cm) - ETAPA II .....	103
FIGURA 4.20	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTACA DE AÇO 3 - 80 cm - ETAPA II .....	104
FIGURA 4.21	- RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE (ESTACA DE AÇO 05- ETAPA II) .....	104
FIGURA 4.22	- RESULTADO MÉDIO ECD – ESTACAS MODELO DE AÇO (ESTACAS COM L=120 cm) .....	105
FIGURA 4.23	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO – ESTACA DE AÇO 3 – ETAPA I .....	106
FIGURA 4.24	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO – ESTACA DE AÇO 5 – ETAPA I .....	106
FIGURA 4.25	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTACA DE AÇO 1 – ETAPA II .....	107
FIGURA 4.26	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTACA DE AÇO 2 (L=100 cm) – ETAPA II .....	107

FIGURA 4.27	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTACA DE AÇO 3 (80 cm) - ETAPA II .....	108
FIGURA 4.28	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTACA DE AÇO 5 (PONTA FECHADA) - ETAPA II .....	108
FIGURA 4.29	- RESULTADOS AGRUPADOS ECE PARA AS ESTACAS DE AÇO (ETAPAS I E II) .....	109
FIGURA 4.30	- RESULTADOS DOS ECEXECD PARA ESTACAS DE AÇO .	110
FIGURA 4.31	- COMPARATIVO RESULTADOS DOS ENSAIOS ECD PARA OS MODELOS DE ESTAPET E ESTACA DE AÇO .....	111
FIGURA 4.32	- COMPARATIVO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS ECE PARA OS MODELOS DE ESTAPET E ESTACA DE AÇO ...	111
FIGURA 4.33	- RESULTADO MÉDIO (ECD) – MARTELO DE 710 N – PROTÓTIPO ESTAPET - (ATÉ PROF= 75 cm) .....	112
FIGURA 4.34	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. PROTÓTIPO ESTAPET (PROF = 90 cm) .....	113
FIGURA 4.35	- RESULTADO MÉDIO (ECD) – MARTELO DE 710 N – PROTÓTIPO ESTACA DE AÇO (ATÉ PROF= 95 cm) .....	113
FIGURA 4.36	- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO - PROTÓTIPO ESTACA DE AÇO - (90 cm) .....	114
FIGURA 4.37	- COMPARATIVO ECE ENTRE PROTÓTIPOS DE AÇO E ESTAPET .....	115
FIGURA 4.38	- COMPARATIVO ECD ENTRE PROTÓTIPOS DE AÇO E ESTAPET .....	115
FIGURA 4.39	- COMPARATIVO ENTRE A MÉDIA DOS RESULTADOS ECE X ECD PARA PROTÓTIPOS ESTAPET E AÇO .....	116
FIGURA 4.40	- COMPARATIVO ENTRE A MÉDIA DOS RESULTADOS ECE PROTÓTIPOS. MODELOS E AMOSTRAS DE ESTAPET, CONCRETO E AÇO NA FASE ELÁSTICA.....	119

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	- COMPARAÇÃO DE DADOS NECESSÁRIOS AO ESTUDO DE CRAVABILIDADE ENTRE DIFERENTES ESTACAS .....	28
TABELA 2.2	- CARACTERÍSTICAS TERMO-MECÂNICAS DO ESTAPET MATERIAIS .....	29
TABELA 2.3	- FATORES DE ESCALA .....	31
TABELA 2.4	- VALORES DE $Nq$ .....	35
TABELA 2.5	- VALORES DE $qc$ X COMPACIDADE RELATIVA .....	39
TABELA 2.6	- MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE RESISTÊNCIA .....	45
TABELA 2.7	- CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS A VELOCIDADE DE ONDA .....	49
TABELA 2.8	- VALORES DE $Jc$ .....	52
TABELA 3.1	- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA AREIA .....	75
TABELA 4.1	- RESULTADO DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DO MODELO PELOS MÉTODOS TEÓRICOS.....	90
TABELA 4.2	- RESULTADOS DE PREVISÃO DECAPACIDADE DE CARGA DO PROTÓTIPO PELOS MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS.....	91
TABELA 4.3	- RESUMO ECE VAN DER VEEN - ESTAPET (RESULTADOS EM APENDICE 2) .....	99
TABELA 4.4	- RESULTADOS DOS ECE PARA ESTAPET DE 80 E 100 cm.....	101
TABELA 4.5	- RESUMO DE RESULTADOS - ECE VAN DER VEEN – AÇO (APENDICE 2) .....	109
TABELA 4.6	- RESULTADOS ADOTADOS ECE DAS ESTACAS DE AÇO AOS 80 E 100 cm.....	110
TABELA 4.7	- VALORES ECE PARA OS PROTÓTIPOS DE AÇO E ESTAPET .....	114
TABELA 4.8	- VALORES ECD PARA OS PROTÓTIPOS DE AÇO E ESTAPET.....	115
TABELA 4.9	- RESULTADOS MÉDIOS ECD E ECE.....	116

TABELA 4.10	- COMPARATIVO DESLOCAMENTO NA DESCARGA ENTRE MODELO E PROTÓTIPO.....	117
TABELA 4.11	- COMPARATIVO DE ALGUMAS GRANDEZAS ENTRE MODELO E PROTÓTIPO: (ESTACAS DE AÇO).....	117
TABELA 4.12	- COMPARATIVO DE ALGUMAS GRANDEZAS ENTRE MODELO E PROTÓTIPO: (ESTAPET).....	118
TABELA 4.13	- VALORES CALCULADOS DE <i>C2</i> E <i>QUAKE C3</i> PARA MODELO E PROTÓTIPO.....	120
TABELA 4.14	- AVALIAÇÃO DO <i>QUAKE</i> .....	120



## LISTA DE ABREVIATURAS

CAPWAP	-	<i>Case pile wave analysis program</i>
CLT	-	<i>Cyclic load test</i>
CPT	-	<i>Cone penetration test</i>
DLT	-	<i>Dynamic load test</i>
ECD	-	Ensaio de carga dinâmico
ECE	-	Ensaio de carga estático
ENTHRU	-	Energia transferida do martelo para a estaca
ESTAPET	-	Estaca a base de PET
FRP	-	<i>Fiber reinforced polymers</i>
PEAD	-	Poliétileno de alta densidade
PET	-	Poliéster de etileno
PROFOUND	-	<i>Professional Foundation Diagnostics</i>
PVC	-	Policloreto de vinila
QML	-	<i>Quick maintained load</i>
SML	-	<i>Slow maintained load</i>
SPT	-	<i>Standard penetration test</i>
SRP	-	<i>Steel reinforced polymers</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta K$  - Variação da energia cinética

$A_l$  - Área lateral

$A_p$  - Área de ponta

$C$  - Coesão do solo

$C_1$  - Perdas de energia do capacete e coxim

$C_2$  - Perdas de energia da estaca

$C_3$  - Perdas de energia do solo ou quake

$C_o$  - Velocidade de onda da partícula

$E$  - Módulo de elasticidade

$e$  - Eficiência - fator que representa perdas de energia do sistema cravador

$E_c$  - Energia cinética

$E_m$  - Energia mecânica

$E_{mf}$  - Energia mecânica final

$E_{mo}$  - Energia mecânica inicial

$E_p$  - Energia potencial

$F_1$  - Fator que leva em conta o efeito de escala, ou seja, entre o cone e o protótipo e o método (ponta)

$F_2$  - Fator que leva em conta o efeito de escala, ou seja, entre o cone e o protótipo e o método (lateral)

$f_s$  - Resistência lateral da luva

$g$  - Aceleração da gravidade

$G_c$  ou  $D_c$  - Densidade relativa

$G_s$  - Módulo de distorção ou cisalhamento do solo

$h$  - Altura de queda do martelo e

$I_r$  - Índice de rigidez

$I_{rr}$  - Índice de rigidez reduzido do solo (Bowles 1996)

$J_c$  - Coeficiente de amortização dinâmica

$K$  - Coeficiente de empuxo

$L$  - Profundidade

$m$  - Massa

$n$  - (nega)

$N_c, q$ - Fatores de capacidade de carga para coesão, carga e densidade

$\emptyset$  - Ângulo de atrito do solo

$P_g$  - Peso de grãos de solo

$P_{mart}$ - Peso do martelo

$q$  - Pressão efetiva na ponta na ponta da estaca.

$q_c$ - Resistência de ponta do cone

$q_l$  - Resistência máxima unitária lateral local

$q_0$ - Tensão efetiva média na ponta da estaca

$R$ - Resistência da estaca

$R_p$  - Resistência de ponta

$\tan \delta$  - Coef. de atrito solo - estaca

$v$  - Velocidade

$V_{m,e}$  - Velocidade das partículas do martelo, estaca

$W$ - Trabalho

$X$  - Somatório das perdas de energia no impacto

$Z$  - Impedância

$\alpha$  - Coeficiente que depende do tipo de solo (coesão)

$\gamma$  - Peso específico efetivo da areia

$\Delta$  - Deformação volumétrica média na zona plastificada abaixo da ponta da estaca (Vesic)

$\delta$ - Ângulo de atrito solo-estaca

$\eta$ - Coeficiente de restituição de Hilley

$\eta'$  - Ângulo da superfície de ruptura (Janbu)

$\rho$  - Densidade

$\sigma'$ - Tensão normal à superfície

$\sigma_v$  - Tensão vertical no segmento de estaca

## SUMÁRIO

<b>1 MOTIVAÇÃO DO ESTUDO</b> .....	22
1.1 INTRODUÇÃO .....	22
1.2 OBJETIVO .....	24
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	25
2.1 INTRODUÇÃO – O USO DE ESTACAS DE PLÁSTICO .....	25
2.1.1 Características gerais das estacas poliméricas .....	27
2.2 MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS .....	30
2.3 CAPACIDADE DE SUPORTE VERTICAL EM ESTACAS .....	31
2.3.1 Formulações teóricas .....	32
2.3.2 Método Aoki-Velloso .....	37
2.3.3 Correlações dos ensaios CPT e SPT .....	38
2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE CARGA .....	39
2.4.1 Métodos dinâmicos - Ensaios de Carregamentos Dinâmicos (ECD) .....	39
2.4.2 Monitoramento utilizando conceitos da equação da onda .....	46
2.4.3 Ensaios de carregamentos estáticos (ECE) .....	56
<b>3 COMPONENTE EXPERIMENTAL</b> .....	60
3.1 COMPOSIÇÃO DOS MODELOS REDUZIDOS .....	60
3.1.1 Caixa forte e distribuição das estacas do modelo .....	60
3.1.2 Sistema de cravação .....	65
3.1.3 Sistema reduzido de provas de carga e aferição de dados .....	68
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS .....	74
3.2.1 Local de coleta .....	74
3.2.2 Curva granulométrica .....	75
3.2.3 Resultados dos ensaios de caracterização das areias .....	75
3.2.4 Densidade Relativa ( $D_r$ ) .....	76
3.2.5 Método de calibração das areias (chuva de areia) .....	77
3.3 MODELOS DE ESTACAS .....	79
3.3.1 Modelos de estacas .....	79
3.4 PROTÓTIPOS .....	81
3.4.1 Protótipos de estacas .....	81

3.4.2	Sistemas utilizados de cravação e distribuição do local de cravação dos protótipos .....	82
3.4.3	Instrumentação dos ensaios ECD dos protótipos .....	85
3.4.4	Instrumentação dos ensaios ECE dos protótipos .....	85
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>90</b>
4.1	RESULTADOS DOS MODELOS- ESTAPET .....	92
4.1.1	ESTAPET- Resultados ECD .....	92
4.1.2	ESTAPET- Resultados ECE .....	96
4.1.3	Comparação ECD X ECE ESTAPET .....	101
4.2	RESULTADOS DOS MODELOS - ESTACAS DE AÇO .....	102
4.2.1	Estaca de aço – Resultados ECD .....	102
4.2.2	Estacas de aço – Resultados ECE .....	106
4.2.3	Comparativo ECD X ECE estaca de aço .....	110
4.3	COMPARATIVO ESTAPET X ESTACA DE AÇO .....	111
4.3.1	Comparativo ECD–ESTAPET X Estaca de aço .....	111
4.3.2	Comparativo ECE–ESTAPET X Estaca de aço .....	111
4.4	PROTÓTIPO ESTAPET .....	112
4.4.1	Resultados ECD - Protótipo- ESTAPET (prof= 75 cm) .....	112
4.4.2	Resultados ECE – Protótipo ESTAPET (Prof = 90cm) .....	113
4.5	RESULTADOS PROTÓTIPO – ESTACA DE AÇO .....	113
4.5.1	Resultados ECD- Protótipo – estaca de aço (prof = 95 cm).....	113
4.5.2	Resultados ECE - Protótipo estaca de aço .....	114
4.6	COMPARATIVOS ENTRE PROTÓTIPOS AÇO X ESTAPET .....	114
4.7	COMPARAÇÕES ENTRE PROTÓTIPO E MODELO .....	117
4.7.1	Comparações entre ensaios ECE entre modelos e protótipos .....	117
4.7.2	Comparações entre ensaios ECD entre modelos e protótipos .....	120
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>122</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS .....	123
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>125</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>132</b>

# 1 MOTIVAÇÃO DO ESTUDO

## 1.1 INTRODUÇÃO

Os materiais que compõem as fundações das construções, ao longo da história sempre tiveram origem extrativista, de jazidas da natureza, como pedreiras, depósitos de areias, de minas de ferro e de florestas, por exemplo. Estas jazidas têm expectativas finitas de duração.

De acordo com dados de Galbiati (2003) e Pacheco (2004), do lixo urbano no Brasil, em torno de 7% são plásticos. Estima-se que o peso do lixo gerado por habitante no Brasil seja 1,3 kgf/dia por habitante. Assim, poderíamos projetar o acréscimo diário de 18,2 mil toneladas de plásticos depositados nos lixões. Caso a população do Brasil gerasse a mesma quantidade de lixo que a Europa ou Estados Unidos (EUA), seria praticamente o dobro de lixo por habitante, conforme dados de Guamá (2008).

Diante dessa realidade, a necessidade de reciclagem é cada vez maior em nossa sociedade que procura ou deveria procurar soluções sustentáveis. De diversos polímeros existentes, foi escolhido como material desse trabalho o PET, (polietileno tereftalado) reciclado, por apresentar algumas vantagens em relação a outros polímeros por suas características físicas, como a resistência à tração e compressão, além de sua reciclabilidade. A estaca desse trabalho será batizada como ESTAPET em função do PET que a constitui.

Para o trabalho, foram adotados procedimentos experimentais de laboratório, desde a caracterização termo-mecânica das amostras de ESTAPET, até a utilização de provas de carga estáticas em modelo reduzido. O modelo reduzido construído nesta pesquisa foi composto basicamente por uma caixa forte de aço, preenchida por areia calibrada com densidade relativa homogênea, um sistema de cravação e um sistema reduzido para provas de carga estática.

O principal motivo da escolha do modelo reduzido é a repetibilidade e a possibilidade de comparações entre os materiais dentro do ambiente, com dados calibrados, uma vez que outros trabalhos utilizando modelos reduzidos já foram executados pelo mesmo grupo de pesquisas, sendo exemplos os trabalhos de Guizelini (2011), e Dell Avanzi (2006), que demonstraram a validade desse método.

No final, foram executadas cravações em solo arenoso de um protótipo de ESTAPET e de uma estaca de aço, e realizadas provas de carga dinâmica, utilizando sensores e o programa DLT (*dynamic load test*), baseados na mecânica das ondas e provas de carga estática. Também foram executadas sondagens CPT (*cone penetration test*) ou SPT (*standard penetration test*).

Assim, pretende-se utilizar a ESTAPET como uma solução alternativa em fundações como, por exemplo, em obras marítimas sujeitas a ataques de agentes de degeneração (corrosão, impactos laterais de embarcações), ou agentes biológicos como o perfurador marinho de madeiras, “buzano” (*teredo navalis*), molusco alongado que possui uma carapaça estriada na parte de sua cabeça, que funciona como uma broca para furar madeira. Seguem fotos de obras nos Estados Unidos e Austrália (FIGURA 1.1) e em Itajaí (SC) (FIGURA 1.2), demonstrando patologias causadas por corrosão, impactos e pela broca da madeira (*teredo navalis*).

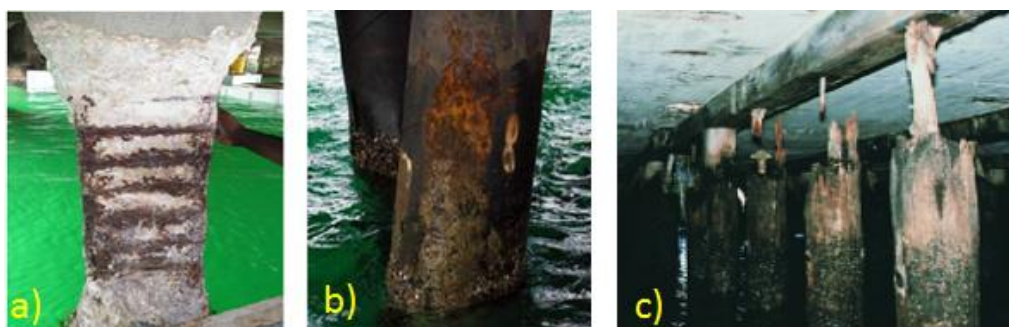


FIGURA 1.1 - ESTACAS COM PATOLOGIAS. (a) ESTACAS DE CONCRETO DEGRADADAS NA AUSTRÁLIA. (b) ESTACAS DE AÇO COM FERRUGEM NA AUSTRÁLIA. (c) ESTACAS DE MADEIRA DETERIORADAS NOS ESTADOS UNIDOS.

FONTE: GUADES (2012) E PANDO (2006)



FIGURA 1.2 - (a) ESTACAS DE CONCRETO QUE SOFRERAM IMPACTOS DE BARCOS. (b) EXEMPLO DE ESTACAS DETERIORADA PELA BROCA DA MADEIRA (*TEREDO NAVALIS*). OBRAS EM ITAJAÍ-SC.

FONTE: DO AUTOR (2008)

## 1.2 OBJETIVO

Este trabalho busca avaliar o potencial de plásticos reciclados de garrafas encontradas em resíduos sólidos urbanos, por exemplo, em embalagens de refrigerantes, para utilização em fundações profundas. O comportamento do PET reciclado quando submetido à cravação e a carregamentos foi comparado com o comportamento do aço, em ambiente reduzido (laboratório) e protótipos.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO – O USO DE ESTACAS DE PLÁSTICO

Esta pesquisa comparou um polímero ainda não testado em fundações, o ESTAPET, com o aço. Materiais poliméricos ainda são pouco aplicados em obras de engenharia de fundações no mundo conforme Iskander (2003) e Guades (2012). Em geral, estacas de plástico reforçadas com fibras têm sido utilizadas principalmente nos Estados Unidos e Austrália nas últimas décadas, além de algumas utilizações isoladas com outros tipos de polímeros pelo mundo, como em Veneza na Itália, em defensas para embarcações. Não existe um padrão definido. O registro histórico é pequeno. De qualquer forma apresentam-se alguns trabalhos executados na linha de fundações profundas baseados na utilização de materiais poliméricos.

As estacas poliméricas reforçadas com fibras ou FRP (*fiber reinforced polymers*) tiveram seu primeiro protótipo em abril de 1987, no Porto de Los Angeles, e, subsequentemente, o *Tiffany Street Pier* em Nova York, construído sobre estacas de plástico reciclado (ISKANDER, 2003). A utilização de polímeros em estacas armadas com proteção de PVC (policloreto de vinila) é citada por Pando (2006), todavia, mesmo nos Estados Unidos é criticada a falta de pesquisa sobre o tema pelos pesquisadores da área.

Nos EUA e Austrália existem outros exemplos de aplicações, em construções e reformas de fundações de marinas e pontes. Na (FIGURA 2.1) (a) e (b) apresenta-se exemplo de cravação de estacas FRP de 125 mm<sup>2</sup>, destinadas a passarelas em Queenlands (Austrália); em (c), mostram-se estacas armadas com proteção de PVC na Ponte sobre o Rio Nottoway no Estado da Virgínia (EUA).



FIGURA 2.1 - (a) e (b) CRAVAÇÃO DE ESTACAS FRP – (AUSTRÁLIA). (c) ESTACAS ARMADAS COM PROTEÇÃO EXTERNA DE PVC – (EUA)  
 FONTE: GUADES (2012) E PANDO (2006)

A empresa fabricante de defensas com estacas de plástico, troca estacas de madeira em Veneza por estacas poliméricas recicláveis desde 1999 conforme a placa de identificação (FIGURA 2.2–a). A FIGURA 2.2 (b) ilustra a utilização dessas defensas com estacas de plástico, em Veneza-Itália.



FIGURA 2.2 - UTILIZAÇÃO DE ESTACAS DE PLÁSTICO COMO DEFENSAS (VENEZA - ITÁLIA, 2012).  
 FONTE: DO AUTOR (2012)

A (FIGURA 2.3) apresenta os tipos de estacas poliméricas e poliméricas com compósitos, utilizadas no mercado norte-americano. Quanto ao processo de moldagem, é mais utilizado a pultrusão contínua de até 32 m, com diâmetros variando entre 254 e 430 mm em tubos reforçados FRP. Na figura referenciada, as estacas são denominadas da seguinte forma: (a) com núcleo de aço revestido; (b) estaca de plástico reciclado com reforço de barras de fibra de vidro ou aço (SRP); (c) estacas tubulares FRP preenchidas de concreto; (d) PEAD (polietileno de alta densidade) reforçado com telas de fibra de vidro e preenchidas com polietileno reciclado; (e) plástico revestido por fibra de vidro, (f) estacas tubulares FRP, reforçadas com fibra de vidro; e (g) estacas prancha em FRP (GUADES, 2012).

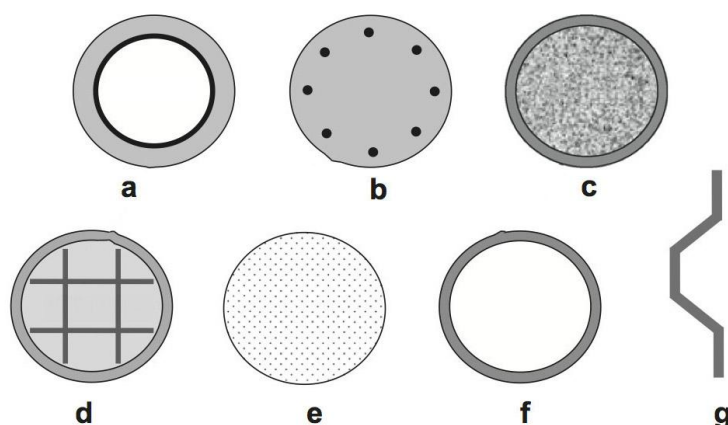


FIGURA 2.3 - SEÇÃO TRANSVERSAL DAS ESTACAS POLIMÉRICAS (COMPÓSITOS) UTILIZADAS NO MERCADO NORTE AMERICANO  
 FONTE: ADAPTADO DE GUADES (2012)

### 2.1.1 Características gerais das estacas poliméricas

Os polímeros, em geral, apresentam comportamento característico diferente dos materiais de construção usuais, denominado como comportamento elasto-plástico não linear com acentuada fluência.

O comportamento tensão-deformação dos diversos tipos de plásticos e polímeros pode ser dividido em três grupos conforme proposto por Callister (1994). O grupo A, caracteriza um polímero frágil que sofre uma ruptura quando se deforma. O grupo B, apresenta um comportamento semelhante ao dos metais. No grupo C, os polímeros apresentam características semelhantes à borracha.

Conforme Santos (2005), os materiais que compõem as garrafas PET são classificados como polímeros semicristalinos, ou seja, formados por região cristalina e amorfa, que segue o comportamento similar ao grupo B. Estes tipos de polímeros, quando submetidos à tração, registram deformação plástica no corpo de prova, gerando estreitamento e um leve aumento de resistência.

A aplicabilidade do PET em obras civis já foi tema de várias pesquisas. Das conclusões importantes podem ser citadas:

- a. Alta deformabilidade sob temperaturas mais elevadas;
- b. Quanto maior o peso molecular, maior resistência à tração.

- c. Quanto maior o grau de cristalinidade, ou seja, as moléculas em arranjo ordenado paralelo, maior o módulo de tração.
- d. Aumento da resistência à tração quando o material é submetido a um tratamento térmico, que evite bolhas. (resfriamento interno).
- e. A pré-deformação por estiramento é uma técnica utilizada em garrafas PET e em fabricação de tiras de amarração (substituem tiras de aço em embalagens), para aumentar a resistência à tração do PET. Trata-se de uma contínua deformação do PET, na fase de estiramento.

Segue abaixo (TABELA 2.1) onde são comparados os resultados de pesquisas com materiais poliméricos similares ao ESTAPET com as pesquisas feitas no laboratório de materiais da UNESP (Universidade do Estado de São Paulo).

TABELA 2.1 - COMPARAÇÃO DE DADOS NECESSÁRIOS AO ESTUDO DE CRAVABILIDADE ENTRE DIFERENTES ESTACAS

Tipo de estaca	A	$\gamma_{mat}$	E	c	Z	Referência
	(mm <sup>2</sup> )	(kgf/m <sup>3</sup> )	(GPa)	(m/s)	(kgf/s)*10 <sup>3</sup>	$\gamma_{mat}$ e E
<b>Protótipo</b>						
ESTAPET maciça 145 mm x 145 mm	210,25	900	21,4	4829	91,3	(FIDALGO, 2010)
<b>Dados comparativos</b>						
Concreto protendido Ø 315 mm	77900	2406	34,5	3787	710	(ISKANDER, 2002)
Tubo aço Ø 340 mm (9,5 mm de parede)	9900	7849	200	5048	392	(ASHFORD, 2001)
Madeira Ø 356 mm	99500	815	13,8	4114	334	(ISKANDER, 2002)
FRP Ø 325 mm concreto interno	83000	2240	31	3652	692	(ASHFORD, 2001)
Aço revestido Ø 254 mm	11300	7849	200	5048	448	(ASHFORD, 2001)
SRP Ø 406 mm	129500	7700	5,4	2644	265	(ISKANDER, 2002)
FRP vazadas Ø 356 mm	14000	1927	23	3455	93	(ASHFORD, 2001)

FONTE: ADAPTADO DE GUADES (2012)

A definição de impedância ( $Z$ ) e da velocidade de onda da partícula ( $c$ ) são explicadas com detalhes no item 2.4.2.2 deste capítulo. De qualquer forma, seguem as fórmulas básicas para defini-las:

$$Z=E*A/c \quad (2.1)$$

$$c=(E*g/\gamma_{mat})^{1/2} \quad (2.2)$$

Onde:

$E$ =módulo de elasticidade

$A$ =área da seção da ponta

$\gamma_{mat}$ = densidade do material

$g$ = aceleração da gravidade

Os dados do protótipo foram baseados nos dados obtidos por Fidalgo (2012). Guades (2012) completou a tabela baseando-se nos dados de Iskander (2002) e Ashford (2001), sendo coerentes com os dados obtidos com a ESTAPET. Os valores de densidade do material ( $\gamma_{mat}$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ) e área da seção de ponta ( $A$ ) demonstram certa similaridade de índices entre os materiais poliméricos e a ESTAPET.

Na (TABELA 2.2), são resumidos outros dados gerais importantes obtidos das amostras retiradas do mesmo lote dos protótipos da ESTAPET.

TABELA 2.2 - CARACTERÍSTICAS TERMO-MECÂNICAS DO ESTAPET MATERIAIS.

Amostras ESTAPET	$\sigma_{pet}$ (MPa)	Energia (J) absorvida	$E$ (MPa)	$T_f$ (°C)	$T_g$ (°C)	$T_c$ (°C)
Sem sal	19,4	0,31	21400	166	-14	117,5
Com sal	15	0,29	17900	-	-	-

FONTE: ADAPTADO DE FIDALGO (2010).

As amostras foram cortadas nos tamanhos e quantidades exigidos para cada ensaio. As amostras com sal foram testadas após serem submetidas a uma solução salina dentro do equipamento denominado *Salt Spray*. Os resultados de Fidalgo (2010) demonstram 23% de redução da tensão de escoamento ao ambiente salino, todavia, não significa que a estaca terá menor vida útil quanto à

corrosão em relação ao aço. As pesquisas de Fidalgo (2010) seguiram as normas ASTM (D695, D6110, E-1641)

O valor de tensão de escoamento à compressão do ESTAPET ( $\sigma_{pet}$ ) é relativamente expressivo quando comparado a outros tipos de materiais. Os dados das temperaturas de fusão ( $T_f$ ), de temperatura de transição vítrea, ( $T_g$ ) e temperatura de cristalização ( $T_c$ ), mostram que um melhor controle do resfriamento do material (evitando bolhas) durante o processo de fabricação, ou a adição de aglutinantes, pode aumentar a temperatura de cristalização e, conseqüentemente, a resistência à compressão, além de aumentar sua temperatura de trabalho que, segundo Callister (1997), deve ser superior em 30° a temperatura de transição vítrea. Para o nosso caso, portanto, a temperatura de trabalho deve ser 15,8° segundo (FIDALGO, 2010).

## 2.2 MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS

Os modelos físicos reduzidos são utilizados para aferição dos aparatos numéricos utilizados para estimar o comportamento de um determinado protótipo (DELL AVANZI *et.al*, 2012). Em Dell Avanzi *et al* (2006), é apresentado uma relação de fatores de escala, relacionando grandezas do protótipo às respectivas grandezas em um modelo físico escalado.

São vantagens da utilização dos modelos físicos reduzidos em geotecnia: repetibilidade e, por conseqüência, acurácia, economia (em algumas situações) e a possibilidade de controle, ou de isolar variáveis geotécnicas, possibilitando comparações mais precisas que no ambiente geotécnico. Assim, numa mesma caixa dimensionada, como a do experimento, foi possível executar duas baterias de testes, comparando o desempenho da estaca em aço e em PET.

Desta maneira, se for considerado um fator de escala  $N$ , como a razão entre o comprimento do protótipo e o comprimento do modelo, este quociente  $N$  será o número de vezes que o comprimento do protótipo é maior que o modelo. Como conseqüência, admitindo-se a gravidade terrestre, teremos uma relação, ou quociente  $\alpha=1$ , para a relação entre a gravidade do protótipo e a gravidade do modelo. Baseando-se nessas relações elementares, Dell'Avanzi (2006), apresenta fatores de escala, relacionando grandezas do protótipo às respectivas grandezas em um modelo físico escalado, tal como indicado abaixo na (TABELA 2.3).

TABELA 2.3 - FATORES DE ESCALA

<b>Grandeza</b>	<b>Fator de escala/Protótipo/modelo</b>
Aceleração	1
Densidade	1
Ângulo de atrito	1
Porosidade	1
Comprimento	$N$
Tensão	$N$
Módulo de elasticidade	$N$
Intercepto coesivo	$N$
Área	$N^2$
Volume	$N^3$
Força	$N^3$
Massa	$N^3$

FONTE: ADAPTADO DE DELL AVANZI (2006)

Por exemplo, para as grandezas volume, força, massa, o fator de escala entre o protótipo e o modelo será o quociente  $N^3$ . Para as grandezas comprimento, módulo de elasticidade, intercepto coesivo, o fator de escala será  $N$ . Para a grandeza área o fator de escala será  $N^2$ . Para as grandezas, aceleração, densidade, ângulo de atrito e porosidade o fator de escala será 1.

Estes fatores podem ser deduzidos da seguinte forma: considerando os fatores comprimento ( $N$ ), área ( $N^2$ ), volume ( $N^3$ ), força ( $N^3$ ), a densidade ou peso específico pode ser obtida ( $N^3/N^3=1$ ), ou a porosidade =  $V_v/V_t = N^3/N^3= 1$ . O caso da porosidade pode ser comprovado que, se o arranjo das partículas do modelo for similar ao do protótipo, deverão ser mantidos os resultados de porosidade, peso específico e ângulo de atrito do solo.

### 2.3 CAPACIDADE DE SUPORTE VERTICAL EM ESTACAS

A capacidade de suporte de ruptura de uma estaca é dividida em duas parcelas, uma de ponta e outra lateral. A carga de ruptura, que ocorre quando há transferência máxima ao solo do esforço na ponta da estaca, ou seja, esta relacionada com recalque incessante, não significa que o elemento estrutural entrou em colapso (CINTRA; AOKI, 2010). Portanto, serão revisados a seguir

alguns métodos teóricos e empíricos de dimensionamento de capacidade de suporte.

### 2.3.1 Formulações teóricas

A seguir, são apresentadas formulações teóricas clássicas de fundações para efeito de previsão da capacidade de suporte do modelo.

#### 2.3.1.1 Resistência de ponta

A teoria de Terzaghi (1943 e 1948) se originou nas investigações de Prandtl relativas à ruptura plástica dos metais por puncionamento, de onde Terzaghi, retomando esses estudos, adaptou-os ao cálculo de capacidade de suporte de um solo homogêneo, sob uma fundação corrida superficial. Segundo essa teoria, o solo abaixo de uma fundação forma uma cunha de ruptura, que se desloca, transmitindo o deslocamento ao solo adjacente e formando duas zonas de cisalhamento, chamadas de radial e linear (ou zona passiva de Rankine), adotando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

O esquema apresentado na (FIGURA 2.4) representa a superfície de ruptura de uma estaca por Terzagui (1943), esboçado por Santos (2008). O valor de  $\alpha$  de Terzagui da equação (2.3), influencia no espraiamento da cunha de ruptura, no arco logarítmico CD, pois outros autores, como Meyerhof (1965) consideram a variável conforme equação (2.5) para  $\alpha$  (Meyerhof). Os valores de  $\beta$  e  $\eta$  também são apresentados abaixo:



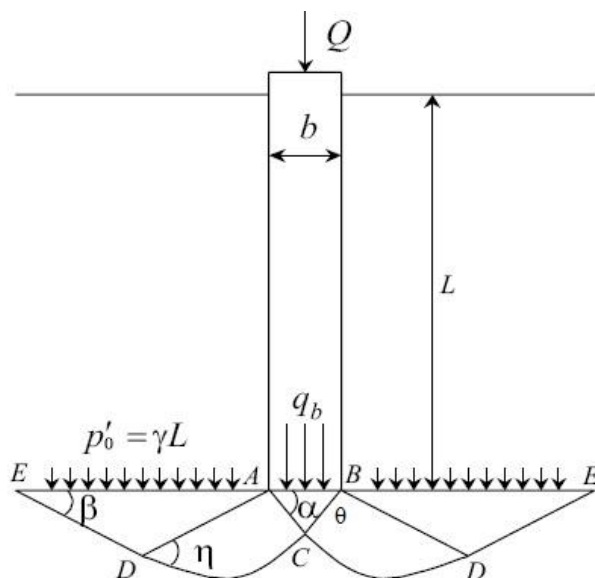


FIGURA 2.4 - SUPERFÍCIE DE RUPTURA POR TERZAGHI  
 FONTE: ADAPTADO DE SANTOS (2008)

Conforme Bueno *et al.*(1985), os trechos AC e DE, da linha de ruptura formada são retos. O ângulo  $\alpha$ , AC formado com a base da estaca e do ângulo  $\beta$ , DE formado com a linha paralela com a ponta da estaca, são dados por:

$$\alpha = \phi \quad (2.3)$$

$$\beta = \pi/4 - \phi/2 \quad (2.4)$$

$$\alpha \text{ (Meyerhof)} = 45 + \phi/2 \quad (2.5)$$

Completando o formato da cunha de ruptura de Terzagui (1943), temos ainda o ângulo ( $\eta$ ) e a espiral logarítmica CD (curva), proposta por Prandtl (1920), citado por Terzaghi (1943), equivalendo a ( $r$ ). As equações abaixo que representam estes arcos e ângulos de ruptura

$$\eta = \pi/2 - \phi \quad (2.6)$$

$$r = r_0 * e^{\theta * \tan \phi} \quad (2.7)$$

$$\theta = 135^\circ - \phi/2 \quad (2.8)$$

Onde:

$r_0$  = vetor BC

$\theta$  = ângulo em radianos da espiral medido a partir de BC, até a reta BD, com centro em B.

Portanto, os métodos analíticos ou teóricos originam-se da teoria da plasticidade, no que se refere à ruptura por punção, seguindo as observações de Prandtl, analisando o formato da superfície de ruptura e seu traçado geométrico e considerando para o solo o critério de ruptura de Mohr – Coulomb, ver (FIGURA 2.5).

As fórmulas para o dimensionamento de fundações rasas serviram de base para o cálculo da resistência de ponta. O fator  $N_\gamma$  é desprezado, a não ser em caso de fundações de base alargada. Os valores e capacidade de ponta variam muito conforme os fatores  $N_q$ , que definem o formato da ruptura, sendo estabelecidos por cada pesquisador.

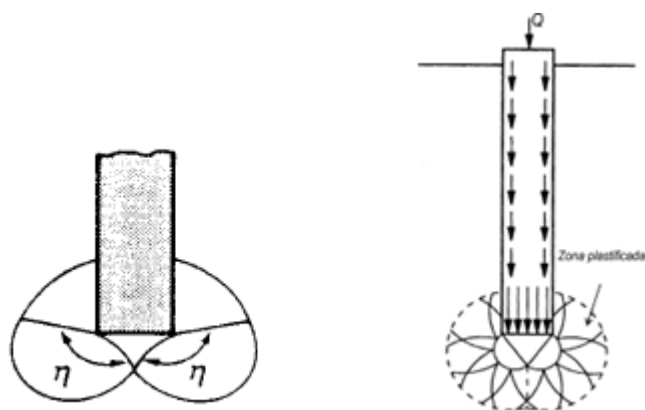


FIGURA 2.5 - SUPERFÍCIES DE RUPTURA ASSUMIDAS POR JANBU (1976), À ESQUERDA, E POR VESIC (1975)  
FONTE: ADAPTADO DE SANTOS (2008)

A capacidade de suporte de ponta de estacas, segundo Bowles (1996), leva em consideração fatores de forma, que relacionam o diâmetro com a profundidade e para casos específicos, como para estacas de base alargadas e solos predominantemente coesivos.

Como na pesquisa se utiliza solo basicamente granular, estaca curta e quadrada, adota-se a formulação proposta por Das (2007).

$$R_p = A_p (c * N_c + q * N_q) \quad (2.9)$$

Onde:

$R_p$  = resistência de ponta

$A_p$  = Área de ponta.

$c$  = coesão do solo na ponta, ou  $S_u$ .

$N_c, q$  = Fatores de capacidade de carga para coesão, carga e densidade.

$q = \gamma \cdot L$  = pressão efetiva na ponta na ponta da estaca.

A (TABELA 2.4) apresenta valores de  $N_q$  conforme a interpretação e análise de cada pesquisador:

TABELA 2.4 - VALORES DE  $N_q$

Pesquisador	Valores de $N_q$	Referência
Terzagui (1943) (base lisa) e Meyerhof (1963).	$N_q = (\tan^2 (45^\circ + \phi/2))^* e^{\pi \cdot \tan \phi}$	Santos (2008)
Vesic (1975)	$N_q = ((3/3 - \sin \phi)^* e^{(\pi/2 - \phi) \cdot \tan \phi}) \cdot ((\tan^2 (45^\circ + \phi/2))^* I_{rr})$	Santos (2008)
Janbu (1976)	$N_q = (\tan \phi + (1 + \tan^2 \phi)^{1/2})^2 \cdot (e^{2 \cdot \eta \cdot \tan \phi})$	Das (2007)

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

O valor de  $I_{rr}$  para Vesic (1975) é determinado por:

$$I_{rr} = I_r / (1 + I_r \cdot \Delta) \quad (2.10)$$

Onde:

$I_{rr}$  = índice de rigidez reduzido do solo (Bowles 1996)

$I_r$  = índice de rigidez =  $G_s / (c + p_o \cdot \tan \phi)$

$\Delta$  = deformação volumétrica média na zona plastificada abaixo da ponta da estaca

$G_s$  = módulo de distorção ou cisalhamento do solo

$p_o$  = tensão efetiva média na pontada estaca

O valor de  $\eta$  para Janbu (1976) corresponde ao ângulo da superfície de ruptura da (FIGURA 2.6). Os valores de  $\eta$  podem variar de  $60^\circ$  a  $105^\circ$ , para argilas moles até areias compactas.

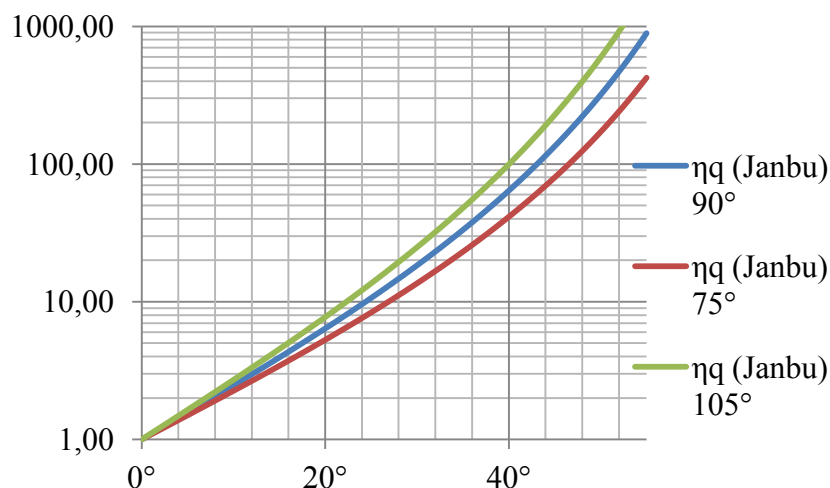


FIGURA 2.6 - VALORES CALCULADOS PARA  $N_q$  DE ACORDO COM  $\eta$  DE 75°, 90° E 105°.

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

Os valores de  $N_c$  para Terzagui (1943), Meyerhof (1963), Vesic (1975) e Janbu (1976) são todos iguais a:

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi \quad (2.11)$$

### 2.3.1.2 Resistência lateral

Para o caso de areias, a resistência lateral de uma forma geral é obtida através da fórmula geral:

$$R_l = q_l \cdot A_l \quad (2.12)$$

Onde:

$q_l$  = resistência máxima unitária lateral local.

$A_l$  = área lateral

A resistência unitária em areias homogêneas  $q_l$  é obtida através da fórmula (CINTRA; AOKI, 2010).

$$q_l = K \cdot \sigma_v \cdot \tan \delta, \quad (2.13)$$

Onde:

$\sigma_v$  = tensão vertical no segmento de estaca =  $\gamma \cdot L$

$K$  = coeficiente de empuxo

$tg \delta$  = coef. de atrito solo- estaca.

$\delta$  = ângulo de atrito solo-estaca

$L$  = profundidade.

Para o experimento será adotado para  $K$  o valor de 1,6% de  $Nq$  e  $\delta$  ao ângulo de atrito de interface residual entre solo e estaca (FLEMING, 1992). Conforme observações experimentais (CINTRA; AOKI, 2010) confirmadas por Das (2007), o atrito lateral  $q_l$  cresce linearmente nas areias até aproximadamente a profundidade  $L'$  entre 15 a 20 vezes o diâmetro da estaca em um gráfico ( $q_l$  x profundidade  $L$ ), devido ao efeito de arqueamento das areias, onde permanece constante (FIGURA 2.7).

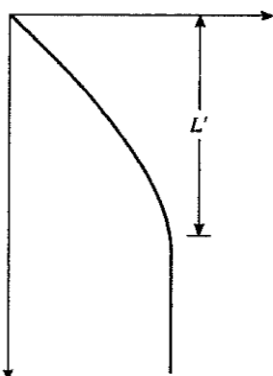


FIGURA 2.7 - AUMENTO DO VALOR DE  $RL$  ATÉ PROFUNDIDADE CRÍTICA  $L'$   
 FONTE: DAS (2007)

O atrito lateral é muito influenciado pelo valor do empuxo, sendo que em estacas cravadas obtêm-se maiores valores de atrito unitário em relação a estacas injetadas e escavadas.

### 2.3.2 Método Aoki-Velloso

Para efeito comparativo de cálculo, apenas nos protótipo foram executadas sondagens *in-loco* tipo SPT e CPT, e foi adotado o método semi-empírico Aoki-Velloso, amplamente difundido. Resumidamente o método é abaixo explicado (CINTRA; AOKI, 2010):

$$R_p = q_c / F_1 \quad (2.14)$$

$$R_l = f_s / F_2 \quad (2.15)$$

Onde:

$q_c$  = resistência de ponta do cone

$f_s$  = resistência lateral da luva

$F_1$  e  $F_2$  = são fatores que levam em conta o efeito de escala, ou seja, entre o cone e o protótipo e o método executivo (escavada ou cravada). Para nosso caso adotou-se 1,75 e 3,5.

Para substituir o valor de  $q_c$ , por valores de SPT, Cintra e Aoki (2010) sugerem as seguintes correlações:

$$q_c = K * N_{spt} \quad (2.16)$$

$$f_s = \alpha * q_c. \quad (2.17)$$

Onde:

$K$  e  $\alpha$  são coeficientes que dependem do tipo de solo. Para a areia em questão adotou-se:  $K=1$  MPa e  $\alpha= 1,4$  %.

### 2.3.3 Correlações dos ensaios CPT e SPT

Com os valores de índice de vazios máximos e mínimos, ou pesos específicos secos máximos e mínimos definidos, pode-se calcular o grau de compactação ou densidade relativa dos grãos ( $G_c$  ou  $D_r$ ).

Os valores de densidade relativa podem variar entre 0 e 100% para solos muito compactos. Segue (TABELA 2.5) que correlaciona a compactação relativa e os valores de  $q_c$  dos ensaios do cone holandês e é encontrada em Gonçalves *et al* (2012), que cita Meyerhof (1965), abaixo adaptada.

TABELA 2.5 - VALORES DE  $q_c$  X COMPACIDADE RELATIVA

<b>Areias</b>	<b><math>q_c</math> (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>D_r</math></b>
Muito fofa	< 20	> 0,2
Fofa	20 a 40	0,2 a 0,4
Medianam. compacta	40 a 120	0,4 a 0,6
Compacta	120 a 200	0,6 a 0,8
Muito compacta	> 200	0,8 a 1

FONTE: MEYERHOF (1965) *apud* GONÇALVES *et al* (2012)

## 2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE CARGA

Serão revisados os métodos dinâmicos e estáticos de cálculo de capacidade de suporte de estacas.

### 2.4.1 Métodos dinâmicos - Ensaio de Carregamentos Dinâmicos (ECD)

Nas fundações onde é utilizado o processo de cravação de estacas, em geral, é recomendada a conferência da resistência de campo de todas as estacas. Os métodos de nega e repique são muito conhecidos e utilizados para esta conferência por observação *in loco*, em relação ao dimensionamento prévio da estaca em questão. Nega é o deslocamento da estaca quando submetida ao impacto do martelo. Em geral, é obtida como um décimo de penetração para 10 golpes. Repique é o deslocamento elástico do solo-estaca medido no topo da estaca.

Os procedimentos de campo para obtenção dos resultados de nega, e repique consistem em colar uma folha de papel na estaca, e riscá-la com uma régua fixada fora da estaca e sistema cravador, permanecendo marcando com o lápis durante os 10 golpes posteriores medindo a deformação permanente e repique conforme (FIGURA 2.8).

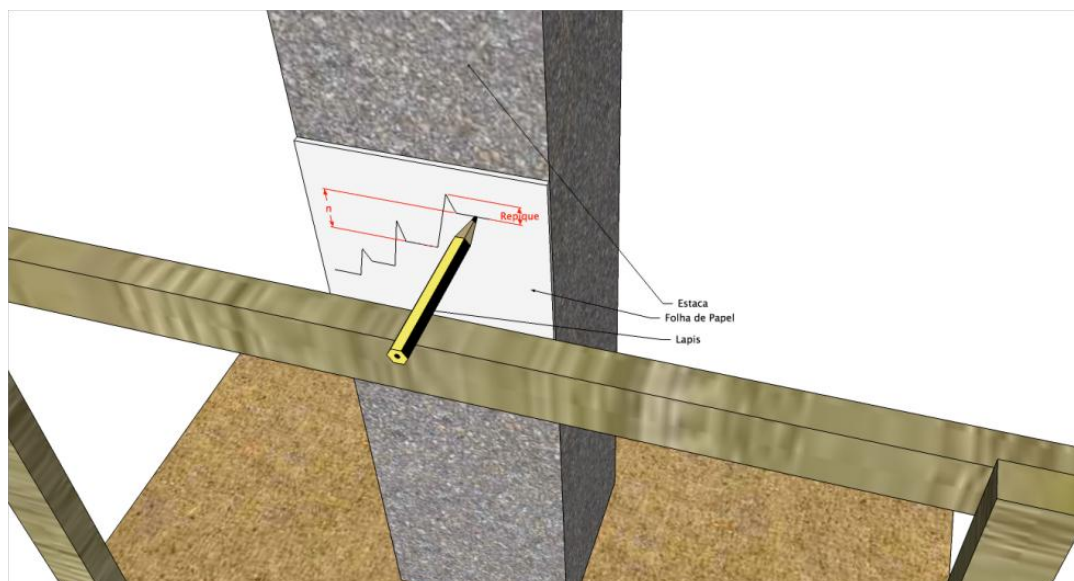


FIGURA 2.8 - ESQUEMA PARA DETERMINAÇÃO DO REPIQUE E NEGA  
 FONTE: DO AUTOR

Este controle também pode ser feito por instrumentação, a partir da onda gerada no impacto do sistema cravador. Muitas pesquisas e autores fazem considerações deste estudo são baseadas nos trabalhos de Gonçalves *et al* (2007), Alonso (1991), Bowles (1996), Cavassani (2005), Avelino (2006) e Velloso e Lopes (2010).

As equações de nega e repique, denominados métodos dinâmicos, são baseadas em leis e princípios da dinâmica dos corpos:

- a) Princípio da conservação de energia, que estabelece que o total de energia de um sistema isolado permanece constante;
- b) Teorema trabalho e energia;
- c) Princípio da conservação da quantidade de movimento;
- d) Teoria de choque dos corpos rígidos;
- e) Do pressuposto que o corpo obedece à Lei de Hooke e que a resistência é mobilizada inteiramente ao longo de toda a massa, em movimento, de forma instantânea.

Durante a cravação, a energia real aplicada à estaca é dissipada no capacete, no sepo, e no sistema de cravação, como no atrito roldana com cabos, atrito guias do martelo com torre, além dos fatores envolvendo atrito solo-estaca.



Na obtenção de fórmulas, deve-se avaliar a eficiência do sistema, ou seja, a razão entre a resistência dinâmica da estaca e sua resistência real, além das deformações solo-estaca.

As fórmulas dinâmicas podem ser deduzidas, baseadas em princípios diferentes, conforme o caminho e considerações dos seus autores. Essas fórmulas, para obtenção da resistência de ruptura, chamadas aqui de ECD, foram sofrendo mudanças conceituais conforme o passar dos séculos desde os princípios de Isaac Newton, até os dias de hoje, com adoção de métodos que analisam o instante do impacto e a geração da onda causada, com instrumentação cada vez mais especializada. Segundo Bowles (1996) existe centenas de fórmulas sobre o assunto.

A seguir são demonstradas deduções de algumas fórmulas para um pequeno entendimento dessas pesquisas e estudos feitos. Portanto seguem alguns princípios dedutivos. O princípio da Conservação da Energia mecânica considera que:

$$Em_o = Emf \quad (2.18)$$

$$Em = Ec + Ep \quad (2.19)$$

Onde:

$Em_o$  = Energia mecânica inicial.

$Emf$  = Energia mecânica final

$Em$  = Energia mecânica

$Ec$  = energia cinética

$Ep$  = energia potencial

Sabendo que:

$$Ec = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (2.20)$$

$$Ep = m * g * h \quad (2.21)$$

Onde:

$m$  = massa,

$h$  = altura de queda do martelo

$v$  = velocidade

Dividindo o ciclo de cravação em duas etapas, separadas pelo momento do impacto, obtêm-se o primeiro período, onde o martelo é liberado em queda livre, que pode ser deduzido o esquema básico da (FIGURA 2.9).

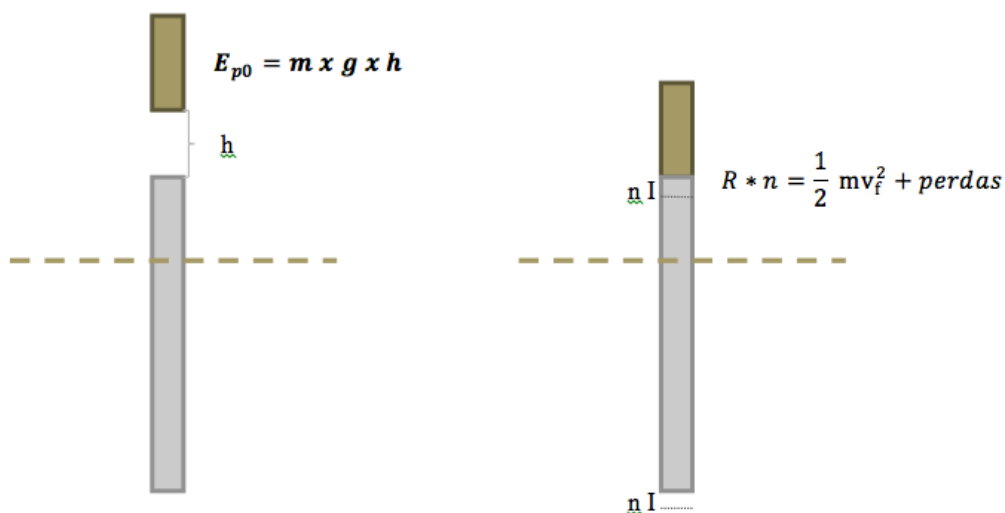


FIGURA 2.9 - ESQUEMA BÁSICO DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA  
FONTE: DO AUTOR

Assim ao final do impacto temos:

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v_f^2 = m * g * h \quad (2.22)$$

Pelo Teorema Trabalho e energia:

$$W = \Delta K \quad (2.23)$$

Onde:

$W$  = trabalho

$\Delta K$  = variação da energia cinética

Por outro lado trabalho ( $W$ ) é o produto da força pelo deslocamento, ou da mesma forma que o produto da resistência da estaca ( $R$ ) pelo nega ( $n$ ). Assim, pode ser obtida a fórmula de Sanders (1851).

$$P_{mart} * h = R * n \quad (2.24)$$

Considerando também o Princípio da Quantidade de Movimento e a interpretação do tipo de choque realmente ocorrido, pode-se deduzir várias fórmulas diferentes, sabendo ainda que as mesmas podem considerar diferentes formas de perda de energia.

Considera-se na física três tipos de choque: o perfeitamente elástico, o parcialmente elástico (com velocidades de afastamento do corpo que sofreu o choque, iguais ou inferiores à velocidade do choque) e o choque perfeitamente inelástico (com velocidade de ambos após o choque iguais, com total dissipação de energia) (RAMALHO,1982). O choque elástico pode ser exemplificado por meio do impacto de duas bolas de sinuca, já o choque inelástico, pode ser exemplificado por meio de um projétil que atinge um alvo e ambos se deslocam como uma única massa.

Através do Princípio da Conservação da Quantidade de movimento, ou seja, o produto da massa pela velocidade antes do impacto é igual ao da massa pela velocidade após o impacto. Fazendo-se considerações quanto ao tipo de choque no momento infinitesimal antes e após o choque, e ainda utilizando os princípios da equação (2.18), pode ser obtida a fórmula de Brix:

$$\frac{P_{est} * P_{mart}^2 * h_{queda}}{(P_{mart} + P_{est})^2} = Rest * n \quad (2.25)$$

Onde:

$P_{est}$  = peso da estaca

$P_{mart}$  = peso do martelo

A Fórmula dos Holandeses (2.26) também tem uma dedução muito similar a Fórmula de Brix. Utilizando também o princípio da conservação da energia, apesar das perdas do choque, é obtida a fórmula dos holandeses, diferindo de Brix, somente porque a massa considerada não é somente da estaca e sim do martelo com a estaca (choque inelástico).

$$n = \frac{P_{mart}^2 * h}{(P_{mart} + P_{est}) * R} \quad (2.26)$$

Entre as críticas relacionadas a esta dedução estão as perdas da energia durante a queda do martelo, onde somente é considerado o Princípio da Energia

Mecânica. Também ocorrem mudanças de considerações quanto ao tipo de choque antes e depois do impacto.

Das observações e deduções feitas, pode ser verificado que, na prática, quando a estaca atinge a “nega”, o comportamento do choque parece obedecer a um estado elástico ou parcialmente elástico. Obedecendo ao Princípio da Quantidade de Movimento, temos o caso de massas diferentes após o choque, onde prevalece o sentido do movimento do corpo de maior massa.

Como a resistência estaca-solo é muito superior ao peso do martelo, apesar do conjunto estar em repouso, quando recebe o impacto do martelo na região de maior resistência, ele tende a voltar devido à onda de energia que retorna após a deformação da estaca.

Com o passar do tempo, o estudo da onda de energia e observações de suas consequências começaram a ser mais bem avaliadas. A partir da fórmula básica, foram adicionados coeficientes que tentam definir as perdas de energia, apesar do grande número de variáveis que possam atuar neste sistema, desde a eficiência do martelo, até o sistema de amortecimento do impacto, com o objetivo de aprimorar essas fórmulas.

Retornando ao Princípio da Conservação da Energia e considerando a fórmula de Sanders (equação 2.24) apenas somando uma parcela referente as perdas de energia pode ser obtido:

$$P_{mart} * h = R * n + perdas \text{ ou } e * P_{mart} * h = R * n + X \quad (2.27)$$

Onde:

$e$  = fator que representa perdas de energia do sistema cravador (eficiência), gerada por atrito das roldanas, das guias do martelo com a torre.

$X$  =somatório das perdas de energia no impacto, e devido às deformações do coxim do capacete ( $C1$ ) normalmente desprezada, estaca ( $C2$ ) e solo ( $C3$  ou *quake*).

Na (FIGURA 2.9) podemos observar duas leituras usuais: a de repique e nega. Os valores de  $C2$  somados com  $C3$  correspondem ao repique enquanto a nega corresponde à deformação permanente.

A partir da fórmula geral simplificada (equação 2.27), foram desenvolvidas muitas soluções, considerando as perdas de energia. Os métodos utilizados neste trabalho são apresentados na (TABELA 2.6).

TABELA 2.6 - MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE RESISTÊNCIA

Métodos	Valor de $R$ (resistência dinâmica)	Ref.
Wellington (1888)	$(e * P_{mart} * h) / (n + \frac{C}{2})$	Avelino (2006)
Hilley (1925)	$\frac{e * P_{mart} * h_{queda}}{n * 0,5 * (C1 + C2 + C3)} * \frac{P_{mart} * \eta^2 * Pest}{(P_{mart} + Pest)}$	Gonçalves <i>et al</i> (2007)
Dinamarqueses (1957)	$\frac{e * P_{mart} * hq}{n + 1/2 * \left( \sqrt[2]{\frac{2 * e * P_{mart} * hq * L}{E * A}} \right)}$	Velloso e Lopes (2010)
Janbu (1951)	$\frac{2 * e * P_{mart} * hq}{\mu * \left( n + \frac{C3}{2} \right) * \left( 1 + \sqrt[2]{1 + e * \frac{P_{mart} * h_{queda} * Le}{E * A}} * \sqrt[2]{\frac{1}{\left( s + \frac{C3}{2} \right)^2}} \right)}$	Gonçalves <i>et al</i> (2007)

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

Observações:

- No método de Wellington a parcela  $C$  corresponde ao repique total ( $C2+C3$ ). O fator ( $e$ ) corresponde à eficiência do martelo;
- No método de Hilley  $\eta$  é o coeficiente de restituição. Conforme Bowles (1996) refere-se ao que chamamos de almofada ou “sepo”. Conforme a dureza da madeira pode variar desde 0,25 a 0,5. Será adotado 0,5;
- $(Le) = L * \alpha$ ;  
Onde:  
 $Le$ =comprimento efetivo  
 $\alpha$ = fator que pode variar entre 0,5 (para estacas longas de *off shore*) e 1 (estacas curtas);  
 $\mu$ = fator que representa o que ocorre no impacto. (1 para areias e 2,1 para argilas);

Para a fórmula de Hilley segundo Velloso e Lopes (2010) os valores de  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$ , que somados representam  $C$ . Para  $C2$  foi adotado valores de Bowles (1996):

$$C1 = R \cdot ta / Aa \cdot Ec \quad (2.28)$$

$$C2 = R \cdot Le / 2 \cdot Ae \cdot Ee \quad (2.29)$$

$$C3 = 5\% \cdot B \quad (2.30)$$

Onde:  $ta$ ,  $Aa$  e  $Ea$  são respectivamente: espessura, área e módulo de elasticidade dos amortecedores e  $L$ ,  $Ae$ ,  $Ee$ ,  $B$ , são respectivamente: comprimento, área, módulo de elasticidade e diâmetro da estaca.

Conforme Velloso e Lopes (2010), para achar  $C2$  deve ser medido o valor do repique e reduzir o valor de quake ou  $C3$ , usualmente 2,5mm para areias, até 7,5mm para argilas, para achar  $C2$ . Para Bowles (1996) o valor de  $C3$  pode chegar a 0 em rochas e areias compactas. Assim, pode ser obtido valor de  $C2$  de campo (medindo o repique e reduzindo  $C3$ ), e incorporado às fórmulas. Também pode ser encontrado  $C2$  primeiro através de um ensaio ECE disponível, e depois obtido  $C3$ .

Na prática de campo, é prudente desconfiar se durante a leitura da nega com valores inferiores a 2 mm, ocorrerem valores de repique muito altos (superiores a 10 mm), indicando que o solo tem comportamento resiliente, ou seja, semelhante a uma borracha, indicando que a energia de cravação foi convertida temporariamente em deformação e não em trabalho.

#### 2.4.2 Monitoramento utilizando conceitos da equação da onda

A análise e a avaliação da capacidade de suporte de estacas foram, ao longo dos séculos, sendo modificadas, sofrendo várias evoluções. As limitações das fórmulas de nega decorrem principalmente em considerar o golpe um evento instantâneo. À medida que foram sendo aprimorados e estudados os métodos para análise do que ocorre no momento do choque, os resultados de pesquisas demonstraram que durante o impacto ocorre a geração de ondas de energia.

#### 2.4.2.1 Equipamentos utilizados para aquisição de dados da equação da onda

Poucas empresas conseguiram adaptar os conceitos da equação da onda em equipamentos de medição e *softwares* devidamente calibrados. Dessa forma, são ligados sensores à estaca com parafusos de ancoragem que medem tensão e aceleração. Em seguida, é aplicada uma energia por um martelo de impacto ou queda livre.

A onda de compressão gerada viaja para base da estaca e reflete para topo. Esta onda refletida contém informações sobre o atrito lateral, resistência de ponta e possíveis defeitos na estaca. Os sinais medidos são processados e armazenados automaticamente. Depois de um teste de carga dinâmica, os dados são analisados utilizando *software*. Os dados da estaca e do solo são modelados e um cálculo é realizado utilizando a equação de onda.

Os modelos do solo descrevem o comportamento em termos de funções de deslocamento, velocidade e aceleração, utilizando parâmetros empíricos, que dependem de propriedades do solo conhecidas. Usando métodos em que os resultados de cada análise de onda são comparados com o comportamento real medido na estaca, parâmetros dinâmicos apropriados são refinados e a resistência lateral, resistência de ponta e do comportamento de deslocamento de carga estática são estabelecidos. O processo é normatizado no Brasil pela ABNT pela norma NBR 13208/1994 e nos Estados Unidos pela ASTM D4945/2012.



FIGURA 2.10 - FOTO DO EQUIPAMENTO DE MONITORAMENTO DO ENSAIO DLT  
FONTE: ARQUIVOS PESSOAIS

### 2.4.2.2 Mecânica das Ondas

Para o entendimento da equação da onda é importante a compreensão do conceito de impedância mecânica ( $Z$ ), que se relaciona com o conceito de transferência de energia a um corpo, ou seja, o quanto uma massa resiste ao movimento quando se aplica uma força. No caso da estaca é relacionada com o fato de que a estaca impede uma mudança na velocidade.

$$Z = \frac{F}{V} \quad (2.31)$$

Quando o martelo e a estaca tem a mesma impedância no momento do impacto, geram uma onda inicial de velocidade  $C_o$ .

$$Z_m = Z_e = \frac{E * A}{c} \quad (2.32)$$

Onde:

$Z_m$  = Impedância do martelo.

$Z_e$  = Impedância da estaca.

Desse modo, a fórmula da velocidade de onda  $C_o$  pode ser deduzida através dos conceitos de Mecânica dos Sólidos e de velocidade ocasionada pela força de impacto. No trabalho de Foá (2001) e Valverde (1996), é apresentada:

$$C_o = \sqrt{\frac{E * g}{\gamma_{mat}}} \quad (2.33)$$

Assim pode ser obtido:

$$Z = A * \sqrt{E * \gamma_{mat}} \quad (2.34)$$

Seguem propriedades relacionadas com a velocidade de onda de alguns materiais, conforme Foá (2001):



TABELA 2.7 - CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS A VELOCIDADE DE ONDA

Material	Módulo de elasticidade $E$ (MPa)	Massa específica $\gamma_{mat}$ (Kgf/m <sup>3</sup> )	Velocidade de onda $c$ (m/s)
Aço	210000	7850	5123
Concreto armado	22500 a 28900	2500	3000 a 3400
Concreto protendido	28300 a 39200	2450	3400 a 4000
Madeira	9000 a 16000	500 a 1000	3700 a 4500
Água	2100	980	1450

FONTE: ADAPTADO DE FOA (2001)

Para o material da ESTAPET, em que o módulo de elasticidade é 21,4 GPa e a massa específica 900 Kgf/m<sup>3</sup>, testados em laboratório (anteriormente apresentados), foi obtida a velocidade de onda  $C_o$  e adotada igual a 4829 m/s na (TABELA 2.1) deste trabalho.

Conforme a onda encontra resistências variadas em seu trajeto, devido ao solo ou as características da estaca, ela sofre reflexões e a equação (2.1) deixa de refletir, de forma satisfatória, a realidade desse problema.

Em Gonçalves *et al* (2007) a solução analítica da onda inicial de compressão no momento do impacto é analisada em várias situações de diferentes de impedâncias entre martelo e estaca.

Caso considerarmos, por exemplo, as mesmas impedâncias, entre martelo e estaca no momento infinitesimal antes do impacto e durante o impacto propriamente dito, todas as partículas do martelo possuem a mesma velocidade, que a velocidade final do martelo e no momento do impacto ( $t=0$ ), a força do martelo ( $F_m$ ) e a força da estaca ( $F_e$ ), são iguais com sentidos opostos:

$$F_{m\uparrow} = F_{e\downarrow} \rightarrow Z_m \cdot V_{m\uparrow} = Z_e \cdot V_{e\downarrow} \quad (2.35)$$

Onde:

$V_{m,e}$  = Velocidade das partículas do martelo, estaca

Como o tempo de atuação no impacto é igual para ambos temos e a velocidade das partículas  $V_m$  e  $V_e$  são iguais a velocidade da onda de propagação do martelo ( $C_m$ ) e das estacas ( $C_e$ ), temos:

$$V_o = V_e + V_m \rightarrow V_{e\downarrow} = V_o - V_{m\uparrow} = \frac{1}{2} \cdot V_o \quad (2.36)$$

Onde:

$V_0$  = Velocidade de queda do martelo. Pode ser obtida através da equação de Torricelli.

Substituindo a equação (2.36) em (2.35) tem-se:

$$F_e = Zm * \frac{1}{2} * V_0 \quad (2.37)$$

Assim, nos estágios seguintes de propagação da onda fica demonstrado em Gonçalves *et al* (2007) o tempo total de impacto:

$$t_{imp} = \frac{2 * Lm}{V_m} \quad (2.38)$$

Onde:

$t_{imp}$  = tempo total de impacto

Através da equação (2.39), pode ser obtida a energia de impacto:

$$E(0; t_{imp}) = \int_0^{t_{imp}} F_e(t) * V_m(t) * dt. \quad (2.39)$$

Onde:

$E$  = energia transferida do martelo para a estaca durante o impacto =  $ENTHRU$ .

Considerando o tempo total de impacto do martelo, ou de suas partículas, e adotando as equações (2.32, 2.37 e 2.38) na resolução da integral da equação (2.39), é obtida a equação:

$$E(t_{imp}) = \frac{1}{2} * Z * V_0^2 * \frac{Lm}{C} = \frac{1}{2} * Mm * V_0^2 \quad (2.40)$$

Ou seja, com o martelo e estaca de mesma impedância, é produzido durante o impacto uma onda inicial  $C$ , de energia  $E$ . Situações com impedâncias diferentes entre martelo e estaca são deduzidas e analisadas além das variações que

ocorrem na onda inicial e detalhadamente são apresentadas por Gonçalves *et al* (2012).

#### 2.4.2.3 Método CASE

O método CASE (*CASE Reserve University* (EUA)), é uma solução fechada da equação da onda. Hipóteses simplificadoras são assumidas:

- A estaca é um meio uniforme, idealmente elástico não oferecendo nenhuma resistência a propagação da onda;
- O solo é idealmente plástico;
- São desprezados os movimentos do solo em relação à estaca.

Assumidas essas hipóteses, todas as reflexões da onda são devidas as resistências do solo. Conforme Almeida (1985), baseando-se nos registros de força e velocidade dos sensores, obtidos durante um golpe qualquer do martelo sobre a estaca, pode ser obtida a resistência mobilizada  $R_t$  através da expressão:

$$R_t = \frac{(F(t_1) + F(t_2))}{2} + \frac{Z \cdot (V(t_1) - V(t_2))}{2} \quad (2.41)$$

Onde:

$t_1$  = instante em que o golpe atinge a maior intensidade na estaca.

O  $t_2$  é obtido da equação (2.42):

$$t_2 = t_1 + 2 \cdot L / c \quad (2.42)$$

A resistência total é dividida em duas parcelas:

$$R_t = R_s + R_d \quad (2.43)$$

Onde:

$R_d$  = componente dinâmica.

$R_s$  = componente estática. Obtém-se diminuindo ( $R_t - R_d$ )

A componente dinâmica é obtida através da equação (2.44). É assumido que  $R_d$  se encontra na ponta da estaca.

$$R_d = J_c * Z * V_e \quad (2.44)$$

Onde:

$J_c$  = coeficiente de amortização dinâmica

Sendo assim é obtido:

$$R_s = (1 - J_c) \frac{F(t_1) + Zv(t_1)}{2} + (1 + J_c) \frac{F(t_2) - Zv(t_2)}{2} \quad (2.45)$$

Valores de  $J_c$  são apresentados na (TABELA 2.8), adaptada de valores de relatórios de Valverde (1996), além de material técnico explicativo da TNO/PROFOUND (*Professional Foundation Diagnostics*). Os parâmetros de entrada de dados de solo da (TABELA 2.8) podem ser obtidos através de uma sondagem CPT ou SPT.

TABELA 2.8 - VALORES DE  $J_c$

	TNO		Case*	Impedance	
	Shaft (MNs/m <sup>3</sup> )	Toe (MNs/m <sup>3</sup> )		Shaft	Toe
				(s/m)	(s/m)
Areia	0,02- 0,10	0,4- 2,0	0,00- 0,15	0,0- 0,1	0,0- 0,5
Areia Siltosa	0,05- 0,15	1,0- 3,0	0,15- 0,25	0,0- 0,1	0,0- 0,5
Silte	0,10- 0,25	2,0- 5,0	0,25- 0,45	0,1- 0,2	0,1- 0,5
Argila Siltosa	0,20- 0,40	4,0- 8,0	0,45- 0,70	0,1- 0,3	0,2- 0,6
Argila	0,25- 0,50	5,0- 10,0	0,90- 1,20	0,1- 0,3	0,2- 0,6

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

Outro conceito básico aplicado no método CASE é o de energia relacionada a velocidade ( $v$ ), que é aplicado no cálculo da energia efetivamente transferida ( $ENTHRU$ ) pelo martelo na cabeça da estaca, que gera uma força ( $f$ ) medida nos sensores em um instante de tempo ( $t$ ) que pode ser obtido pelos dados do programas de monitoração, através da seguinte fórmula:

$$ENTHRU = \int_0^{2l/c} f(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad (2.46)$$

Conforme Almeida (1985), a razão da energia bruta (*mgh*) transferida antes do impacto do martelo, pela energia efetivamente transferida (*ENTHRU*), nos gera a eficiência desse martelo.

#### 2.4.2.4 Método TNOWAVE

O método TNOWAVE de análise ECD não é muito difundido no Brasil. O método mais conhecido no Brasil é o CAPWAP que significa *Case Pile Wave Analysis Program*. É um programa desenvolvido paralelamente ao Método Case que também utiliza os dados de velocidade e força obtidos pelos sensores no topo da estaca. De certa forma, o método CAPWAP é similar ao TNOWAVE, onde os deslocamentos são medidos em cada massa que a estaca foi dividida, além da resistência do solo. As forças obtidas no programa, no topo da estaca são comparadas com a reação do solo, e reprocessadas até a convergência de resultados, obtendo-se a previsão da carga mobilizada durante um golpe escolhido.

Segundo Middendorp (2004) o método TNOWAVE foi desenvolvido pelas empresas HBG (*Hollandsche Beton Group*) e TNO num martelo especial de impacto Hydroblok que utilizava nitrogênio e pelos seus pesquisadores, dentre eles Heerema (1970), Voitus Van Hammer *et al* (1974), Van Weele (1984), Meunier (1984), entre outros, e anteriormente utilizado no campo de aplicações de onda de tensões, na Holanda em 1950 por De Josselin e De Jong (1956) e Verduin (1956).

O método TNOWAVE é baseado na solução teórica da equação da onda através de Saint Venant (1867) e já havia sido utilizado na Holanda, na predição da propagação de ondas.

Seguem modelos baseados na equação da onda conforme Middendorp (2004):

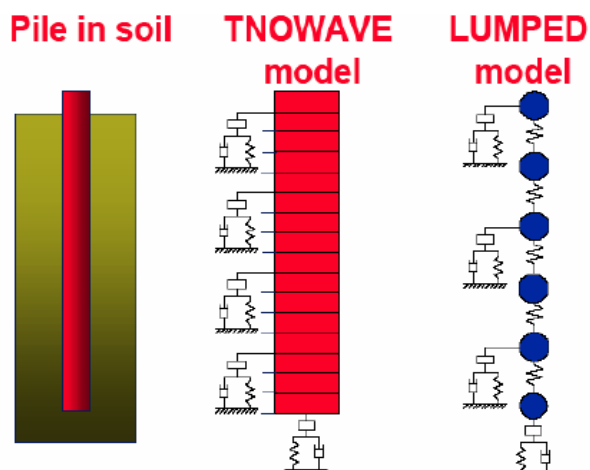


FIGURA 2.11 - COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS TNOWAVE E LUMPED (AGLOMERADO) - MODELO DE SMITH

FONTE: MIDDENDORP (2004)

Existem diferenças nos métodos de análise, principalmente em relação ao método adotado para resolução da equação da onda, colocado anteriormente e demonstrado na (FIGURA 2.11). No Modelo de Smith, a estaca é constituída por uma serie de pontos de massa aglomeradas. O atrito do fuste e a resistência de ponta são contados por uma série de molas ligadas aos pontos de massa e calculadas por integração.

Já o grupo HBG escolheu uma abordagem utilizando primeiramente uma solução analítica para o caso sem atrito, e depois aplicado continuamente no fuste através de forças de atrito concentradas nas partes divididas, sendo a teoria de ondas de tensão válida para elas e as descontinuidades nesses pontos de ação tratados de maneira simples (MIDDENDORP, 2004).

As críticas ao método aglomerado (Modelo de Smith) segundo os defensores do modelo TNOWAVE, em geral se devem à limitação na representação de frequências mais elevadas, gerando maiores imprecisões, como se a estaca estivesse com um pouco de vibração, após a passagem da “frente de onda”, e também devido à diminuição da amplitude da onda em casos demonstrados de estacas sem atrito, por conta dos amortecimentos numéricos gerados pelos blocos aglomerados (MIDDENDORP, 2004).

De um modo geral, com o advento de recursos eletrônicos mais sofisticados, as pesquisas neste campo evoluíram bastante, pois ferramentas matemáticas como a solução por elementos finitos puderam ser utilizadas amplamente. Os programas podem fazer inúmeras interações entre estaca e solo até que a forma

da equação da onda teórica tender a coincidir com a forma da onda medida experimentalmente.

O algoritmo ao qual é baseado o programa TNOWAVE é representado abaixo, conforme Middendorp (2004):

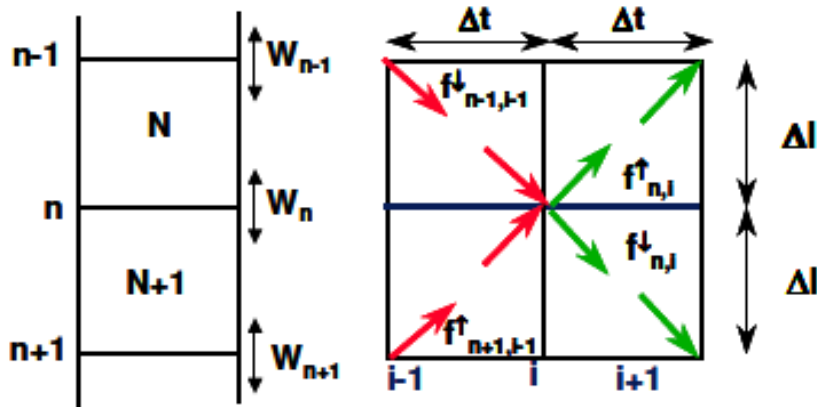


FIGURA 2.12 - ALGORITMO E REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA MÉTODO TNOWAVE  
FONTE: MIDDENDORP (2004)

Os valores das ondas de força são dados por:

$$f_{n,i}^{\uparrow} = \left( \left( -\frac{Z_N - Z_{N+1}}{Z_N + Z_{N+1}} \right) * f^{\downarrow} + \left( \frac{Z_N}{Z_N + Z_{N+1}} \right) * (2f^{\downarrow} + W_n, i) \right) \quad (2.47)$$

$$f_{n,i}^{\downarrow} = \left( \left( \frac{Z_N - Z_{N+1}}{Z_N + Z_{N+1}} \right) * f^{\uparrow} + \left( \frac{Z_{N+1}}{Z_N + Z_{N+1}} \right) * (2f^{\downarrow} - W_n, i) \right) \quad (2.48)$$

Onde:

$f^{\downarrow}$  = onda incidente para baixo em  $n-1$ , e  $i-1$ .

$f^{\uparrow}$  = onda incidente para cima em  $n+1$  e  $i-1$ .

$f_{n,i}^{\downarrow}$  = onda de força transmitida viajando para baixo.

$f_{n,i}^{\uparrow}$  = onda de força transmitida viajando para cima.

$n$  = ponto de discreto ou número de nó.

$Z_n$  = impedância da estaca no elemento  $n$ .

$Z_{n+1}$  = impedância da estaca de elemento  $n+1$ .

$N$  = número de elemento de estaca.

$W$  = interação do solo.

### 2.4.3 Ensaios de carregamentos estáticos (ECE)

Neste ítem serão revisados inicialmente os procedimentos para execução de prova de carga estática e, posteriormente, os métodos de previsão de carregamento último. A parte de adaptações dos equipamentos necessários para o ECE da prensa e resultados obtidos serão detalhados no capítulo 3.

#### 2.4.3.1 Procedimentos para execução de provas de carga estática

Devido à sua precisão, as provas de carga estática são instrumento de grande utilidade na elaboração de dados confiáveis e pesquisas na área de engenharia geotécnica.

As provas de carga vêm sofrendo evoluções visando maior facilidade de execução e economia, precisão e rapidez. O ensaio mostra resultados de recalque e ruptura do elemento solo-estaca isolado ou até efeito de grupo.

Os tipos mais usados e conhecidos de prova de carga são os de carga controlada e incremental, e dentre eles temos: a) a prova de carga lenta, ou ensaio lento, ou ainda *slow maintained load*, conhecido como SML; b) prova de carga rápida, ou ensaio rápido, ou *quick maintained load*, conhecido como QML e; c) prova de carga cíclica, ou ensaio cíclico, ou *cyclic load test*, conhecido como CLT.

Conforme Gonçalves (2008) nos ensaios lentos, os incrementos de carga são mantidos até a sua estabilização. Nos ensaios rápidos os incrementos de carga são mantidos durante um tempo pré-estabelecido normalmente de cinco a quinze minutos, e os ensaios cíclicos são especiais para atender a certo padrão de carregamento.

De acordo com a NBR 12131/2005, o processo de ensaio é utilizado para todos os tipos de estacas e consiste em aplicar esforços crescentes à estaca através de macacos hidráulicos, com capacidade mínima superior a 10% do maior carregamento do ensaio, contra um sistema de reação estável. As estacas de reação ou estrutura de reação, como no experimento a própria caixa, devem ser projetadas para capacidade carga 1,5 vezes maior que a capacidade de carga exigida para o ensaio.

A NBR 12131/2005 recomenda que o manômetro de leitura da pressão do macaco aplicada sobre a estaca tenha índice que não ultrapasse 25% da máxima



prevista na prova de carga, além de ser calibrado com certificado. Os extensômetros devem ter leituras diretas de 0,01mm. Esta norma ainda recomenda que a cabeça da estaca esteja nivelada.

A estaca deve ser carregada até a sua ruptura ou até duas vezes sua carga de trabalho prevista, ficando a critério do projetista a adoção do tipo de ensaio a ser adotado: lento, rápido, misto ou cíclico.

Na definição das faixas de carregamento, deve ser respeitado que o acréscimo entre os estágios de carregamento não seja superior a 20% da carga de trabalho prevista para o ensaio lento, e 10% para o ensaio rápido.

#### 2.4.3.2 Critérios Para Avaliação da Curva Carga Recalque

Os Ensaios de Carregamento Estático (ECE) são importantes na definição e controle das fundações. A avaliação e interpretação da curva carga-recalque tem como principal objetivo a definição da carga total de ruptura, e até estimar as parcelas de ponta e lateral.

Existem métodos para a avaliação da curva carga-recalque, obtidos desses ensaios. Pode ser definida a capacidade de carga da estaca quando ocorrer a ruptura nítida da fundação, ou seja, quando o recalque se tornar incessante. Entretanto, não é sempre que ocorre essa nitidez no ensaio. A velocidade da solicitação dos ensaios influencia mais os resultados em argilas do que em areias, devido ao comportamento elástico do solo argiloso, sendo indicados ensaios lentos para argilas e ensaios rápidos em areias. Seguem alguns métodos de análise das curvas carga-recalque.

O método de Van-der Veen é um dos mais utilizados em nosso país, e consiste em encontrar o valor de  $P_{ult}$  (carga última adotada), por tentativas, traçando um gráfico:  $-\ln(1-P/P_{ult})$  em função do recalque ( $\rho$ ), ou seja, entrando com os valores de  $P$  (carga) em relação ao recalque. Traçam-se várias curvas para cada  $P_{ult}$ , até ser encontrado o valor linear que é o resultado final (FIGURA 2.13).

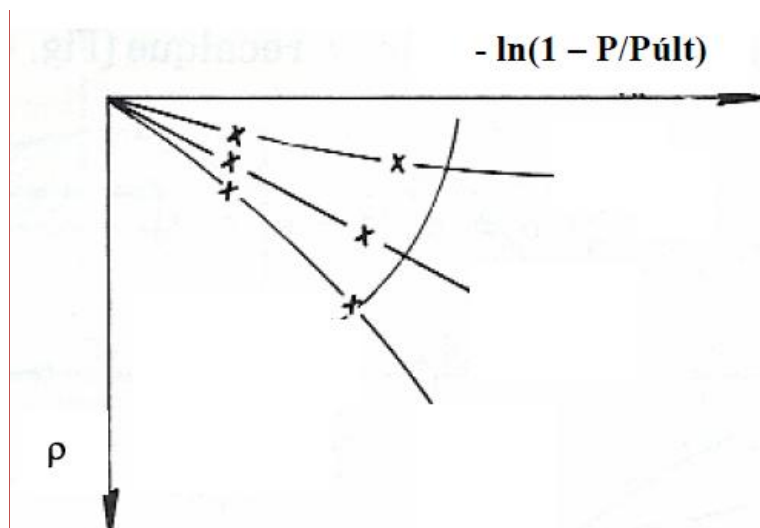


FIGURA 2.13 - ESTIMATIVA DE P ÚLTIMO - MÉTODO DE VAN DER VEEN  
 FONTE: MAGALHÃES, 2005.

De acordo com Cavassani (2005), o método de Van der Veen (1953) estabelece uma ruptura física diferentemente da ruptura convencional adotada pelos métodos a seguir apresentados (Método da NBR 6122/2010; Método de Davisson (1972) e Critério Inglês). A diferença básica entre ruptura física e ruptura convencional é que a ruptura física é determinada por deformações infinitas enquanto na ruptura convencional a deformação ou recalque é arbitrado.

O Método da Norma NBR 6122/ 2010 estabelece uma carga de ruptura convencional correspondente a um deslocamento ou recalque ( $\rho$ ) calculado pela fórmula:

$$\rho = (R \cdot L / E \cdot A) + D / 30 \quad (2.49)$$

Onde:

$R$  = carga de ruptura convencional (N)

$L$  = comprimento da estaca (mm)

$A$  = área da seção transversal da estaca (mm<sup>2</sup>)

$E$  = módulo de elasticidade da estaca (MPa)

$D$  = diâmetro do círculo circunscrito à estaca. (mm)

Segundo a NBR 6122/1996, as unidades devem ser compatíveis com a unidade do módulo de elasticidade.

O Método de Davisson é similar ao da NBR 6122/1996, e fixa um valor de recalque máximo para o qual é considerada a carga limite, não propriamente carga de ruptura. A fórmula considerada por Davisson é:

$$\rho = (R \cdot L / E \cdot A) + 3,8mm + D/120 \quad (2.50)$$

As variáveis adotadas foram as mesmas convencionadas pelo método da NBR 6122, sendo: (mm) para comprimento ( $L$ ) e recalques ( $\rho$ ); (MPa) para módulo de elasticidade ( $E$ ) e (N) para capacidade de ruptura convencional ( $R$ ).

Conforme Cavassani (2005), o método de Davisson é muito difundido e tem a vantagem de permitir o cálculo com antecedência do recalque máximo apenas considerando as características físicas e geométricas da estaca. Analisando preliminarmente, quando na fixação de valores iniciais (3,8mm), os valores de recalque possam ser majorados para estacas ou modelos com estacas de pequenas dimensões.

Ainda segundo o autor, o Critério Inglês é o método mais comum de interpretação dos ECE. Esse método simplesmente estabelece que a carga de ruptura corresponda a um recalque igual a 10 % do diâmetro da ponta da estaca. Este critério pode induzir a erros em caso de estacas longas devido a deformações elásticas da estaca como também estes erros podem ser insignificantes em caso de estacas curtas, o objeto dessa pesquisa.

### **3 COMPONENTE EXPERIMENTAL**

Como procedimentos dessa pesquisa foram utilizados como ferramenta modelos reduzidos. A maior vantagem desse processo é a possibilidade de comparação do comportamento das estacas de aço e de plástico, possibilitando a repetição do experimento, e condições de isolar variáveis, o que na natureza seria impossível.

#### **3.1 COMPOSIÇÃO DOS MODELOS REDUZIDOS**

##### **3.1.1 Caixa forte e distribuição das estacas do modelo**

Após a decisão de ser adotado um modelo para o experimento, foi fabricada uma caixa forte em aço especialmente projetada para a pesquisa. A principal característica de uma caixa forte é a limitação do domínio de análise. No caso em questão, a caixa forte foi dimensionada estruturalmente de modo a garantir a indeformabilidade de suas paredes frente aos esforços oriundos dos modelos ensaiados. Para isso, as paredes da caixa foram constituídas por chapas de aço carbono com 12,5 mm de espessura. As dimensões da caixa forte são 1,25m de largura x 1,0m de comprimento x 1,5m de profundidade.

Para facilitar a verificação da homogeneidade e compacidade do solo arenoso de preenchimento da caixa, foi instalado um painel duplo de vidro temperado com 20 mm de espessura em um dos lados da caixa (FIGURA 3.1).



FIGURA 3.1 - CAIXA FORTE PROJETADA E CONSTRUÍDA COM VIDRO FRONTAL PARA ACOMPANHAMENTO VISUAL.  
FONTE: DO AUTOR

Para evitar a sobreposição de bulbo de tensões ou superfícies de ruptura das estacas ensaiadas [e.g. Vesic (1977); Terzaghi (1943); Janbu (1976) citado por Bowles (1996)], a caixa forte possibilitou o ensaio de seis estacas-modelo distribuídas, distantes cerca de 25 cm entre centros na primeira e segunda bateria de ensaios.

Após a análise do formato da curva de ruptura calculada, é possível observar o espraiamento da cunha de ruptura inerente deste método. A imagem demonstra a segurança em adotar a distância de 25 cm entre eixos de estacas, uma vez que o espraiamento da curva de ruptura atinge uma distância inferior a 10 cm para cada lado da estaca (FIGURA 3.2).

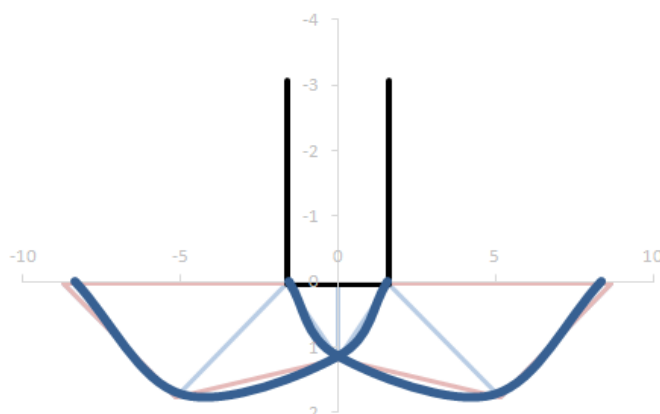


FIGURA 3.2- RUPTURA TEÓRICA POR TERZAGUI  
UTILIZANDO A ESCALA DO MODELO  
FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

O comprimento das estacas-modelo foi limitado de modo que fosse garantida uma distância mínima igual a 30 cm entre a ponta da estaca e a base da caixa-forte de ensaio. Foi adotado a distância entre eixos de estacas modelo em torno de 25 cm, garantindo uma distância segura entre superfícies de ruptura ou bulbos de tensões de uma estaca em relação a outra (DELL'AVANZI *et al*, 2012).

Com base nesses princípios teóricos, foram distribuídas as estacas e cravadas três ESTAPETS (números 1,2 e 4) e duas estacas de aço (números 3 e 5), da (FIGURA 3.3), numa primeira bateria de ensaios realizados no período de 27 de julho a 30 de setembro de 2010, e 04 estacas de aço e 03 ESTAPETS na segunda bateria de ensaios realizados no período de 30 de janeiro a 05 de março de 2013. A (FIGURA 3.3) e a (FIGURA 3.4) apresentam o posicionamento em planta das estacas-modelo na caixa forte durante a primeira bateria e a (FIGURA 3.5) e (FIGURA 3.6) ilustram a distribuição das estacas no solo homogêneo durante a segunda bateria.

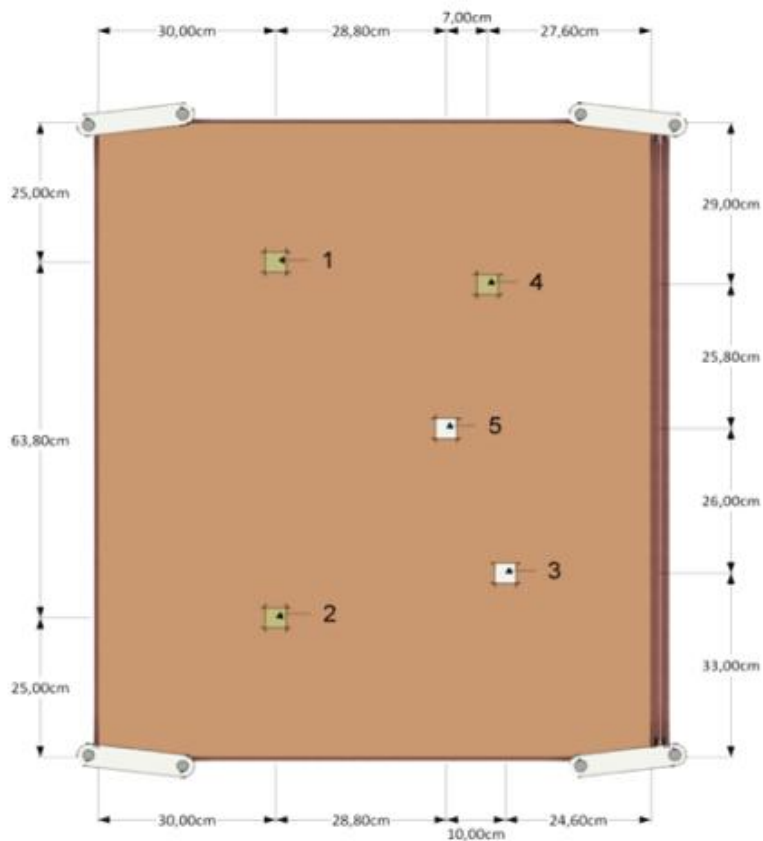


FIGURA 3.3 - LOCAÇÃO DAS ESTACAS NA CAIXA DE AREIA DURANTE PRIMEIRA BATERIA DE ENSAIOS EM PLANTA BAIXA ESQUEMÁTICA  
FONTE: ELABORADA PELO AUTOR



FIGURA 3.4 - LOCAÇÃO DAS ESTACAS NA CAIXA DE AREIA DURANTE PRIMEIRA BATERIA DE ENSAIOS  
FONTE: DO AUTOR

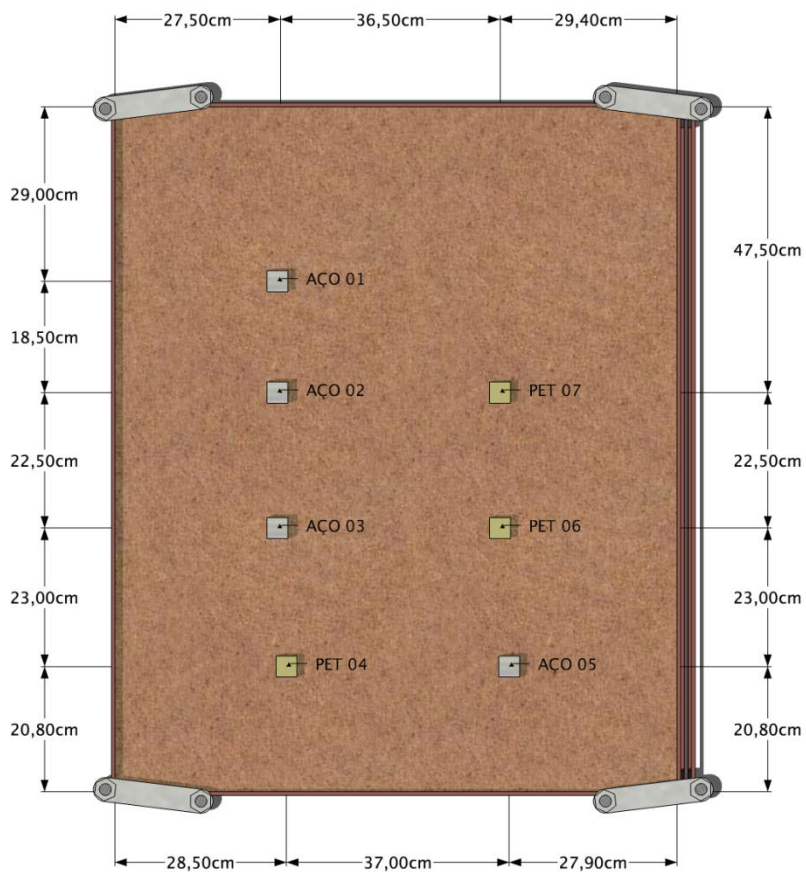


FIGURA 3.5 - LOCAÇÃO DAS ESTACAS NA CAIXA DE AREIA DURANTE SEGUNDA BATERIA DE ENSAIOS EM PLANTA BAIXA ESQUEMÁTICA.  
FONTE: DO AUTOR



FIGURA 3.6 - LOCAÇÃO DAS ESTACAS NA CAIXA DE AREIA DURANTE SEGUNDA BATERIA DE ENSAIOS.  
FONTE: DO AUTOR



É importante esclarecer que, durante a primeira bateria de ensaios, uma das estacas foi excluída, pois, além de ser a primeira, o sistema de cravação apresentava problemas operacionais, que causaram perdas de energia significativas, resultando diferenças significativas. Detectados os problemas originados por ajustes no sistema de cravação, oriundos principalmente dos desníveis e atritos, estes foram corrigidos e o modelo ajustado para a segunda estaca em diante. Na segunda bateria foi possível reduzir as distâncias entre as estacas-modelo, sobretudo devido às diferenças nos comprimentos entre elas.

### 3.1.2 Sistema de cravação

No dimensionamento do martelo e sistema de cravação, foi levada em consideração a relação peso do martelo/peso da estaca, sugerida pela NBR 6122/2010, ou seja, esta relação entre pesos não deve ser inferior a 0,5 podendo ser a maior possível. O peso das ESTAPETs será demonstrado através da definição da densidade, ficando próximo a 1 kgf para estacas com 1,2m de comprimento na seção adotada para a estaca modelo, optando-se por um martelo de 2 kgf de peso. Portanto, foi garantida uma relação peso do martelo/peso da estaca igual a 2 para a ESTAPET.

O sistema de cravação (martelo-guia) foi fixado a uma viga de reação em aço com 310 mm de altura de alma conforme perspectiva e corte ilustrado na (FIGURA 3.7) e (FIGURA 3.8).

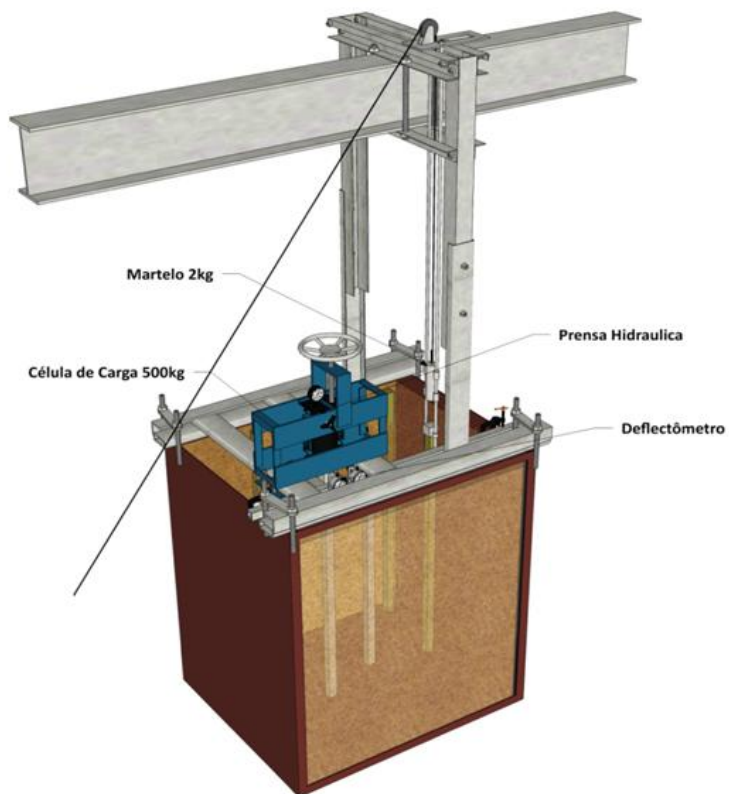


FIGURA 3.7 - PERSPECTIVA DO MODELO EXECUTADO  
 FONTE: DO AUTOR

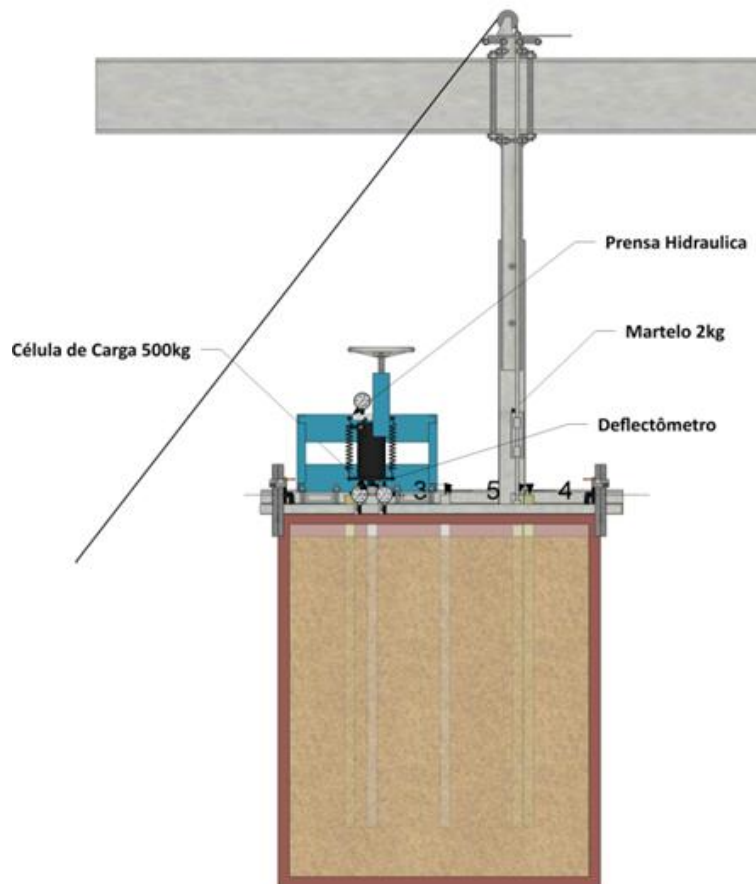


FIGURA 3.8 - CORTE DO MODELO EXECUTADO  
 FONTE: DO AUTOR

O sistema de cravação é constituído por duas barras de aço lisas de espessura de 12,5 mm, que funcionam como guias, pois no martelo de cravação foram soldados dois pequenos tubos passantes guias que encaixasse com pequena folga as barras lisas especificadas. Todo o modelo de cravação foi concebido em detalhes, como capacete entre a estaca e o martelo, sepo de madeira e pequenos cliques de amarração do cabo para aproximar ao máximo a situação real de cravação de uma estaca.

Durante o processo de cravação, o martelo de cravação é suspenso manualmente até uma altura especificada, por um cabo de aço de 3 mm de diâmetro que passa por uma polia de 10 cm de diâmetro posicionada na parte superior do sistema de cravação (FIGURA 3.9)



FIGURA 3.9 - POLIA DE DIÂMETRO 10 cm  
INSTALADA SOBRE A VIGA PRINCIPAL FIXA,  
QUE SUSTENTA TODO SISTEMA  
FONTE: DO AUTOR

A altura de queda do martelo de cravação foi controlada a partir de escalas centimétricas fixadas nas colunas laterais do sistema de cravação. Segue uma série de fotos classificadas (FIGURA 3.10) que detalham o sistema projetado e construído.



FIGURA 3.10 - DETALHES EXECUTIVOS DO MODELO: MARTELO DE 2 kgf, CAPACETE, CEPO DE MADEIRA, HASTES GUIAS DE 12,5 mm, CABO DE AÇO DE 3 mm, ESCALA CENTIMÉTRICA E TODO SISTEMA OPERANDO, INCLUSIVE COM A MEDIÇÃO DO REPIQUE  
 FONTE: DO AUTOR

### 3.1.3 Sistema reduzido de provas de carga e aferição de dados

Na utilização de prensas hidráulicas, foi obedecida a capacidade mínima superior a 10% do maior carregamento do ensaio (previsto). A grande vantagem da utilização desses equipamentos foi a viabilidade financeira, pois os recursos do experimento foram fornecidos pelo próprio pesquisador, desde a caixa forte, célula de carga até a prensa e os materiais.

A validade do sistema de aplicação de carga estática foi aferida. Na adaptação da prensa, o seu manômetro foi adequado ao nível de carregamento

adotado. Para a prensa de marca Marcon, adaptou-se a escala de pressão, pois a mesma tinha capacidade para até 100 kN. Como temos níveis de carregamento previamente calculados até 5 kN, foi trocado o manômetro de carga por um de pressão, que avaliou os carregamentos até um nível de 4 MPa, compatibilizando o fornecimento de óleo hidráulico para a pressão efetivamente aplicada através da substituição da alavanca de carregamento original da prensa, por um volante giratório que reduziu a aplicação de carga instantânea durante a aplicação manual controlada. No gráfico ilustrado pela (FIGURA 3.11) são demonstradas três aplicações de carga da prensa em célula de carga aferida do laboratório do LACTEC. Estas leituras demonstraram a validade da prensa de aplicação de carga, com erro inferior a 0,1% (para pressões próximas à zero a prensa demonstrou baixa sensibilidade, existindo um erro inicial).

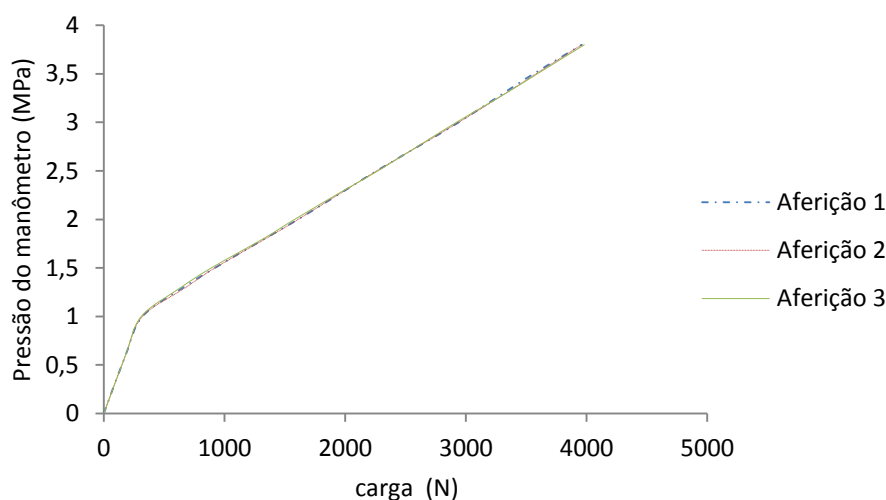


FIGURA 3.11 - GRAFICO DA AFERIÇÃO DA PRENSA UTILIZADA  
FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

De qualquer forma, a carga transmitida pela prensa para a estaca é medida pela célula de carga instalada entre elas. A minicélula de carga foi previamente aferida, pela empresa MC Controles. Os dados foram transferidos ao programa LABVIEW, para obtenção da leitura conforme gráfico (FIGURA 3.12).

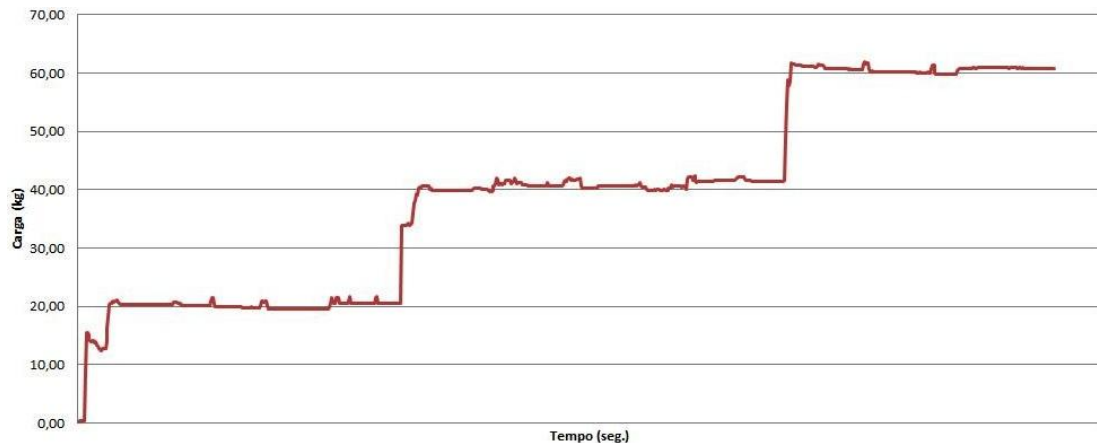


FIGURA 3.12 - RESULTADOS PROVENIENTES DO PROGRAMA LABVIEW (CARGA X TEMPO)  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

Foram adquiridas com a garantia do mesmo duas minicélulas para 2 kN e 5 kN, para atender o experimento após previamente avaliada a capacidade de carga teórica. O sistema de aplicação de carga e de reação para a prova de carga estática foi desenvolvido observando-se as considerações de similitude e adotando as premissas de desempenho definidas na ABNT NBR 12131/2005. Foi escolhida a célula de carga com capacidade adquirida de 5 kN, previamente avaliada. Segue detalhe da célula de carga utilizada, além do esquema de ligação com o programa utilizado no laboratório (LABVIEW), na (FIGURA 3.13).

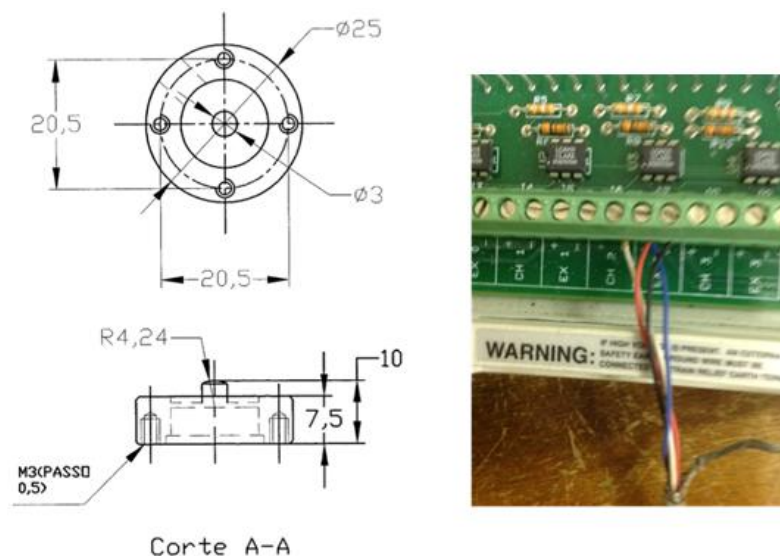


FIGURA 3.13 - DETALHE DA CÉLULA DE CARGA E ESQUEMA DE LIGAÇÃO, COM O PROGRAMA LABVIEW.  
 FONTE: DO AUTOR

As provas de carga estática foram realizadas seguindo o procedimento de ensaios de carregamento rápido. Nos ensaios rápidos, os incrementos de carga são mantidos constantes durante um tempo pré-estabelecido de dez minutos. Foi adotado este tipo de ensaio pela pequena diferença de resultados esperados caso fosse adotado o procedimento de carregamento lento, uma vez que o solo arenoso utilizado estava completamente seco. Na (FIGURA 3.14) é apresentada a prensa utilizada para a aplicação das cargas.



FIGURA 3.14 - PRENSA (MARCON), ADAPTADA E CALIBRADA PARA O SISTEMA, COLOCADA SOBRE VIGAS DE REAÇÃO  
FONTE: DO AUTOR

Foram observadas as recomendações da ABNT NBR 12131/2005 no tocante às características da instrumentação e do aparato de aplicação de carga quais sejam:

- a) O sistema de reação deve ser estável, projetado para uma capacidade carga 1,5 vezes maior que a capacidade de carga exigida para o ensaio. Neste caso, a própria caixa-forte serviu como reação. A (FIGURA 3.15), mostra em detalhes a prensa adaptada e o sistema de reação do ensaio;
- b) Calibração do manômetro e da célula de carga - Foi utilizado para o experimento um manômetro calibrado com leitura máxima igual a 3 MPa;
- c) Utilização de relógios medidores de deslocamentos calibrados e de resolução igual a 0,01mm;
- d) Na definição das faixas de carregamento, o acréscimo entre os estágios de carregamento não deve ser superior a 20% da carga de trabalho prevista para o ensaio lento e 10% para o ensaio rápido (como já visto);

- e) As “cabeças” das estacas devem ser niveladas. Entre a “cabeça” das estacas e a célula de carga foi adaptada uma peça metálica, denominada “cap”, que possui quatro prolongamentos onde são posicionados os extensômetros.

Seguem imagens das etapas de montagem, executadas durante as duas baterias de ensaio, com referente detalhamento (FIGURA 3.15 à FIGURA 3.18).



FIGURA 3.15 - PRENSA INSTALADA SOBRE AS VIGAS DE REAÇÃO E CÉLULA DE CARGA SOBRE O “CAP”, LIGADO AO DISPOSITIVO DE APLICAÇÃO DO LABVIEW.  
FONTE: DO AUTOR



FIGURA 3.16 - DETALHE DO EXTENSÔMETRO LIGADO AO “CAP” INSTALADO SOB A ESTACA DE AÇO 1 DA 2ª BATERIA DE ENSAIOS  
FONTE: DO AUTOR





FIGURA 3.17 - EXTENSÔMETROS INSTALADOS SOBRE O CAP, E FIXADOS A ESTRUTURA INDEPENDENTE A ESTACA, DURANTE A PRIMEIRA BATERIA DE ENSAIOS. PRENSA FIXADA AO SISTEMA DE REAÇÃO POR CHAPA PARAFUSADA ABAIXO DO SISTEMA.  
FONTE: DO AUTOR



FIGURA 3.18 - ESQUEMA GERAL DA PROVA DE CARGA COM A INSTALAÇÃO LIGADA AO COMPUTADOR DO LAGEMA, DETALHES DA INSTALAÇÃO E DO COMPUTADOR DURANTE O ENSAIO ESTÁTICO  
FONTE: DO AUTOR

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS

O material utilizado para o preenchimento da caixa-forte necessita proporcionar uma repetibilidade de estado e propriedades quando da necessidade de novo preenchimento. Em relação a este aspecto, o uso de areia seca como material de preenchimento apresenta-se interessante, porque proporciona o controle da densidade desta ao longo do processo de preenchimento da caixa de ensaio, de maneira sistemática e acurada (MIURA; TOKI, 1982, TAKAGI *et al*, 1983; KUERBIS;VAID, 1988, BRANDON *et al*, 1991, PRESTI *et al*, 1992).

Para análise de um determinado parâmetro de solo, material ou cravabilidade, por exemplo, a caixa forte, com o material de propriedades conhecidas, deve facilitar o entendimento da diferença de comportamento de estacas de aço e ESTAPETs em situações de cravabilidade. Dessa forma, o próximo passo desse trabalho será a análise da areia de preenchimento da caixa.

#### 3.2.1 Local de coleta

A areia escolhida para o enchimento da caixa forte foi retirada da jazida Santa Lídea, da cidade de Navegantes (SC). Seguem fotos da jazida.



FIGURA 3.19 - JAZIDA FONTE DA AREIA DO EXPERIMENTO  
FONTE: DO AUTOR

Toda a areia foi seca ao sol e peneirada utilizando-se a peneira de 4,8mm para retirar as sujeiras, torrões e depois transportada em torno de 3 tf para o laboratório.

### 3.2.2 Curva granulométrica

Segue abaixo (FIGURA 3.20) a curva granulométrica da areia de Santa Lídea, conforme relatório do Laboratório de mecânica dos solos da FURB (Fundação Universitária de Blumenau), demonstrando-se a predominância de areia do tipo quartzosa, uniforme fina SP (ABNT NBR 7181).

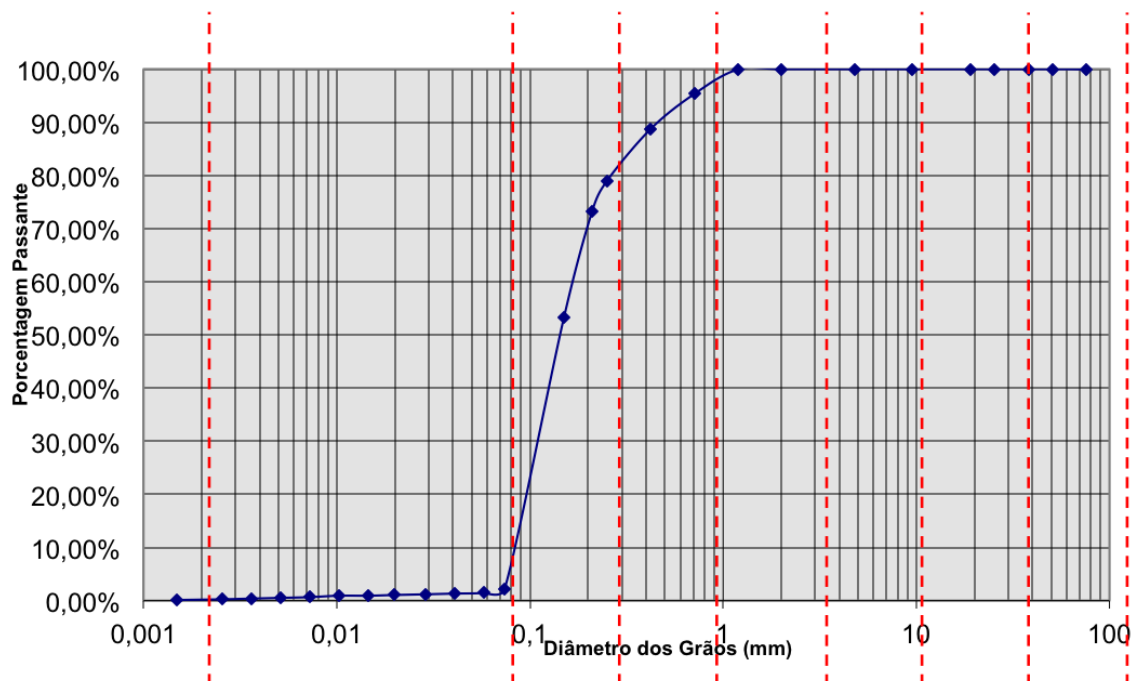


FIGURA 3.20 - ENSAIO DE GRANULOMETRIA AREIA DE SANTA LÍDEA  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

### 3.2.3 Resultados dos ensaios de caracterização das areias

Antes de iniciar o preenchimento da caixa forte foram executados ensaios de caracterização da areia. Serão a seguir apresentados os resultados dos ensaios relativos ao peso específico dos grãos ( $G$ ), índice de vazios ( $e$ ) máximo e mínimo, cisalhamento ( $\phi$ ) e densidade relativa ( $D_r$ ).

TABELA 3.1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA AREIA

	$G$	$e_{max}$	$e_{min}$	$\gamma_s$	$\phi$	$c$ (kPa)
<b>Resultados</b>	2,65	0,58	0,89	1,64	36,3°	7
<b>Tipo de ensaio</b>	-	-	Mesa vibrat	estufa	Cisal.	Cisal.
<b>Quantidade</b>	3	3	3	3	3	3
<b>Norma</b>	NBR 6508	NBR 12004	NBR 12051	-	-	-

FONTE: ADAPTADO DE SACHET (2010)

As amostras encaminhadas ao LAME da UFPR foram deixadas em estufa por vinte e quatro horas no mínimo, a 99 °C. As amostras do ensaio de cisalhamento, foram retiradas obedecendo a altura de queda de 1m, para se obter a mesma densidade relativa dos grãos em relação ao enchimento da caixa, em que foi adotada igual altura.

### 3.2.4 Densidade Relativa ( $D_r$ )

Na decisão de qual altura de queda da areia adotar foram fundamentais os resultados anteriores de densidade relativa, em função da altura de queda. Neste caso, o experimento necessitou dados homogêneos passíveis de repetição em futuros experimentos. Para esta investigação foram adotadas duas vezes a mesma areia (a caixa de areia foi cheia duas vezes).

O que se esperou é que se tivessem densidades relativas homogêneas ao longo do enchimento, de fundamental importância na obtenção de dados precisos, pois a densidade relativa influencia diretamente nos valores de ângulo de atrito.

Para a obtenção de um gráfico que relaciona altura de queda com a densidade relativa, foi adotado recipiente com abertura inferior de cinco 5 mm. Para este diâmetro verificou-se uma vazão de 1,26 g/s.

A vazão, regulada pela abertura da peneira, influencia diretamente no valor da densidade. Outros trabalhos como o de Bernardes (1989), demonstram que quanto maior a abertura, maior vazão, porém, menor torna-se o peso específico (maior porosidade), para mesmos materiais e alturas de queda. Este fenômeno deve-se ao maior entrosamento entre os grãos quando submetidos a menor vazão, ou seja, diminuição da porosidade.

Foram feitas três medições de pesagem em cada altura de queda utilizando-se uma balança com capacidade máxima de 200 g. Com os dados de densidades máximas e mínimas e, por consequência, os valores limites de índice de vazios, a densidade referente a cada altura de queda e o índice de vazios relativo a cada altura de queda, pode ser traçado o gráfico da (FIGURA 3.21).

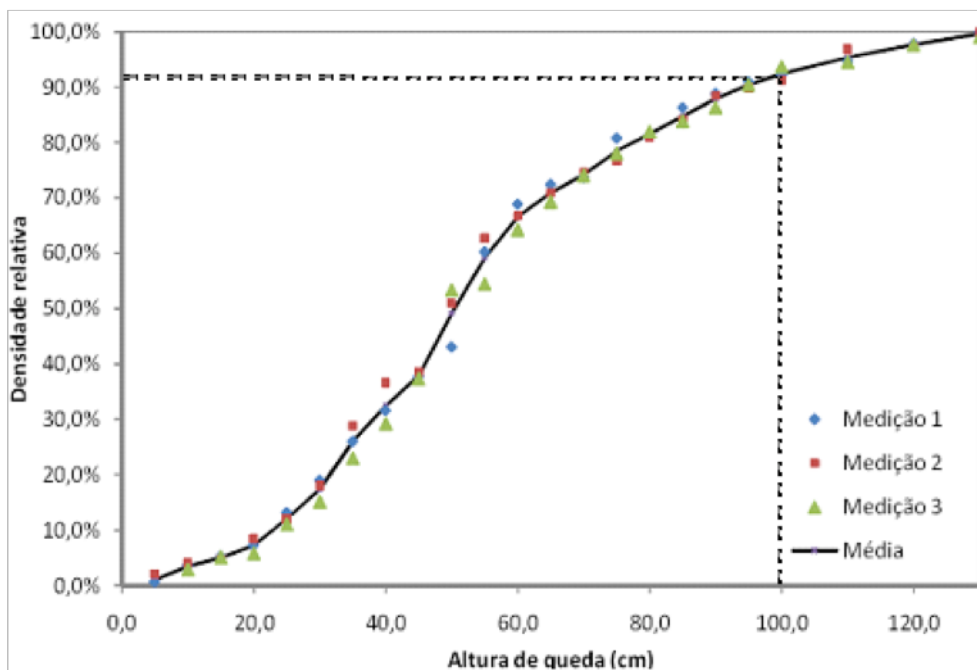


FIGURA 3.21- DENSIDADE RELATIVA X ALTURA DE QUEDA  
 FONTE: ADAPTADO DE SACHET (2010)

Considerando o gráfico verifica-se que, com maiores alturas de queda, são obtidos valores mais regulares de densidade relativa, demonstrando que uma pequena variação de altura não interfere significativamente nos valores de densidade relativa. Sendo assim foi adotado o valor de altura de queda 100 cm o que corresponde a uma densidade relativa de 93 %.

### 3.2.5 Método de calibração das areias (chuva de areia)

Este método tem como objetivo principal assegurar uma densidade relativa uniforme em todo o modelo como, além de densidade uniforme, o índice de vazios iguais durante o lançamento da areia. A sequência para execução da calibração consiste em encontrar a densidade real dos grãos e o índice de vazios máximo e mínimo para a amostra, através de ensaio de laboratório.

Para amostras de areia, em um recipiente de volume conhecido, deixa-se cair a areia em alturas diferentes e medindo em uma balança de precisão, os respectivos pesos, e por correlações, calcula-se o índice de vazios de cada amostra. Posteriormente, calcula-se a densidade relativa através das fórmulas, que relacionam com o índice de vazios ou densidade da areia (máxima, mínima e

natural). Para cada vazão, traça-se o gráfico da altura de queda por densidade relativa.

De acordo com Presti (1992), em seu estudo comparativo de métodos para se obter o grau de compactação em materiais granulares, o ensaio por deposição de solo apresenta vantagens em relação ao método da ASTM 4253 -83, porque anula esmagamento de grãos, além de ser mais barato, apresentar repetibilidade em números e maior acurácia. Neste método, a energia cinética entre os grãos, a partir de uma determinada altura crítica cessa.

A altura de queda e o tamanho dos grãos, até esta altura crítica é diretamente proporcional ao aumento da energia cinética conforme observações de Vaid e Negussey (1984, 1989), citados em Presti (1992). Esta altura crítica, onde o grau de compactação tende a ficar constante, é encontrado nos gráficos de calibração da areia. Foram adotadas as distâncias entre furos de 5 cm, para se tornar similar a distância adotada no trabalho de Bernardes (1989).

É importante salientar que, com a colocação do vidro (espessura de 20 mm) temperado em frente a caixa, como pode ser visto nas fotos, o processo torna-se bem mais simples para detecção de alturas diferentes e correção, possibilitando o monitoramento do processo, fato que seria muito difícil em uma caixa forte de aço toda fechada.

Seguem alguns detalhes executivos:

1. A peneira cobre toda a área interna da caixa. Quando a peneira é elevada além da altura da caixa de areia, foi necessário a instalação de quatro cantoneiras, fixadas nos vértices da caixa de areia. Com regulagens (furos) em cada 5 cm de altura, foi possível elevar toda a peneira de 5 cm em 5 cm, e assim estas cantoneiras serviram de apoio para a peneira na parte acima da caixa.
2. A utilização de plástico de proteção e andaime foi fundamental para obter qualidade e segurança no experimento, evitando acidentes, melhorando o ar respirado e as condições gerais do laboratório, otimizando o processo para futuros experimentos.
3. Colocação de um segundo vidro temperado de 10mm, dobrando a capacidade de suporte à tensão e mantendo a transparência necessária ao monitoramento do processo.

Abaixo, as fotos (FIGURA 3.22) das duas etapas do enchimento da caixa forte de aço destinada ao experimento:



FIGURA 3.22 - FOTOS DA SEGUNDA ETAPA DO EXPERIMENTO DETALHES DA EXECUÇÃO  
FONTE: DO AUTOR (2012)

### 3.3 MODELOS DE ESTACAS

#### 3.3.1 Modelos de estacas

O principal composto do material utilizado para a estaca testada é o PET. O polímero gerado através do processo de extrusão é basicamente composto de garrafas PET, tampas e rótulos, que são lavados e picotados antes de entrarem na extrusora onde é fundido e então forçado por um cabeçote a sair em forma pastosa para moldagem da peça (FIGURA 3.23).

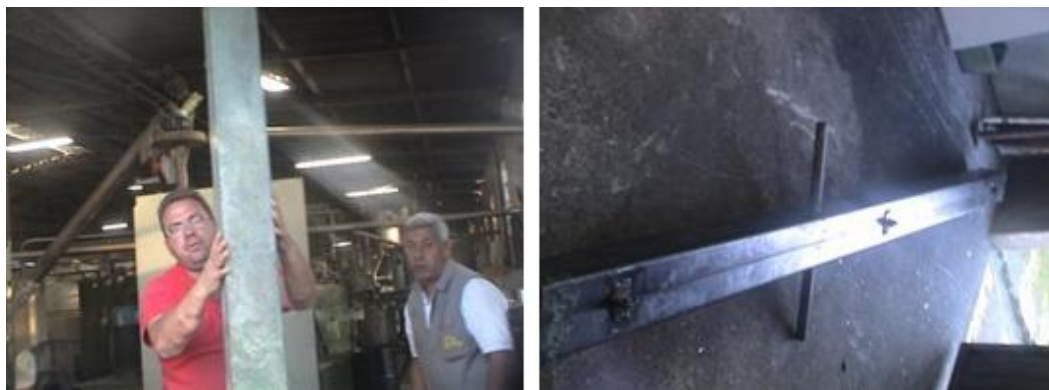


FIGURA 3.23 - FOTOS DA MOLDAGEM DE UM DOS PROTÓTIPOS (14,5X14,5cmX3m) EM FÁBRICA DE ITAJAÍ.  
FONTE: DO AUTOR

O material se constitui basicamente por PET, misturados de forma empírica com um pouco de poliéster, polietileno e polipropileno das tampas e rótulos. O material do modelo da ESTAPET foi retirado diretamente de uma parte de um protótipo não utilizado para a cravação.

Na primeira bateria de ensaios, todas as estacas de aço e ESTAPETS tinham 1,2m de comprimento e as estacas de aço apresentavam ponta aberta, com a finalidade de comparar os resultados de resistência total entre os materiais. Já na segunda bateria de ensaios, os comprimentos foram variados para as estacas visando a análise da sua lateral e ponta, além de estaca com ponta fechada. Assim, as ESTAPETS número 4, 6 e 7 tinham os comprimentos 0,8m, 1 m, e 1,2m respectivamente, e as estacas de aço de ponta aberta 1, 2, 3, apresentavam o comprimento 1,2 m, 1 m e 0,8m. A estaca de aço 05 apresentava ponta fechada e tinha o comprimento arbitrado de 1,2 m para fins comparativos. Na sequência seguem fotos.

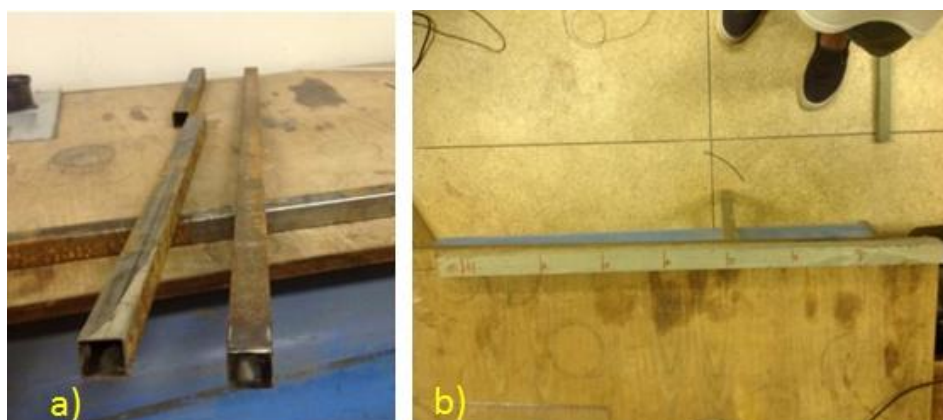


FIGURA 3.24 – (a) ESTACA MODELO EM AÇO ABERTA E FECHADA. (b); ESTACA MODELO DE ESTAPET COM COMPRIMENTO DE 80 CM.  
FONTE: DO AUTOR



O comprimento das estacas-modelo foi limitado de modo que fosse garantida uma distância mínima igual a 30 cm entre a ponta da estaca e a base da caixa-forte de ensaio. Conforme observado, a distância de influência de uma estaca com seção de 31 mm atinge aproximadamente 09 cm de distância. Adotando a distância entre eixos de estacas modelo em torno de 25 cm, garantiu-se uma distância segura entre superfícies de ruptura ou bulbos de tensões de uma estaca em relação à outra (AVANZI *et al*, 2012).

### 3.4 PROTÓTIPOS

Serão explicados a seguir os procedimentos de campo adotados nos ensaios utilizando protótipos de aço e ESTAPET.

#### 3.4.1 Protótipos de estacas

Foram realizados ensaios em campo com um protótipo da ESTAPET e uma estaca de aço similar. Para estes protótipos, foram adotadas as seções de 145mm x 145mm para a ESTAPET e 150mm x 150mm com espessura de 6,4 mm para a estaca de aço. Devido às dimensões padrões das usinas fornecedoras de aço, não se respeitou uma perfeita aplicação de fatores de escalas entre os protótipos utilizados, porém, essas diferenças são praticamente desprezíveis. O comprimento adotado foi 2,8m.

Para o protótipo, foi decidido adotar um fator de escala geométrico relacionando as dimensões entre protótipo e modelo ( $K = L_p / L_m$ ) igual a 4,83. As estacas-modelo, cujas dimensões são iguais a 31 mm x 31 mm x 1200 mm corresponderiam a uma estaca-protótipo de área igual a 225 cm<sup>2</sup> (150 mm de lado) com 5,76 m de comprimento, contudo, estaca adotada possui 3m devido a limitações da fabricação da ESTAPET.

É importante destacar e registrar que se trata da primeira cravação de uma estaca maciça a base de PET reciclado relatada. Abaixo seguem as figuras das estacas protótipos utilizadas e sua preparação para os ensaios, inclusive com a instalação dos sensores para os ensaios DLT.



FIGURA 3.25 - PREPARAÇÃO DOS PROTÓTIPOS ESTAPET (MARCAÇÃO CONTAGEM DE GOLPES, INSTALAÇÃO DE SENSORES E ESTACA DE AÇO 05/04/2013) – ITAPEMA (SC)  
FONTE: DO AUTOR

### 3.4.2 Sistemas utilizados de cravação e distribuição do local de cravação dos protótipos

As estacas protótipos foram marcadas de 25 cm em 25 cm para a contagem de golpes. Durante a cravação das estacas utilizando martelo manual de 71 kgf, constatou-se a alta compactidade do solo. Devido a este fato, o ensaio utilizando martelo manual limitou-se a 75 cm de cravação para a ESTAPET e 100 cm para a estaca de aço.

Assim foram anotados os resultados obtidos com o martelo manual de 71 kgf e na sequência a ESTAPET foi retirada. Num segundo ensaio, foi utilizado martelo hidráulico de 2750 kgf e tentou-se a cravação aos 100 cm de profundidade, da ESTAPET, com baixa altura de queda.

As localizações destes ensaios estão melhores ilustradas no mapa (FIGURA 3.26) abaixo:

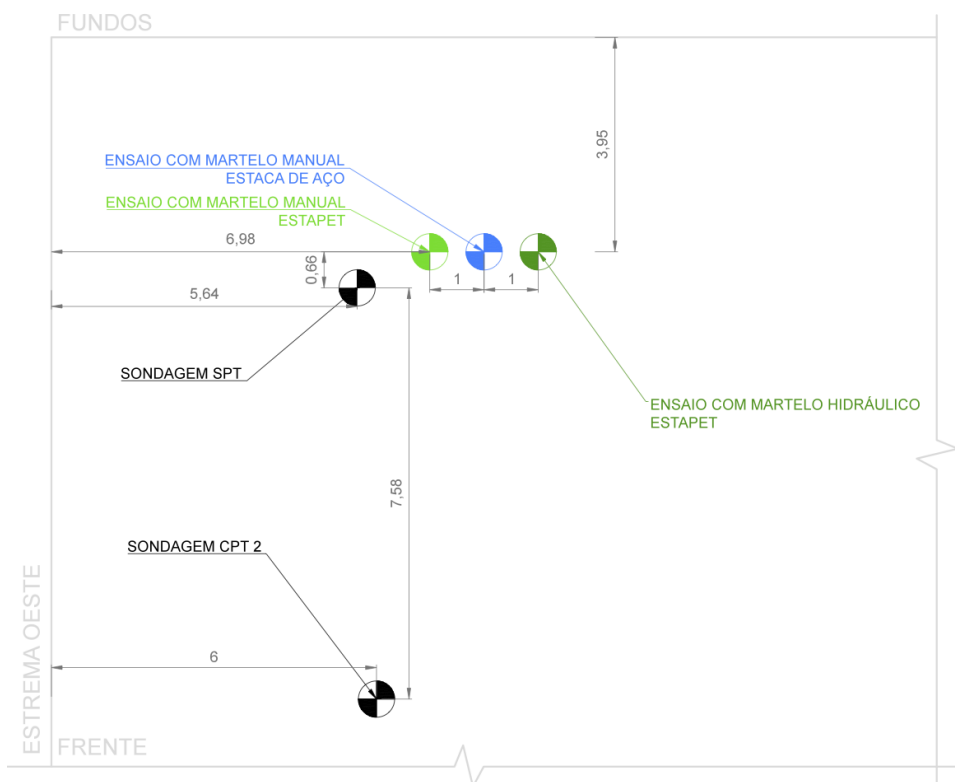


FIGURA 3.26 - MAPA DA SONDAÇÃO CPT, SPT E LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS (RUA 248-ITAPEMA – SC)  
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Abaixo segue a ilustração da cravação de estacas de ESTAPET utilizando martelo hidráulico de 2750 kgf (FIGURA3.27).



FIGURA 3.27 - CRAVAÇÃO DO PROTÓTIPO UTILIZANDO MARTELO HIDRÁULICO  
FONTE: DO AUTOR

Apesar da maior massa do martelo, não foi possível penetrar mais que 90 cm durante o ensaio com martelo hidráulico (para a ESTAPET) pela possibilidade

de ruptura da estaca quando aplicados maiores alturas de queda. Portanto, foi adotado o comprimento cravado de 100 cm para estaca de aço e 90 cm para a ESTAPET. O ensaio dinâmico PDA com o martelo hidráulico de 2750 kgf, quando utilizado na ESTAPET, demonstrou dados erráticos, devido à alta relação entre peso do martelo e da estaca.

Para o martelo manual de 71 kgf, foi feita uma adaptação de uma sonda SPT manual. No mapa (FIGURA 3.26) é utilizado o termo “ensaio com martelo manual”, para este martelo adaptado. Abaixo segue que detalha esta adaptação do martelo ao aparelho SPT utilizado:



FIGURA 3.28 - ADAPTAÇÃO UTILIZADA EM  
SONDA SPT  
FONTE: DO AUTOR

Basicamente esta adaptação seguiu os moldes do modelo de laboratório, com a utilização de duas guias soldadas em um capacete de absorção de impacto e martelo de 71 kgf. Usou-se coxim para absorção do impacto e, na estimativa da capacidade de carga, adotaram-se os dados do ensaio CPT e SPT (APÊNDICE 1).

### 3.4.3 Instrumentação dos ensaios ECD dos protótipos

Para os ensaios de carga dinâmicos dos protótipos foram lidos os diferentes números de golpes para as faixas de 25 cm estipuladas, além da medição dos repiques com energia crescente em profundidades de testes de 50 cm/ 75 cm e ao final da cravação.

Igualmente, acompanhou-se a leitura da resistência utilizando equipamento fornecido pela empresa Profound, pelo método TNO, através do programa DLTWAVE, relatado no item 2.4.2.1, e anteriormente ilustrado aos sensores instalados.

### 3.4.4 Instrumentação dos ensaios ECE dos protótipos

Foram adotados ensaios de carregamento rápido, por se tratar de solo arenoso, para os protótipos em questão, seguindo os procedimentos utilizados no modelo, aplicando-se basicamente a NBR 12131/2005. Aplicaram-se esforços crescentes na estaca através de macaco hidráulico, com capacidade mínima superior a 10% do maior carregamento do ensaio, contra o sistema de reação, ou seja, 25 tf, pois os ensaios SPT e CPT geraram dados de capacidade de carga muito diferentes e, na ocasião, usaram-se valores mais “arrojados”, confiando nos dados CPT utilizados no método proposto por Aoki-Velloso.

As estacas de reação ou estrutura de reação, para o protótipo estavam dimensionadas para atender 1,5 vezes a maior capacidade de carga exigida para o ensaio (para o caso duas estacas metálicas projetadas para cravação a 3 m de profundidade). Observaram-se as recomendações para o manômetro e sua certificação. Também a cabeça da estaca foi nivelada e todo o sistema.

Para a definição das faixas de carregamento, foi respeitado o acréscimo entre os estágios de carregamento não superior a 10% da carga de trabalho prevista para ensaio rápido (menor que 3 tf), adotando-se faixas de carregamento de 2,5 tfs.

O macaco usado foi da marca PONTEMAC, modelo GRC 256, para 25 tfs, e Bomba Hidráulica Manual também PONTEMAC, com duplo estágio de pressão para acionar cilindros de simples ação, possuindo porta manômetro, Mangueira e Manômetro 4” glicerinado com pressão de 0 à 700 kgf/cm<sup>2</sup>.

A carga transmitida pela prensa para a estaca foi medida pela célula de carga instalada entre elas. A célula de carga modelo MC 30 foi adquirida e aferida pela empresa Líder Balanças. Os dados foram transferidos por leitura direta em leitor digital da célula modelo LD 1050 da mesma empresa, conforme figura a seguir:



FIGURA 3.29 – LEITOR DIGITAL A ESQUERDA E CÉLULA DE CARGA À DIREITA (EM APLICAÇÃO NO EXPERIMENTO)  
FONTE: DO AUTOR

As “cabeças” das estacas foram devidamente niveladas. De forma similar ao modelo entre a “cabeça” das estacas e a célula de carga foi adaptada uma peça metálica, denominada “cap”, de onde são posicionados os extensômetros. Segue o esquema de reação adotado:

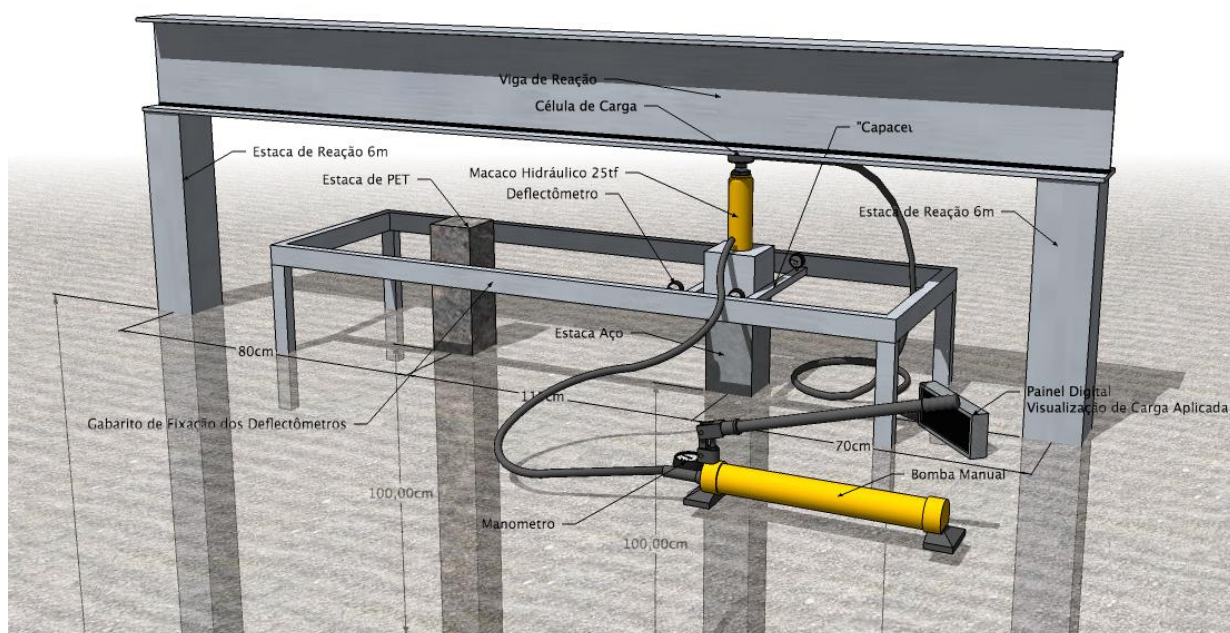


FIGURA 3.30 - CROQUI ESQUEMÁTICO DO ENSAIO DE CARGA ESTÁTICA DOS PROTÓTIPOS  
 FONTE: DO AUTOR

Basicamente foi utilizada uma viga de reação de 450 mm de altura, formando um cavalete soldado com as duas estacas metálicas já descritas. Além disso, foi apoiado o braço da escavadeira com o martelo hidráulico para garantir carga adicional de reação de 10 tf ao sistema de reação.



FIGURA 3.31 - PRENSA (PONTMAC), ADAPTADA E CALIBRADA PARA O SISTEMA, COLOCADA SOBRE VIGAS DE REAÇÃO.  
 FONTE: DO AUTOR

Seguem imagens das etapas de montagem, durante a execução dos ensaios:



FIGURA 3.32 - DETALHE DO EXTENSÔMETRO LIGADO AO “CAP” INSTALADO SOB A ESTACA DE AÇO À ESQUERDA E A ESTAPET À DIREITA.  
FONTE: DO AUTOR

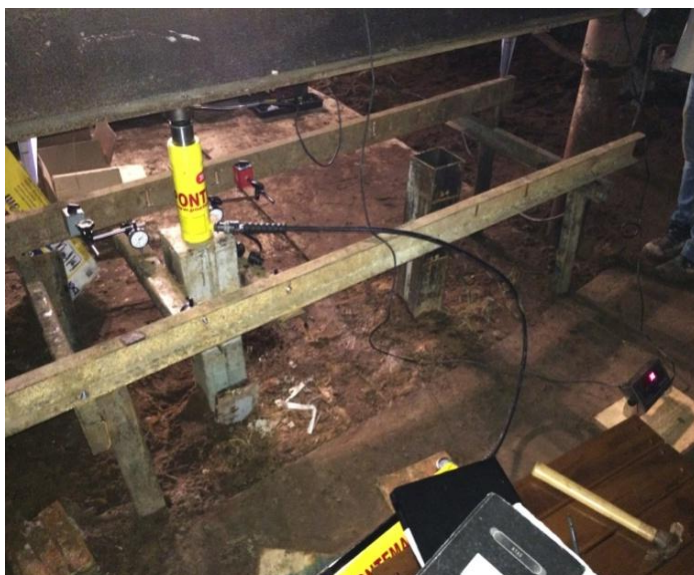


FIGURA 3.33 - ESQUEMA GERAL DA PROVA DE CARGA NA ESTACA DE AÇO A ESQUERDA E NA ESTAPET À DIREITA, COM MONITORAMENTO.  
FONTE: DO AUTOR

Os resultados dos ensaios de carregamento estático (ECE) foram resumidos em gráficos e tabelas que demonstram os resultados das análises das curvas



carga x deslocamento dos métodos de Van der Veen, da NBR 6122/1996, Davison e Critério Inglês, já estudados na revisão bibliográfica.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos relativos aos modelos e protótipos em aço e PET. Inicialmente, serão expostos os resultados dos modelos e, na sequência, os resultados dos protótipos.

Considerando as informações contidas no capítulo 3, a pesquisa contou com a cravação de estacas modelo sendo 6 ESTAPETs e 6 estacas de aço, durante duas baterias de ensaios, sendo estas cravadas com um martelo de gravidade. No processo de cravação dos modelos, foi realizado o controle minucioso da altura de queda do martelo e do número de golpes para cada 10 cm de penetração. Ao final de cada trecho, foi realizada a medição da nega e repique elástico, cujos resultados serão apresentados em tabelas e gráficos a seguir. No (APÊNDICE 1) encontram-se os dados dos experimentos que originaram os gráficos deste capítulo para os modelos e protótipos. No (APÊNDICE 5) encontram-se os dados dos ECE do protótipo.

Em cada uma das quatro profundidades de teste, (30, 50, 70 e 90 cm respectivamente), foram realizados provas de carga dinâmica com energia crescente. Este procedimento teve por objetivo comparar as estimativas da capacidade de carga através de fórmulas dinâmicas, com as provas de carga estáticas e também com as previsões da capacidade de carga pelos métodos clássicos.

Segue o resumo de todos os resultados de previsão de carga dos modelos indicando os métodos de cálculo (TABELA 4.1).

TABELA 4.1 - RESULTADO DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DO MODELO PELOS MÉTODOS TEÓRICOS

<b>Método</b>	<b>ESTAPET L=120cm (kN)</b>	<b>ESTAPET L=100cm (kN)</b>	<b>ESTAPET L=80cm (kN)</b>	<b>Aço L=120cm (kN)</b>	<b>Aço L=100 cm (kN)</b>	<b>Aço L=80cm (kN)</b>
<b>Janbu-ponta</b>	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936
<b>Terzagui-ponta lisa</b>	0,933	0,933	0,933	0,933	0,933	0,933
<b>Meyerhof (1963)</b>	0,933	0,933	0,933	0,933	0,933	0,933
<b>Ponta média</b>	0,934	0,934	0,934	0,934	0,934	0,934
<b>Lateral (Das)</b>	0,218	0,174	0,131	0,218	0,174	0,131
<b>Total ponta+lat</b>	1,15	1,108	1,065	1,15	1,108	1,065

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

No cálculo da resistência de ponta conforme os métodos teóricos, o fator preponderante na resistência é o ângulo de atrito, sendo muito significativo no resultado da resistência de ponta.

TABELA 4.2 - RESULTADOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA DO PROTÓTIPO PELOS MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS

<b>Método</b>	<b>ESTAPET(14,5cm x14,5cm) (kN)</b>	<b>Aço (15x15cm) (kN)</b>
Aoki – SPT - ponta	479	512
Aoki – CPT - ponta	158	169
Aoki – SPT - lateral	180	193
Aoki – CPT- lateral	17,4	19
Aoki – SPT - total	663	705
Aoki – CPT - total	176	188

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

Os resultados da (TABELA 4.2) apontam as capacidades de carga de 17,6 tf e 66,3 tf, para os ensaios CPT e SPT, e profundidade de apenas 1 (um) metro. Também é verificada a alta capacidade de carga esperada, pela compacidade do solo arenoso, com tensões admissíveis podem oscilar entre 7 a 21 MPa, para as cargas de ponta calculadas de 15,8 tf e 47,9 tf, respectivamente para os ensaios CPT e SPT.

Nos resultados a seguir apresentados para os ensaios de carregamento dinâmico, foram utilizadas as médias dos resultados dos métodos de Wellington, Hilley, Dinamarqueses e Janbu, para os modelos e protótipos.

No (APÊNDICE 5) constam os gráficos e tabelas com os resultados da contagem de golpes, repiques e resultados preliminares pelo método dos Holandeses, além dos resultados do ensaio DLT realizados nos protótipos.

Os parâmetros principais adotados para as ESTAPETs e estacas de aço foram:

$C_1$ =desprezado

$Repique = C_2 + C_3$

$\mu$  (areia fina) para Janbu= 1,2

Coef. de restituição ( $n$ )= 0,4

Eficiência do martelo ( $e$ )= 0,7

Peso da estapet = 1,08 kgf

$$E_{pet} = 20 \text{ Gpa}$$

Peso da estaca de aço = 2 kgf

$$E_{aço} = 210 \text{ Gpa}$$

*C3 (quake)* arbitrado = 80% do repique (o critério para este parâmetro adotado é justificado na seção 4.7.2 deste capítulo).

#### 4.1 RESULTADOS DOS MODELOS- ESTAPET

##### 4.1.1 ESTAPET- Resultados ECD

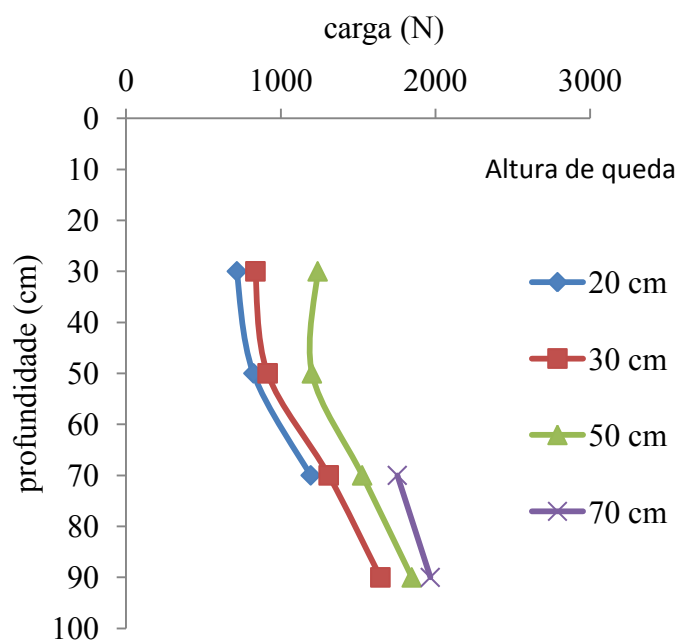


FIGURA 4.1 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTAPET 1- ETAPA I  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

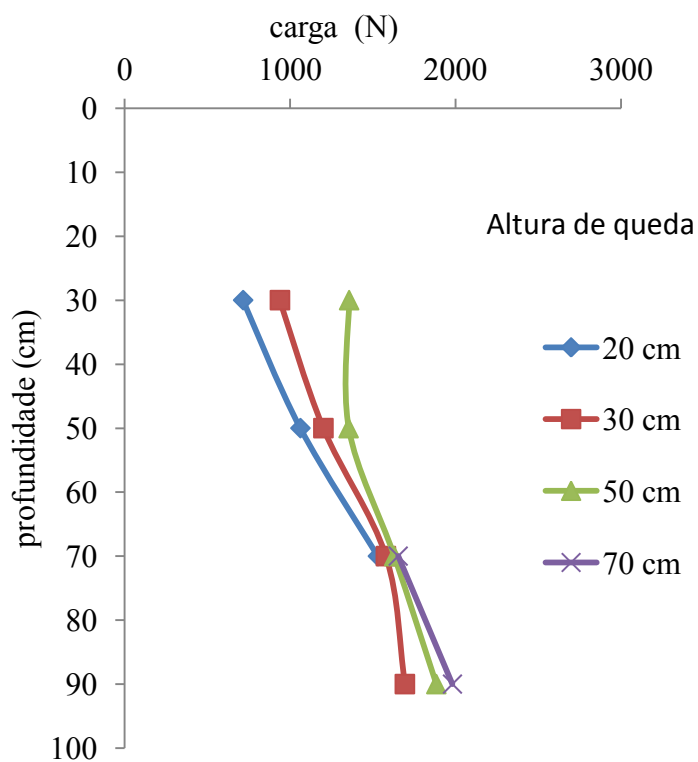


FIGURA 4.2 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTAPET 2- ETAPA I  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

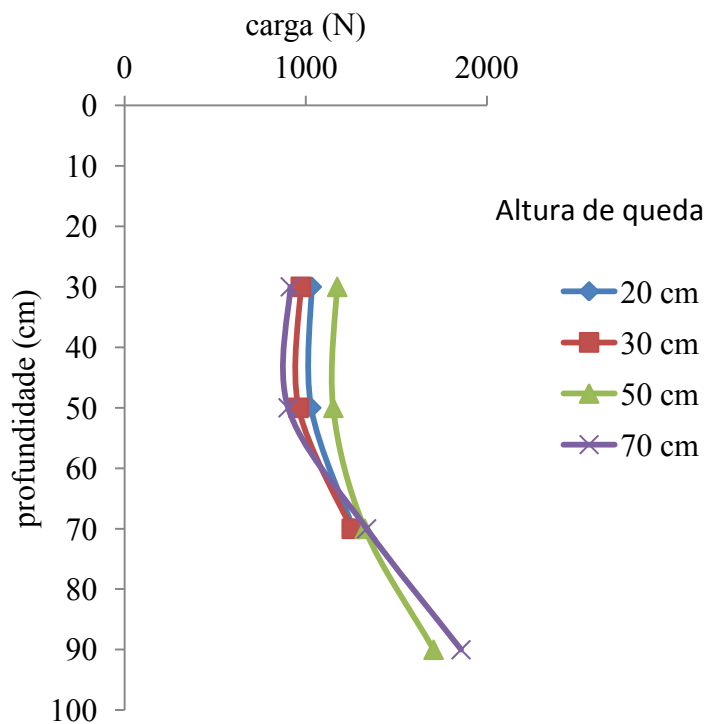


FIGURA 4.3 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTAPET 04- ETAPA I  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

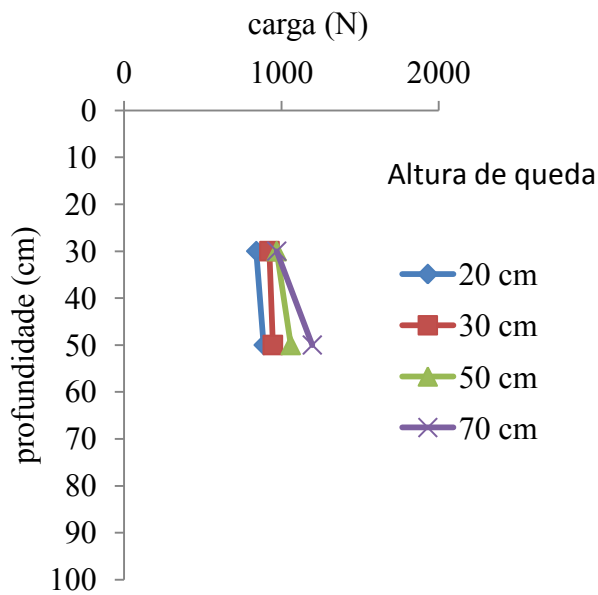


FIGURA 4.4 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTAPET 04 -80 CM - ETAPA II. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

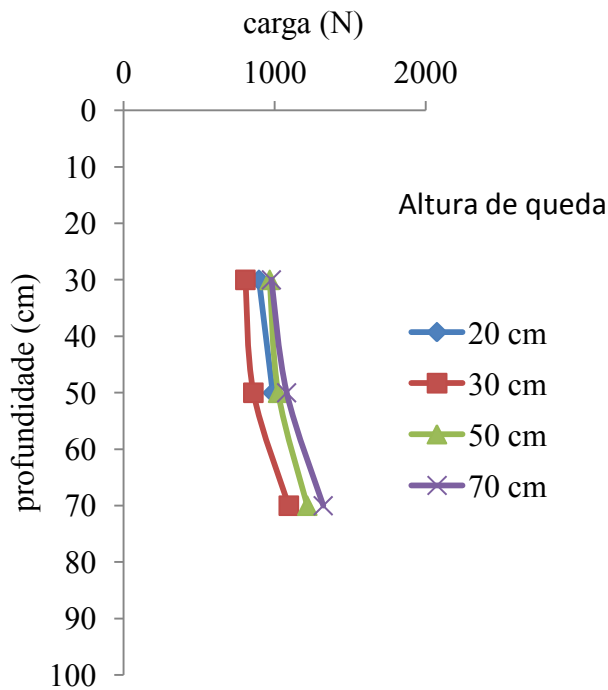


FIGURA 4.5 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE-ESTAPET 6 - (100 cm - ETAPA II. FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

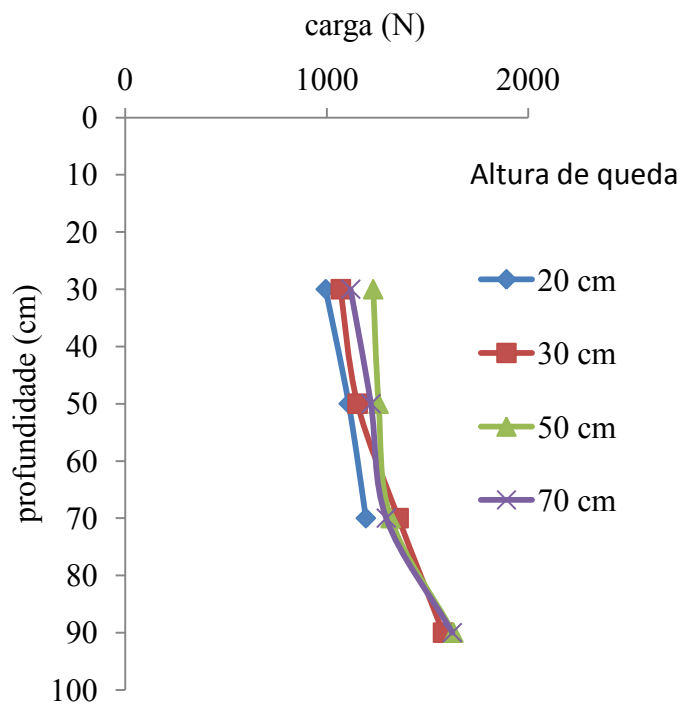


FIGURA 4.6 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE (ESTAPET 07- ETAPA II)  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

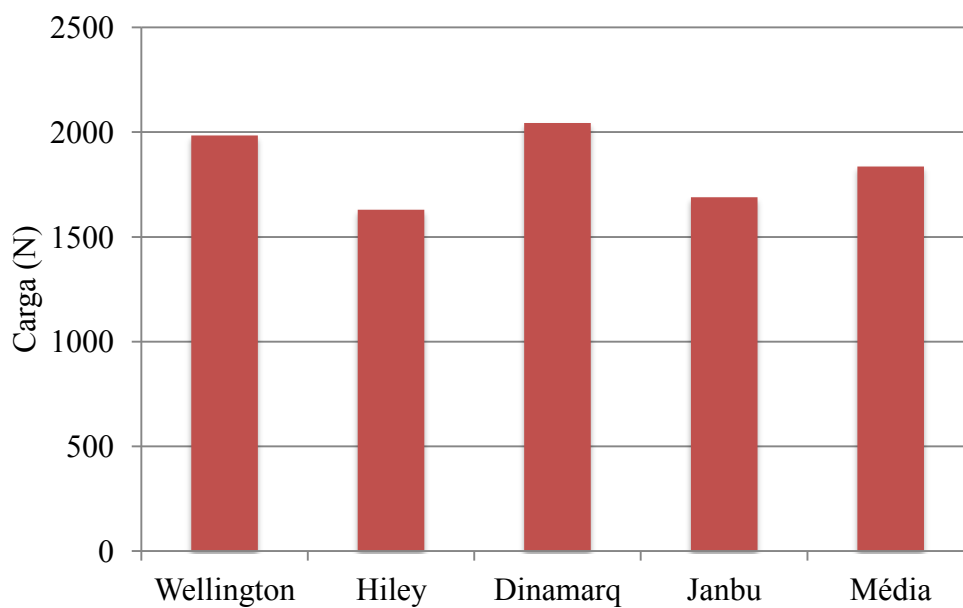


FIGURA 4.7 - RESULTADO MÉDIO ECD – ESTAPETS (ESTACAS MODELO COM L=120 cm)  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Os resultados dos métodos ECD de previsão de suporte apontam uma média de capacidade de suporte dinâmico na ordem 1835,8 N para as ESTAPETs, com 1,20m. Os valores entre métodos ficaram acima ou abaixo da média em até 12%, demonstrando bom padrão entre métodos a este nível de resistência unitária do solo.

#### 4.1.2 ESTAPET- Resultados ECE

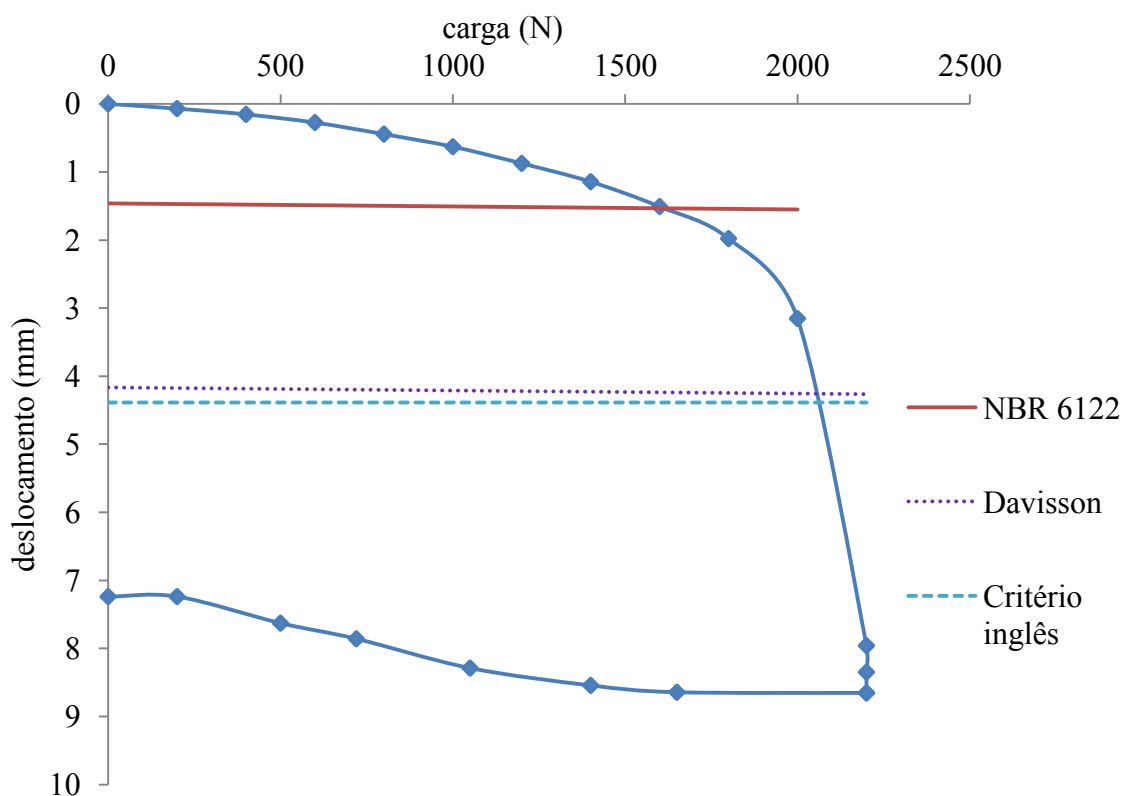


FIGURA 4.8 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET I – ETAPA I  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR



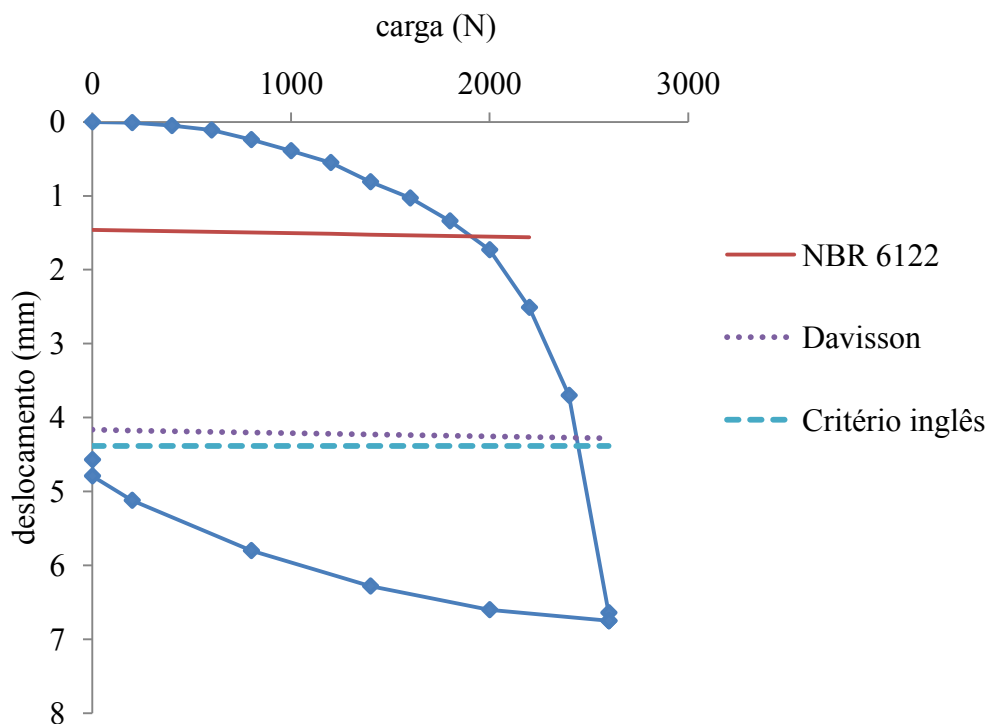


FIGURA 4.9 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET 2 – ETAPA I  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

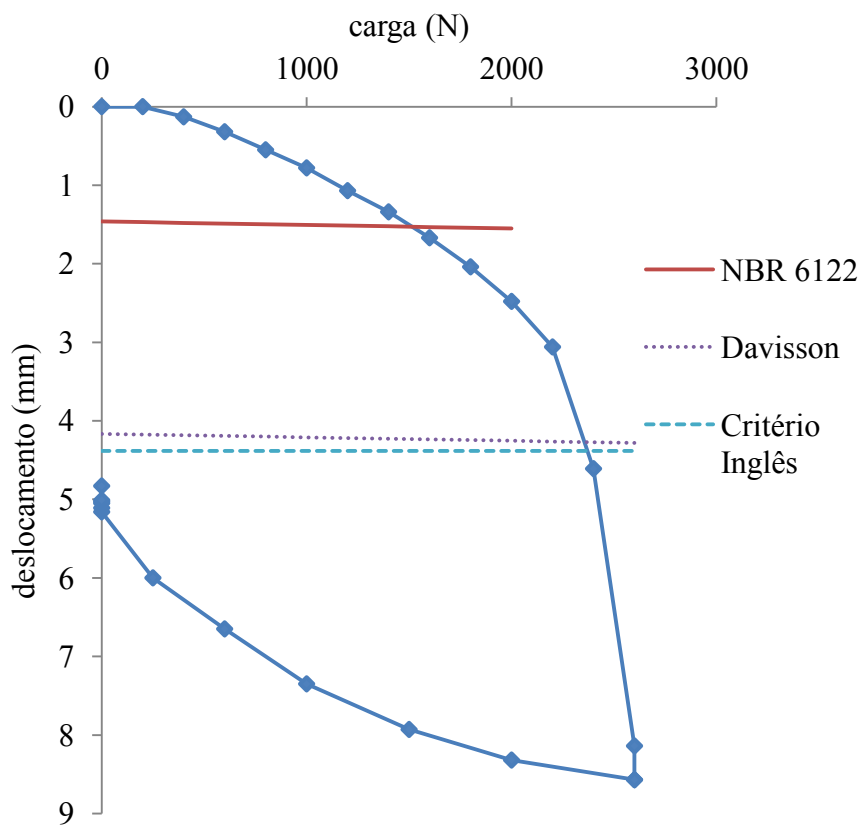


FIGURA 4.10 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET 4 - ETAPA I  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

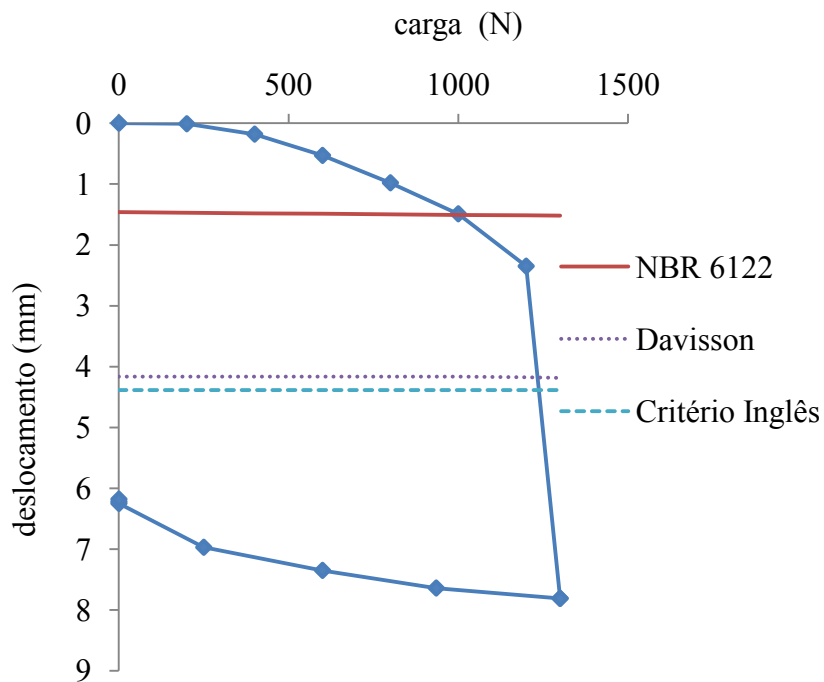


FIGURA 4.11 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET 4 (80 cm) – ETAPA II  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

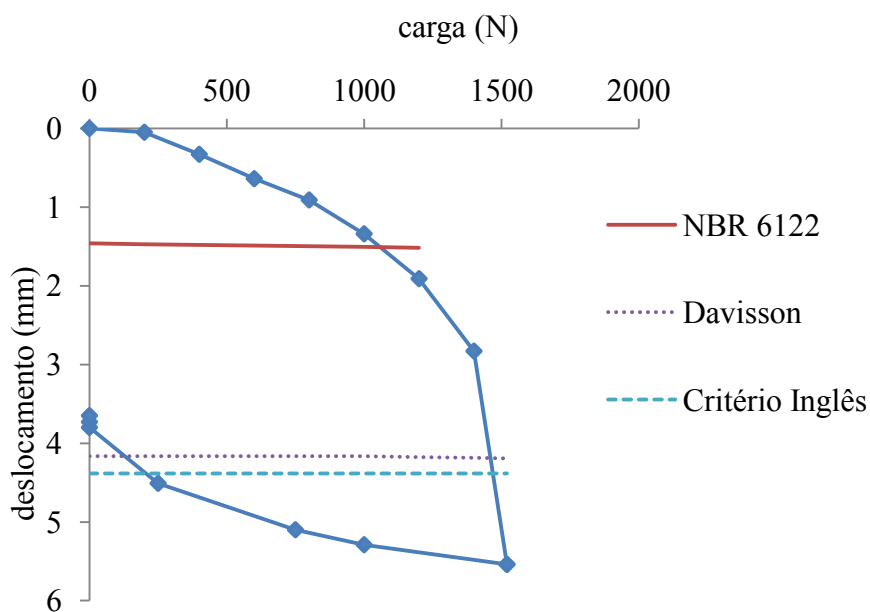


FIGURA 4.12- AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET 6 (100 cm) – ETAPA II  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

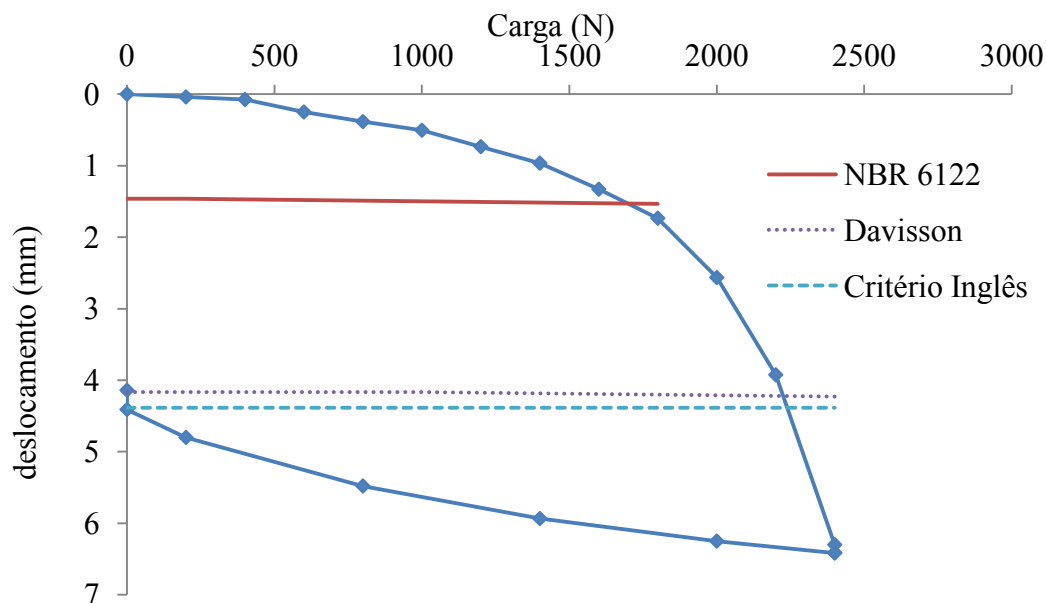


FIGURA 4.13 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTAPET 7 – ETAPA II  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

TABELA 4.3 – RESUMO ECE VAN DER VEEN - ESTAPET (RESULTADOS EM APENDICE 2)

ESTAPET	ETAPA	CARGA (N)
1	I	2070
2	I	2300
4	I	2310
4 (L=80cm)	II	1310
6 (L=100 cm)	II	1380
7	II	2129

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

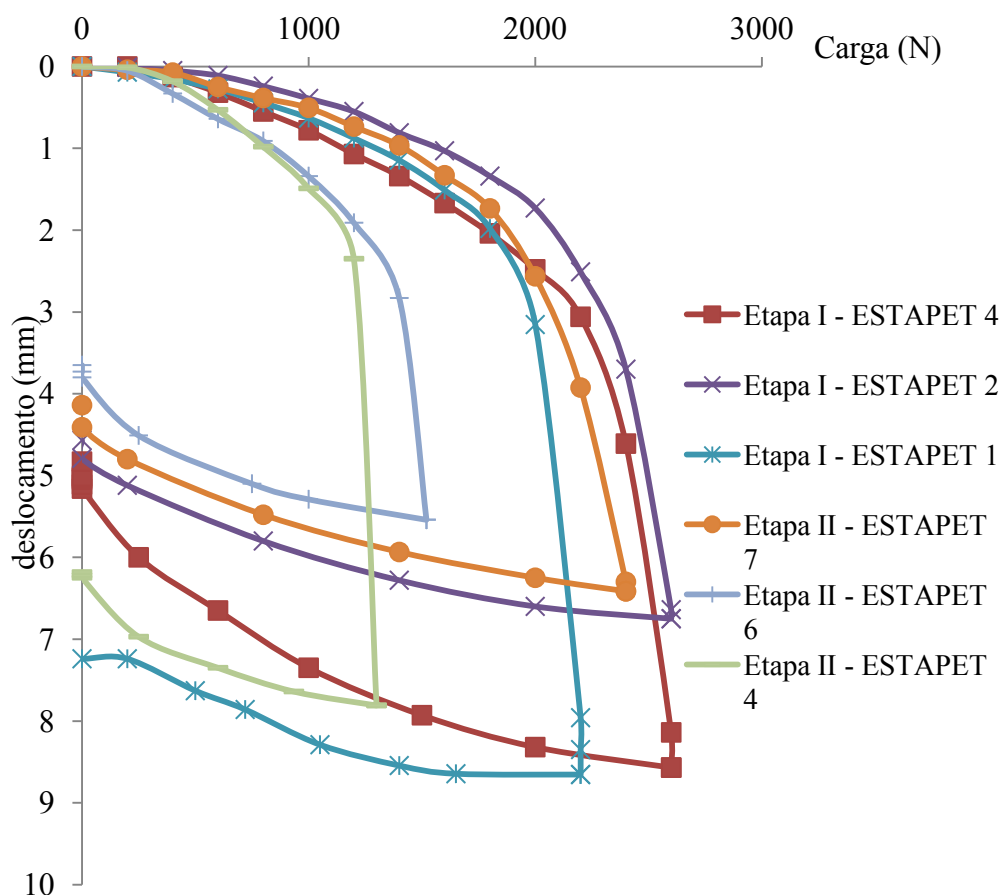


FIGURA 4.14 - RESULTADOS AGRUPADOS ECE PARA AS ESTAPETS (ETAPAS I E II)  
 FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

Fica demonstrada a homogeneidade do experimento. Estes resultados também demonstram que o modelo reduzido com a ESTAPET mantém a regra em que a capacidade de carga das estacas ocorre para deslocamentos correspondentes a 10% da seção da estaca, ou seja, em torno de 3 mm (claramente definido nos ensaios estáticos). No caso do ESTAPET, ocorrem deformações inerentes do polímero, aumentando este percentual para até 30%. Numa análise trecho a trecho verifica-se uma linha inicial ligeiramente curva bem definida de pleno desenvolvimento da resistência lateral. Através de uma análise da velocidade de deformação pode ser apurado o início da mobilização de ponta.

## 4.1.3 Comparação ECD X ECE ESTAPET

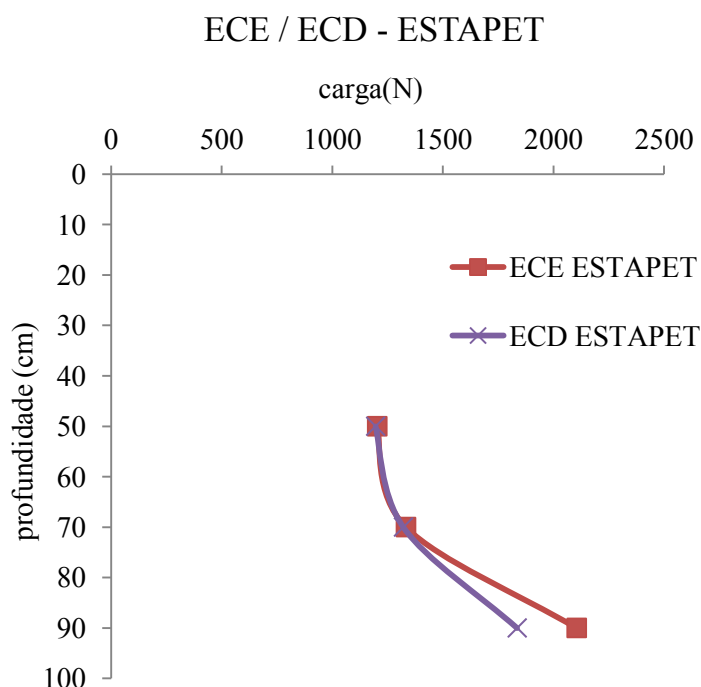


FIGURA 4.15 - COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS ECE X ECD PARA A ESTAPET

FONTE: ELABORADO PELO AUTOR

TABELA 4.4 - RESULTADOS DOS ECE PARA ESTAPET DE 80 E 100 cm

Tipo		ECE (N)					Média(N)
		Estaca	NBR	Veem	Davisson	Inglês	
ETAPA II							
4	PET (80 cm)	4	1000	1310	1250	1250	1202,5
6	PET (100 cm)	6	1050	1380	1450	1450	1332,5

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

É importante lembrar que esses dados comparativos só foram possíveis devido aos ensaios em estacas curtas na etapa II do modelo, quando foi feito apenas um ensaio para estacas de aço e PET aos 80 cm e 100 cm. Para o comprimento de 120 cm, foi utilizado o valor médio dos experimentos para cada material nas duas etapas.

Quanto aos resultados, eles refletem a tendência dos materiais poliméricos apresentarem maior perda de energia na cravação que os metálicos dada a baixa rigidez e o comportamento não linear elasto-plástico semelhante ao solo. Fica claro o aumento da resistência dinâmica pelo fato dos gráficos permanecerem juntos, ECD com ECE.

## 4.2 RESULTADOS DOS MODELOS - ESTACAS DE AÇO

### 4.2.1 Estaca de aço – Resultados ECD

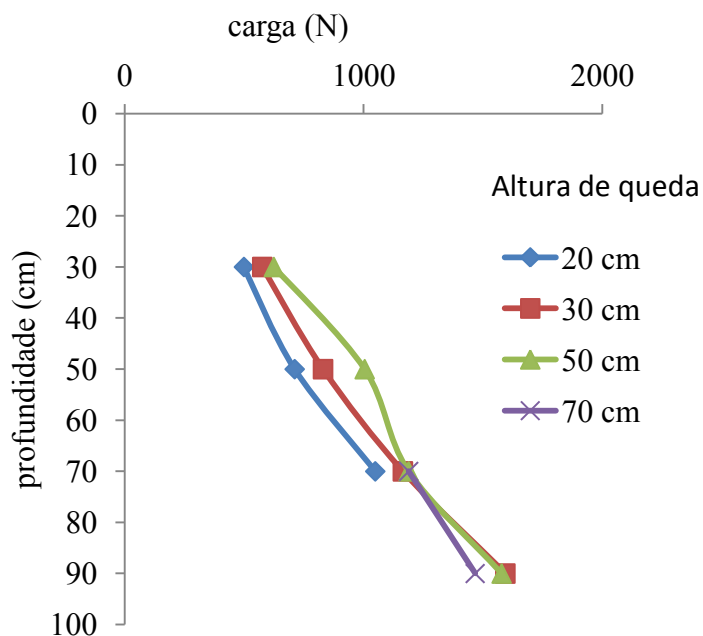


FIGURA 4.16 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTACA DE AÇO 3 - ETAPA I  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

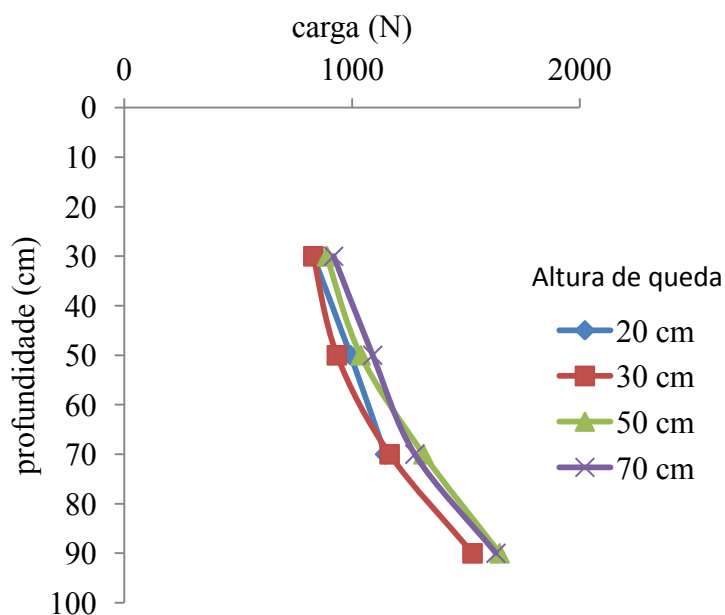


FIGURA 4.17 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTACA DE AÇO 5 - ETAPA I  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

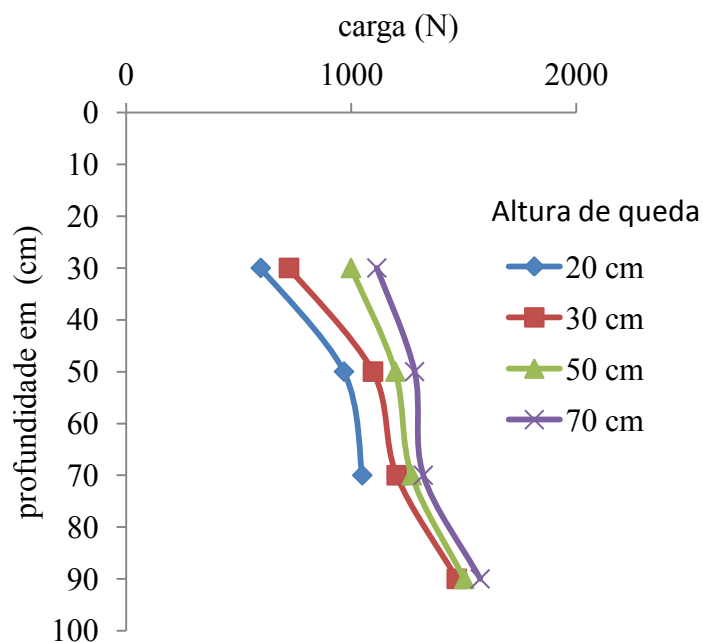


FIGURA 4.18 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTAPET 01- ETAPA II  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

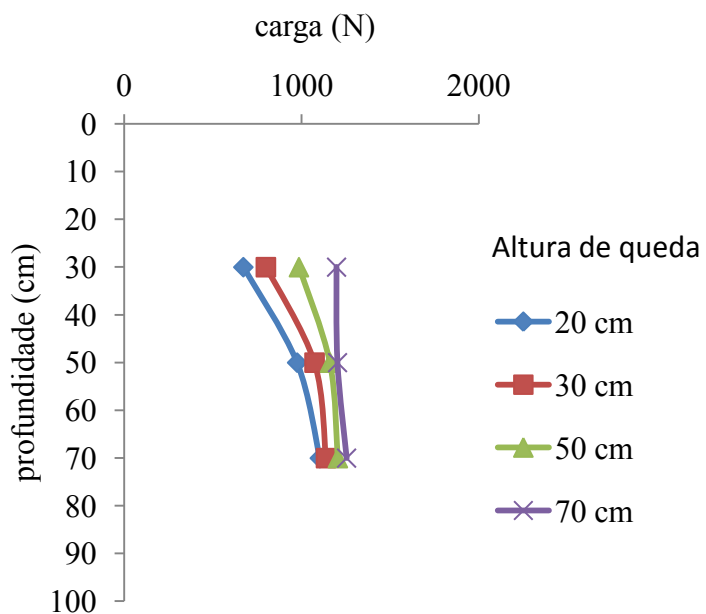


FIGURA 4.19 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE - ESTACA DE AÇO 2 (100 cm) - ETAPA II  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

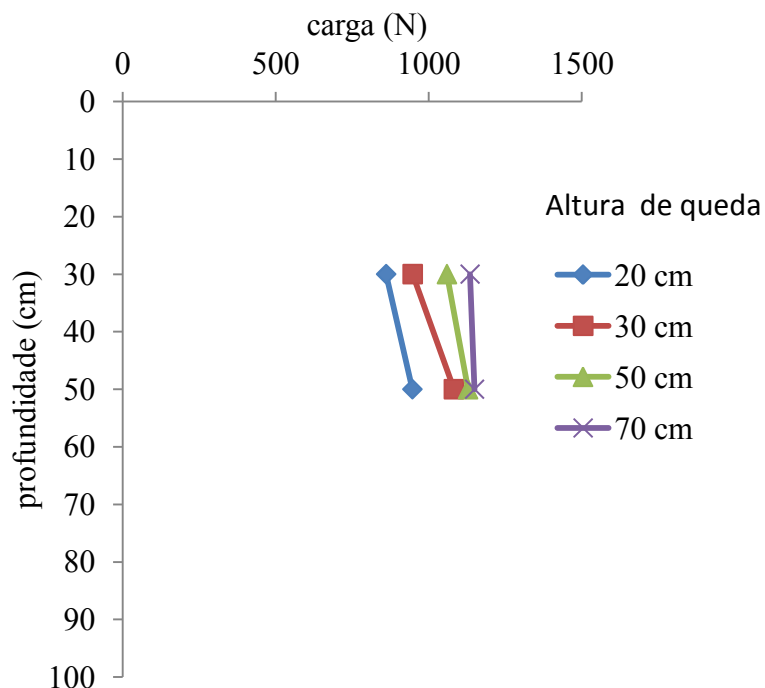


FIGURA 4.20 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE  
- ESTACA DE AÇO 3 - 80 cm - ETAPA II  
FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

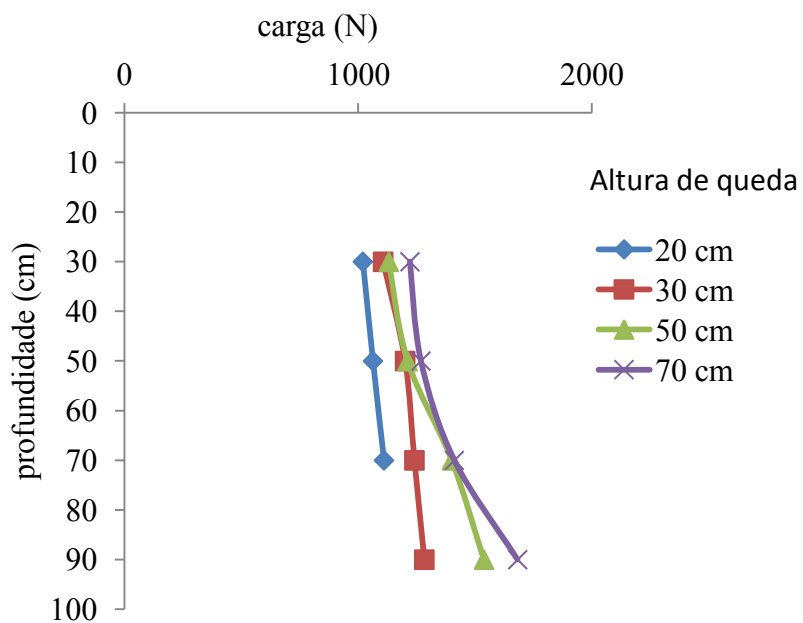


FIGURA 4.21 - RESULTADO MÉDIO (ECD) - CARGA X PROFUNDIDADE  
(ESTACA DE AÇO 05- ETAPA II)  
FONTE: ELABORADA PELO AUTOR



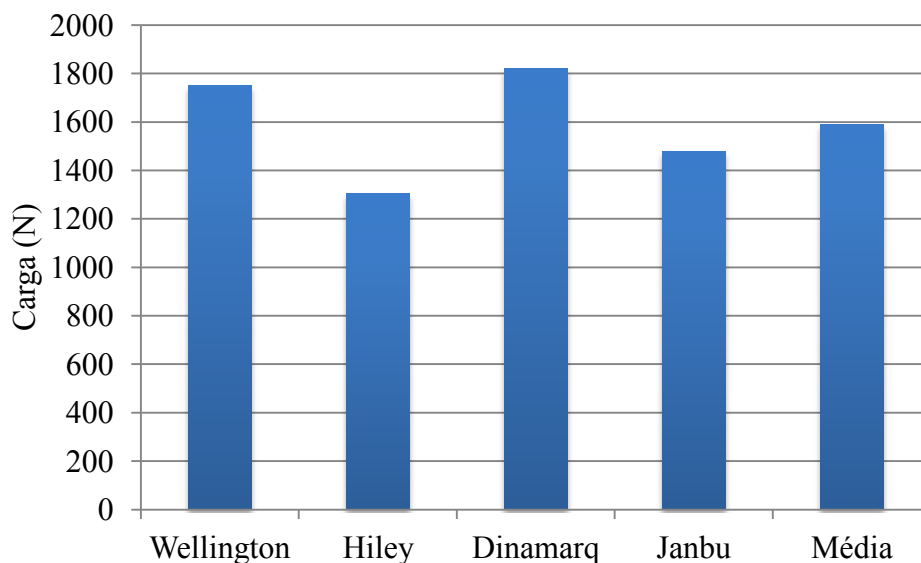


FIGURA 4.22 - RESULTADO MÉDIO ECD – ESTACAS MODELO DE AÇO (ESTACAS COM L=120 cm)  
FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

Os resultados dos métodos ECD de previsão de suporte apontam uma média de capacidade de suporte dinâmico na ordem 1588,4N para as estacas de aço com 1,20m. Os valores entre métodos ficaram acima ou abaixo da média em até 18%, demonstrando uma maior dispersão entre métodos. Porém, os resultados médios entre etapas I e II foram diferentes em menos de 2%, demonstrando excelente qualidade do ambiente modelado.

## 4.2.2 Estacas de aço – Resultados ECE

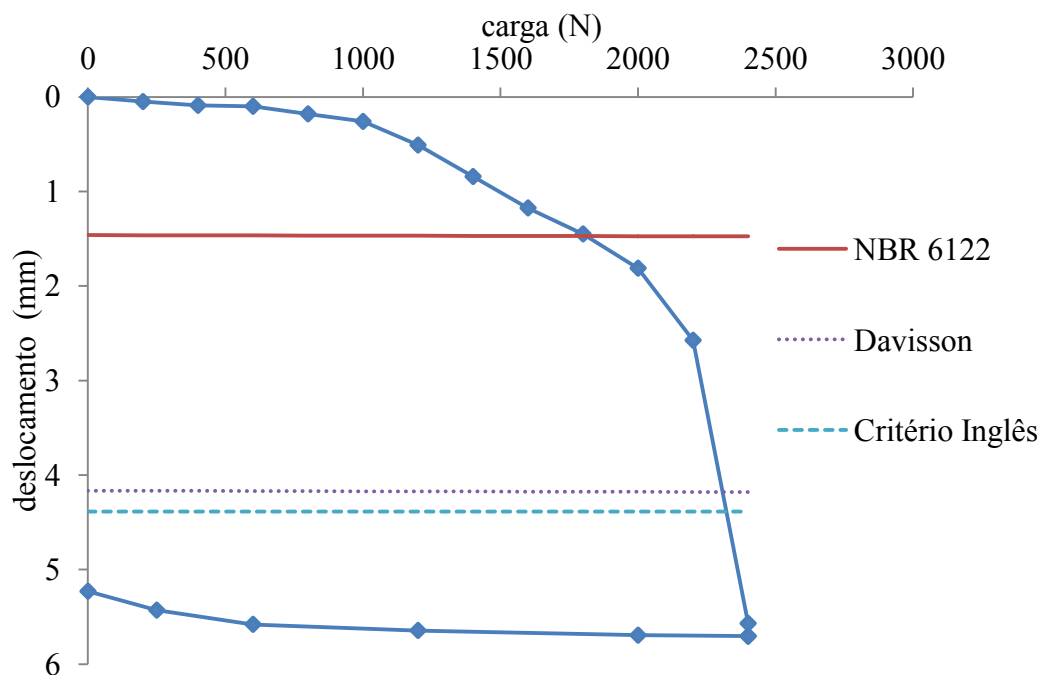


FIGURA 4.23 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO – ESTACA DE AÇO 3 – ETAPA I

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

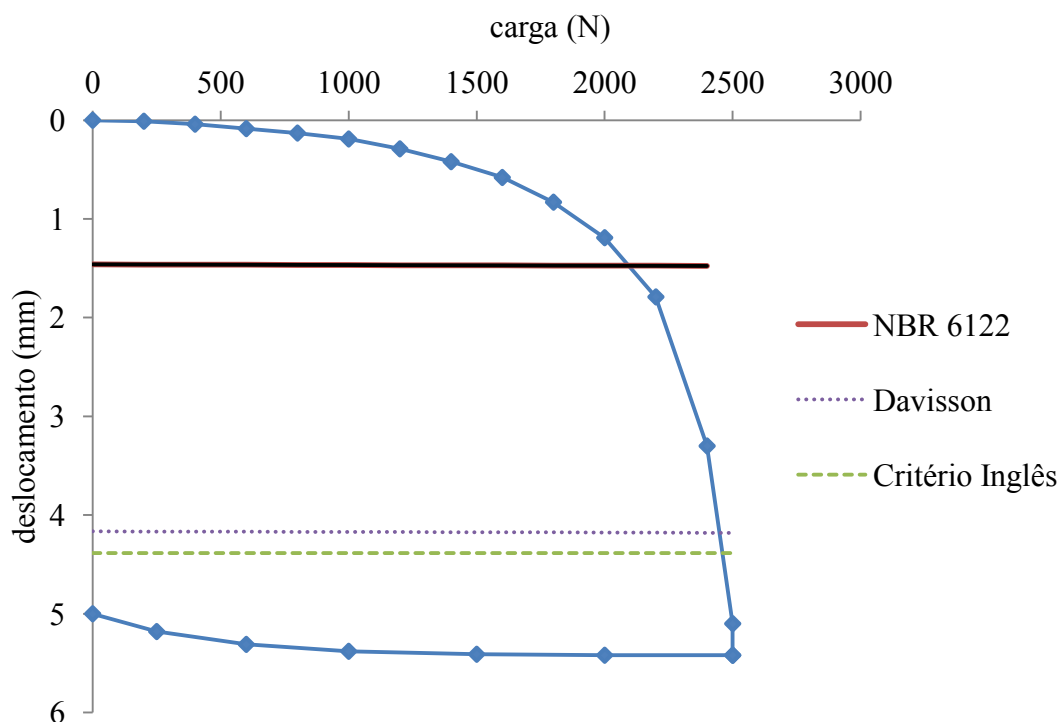


FIGURA 4.24 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO – ESTACA DE AÇO 5 – ETAPA I

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

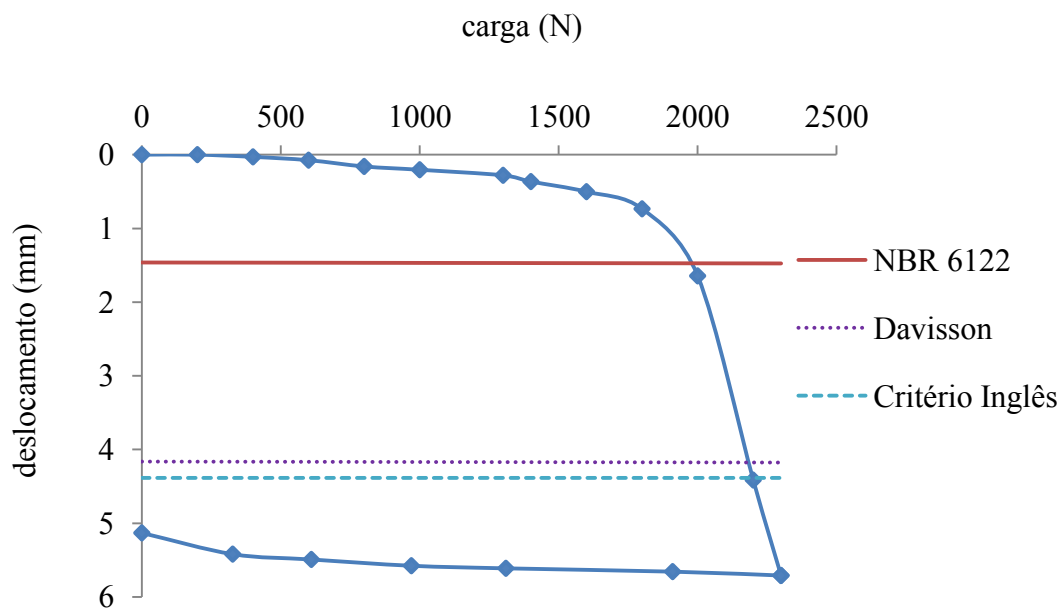


FIGURA 4.25 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTACA DE AÇO 1 – ETAPA II  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

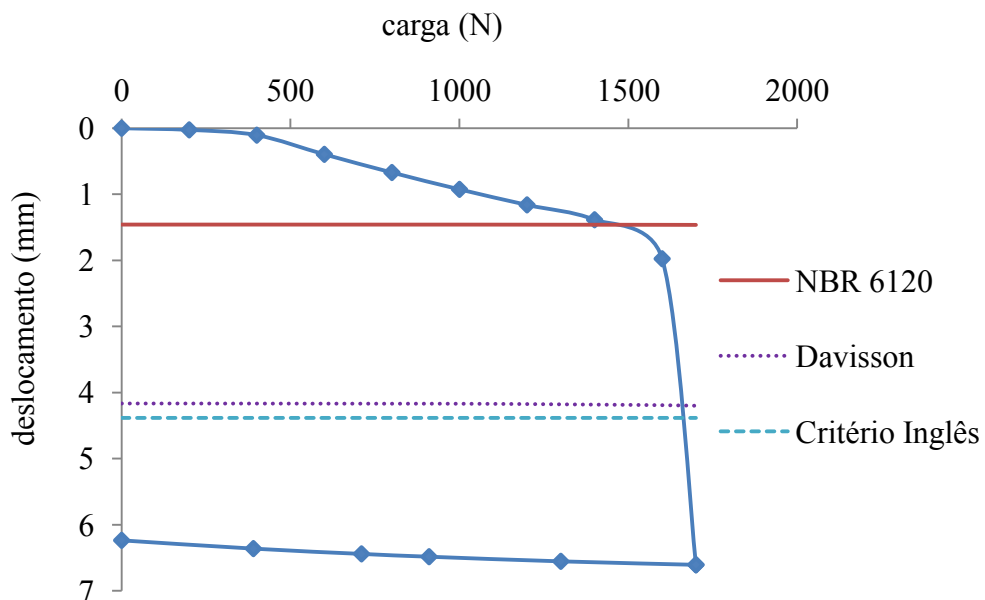


FIGURA 4.26 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTACA DE AÇO 2 (L=100 cm) – ETAPA II  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

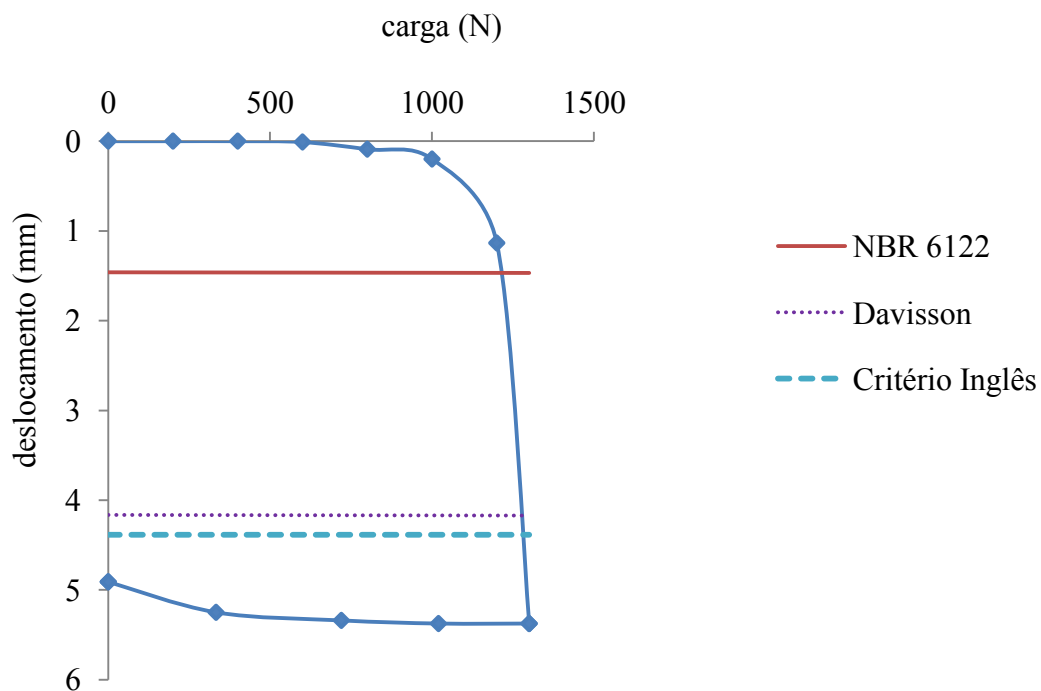


FIGURA 4.27 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTACA DE AÇO 3 (80 cm) - ETAPA II  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

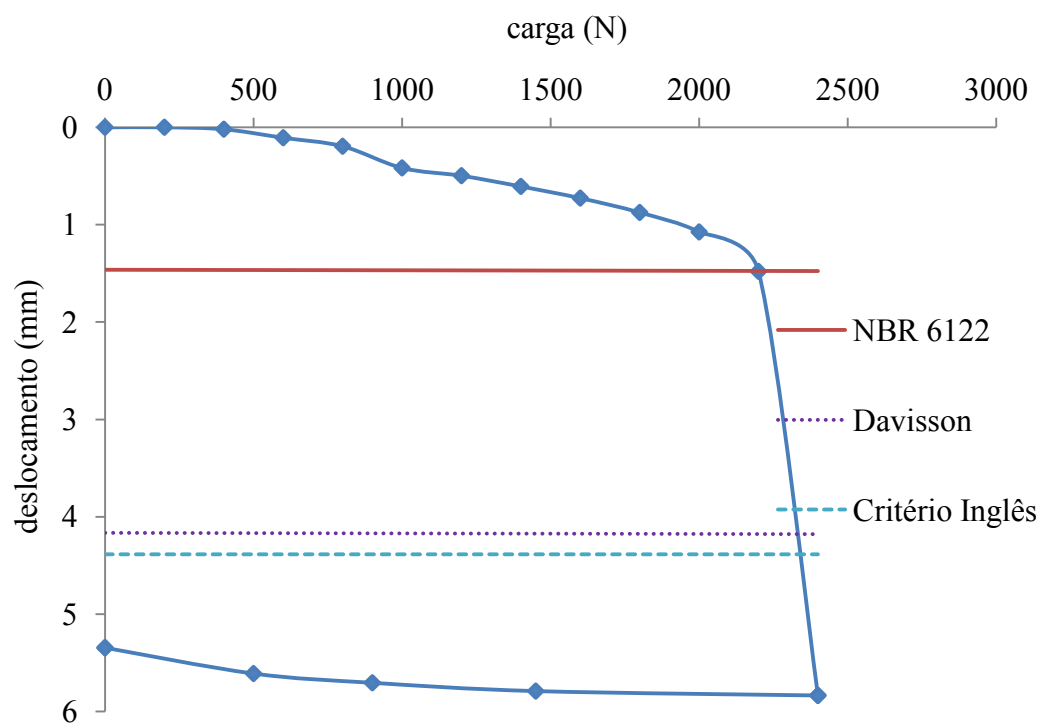


FIGURA 4.28 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. ESTACA DE AÇO 5 (PONTA FECHADA) - ETAPA II  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

TABELA 4.5 - RESUMO DE RESULTADOS - ECE VAN DER VEEN – AÇO (APENDICE 2)

Estaca de aço	ETAPA	CARGA (N)
3	I	2260
5	I	2270
1	II	2040
2 (L=100cm)	II	1660
3(L=80cm)	II	1210
5(Ponta fechada)	II	2290

FONTE: DO AUTOR

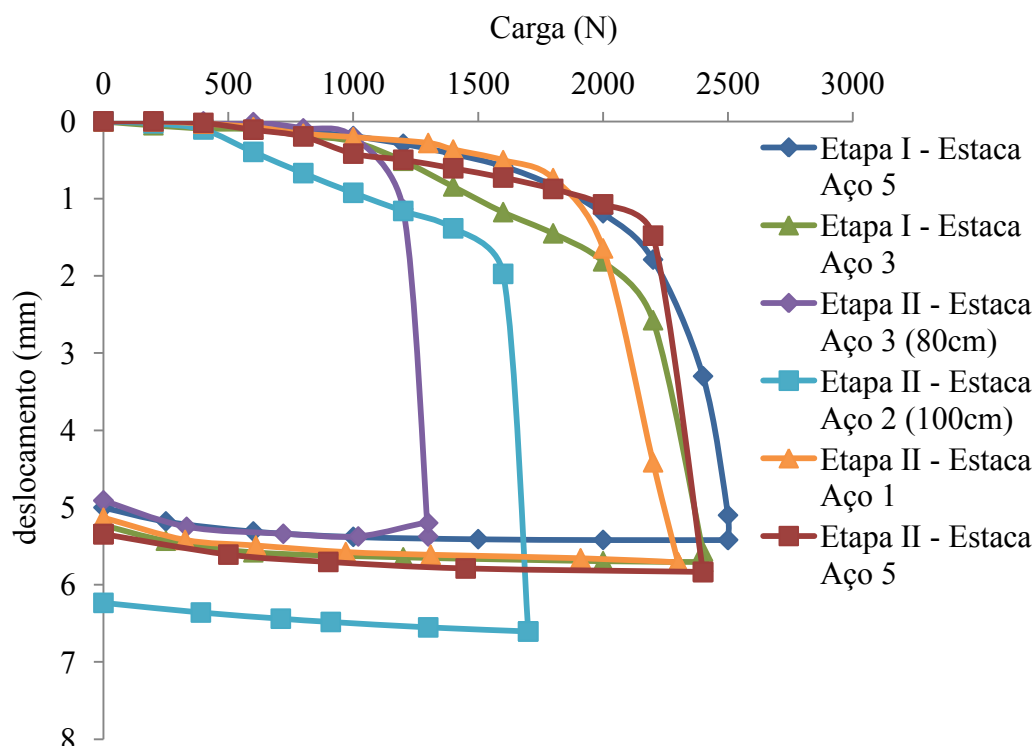


FIGURA 4.29 - RESULTADOS AGRUPADOS ECE PARA AS ESTACAS DE AÇO (ETAPAS I E II)

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

Os resultados do ECE das estacas de aço estão mais homogêneos que os da ESTAPET, além de não demonstrarem na curva de descarregamento relaxamento do material.

## 4.2.3 Comparativo ECD X ECE estaca de aço

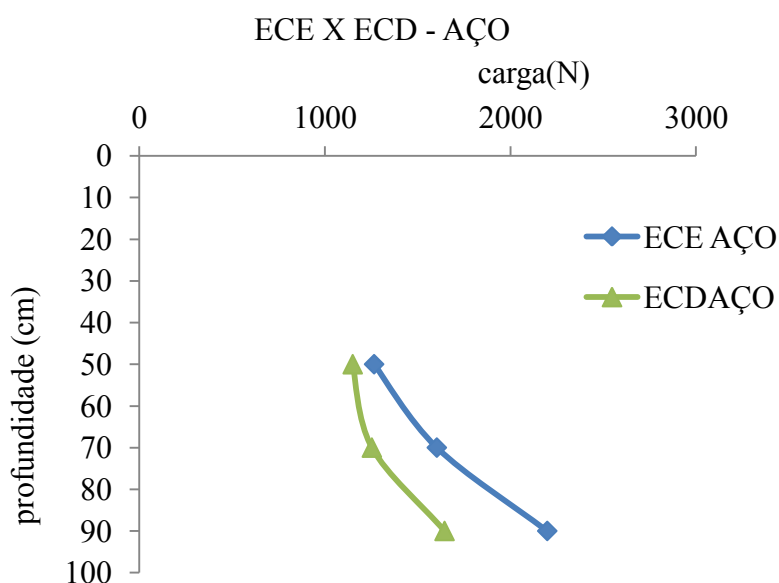


FIGURA 4.30 - RESULTADOS DOS ECE X ECD PARA ESTACAS DE AÇO  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

TABELA 4.6 - RESULTADOS ADOTADOS ECE DAS ESTACAS DE AÇO AOS 80 E 100 cm

Tipo		ECE (N)					Média (N)
		Estaca	NBR	Veem	Davisson	Inglês	
<i>ETAPA II</i>							
2	AÇO (100 cm)	2	1450	1660	1650	1650	1602,5
3	AÇO (80 cm)	3	1250	1210	1300	1300	1265

FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

Estes resultados demonstram a tendência à aproximação de resultados ECD e ECE em menores níveis de tensão aplicada. À medida que essas tensões dinâmicas e estáticas diminuem, os gráficos se aproximam entre si.

### 4.3 COMPARATIVO ESTAPET X ESTACA DE AÇO

#### 4.3.1 Comparativo ECD–ESTAPET X Estaca de aço

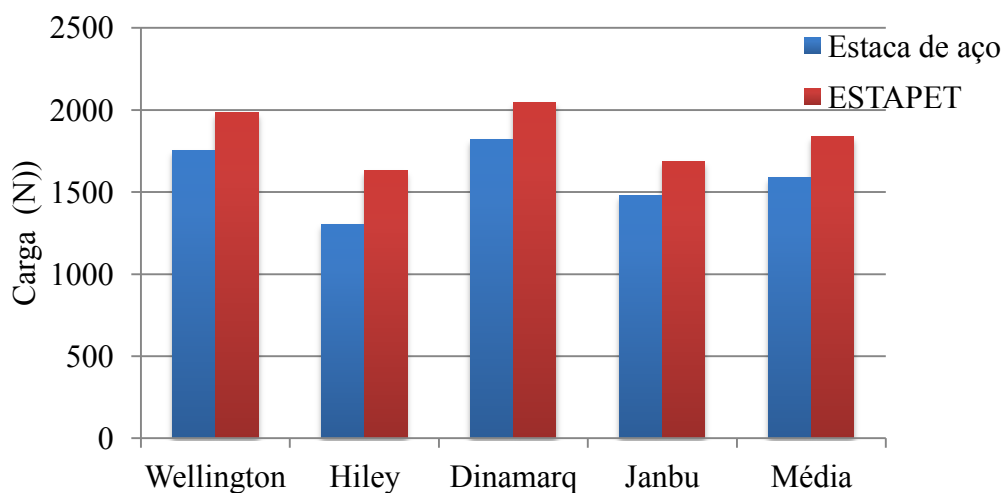


FIGURA 4.31 - COMPARATIVO RESULTADOS DOS ENSAIOS ECD PARA OS MODELOS DE ESTAPET E ESTACA DE AÇO  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

#### 4.3.2 Comparativo ECE–ESTAPET X Estaca de aço

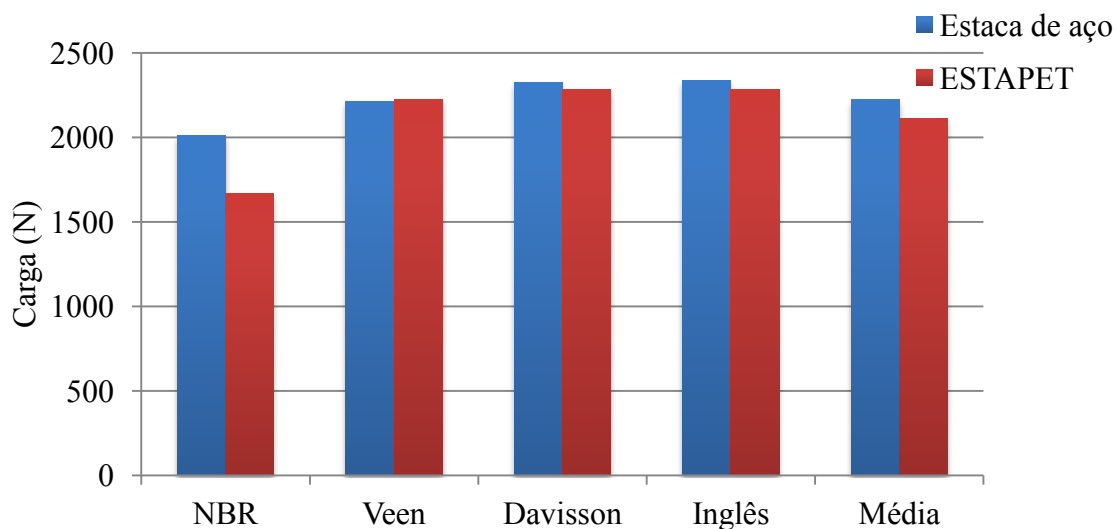


FIGURA 4.32 - COMPARATIVO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS ECE PARA OS MODELOS DE ESTAPET E ESTACA DE AÇO  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

O comparativo entre ECE e ECD das ESTAPETs e estacas de aço demonstra a maior resistência dinâmica da ESTAPET. Na realidade em termos de capacidade de suporte solo-estaca, o aço mostra uma superioridade no ensaio

ECE. Nos ensaios ECD a maior resistência dinâmica da ESTAPET em relação ao aço fica em torno de 17,9%. Nos ensaios ECE a mesma ESTAPET é inferior neste mesmo critério em 4,5% em relação ao aço. Os valores médios de ECE para a ESTAPET são 2105 N contra 2298 N para as estacas de aço. Os valores médios de ECD para a ESTAPET são 1830 N contra 1557 N para as estacas de aço.

#### 4.4 PROTÓTIPO ESTAPET

##### 4.4.1 Resultados ECD - Protótipo- ESTAPET (prof= 75 cm)

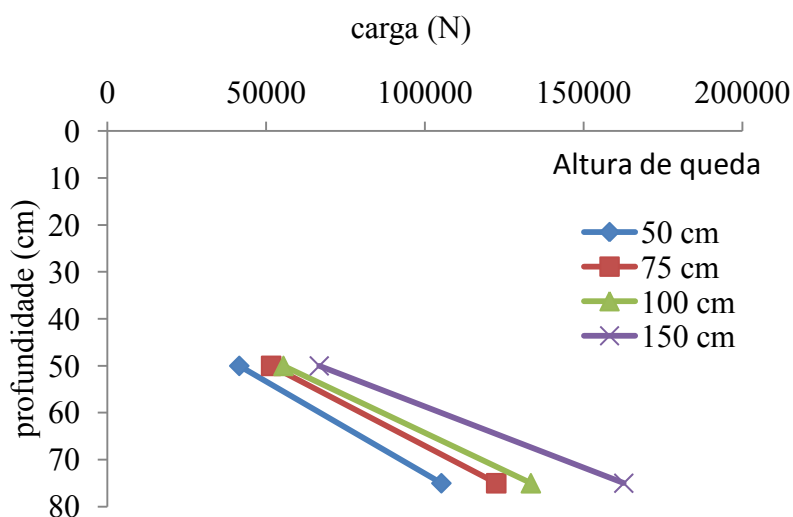


FIGURA 4.33 - RESULTADO MÉDIO (ECD) – MARTELO DE 710 N - PROTÓTIPO ESTAPET - (ATÉ PROF= 75 cm)  
FONTE: ELABORADA PELO AUTOR



#### 4.4.2 Resultados ECE – Protótipo ESTAPET (Prof = 90 cm)

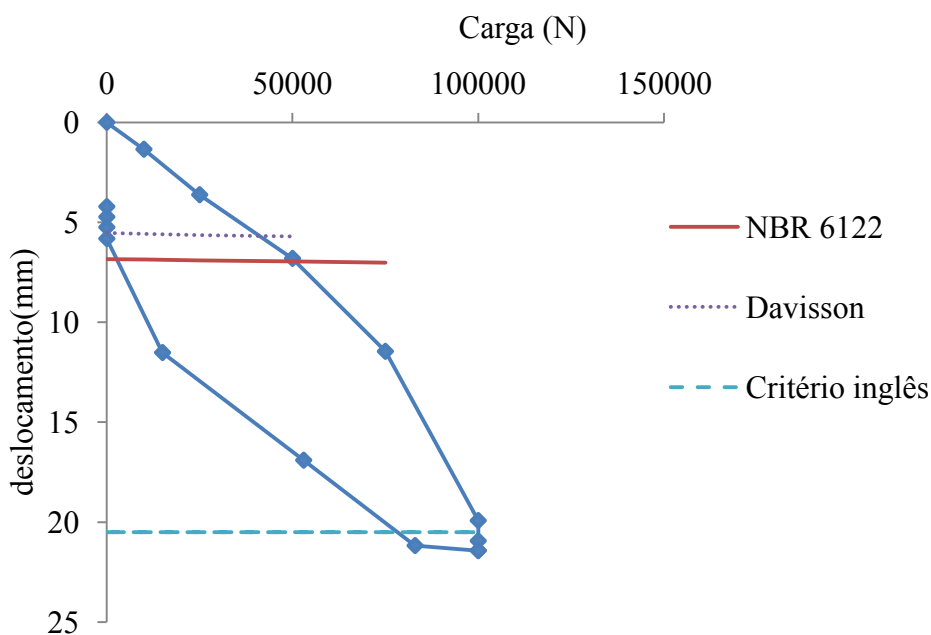


FIGURA 4.34 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO. PROTÓTIPO ESTAPET (PROF = 90 cm)  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

#### 4.5 RESULTADOS PROTÓTIPO – ESTACA DE AÇO

##### 4.5.1 Resultados ECD- Protótipo – estaca de aço (prof = 95 cm)

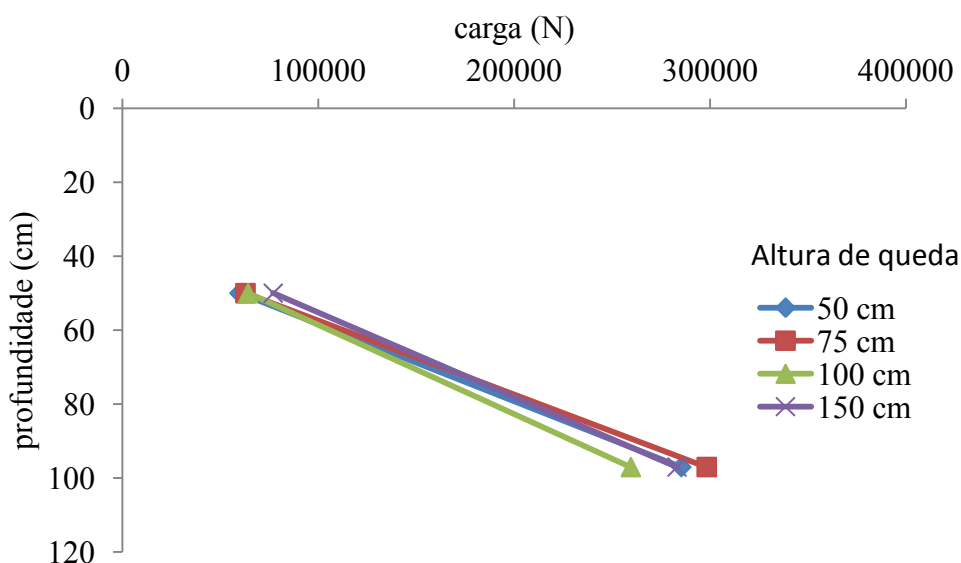


FIGURA 4.35 - RESULTADO MÉDIO (ECD) – MARTELO DE 710 N – PROTÓTIPO ESTACA DE AÇO (ATÉ PROF= 95 cm)  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

#### 4.5.2 Resultados ECE - Protótipo estaca de aço

Os dados obtidos que originaram os resultados gráficos a seguir apresentados se encontram em (APÊNDICE 1 e 5).

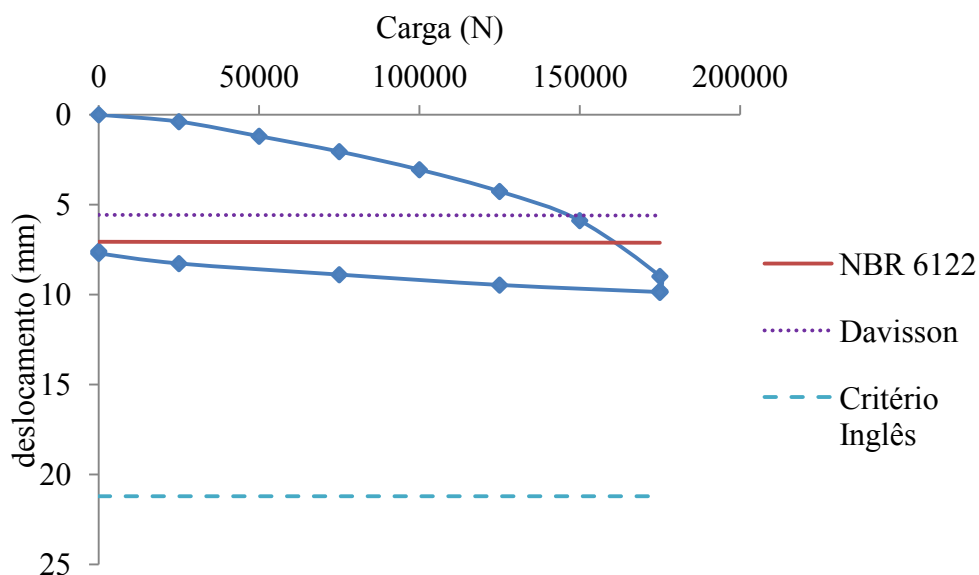


FIGURA 4.36 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO - PROTÓTIPO ESTACA DE AÇO - (90 cm)  
FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

#### 4.6 COMPARATIVOS ENTRE PROTÓTIPOS AÇO X ESTAPET

TABELA 4.7 - VALORES ECE PARA OS PROTÓTIPOS DE AÇO E ESTAPET

MÉDIA ECE (kN)					
Tipo	NBR	Veen	Davisson	Inglês	Média (kN)
ESTAPET	52	115	42	100	77,3
Aço	160	202	148	180	172,5

FONTE: DO AUTOR

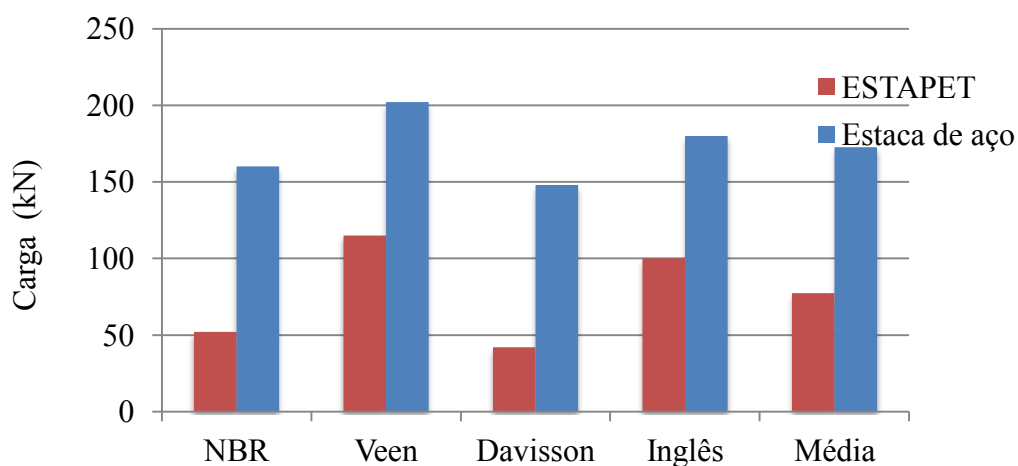


FIGURA 4.37 - COMPARATIVO ECE ENTRE PROTÓTIPOS DE AÇO E ESTAPET  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

TABELA 4.8 - VALORES ECD PARA OS PROTÓTIPOS DE AÇO E ESTAPET

MÉDIA (kN)					
Tipo	Wellington	Hiley	Dinamarq	Janbu	Média (kN)
Estaca de AÇO	304,3	180	379,4	269,04	283,18
ESTAPET	143,9	104,4	269,5	132,7	162,63

FONTE: DO AUTOR

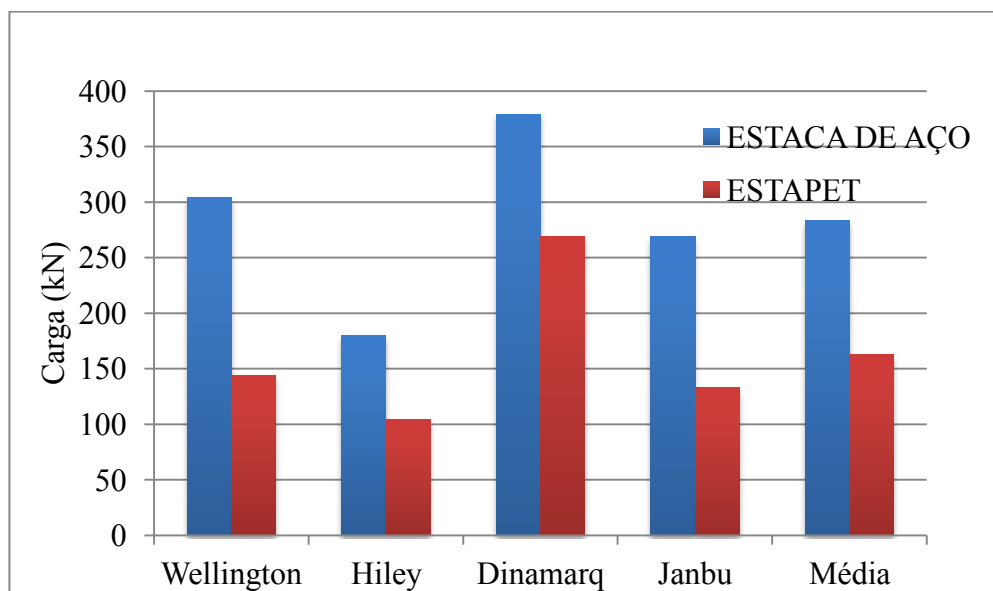


FIGURA 4.38 - COMPARATIVO ECD ENTRE PROTÓTIPOS DE AÇO E ESTAPET  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

TABELA 4.9 - RESULTADOS MÉDIOS ECD E ECE

Tipo	Comparativo ECExECD (ESTAPET e aço) (kN)	
	ECE	ECD
ESTAPET	77,3	162,63
Estaca de Aço	172,5	283,18

FONTE: DO AUTOR

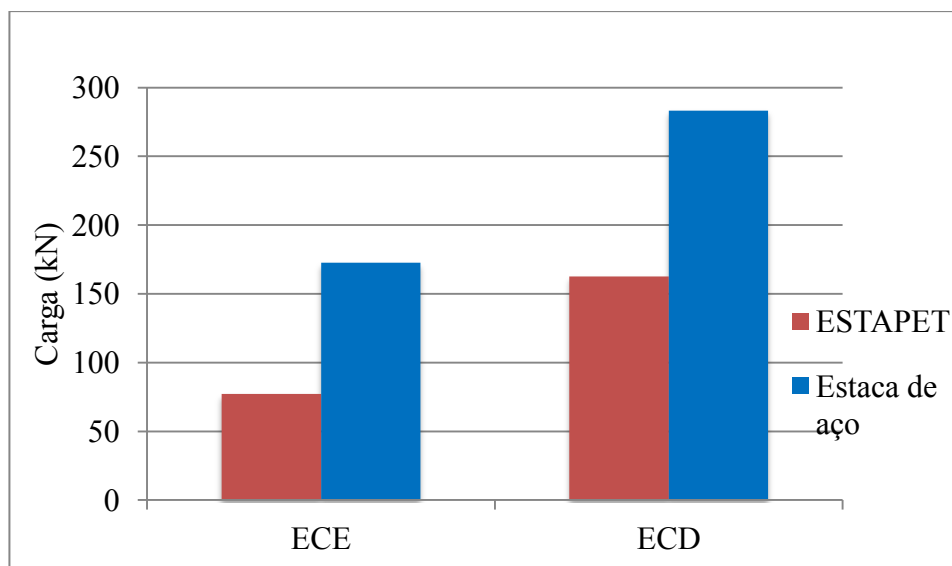


FIGURA 4.39 - COMPARATIVO ENTRE A MÉDIA DOS RESULTADOS ECE X ECD PARA PROTÓTIPOS ESTAPET E AÇO  
 FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

Em relação ao comparativo entre resultados ECE, a ESTAPET protótipo apresentou grande perda de suporte em relação ao protótipo de aço, com capacidade de suporte médio de 77,3 kN contra 172,5 kN da estaca de aço. Esses valores são 55,2 % inferiores ao aço. A diferença se deve ao solo apresentar uma grande compacidade, conforme demonstra o ensaio CPT em (APÊNDICE 3) . Lembrando que o ensaio ECE para a estaca de aço foi realizado com 97 cm cravados de estaca e 90 cm de ESTAPET.

Os ensaios ECD foram realizados em cotas diferentes com a ESTAPET a 75 cm e a estaca de aço a 97 cm. Por este fato, o comparativo percentual não é válido, pois, caso fosse possível continuar a cravação, a ESTAPET iria apresentar ganho maior de capacidade suporte ECD. A ESTAPET apresenta 42,5% de resistência dinâmica inferior ao aço nestas cotas.

Analisando o ECD na mesma cota de 50 cm, temos um valor de resistência para a ESTAPET de 66,7 kN, contra 77 kN da estaca de aço, representando uma resistência dinâmica inferior a da estaca de aço de 13%, comprovando similaridade com o modelo.

## 4.7 COMPARAÇÕES ENTRE PROTÓTIPO E MODELO.

### 4.7.1 Comparações entre ensaios ECE entre modelos e protótipos

Dos gráficos (FIGURA 4.14) e (FIGURA 4.29) dos resultados agrupados dos ensaios ECE dos modelos e dos gráficos (FIGURA 4.34) e (FIGURA 4.36) dos ensaios ECE dos protótipos pode ser comparado o deslocamento no descarregamento do ensaio. Seguem os dados abaixo na (TABELA 4.10).

TABELA 4.10 - COMPARATIVO DESLOCAMENTO NA DESCARGA ENTRE MODELO E PROTÓTIPO

<b>Tipo de estaca</b>	<b>Deslocamento do Modelo (<math>\rho_m</math>)(mm)</b>	<b>Fator de Escala (N)</b>	<b>deslocamento previsto (<math>\rho_x</math>) (mm)</b>	<b>deslocamento protótipo (<math>\rho_p</math>)(mm)</b>
ESTAPET	3,5	4,68	16,38	16
Estaca de aço	0,25	4,83	1,21	1,2

FONTE: DO AUTOR

Pode ser percebida a similaridade de deslocamento da parcela elástica do material. O fator tempo, no entanto, é importante em um comparativo com a tensão deformação do material devido à fluência inerente dos polímeros.

Segue (TABELA 4.11) e (TABELA 4.12) do comparativo de outras grandezas, entre modelo das estacas e os protótipos em aço e ESTAPET.

TABELA 4.11 – COMPARATIVO DE ALGUMAS GRANDEZAS ENTRE MODELO E PROTÓTIPO: (ESTACAS DE AÇO)

<b>Grandeza</b>	<b>Modelo</b>	<b>FATOR DE ESCALA (N)</b>		<b>Protótipo</b>
	<b>Estaca de aço</b>	<b>(M)</b>	<b>Previsão</b>	<b>Estaca de aço</b>
Deslocamento elástico (mm)	0,25	4,8	1,2	1,2
Deslocamento total (mm)	6,0	4,8	29,0	9,1
Deslocamento solo (mm)	5,75	4,8	27,8	7,9
Área (mm <sup>2</sup> )	961,0	23,3	22500,0	22500,0
Força total(N)	2298,0	112,7	258935,4	172500,0
Tensão na ruptura ECE (MPa)	2,4	4,8	11,5	7,7

FONTE: DO AUTOR

TABELA 4.12 – COMPARATIVO DE ALGUMAS GRANDEZAS ENTRE MODELO E PROTÓTIPO: (ESTAPET)

Grandeza	Modelo	FATOR DE ESCALA (N)		Protótipo
	ESTAPET	(N)	Previsão	ESTAPET
Deslocamento elástico (mm)	3,5	4,7	16,4	16,0
Deslocamento total (mm)	8,5	4,7	39,8	21,0
Deslocamento solo (mm)	5,0	4,7	23,4	5,0
Área (mm <sup>2</sup> )	961,0	21,9	21025,0	21025,0
Carga total(N)	2105,0	102,5	215769,3	77300,0
Tensão na ruptura ECE (MPa)	2,2	4,7	10,3	3,7

FONTE: DO AUTOR

Os solos na natureza são heterogêneos. Para tentar obter uma perfeita relação entre modelo e protótipo, teríamos de encontrar um solo na natureza com ângulo atrito interno igual ao modelo, além de granulometria semelhante, forma dos grãos, teor de umidade, etc. Dessa forma, poderíamos encontrar o mesmo nível de tensão de suporte.

Neste trabalho, o solo do modelo e do protótipo, apesar de serem constituídos por uma areia fina, apresentam compacidades diferentes se compararmos o resultado da sondagem do protótipo que indica um ângulo de atrito superior a 40<sup>0</sup>, maior que os 36<sup>0</sup> obtidos nos ensaios de cisalhamento do solo do modelo. Outra observação importante é que os comprimentos das estacas dos protótipos, para serem similares ao modelo, deveriam ter o comprimento de 5,64 metros para a ESTAPET e 5,76 metros para a estaca de aço, porém, a alta compacidade limitou a cravabilidade dessas estacas (fato já esclarecido), limitando coincidentemente o comprimento aos mesmos 1,2 metros do modelo.

Levando em conta as observações do parágrafo acima, pode ser comentado de uma forma geral que a deformação elástica da estaca foi mantida, conforme já explicado na (TABELA 4.10), contudo, devido à maior compacidade da areia do protótipo, a parcela de deslocamento do solo deste foi menor.

Assim, em relação à força ou tensão máxima aplicada a deformabilidade da ESTAPET, esta fica evidenciada no solo mais compacto, refletindo em capacidade de suporte de ruptura menor.

Apesar das imprecisões já citadas e as diferenças em avaliar carga ou tensão com deformação ou deslocamento, em relação a tempo e formas de execução de ensaios de materiais e estacas, segue gráfico ilustrativo da (FIGURA

4.40) das tensões aplicadas em escala logarítmica aos materiais e suas deformabilidades, com o intuito de prever a tendência do comportamento do solo com materiais diferentes, e poder entender os dados da (TABELA 4.11) e (TABELA 4.12).

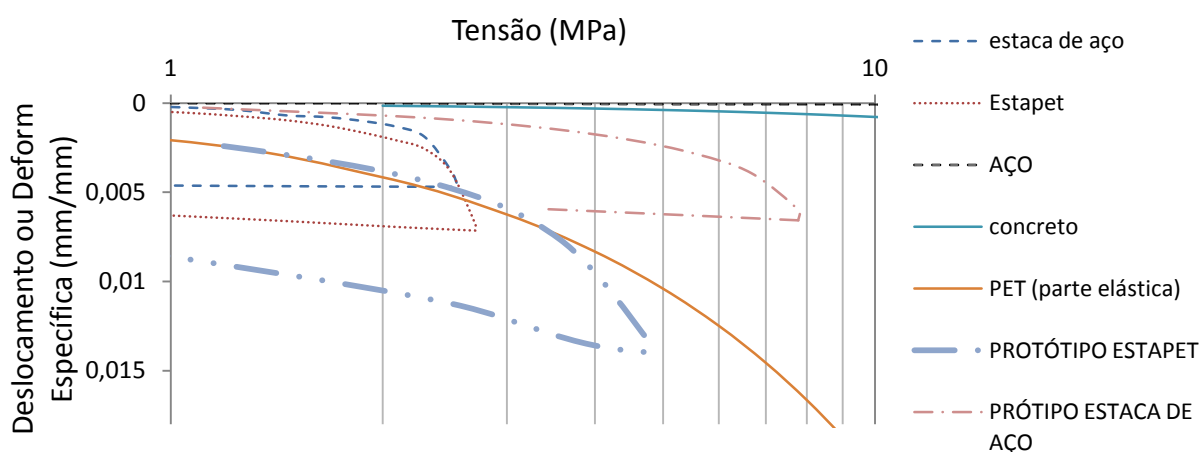


FIGURA 4.40 - COMPARATIVO ENTRE A MÉDIA DOS RESULTADOS ECE PROTÓTIPOS. MODELOS E AMOSTRAS DE ESTAPET, CONCRETO E AÇO NA FASE ELÁSTICA. FONTE: ELABORADA PELO AUTOR

Os dados para o aço e concreto utilizado são usuais em fundações, como o módulo de elasticidade adotado, já nos ensaios ECD. A deformação específica refere-se à razão entre o alongamento dos materiais testados com seu comprimento, na fase elástica. A tensão reporta-se à aplicação de carga nos materiais.

Para a ESTAPET, é verificado que a deformação gerada no ensaio de compressão na fase elástica se repete de forma similar dois casos do trabalho, no modelo e, principalmente, no protótipo quando é atingido o solo compacto. Dessa forma, a deformação do protótipo da ESTAPET fica evidenciada no gráfico da (FIGURA 4.40) e justificada a menor capacidade de suporte em casos de solos muito compactos. Já o protótipo da estaca de aço apresenta deslocamento no solo, apesar de compacto, refletindo em elevada resistência de suporte nesse caso.

Outro aspecto importante a observar é que mesmo a estaca de aço apresenta gráfico de carga x deslocamento com acelerada deformação no início do ensaio, típica de estacas com baixa resistência lateral. O fato de a estaca ser muito curta acelerou este comportamento. O solo nos primeiros centímetros pouco resistente também colaborou com este formato de gráfico.

Nas comparações entre situações do modelo e do protótipo, é necessária a identificação de qual da parcela inerente ao deslocamento total é preponderante.

#### 4.7.2 Comparações entre ensaios ECD entre modelos e protótipos

Como já demonstrado, a capacidade de suporte da ESTAPET nos ensaios estáticos é menor em relação à previsão de suporte através dos ensaios dinâmicos, porém, em solos mais compactos esta diferença se acentua. Na verdade, é a perda de energia que se eleva durante a cravação em solos cada vez mais compactos.

Através das comparações de resultados entre modelo e protótipo, podem ser avaliados os critérios teóricos apresentados na revisão bibliográfica em 2.4.1 e os valores adotados na fase de análise de resultados. Segue a (TABELA 4.13) com os valores calculados para a deformação elástica do material (*C2*) e *quake* (*C3*), para modelo e protótipo.

TABELA 4.13 – VALORES CALCULADOS DE *C2* E *QUAKE* (*C3*) PARA MODELO E PROTÓTIPO

ESTACAS	ECE <i>R</i> (N)					repique	<i>C - C2</i>	<i>C3/C</i> (%)
		<i>L</i> (mm)	<i>E</i> (MPa)	<i>A</i> (mm <sup>2</sup> )	<i>C2</i> (mm)	<i>C</i> (mm)	<i>C3</i> (mm)	
ESTAPET MOD.	2100	1200	28000	961	0,09	1,50	1,41	93,76
ESTAPET PROT.	77300	1500	28000	21025	0,20	6,00	5,80	96,72
EST. AÇO MOD.	2298	1200	280000	961	0,01	1,00	0,99	98,98
EST. AÇO PROT.	172500	1500	280000	22500	0,04	1,50	1,46	97,26

FONTE: DO AUTOR

TABELA 4.14 – AVALIAÇÃO DO *QUAKE*

ESTACAS	<i>C3</i> = 5% de <i>B</i> (mm)	<i>C3</i> =0,8* <i>C</i> (mm)	<i>C3</i> = 2,54 (mm)	<i>C3</i> calc (mm)
ESTAPET MOD.	2,19	1,20	2,54	1,41
ESTAPET PROT.	10,25	4,80	2,54	5,80
EST. AÇO MOD.	2,19	0,80	2,54	0,99
EST. AÇO PROT.	10,61	1,20	2,54	1,46

FONTE: DO AUTOR



Os valores de  $C2$  foram definidos aplicando a equação (2.29). Como foi obtido o valor de carga de ruptura nos ensaios ECE, portanto na carga máxima, pode ser determinado o valor de  $C2$  e, subsequentemente, o valor de quake  $C3$ .

Na análise da (TABELA 4.14), foi comparado o valor calculado do quake com os parâmetros pré-estabelecidos na seção 2.4.1 verificando-se que o valor de  $C3$  calculado para o protótipo da ESTAPET é superior em 128% ao valor de  $C3$  quando estabelecido constante 2,54 mm. Para a estaca de aço do modelo, o valor constante de 2,54 mm é superior em 156% ao valor do  $C3$  calculado. Já o critério de utilizar para  $C3$  5% do valor do diâmetro circunscrito, apresenta índices para a estaca de aço do protótipo 626% superior ao valor calculado.

O parâmetro adotado neste trabalho para  $C3$  de 80 % do valor do repique lido variou entre 13% a 19%, inferiores ao valor de  $C3$  calculado, demonstrando semelhança em diferentes escalas e materiais quando utilizada a carga de ruptura.

## 5 CONCLUSÃO

A pesquisa utilizou ferramentas aplicadas na geotecnia, no caso, ferramentas para utilização em conferências ou aferições de capacidade de suporte. Por isso, o trabalho foi experimental e comparativo entre dois materiais com características termomecânicas diferentes: o aço e um polímero, o PET. Assim, após uma série de ensaios de laboratório, de campo e análises dos resultados obtidos, algumas conclusões puderam ser relacionadas:

- O material da ESTAPET deve ser mais rígido, e para isso, a sugestão seriam novos estudos com ESTAPET misturada a algum compósito, ou melhorias no processo de extrusão, ou até mudança de processo, evitando bolhas.
- Quanto ao pré-dimensionamento utilizando métodos teóricos e empíricos, os resultados dos métodos teóricos se mostraram um pouco inferiores às capacidades de suporte atingidas. Os resultados obtidos através da formulação semi-empírica, utilizando o método proposto por Aoki Velloso, usando os dados do CPT para o protótipo (em solo muito compacto), foram precisos, o que não ocorreu quando se utilizou a mesma formulação, porém com os dados do SPT. No entanto, confirmou-se que valores de NSPT acima de 50, na prática, devem ser desprezados.
- Os ensaios ECE das estacas modelo de aço apresentam resultados médios de capacidade de carga um pouco superiores às ESTAPETs (em torno de 4,4%). Já no protótipo, a diferença foi mais expressiva (em torno de 124%), demonstrando uma tendência a menor capacidade de suporte da ESTAPET em solos mais compactos, por ser atingido o limite da tensão admissível à compressão do próprio material.
- A eficiência do modelo reduzido, demonstrado pela similaridade dos resultados na etapa II da execução de ensaios dos modelos, aferiu muito bem todo o sistema reduzido do experimento. A estaca de aço e a ESTAPET apresentaram valores de capacidade de suporte muito próximos à média dos resultados apresentados na etapa I, ou seja, 7,1% inferior na estaca de aço e 1,2% inferior na ESTAPET. A etapa II do experimento ainda nos forneceu dados importantes obtidos pelos ensaios estáticos e dinâmicos com estacas modelos de 80 cm e

100 cm, para tornar possível uma avaliação da capacidade de suporte longo do fuste.

- Foi verificado que existe a influência da ponta fechada da estaca modelo de aço em relação à capacidade de suporte média das estacas com ponta aberta. Nos ensaios estáticos ficou constatada a diferença de apenas 4,5% superior para a estaca com ponta fechada.
- As diferenças entre a capacidade de suporte do solo pelos ensaios dinâmicos comprovaram a hipótese de que o módulo de elasticidade menor vai refletir em maior perda de energia necessária à cravação, sendo preciso um maior número de golpes para cravação dessa estaca. Este fato acaba por originar maior capacidade dinâmica, apesar de não refletir a realidade. Isso acontece mais intensamente à medida que mais próximos forem os valores de tensão admissível do solo e resistência à compressão do material. O efeito é maior na perda de energia durante a aplicação de golpes, gerando efeito de mola mais intenso.
- Ficou demonstrado que o parâmetro adotado neste trabalho para quake estabelecido em 80 % do valor de do repique lido apresenta do semelhança em diferentes escalas e materiais quanto mais próxima a carga dinâmica estiver da carga de ruptura.
- Utilizando os recursos de uma prova de carga dinâmica (ensaio DLT em APÊNDICE 5) ficou demonstrado que a estaca de aço apresenta comportamento dinâmico previsível, ou seja, um pouco inferior à capacidade de suporte gerada pelos dados do ECE. A ESTAPET apresentou comportamento errático, devido ao efeito de perda de energia.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa aponta que, para a adoção de fórmulas dinâmicas e estáticas em materiais poliméricos, ajustes nas fórmulas devem ser feitos, e o caminho leva a crer que fatores como os de deformação de solo (*quake*) ou de materiais (*C2*) devam ser continuamente estudados em modelos reduzidos com outros tipos de solo, como solos argilosos que também apresentam um efeito ou comportamento

elástico similar ao da própria ESTAPET. Também resultados em relação ao dumping ( $J_c$ ), podem ser aprimorados.

Os trabalhos em modelos reduzidos deveriam ser incentivados por serem uma ferramenta importantíssima para aferição de equipamentos à geotecnia e conhecimento do comportamento dos diversos tipos de solo e suas interações com as estruturas. O trabalho poderia ter continuação com a verificação de novos protótipos, com a adição de compósitos e ensaios em novos modelos nos mesmos moldes desse trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6122**: Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, 1996 e 2010

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12004**: Determinação do Índice de Vazios Máximo de Solos Não Coesivos. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12051**: Determinação do Índice de Vazios Mínimo de Solos Não Coesivos. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6508**: Determinação da Massa Específica- Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12131**: Estacas – Prova de Carga Estática. Rio de Janeiro, 2005. Rio de Janeiro, 1994.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13208**: Estacas – Ensaio de Carregamento Dinâmico, 1994.

ALMEIDA, H. R. de. **Monitoração de Estacas e o Problema de Tensões na Cravação**. 1985. 83 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1985.

ARAÚJO, M. G. **Avaliação de Métodos de Controle de Cravação**. 1988. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1988.

ALONSO, U. R. **Previsão e Controle das Fundações**. São Paulo: Blucher, 1991.

ASHFORD, S. A. Drivability of Glass FRP Composite Piling. **Journal of Composites for Construction**. v. 5, n. 1, p.58-60, February, 2001.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D4253** - Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of soils Using a Vibratory Table. West Conshohocken (PA), 1983; 2006.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM-D4945** - Standard Test Method for High Strain Dynamic Testing of Deep Foundations.. West Conshohocken (PA), 2012.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM-D6110** - Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics. West Conshohocken (PA), jan. 2010.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM-D695**- Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. West Conshohocken (PA), jan. 2010.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM-E1641**- Standard Test Method for Decomposition Kinetics by Thermogravimetry. West Conshohocken (PA), 1999.

AVELINO, J. D. **Análise de Desempenho de Estacade Fundação em um Terreno com Presença de Solos Moles**. 2006. 119 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

BERNARDES, G. de P. **Dynamic and Static Testing of Large Model Piles in Sand**. 1989. Tese (Nowegian Institute of Thecnology) – University of Trondheim, 1989.

BOWLES, J.E. **Foundation Analysis and Design**. New York: McGraw-Hill International, 1996.

BRANDON, T.L.; CLOUGH, G.W.; RAHARDJO, P.P. Fabrication of Silty Sand Specimens for Large and Small-scale tests. **Geotechnical Testing Journal**, v. 14, n.1, p.46-55, March 1991.

BUENO, B. de S.; LIMA, D. C. de; ROHM, S. A. **Capacidade de Carga de Fundações Rasas**. Viçosa: Oficinas Gráficas de Imprensa da Universidade Federal de Viçosa, 1985.

CALLISTER, W.D. **Materials Science and Enginnering**, An Introduction. New York: John Wiley & Sons, 1994.

CANDIAN, L. M. **Estudo do Polietileno de Alta Densidade Reciclado para Uso em Elementos Estruturais**. 2007. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas) – Universidade de São Carlos, 2007.

CAVASSANI, M. R. P. **Avaliação da Capacidade de Carga de Estacas Metálicas Tubulares de Alta Resistência através de Provas de Carga Dinâmica de Energia Crescente**. 2005. 177 f. Dissertação (Centro Tecnológico) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2005.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Fundações por Estacas**: Projeto Geotécnico. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CONSTANZI, M. A. *et al.* Avaliação da Fluência de Geotexteis não Tecidos com Ensaio Acelerados. **Solos e Rochas**. v. 26, n. 3, p.217-228. São Paulo, set./dez. 2003.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thonsom, 2007.

DAS, B. M. **Principles of Foundation Engineering**. 6. ed. New York: Thonsom, 2007.

DELL'AVANZI, E. *et al.* Estudo do Comportamento de Estruturas Grampeadas Utilizando Modelos Reduzidos – Conceitos Teóricos para Garantia da Similitude Modelo – Protótipo. In: CONFERÊNCIA LUSO-BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Anais...** Curitiba, 2006.

FIDALGO, A. T. M. **Propriedades Térmicas e Mecânicas do PET Reciclado**. Monografia (Curso de Graduação em Engenharia de Materiais)- Universidade Estadual Paulista, 2003.

FLEMING, W.G.K. A new method for single pile settlement prediction and analysis. **Geotechnique**. v. 2, n. 3, p. 411-425.

FOÁ, S. B. **Análise do Ensaio de Carregamento Dinâmico de Energia Crescente para o Projeto de Fundações Profundas**. 2001. 200 f. Dissertação (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, 2001.

FROST J. D.; HAN, J. Behaviour of interfaces between fibre-reinforced polymers and sands. **J Geotech Geo-environ Eng**. v. 125, n. 8, p.633-640. 1999.

GALBIATI, A. F. **O Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos e a Reciclagem**. 2003. Disponível em <[http://www.amda.org.br/imgs/up/Artigo\\_15.pdf](http://www.amda.org.br/imgs/up/Artigo_15.pdf)> Acesso em 20 set. 2010.

GONÇALVES, C.; BERNARDES, G. de P.; GONÇALVES, C.; NEVES, L. F. de S. **Estacas Pré-Fabricadas de Concreto**. v. I. São Paulo: Do Autor, 2007.

GONÇALVES, C.; BERNARDES, G. de P.; GONÇALVES, C.; NEVES, L. F. de S. **Estacas Pré-Fabricadas de Concreto**. v. II. São Paulo: Do Autor, 2007.

GONÇALVES, S. F. **Estudo do Comportamento à Compressão de Estacas Metálicas Curtas em Solo Sedimentar**. 2008. 114 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

GUADES, E., *et al.* A Review on the Driving Performance of FRP Composite Piles. **Composite Structures**. v. 94, n. 6, (p.1932-1942). London, May 2012.

GUAMÁ, F. F. M. C. de, *et al.* **Lixo Plástico de sua Produção até a Madeira Plástica**. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Anais... Rio de Janeiro, 2008.

GUIZELINI, A. P. **Estudo do Comportamento Hidromecânico de Solos Visando a Construção de Sistemas de Cobertura Alternativos para Aterros Sanitários**. 2011. 166 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, 2011.

ISCIMEN, M. **Shearing behavior of curved interfaces**. 2004. 130 f. Tese (Master of Science in Civil and Environmental Engineering) - Georgia Institute of Technology, 2004.

ISKANDER M. G; STACHULA, A. Wave equation analyses of fibre-reinforced polymer composite piling. **J Compos Constr**. v. 6, n. 2, p. 88-96. 2002.

ISKANDER, M.; HANNA, S. Engineering Performance of FRP Composite Piling. TRB 2002 Session On Fiber Reinforced Polymer Piles. **Transportation Research Board**. USA, 2003.

KUERBIS, R.; VAID, Y.P. Sand sample preparation – the slurry deposition method. **Soils and Foundations**. v. 28, n. 4, p.107-118. 1988.

LAMBE, T.W.;WHITMAN, R.V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1979.

LODI, P. C. **Aspectos da Degradação de Geomembranas Poliméricas de PEAD e PVC**. 2003. 354 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, 2003.

MAGALHÃES, P. H. L. **Avaliação dos Métodos de Capacidade de Carga e Recalque de Estacas Hélice Contínua Via Provas de Carga**. 2005. 243 f. Dissertação (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, 2005.

MENEZES, S. M.; CARVALHO, D. de; ALBUQUERQUE, P. J. R. de. Estimativa de Cargas Residuais obtidas na Ponta de Estacas em Solos Porosos. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológica**. v. 26, n. 01, p. 03-10. Londrina, jan./jun., 2005.

MIDDENDORP, P. Thirty Years of Experience With the Wave Equation Solution Based on the Method of the Characteristics. 7th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to piles. **Anais...** Malásia, 2004.



MIURA, S.; TOKI, S. A sample preparation method and its effect on the static and cyclic deformation – strength properties of sand. **Soils and Foundations**. v. 22, n. 1, p. 61-76. 1982.

MORE, Charles J. *et al.* A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. **Marine Pollution Bulletin**. n. 42, p.1297-1300. 2001.

PACHECO, J. R; PERALTA-ZAMORA, P. G. Integração de Processos Físico – Químicos e Oxidativos Avançados Para Remediação ou Percolado de Aterro Sanitário (Chorume). **Engenharia Sanitária Ambiental**. v. 9, n. 4, p.306-311.out./dez. 2004.

PANDO, M. A. **A laboratory and field study of composite piles for bridge substructures**. 2006. 396 f. Dissertation – PhD (Civil Engineering Department) - Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.

PEREIRA, T. A. B. P. **Análise e dimensionamento de estacas sujeitas a compressão axial-aplicações na região administrativa especial de Macau**. 2008. 439 f. Dissertação (Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia) – Universidade do Porto, 2008.

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PITZ, D.; DELL'AVANZI, E.; BERNARDES, G. de P. Avaliação do Potencial do Uso de Estacas Fabricadas com Plástico reciclado – ESTAPET – Através de Modelos Reduzidos. In: VII SEMINÁRIO DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS. **Anais...** São Paulo, 2012.

POULOS, H. G.; DEVIS, E. H. **Pile Foundation Analysis and Design**. Canada: John Wiley & Sons, 1980.

PRESTI, D.C.F.*et al.* Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: a comparative study. **Geotechnical Testing Journal**. v.15, n. 2, p. 180-189. 1992.

RAMALHO JUNIOR, F. *et al.* **Os Fundamentos da Física**. São Paulo: Moderna, 1982.

REBELO, K. M. W. **Resistência entre geomembranas e solos através do ensaio de ring-shear**. 2003. 194 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, 2003.

REIS, J. H.C. **Modelos de Atrito estático de interfaces de contato entre areia e concreto**. 2006. Tese (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, 2006.

FLORAL, R. F.; PETERS, S. T. **Modern Plastic Encyclopedia**. New York: The McGraw-Hill Companies, 1996.

SACHET, J. **Caracterização de Solo e Estudo da Capacidade de Suporte de Estacas PET**. 2010. Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, 2010.

SADREKARIMI, J. Surface roughness effects on the bearing capacity of piles in dry sand. **EJGE - Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. v. 14. 2009.

SANTOS, A. J. **Fundações por estacas- Acções verticais - Elementos teóricos**. Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2008.

SANTOS, D. B. dos S. **Estudo do Uso de Garrafas Pet em Geotecnia**. 2005. 213 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

SOARES, F. L. **Análise Experimental de Carga Dinâmica em Tubulões a Céu Aberto no Campo Experimental de Fundações da EESC/ USP**. 2002. 158 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, 2002.

TAKAGI, N.; *et al.* Development of a strain measurement system for soils and its application. **Soils and Foundations**. v. 23, n. 3, p. 65-79. Set. 1983.

TERZAGUI, Karl. **Theoretical Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1943.

TERZAGUI, K.; RALPH, P.; MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996.

TERZAGHI, K. **Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1948.

TSCHEBOTARIOFF, G. P. **Fundações Estruturas de Arrimo e Obras de Terra**. São Paulo: McGraw-Hill, 1978.

VALVERDE, S. Relatório 9691 da empresa PDI Engenharia. **Ensaio de Carregamento Dinâmico**. Pool de Empresas de Combustíveis de Itajaí – Contratante Pitz Fundações Ltda. Itajaí, 1996.

VELLOSO, D. de A.; LOPES, F. R. **Fundações**: Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VESIC, A. S. Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations. **Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division**. p. 45-73. Jan. 1973.

VIEIRA, S. H. A. **Controle de Cravação de Estacas Pré-moldadas**; Avaliação de Diagramas de Cravação e Fórmulas Dinâmicas. 2006. 122 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

## APÊNDICES

APENDICE 1 – DADOS DOS ENSAIOS ECD: MODELO E PROTÓTIPO .....	133
APENDICE 2 – DADOS DOS ENSAIOS ECE: MODELO E PROTÓTIPO .....	145
APENDICE 3 – SONDAÇÃO CPT E SPT .....	159
APENDICE 4 – DADOS DE CRAVAÇÃO: MODELO E PROTÓTIPO .....	161
APENDICE 5 – ENSAIO DLT – PROTÓTIPOS .....	166

## APÊNDICE – 1

### LEITURA DE DADOS DOS ENSAIOS ECD EXECUTADOS COM OS MODELOS REDUZIDOS NAS ETAPAS I E II E PROTÓTIPOS - RESULTADOS MÉDIOS CALCULADOS.

TABELA 1.1 - DADOS ECD – ESTAPET 1- ETAPA I - LEITURA DE DADOS

	cota in. (cm)	cota fin. (cm)	hqueda (cm)	leitura rep.(cm)	nega no repique
Repique 01	30	33	20	0,00	0,35
	30	33	30	0,00	0,45
	30	33	50	0,00	0,51
Repique 02	50	52,5	20	0,01	0,30
	50	52,5	30	0,03	0,40
	50	52,5	50	0,06	0,50
Repique 03	70	72,8	20	0,02	0,20
	70	72,8	30	0,04	0,27
	70	72,8	50	0,05	0,39
	70	72,8	70	0,02	0,49
Repique 04	90	91,2	30	0,07	0,20
	90	91,2	50	0,10	0,30
	90	91,2	70	0,12	0,40

TABELA 1.2 - ECD – ESTAPET 1 - ETAPA I- RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	hqueda (cm)	Wellington	Hilley	Carga (kgf) Dinamarq	Janbu	Média (N)
Repique 01	20	80,00	65,69	74,27	66,47	716,09
	30	93,33	76,64	86,95	77,57	836,23
	50	138,61	113,83	127,81	115,10	1238,39
Repique 02	20	91,80	75,39	85,63	76,45	823,18
	30	101,20	83,11	96,99	84,68	914,94
	50	132,08	108,46	128,99	110,96	1201,20
Repique 03	20	133,33	109,49	123,35	111,25	1193,57
	30	144,83	118,93	138,59	121,57	1309,79
	50	168,67	138,51	161,78	141,51	1526,21
Repique 04	70	196,00	160,95	181,32	163,15	1753,55
	30	178,72	146,76	180,22	151,93	1644,07
	50	200,00	164,23	204,28	170,24	1846,87
	70	213,04	174,94	217,54	181,15	1966,69

TABELA 1.3 - DADOS ECD – ESTAPET 2- ETAPA I- LEITURA DE DADOS

	<b>cota in.(cm)</b>	<b>cota fin. (cm)</b>	<b>hqueda (cm)</b>	<b>leitura rep.(cm)</b>	<b>nega no repique</b>
Repique 01	30	33,8	20	0	0,35
	30	33,8	30	0	0,4
	30	33,8	50	0	0,46
Repique 02	50	52,7	20	0,01	0,23
	50	52,7	30	0,03	0,3
	50	52,7	50	0,06	0,44
Repique 03	70	74,2	20	0	0,16
	70	74,2	30	0,04	0,22
	70	74,2	50	0,06	0,36
	70	74,2	70	0,08	0,5
	70	74,2	90	0	0,65
Repique 04	90	91,3	30	0,05	0,2
	90	91,3	50	0,08	0,3
	90	91,2	70	0,11	0,4

TABELA 1.4 - ECD – ESTAPET 1 - ETAPA I - RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	<b>hqueda (cm)</b>	<b>Wellington</b>	<b>Hilley</b>	<b>Carga (kgf)</b>		<b>Média (N)</b>
				<b>Dinamarq</b>	<b>Janbu</b>	
Repique 01	20	80,00	65,69	74,27	66,47	716,09
	30	105,00	86,22	96,99	87,20	938,53
	50	152,17	124,96	139,26	126,27	1356,65
Repique 02	20	119,15	97,84	108,95	99,06	1062,51
	30	133,33	109,49	126,11	111,56	1201,21
	50	148,94	122,30	145,03	125,19	1353,64
Repique 03	20	175,00	143,70	149,74	143,82	1530,65
	30	175,00	143,70	165,97	146,88	1578,89
	50	179,49	147,39	173,84	150,98	1629,24
	70	181,48	149,03	178,02	152,82	1653,39
	90	193,85	159,18	178,15	160,92	1730,24
Repique 04	30	186,67	153,28	180,22	157,33	1693,75
	50	205,88	169,06	204,28	174,27	1883,74
	70	215,38	176,87	217,54	182,76	1981,38

TABELA 1.5 - DADOS ECD – ESTACA DE AÇO 3- ETAPA I - LEITURA DE DADOS

	<b>cota in.(cm)</b>	<b>cota fin. (cm)</b>	<b>hqueda (cm)</b>	<b>leitura repique(cm)</b>	<b>nega no repique</b>
Repique 01	30	34,6	20	0	0,5
	30	34,6	30	0	0,65
	30	34,6	50	0	1
Repique 02	50	55	20	0	0,35
	50	55	30	0	0,45
	50	55	50	0	0,62
Repique 03	70	73,2	20	0,05	0,22
	70	73,2	30	0,06	0,3
	70	73,2	50	0,07	0,5
	70	73,2	70	0,1	0,7
Repique 04	90	91,9	30	0,07	0,21
	90	91,9	50	0,07	0,37
	90	91,9	70	0,07	0,57

TABELA 1.6 - ECD – ESTACA DE AÇO 3 - ETAPA I - RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	<b>h. queda (cm)</b>	<b>Carga (kgf)</b>				<b>Média (N)</b>
		<b>Wellington</b>	<b>Hilley</b>	<b>Dinamarq</b>	<b>Janbu</b>	
Repique 01	20	56,00	41,72	55,14	46,66	498,80
	30	64,62	48,14	63,68	53,84	575,68
	50	70,00	52,15	69,14	58,33	624,06
Repique 02	20	80,00	59,60	78,25	66,65	711,25
	30	93,33	69,53	91,39	77,76	830,04
	50	112,90	84,11	110,69	94,07	1004,44
Repique 03	20	114,29	85,14	122,90	97,17	1048,75
	30	127,27	94,82	135,67	107,98	1164,34
	50	130,84	97,48	136,62	110,45	1188,47
	70	130,67	97,35	137,13	110,34	1188,71
Repique 04	30	171,43	127,71	191,27	146,94	1593,39
	50	172,84	128,77	183,07	146,50	1577,92
	70	161,98	120,68	167,63	136,53	1467,03

TABELA 1.7- DADOS ECD – ESTAPET 4 - ETAPA I - LEITURA DE DADOS

	<b>cota inicial(cm)</b>	<b>cota final (cm)</b>	<b>hqueda (cm)</b>	<b>leitura repique (cm)</b>	<b>nega no repique</b>
Repique 01	30	34,6	20	0,008	0,25
	30	34,6	30	0,015	0,4
	30	34,6	50	0,03	0,55
	30	34,6	70	0,04	1
Repique 02	50	55	20	0,01	0,25
	50	55	30	0,03	0,4
	50	55	50	0,06	0,55
	50	55	70	0,08	1
Repique 03	70	73,2	20	0,015	0,2
	70	73,2	30	0,035	0,3
	70	73,2	50	0,07	0,47
	70	73,2	70	0,085	0,66
Repique 04	90	91,9	30	0,12	0,2
	90	91,9	50	0,15	0,33
	90	91,9	70	0,18	0,43

TABELA 1.8 - ECD – ESTAPET 04 - ETAPA I- RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	<b>hqueda (cm)</b>	<b>Carga (kgf)</b>				<b>Média(N)</b>
		<b>Wellington</b>	<b>Hilley</b>	<b>Dinamarq</b>	<b>Janbu</b>	
Repique 01	20	110,24	90,52	101,09	91,64	1032,99
	30	103,07	84,64	96,99	85,92	972,61
	50	123,89	101,74	118,11	103,50	1173,49
	70	96,08	78,90	93,29	80,28	914,32
Repique 02	20	109,80	90,17	101,09	91,35	1030,11
	30	101,20	83,11	96,99	84,68	960,19
	50	120,69	99,11	118,11	101,35	1152,09
	70	94,23	77,38	93,29	79,04	901,98
Repique 03	20	134,94	110,81	123,35	112,31	1263,87
	30	132,28	108,63	126,11	110,85	1253,82
	50	138,61	113,83	136,54	116,71	1326,19
	70	139,50	114,55	137,93	117,37	1335,75
Repique 04	30	161,54	132,65	180,22	139,90	1607,97
	50	172,84	141,93	187,83	148,69	1705,50
	70	188,46	154,76	203,96	161,87	1856,87



TABELA 1.9 - DADOS ECD – ESTACA DE AÇO 05 - ETAPA I- LEITURA DE DADOS

	<b>cota inicial(cm)</b>	<b>cota final (cm)</b>	<b>hqueda (cm)</b>	<b>leitura repique(cm)</b>	<b>nega no repique</b>
Repique 01	30	35,2	10	0	0,2
	30	35,2	20	0	0,3
	30	35,2	30	0	0,45
	30	35,2	50	0	0,7
	30	35,2	70	0	0,95
Repique 02	50	54,4	10	0	0,15
	50	54,4	20	0	0,25
	50	54,4	30	0	0,4
	50	54,4	50	0	0,6
	50	54,4	70	0	0,8
Repique 03	70	73,46	10	0	0,13
	70	73,46	20	0,05	0,2
	70	73,46	30	0,06	0,3
	70	73,46	50	0,07	0,45
	70	73,46	70	0,1	0,65
Repique 04	90	92,14	30	0,07	0,22
	90	92,14	50	0,08	0,35
	90	92,14	70	0,1	0,5

TABELA 1.10. ECD – ESTACA DE AÇO 05 - ETAPA I - RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	<b>hqueda (cm)</b>	<b>Carga (kgf)</b>				<b>Média (N)</b>
		<b>Wellington</b>	<b>Hilley</b>	<b>Dinamarq</b>	<b>Janbu</b>	
Repique 01	10	70,00	52,15	68,12	58,31	621,44
	20	93,33	69,53	90,96	77,75	828,95
	30	93,33	69,53	91,39	77,76	830,04
	50	100,00	74,50	98,26	83,32	890,21
	70	103,16	76,85	101,59	85,95	918,89
Repique 02	10	93,33	69,53	90,01	77,72	826,51
	20	112,00	83,44	108,60	93,29	993,32
	30	105,00	78,23	102,54	87,47	933,11
	50	116,67	86,92	114,31	97,20	1037,74
	70	122,50	91,26	120,30	102,07	1090,32
Repique 03	10	107,69	80,23	103,30	89,66	952,20
	20	124,44	92,71	134,73	105,99	1144,70
	30	127,27	94,82	135,67	107,98	1164,34
	50	144,33	107,53	151,39	122,00	1313,11
	70	140,00	104,30	147,45	118,33	1275,20
Repique 04	30	164,71	122,71	182,94	141,02	1528,44
	50	179,49	133,72	193,17	152,63	1647,51
	70	178,18	132,75	190,43	151,18	1631,33

TABELA 1.11- DADOS ECD – ESTACA DE AÇO 1 - ETAPA II- LEITURA DE DADOS

	<b>cota inicial(cm)</b>	<b>cota final (cm)</b>	<b>hqueda (cm)</b>	<b>leitura repique(cm)</b>	<b>nega no repique</b>
Repique 01	30	34	10	0,05	0,30
	30	34	20	0,05	0,40
	30	34	30	0,05	0,50
	30	34	50	0,07	0,60
	30	34	70	0,10	0,75
Repique 02	50	55	20	0,05	0,24
	50	55	30	0,06	0,32
	50	55	50	0,06	0,5
	50	55	70	0,09	0,65
Repique 03	70	73,2	20	0,05	0,22
	70	73,2	30	0,06	0,29
	70	73,2	50	0,06	0,47
	70	73,2	70	0,09	0,63
Repique 04	90	91,9	30	0,07	0,23
	90	91,9	50	0,07	0,39
	90	91,9	70	0,07	0,53

TABELA 1.12. ECD – ESTACA DE AÇO 01 - ETAPA II- RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	<b>hqueda (cm)</b>	<b>Carga (kgf)</b>				<b>Média(N)</b>
		<b>Wellington</b>	<b>Hilley</b>	<b>Dinamarq</b>	<b>Janbu</b>	
Repique 01	10	43,08	32,09	45,82	36,45	393,61
	20	65,88	49,08	68,66	55,55	597,92
	30	80,00	59,60	82,42	67,30	723,29
	50	110,24	82,13	114,31	92,87	998,85
	70	122,50	91,26	128,17	103,36	1113,21
Repique 02	20	105,66	78,72	112,98	89,70	967,66
	30	120,00	89,40	127,43	101,70	1096,35
	50	132,08	98,40	136,62	111,29	1195,96
	70	141,01	105,05	147,45	119,02	1281,32
Repique 03	20	114,29	85,14	122,90	97,17	1048,75
	30	131,25	97,78	140,20	111,41	1201,60
	50	140,00	104,30	145,12	118,05	1268,66
	70	145,19	108,16	152,02	122,59	1319,91
Repique 04	30	158,49	118,08	175,30	135,57	1468,59
	50	164,71	122,71	173,97	139,49	1502,18
	70	173,45	129,22	179,94	146,31	1572,29

TABELA 1.13 - DADOS ECD – ESTACA DE AÇO 2 (100 cm) - ETAPA II - LEITURA DE DADOS

	<b>cota inicial(cm)</b>	<b>cota final (cm)</b>	<b>hqueda (cm)</b>	<b>leitura repique(cm)</b>	<b>nega no repique</b>
Repique 01	30	34,5	20	0,04	0,36
	30	34,5	30	0,06	0,45
	30	34,5	50	0,08	0,61
	30	34,5	70	0,10	0,70
Repique 02	50	53,2	20	0,05	0,24
	50	53,2	30	0,06	0,33
	50	53,2	50	0,06	0,52
	50	53,2	70	0,09	0,7
Repique 03	70	71,7	20	0,05	0,21
	70	71,7	30	0,06	0,31
	70	71,7	50	0,06	0,5
	70	71,7	70	0,09	0,67

TABELA 1.14 ECD – ESTACA DE AÇO 02 (100 cm) - ETAPA II- RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	<b>hqueda (cm)</b>	<b>Carga (kgf)</b>				<b>Média (N)</b>
		<b>Wellington</b>	<b>Hilley</b>	<b>Dinamarq</b>	<b>Janbu</b>	
Repique 01	20	73,68	56,64	76,29	62,05	671,66
	30	87,32	67,12	91,39	73,67	798,75
	50	107,69	82,78	112,71	90,85	985,08
	70	130,67	100,44	137,43	110,34	1197,20
Repique 02	20	105,66	81,22	113,36	89,71	974,88
	30	116,67	89,68	124,05	98,84	1073,10
	50	127,27	97,83	131,81	107,21	1160,31
	70	131,54	101,12	137,43	110,94	1202,58
Repique 03	20	119,15	91,59	129,03	101,40	1102,93
	30	123,53	94,96	131,84	104,76	1137,70
	50	132,08	101,52	136,97	111,30	1204,67
	70	137,06	105,36	143,47	115,66	1253,86

TABELA 1.15 - DADOS ECD – ESTACA DE AÇO 3 (80 cm) - ETAPA II - LEITURA DE DADOS

	<b>cota inicial(cm)</b>	<b>cota final (cm)</b>	<b>hqueda (cm)</b>	<b>leitura repique(cm)</b>	<b>nega no repique</b>
Repique 01	30	33,7	20	0,04	0,28
	30	33,7	30	0,06	0,38
	30	33,7	50	0,08	0,57
	30	33,7	70	0,09	0,75
Repique 02	50	53,3	20	0,05	0,25
	50	53,3	30	0,06	0,33
	50	53,3	50	0,06	0,54
	50	53,3	70	0,09	0,74

TABELA 1.16 ECD – ESTACA DE AÇO 03 (80 cm) - ETAPA II- RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	hqueda (cm)	Carga (kgf)				Média(N)
		Wellington	Hilley	Dinamarq	Janbu	
Repique 01	20	93,33	74,32	97,88	78,81	860,87
	30	102,44	81,57	108,41	86,62	947,60
	50	114,75	91,38	120,78	96,89	1059,49
	70	123,27	98,16	128,72	103,89	1135,11
Repique 02	20	101,82	81,08	109,35	86,40	946,61
	30	116,67	92,90	124,47	98,85	1082,23
	50	122,81	97,79	127,37	103,41	1128,45
	70	124,84	99,41	130,43	105,23	1149,79

TABELA 1.17- DADOS ECD – ESTACA DE AÇO 5 (120 cm PONTA FECHADA) - ETAPA II - LEITURA DE DADOS

	cota inicial(cm)	cota final (cm)	hqueda (cm)	leitura repique(cm)	nega no repique
Repique 01	30	33,8	20	0,01	0,24
	30	33,8	30	0,02	0,33
	30	33,8	50	0,03	0,54
	30	33,8	70	0,04	0,70
Repique 02	50	54	20	0,01	0,23
	50	54	30	0,03	0,3
	50	54	50	0,04	0,5
	50	54	70	0,05	0,67
Repique 03	70	73,7	20	0,01	0,22
	70	73,7	30	0,03	0,29
	70	73,7	50	0,04	0,43
	70	73,7	70	0,05	0,6
Repique 04	90	91,9	30	0,03	0,28
	90	91,9	50	0,04	0,39
	90	91,9	70	0,05	0,5

TABELA 1.18 - ECD – ESTACA DE AÇO 05 (120 cm - PONTA FECHADA) - ETAPA II - RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	hqueda (cm)	Carga (kgf)				Média(N)
		Wellington	Hilley	Dinamarq	Janbu	
Repique 01	20	114,29	85,14	112,98	95,58	1019,98
	30	123,53	92,03	123,68	103,51	1106,87
	50	126,13	93,96	126,73	105,65	1131,17
	70	136,11	101,40	137,13	114,04	1221,71
Repique 02	20	119,15	88,77	117,73	99,66	1063,27
	30	133,33	99,33	135,67	112,13	1201,15
	50	134,62	100,29	136,62	113,02	1211,35
	70	141,01	105,05	143,14	118,33	1268,82
Repique 03	20	124,44	92,71	122,90	104,10	1110,40
	30	137,70	102,59	140,20	115,84	1240,81
	50	155,56	115,89	158,24	130,74	1401,06
	70	156,80	116,82	159,44	131,68	1411,86
Repique 04	30	142,37	106,07	145,04	119,80	1283,19
	50	170,73	127,20	173,97	143,61	1538,77
	70	186,67	139,07	190,43	156,99	1682,87

TABELA 1.19 - DADOS ECD – ESTAPET – 04 (80 cm) - ETAPA II - LEITURA DE DADOS

	cota	cota	hqueda	leitura	nega no
	inicial(cm)	final (cm)	(cm)	repique(cm)	repique
Repique 01	30	34,9	20	0,00	0,30
	30	34,9	30	0,00	0,41
	30	34,9	50	0,01	0,65
	30	34,9	70	0,02	0,91
Repique 02	50	53,8	20	0,01	0,28
	50	53,8	30	0,03	0,39
	50	53,8	50	0,05	0,58
	50	53,8	70	0,06	0,72

TABELA 1.20 - ECD – ESTAPET 04 (80 cm) - ETAPA I I- RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	hqueda (cm)	Carga (kgf)				Média(N)
		Wellington	Hilley	Dinamarq	Janbu	
Repique 01	20	93,33	78,56	86,38	77,53	839,51
	30	102,44	86,23	95,55	85,15	923,40
	50	106,87	89,96	101,72	89,04	968,97
	70	106,52	89,66	102,60	88,85	969,10
Repique 02	20	98,25	82,70	92,06	81,86	887,17
	30	103,70	87,29	100,10	86,83	944,82
	50	115,70	97,39	113,24	97,03	1058,39
	70	130,67	109,99	128,08	109,57	1195,74

TABELA 1.21 - DADOS ECD – ESTAPET – 06 (100 cm) - ETAPA II - LEITURA DE DADOS

	<b>cota inicial(cm)</b>	<b>cota final (cm)</b>	<b>hqueda (cm)</b>	<b>leitura repique(cm)</b>	<b>nega no repique</b>
Repique 01	30	34,9	20	0,00	0,28
	30	34,9	30	0,00	0,47
	30	34,9	50	0,01	0,65
	30	34,9	70	0,02	0,90
Repique 02	50	53,8	20	0,01	0,25
	50	53,8	30	0,03	0,43
	50	53,8	50	0,05	0,60
	50	53,8	70	0,06	0,80
Repique 03	70	72,8	30	0,04	0,33
	70	72,8	50	0,05	0,50
	70	72,8	70	0,08	0,64

TABELA 1.22 - ECD – ESTAPET 6 (100 cm) - ETAPA II - RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	<b>h. queda (cm)</b>	<b>Wellington</b>	<b>Hilley</b>	<b>Carga (kgf)</b>		<b>Média (N)</b>
				<b>Dinamarq</b>	<b>Janbu</b>	
Repique 01	20	100,00	84,17	91,21	82,95	895,83
	30	89,36	75,22	83,49	74,28	805,89
	50	106,87	89,96	101,06	89,01	967,22
	70	107,69	90,65	103,10	89,80	978,12
Repique 02	20	109,80	92,42	101,09	91,35	986,67
	30	94,38	79,44	90,70	78,97	858,73
	50	112,00	94,27	108,92	93,86	1022,64
	70	118,07	99,38	115,23	98,92	1079,02
Repique 03	30	120,00	101,01	115,69	100,70	1093,48
	50	133,33	112,23	128,99	111,80	1215,90
	70	144,12	121,31	141,93	121,19	1321,35

TABELA 1.23- DADOS ECD – ESTAPET – 07 (120 cm) - ETAPA II - LEITURA DE DADOS

	<b>cota inicial(cm)</b>	<b>cota final (cm)</b>	<b>hqueda (cm)</b>	<b>leitura repique(cm)</b>	<b>nega no repique</b>
Repique 01	30	34,9	20	0,00	0,25
	30	34,9	30	0,00	0,35
	30	34,9	50	0,01	0,51
	30	34,9	70	0,02	0,78
Repique 02	50	53,8	20	0,01	0,22
	50	53,8	30	0,04	0,31
	50	53,8	50	0,05	0,48
	50	53,8	70	0,06	0,70
Repique 03	70	74,1	20	0,02	0,20
	70	74,1	30	0,04	0,26
	70	74,1	50	0,07	0,45
	70	74,1	70	0,08	0,65
Repique 04	90	92,4	30	0,07	0,21
	90	92,4	50	0,09	0,35
	90	92,4	70	0,11	0,50

TABELA 1.24 - ECD – ESTAPET 7 (120 cm) - ETAPA II - RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	Hqueda	Carga (kgf)				Média(n)
	(cm)	Wellington	Hilley	Dinamarq	Janbu	
Repique 01	20	112,00	91,97	101,09	92,80	99,46
	30	120,00	98,54	109,64	99,56	106,94
	50	137,25	112,71	127,81	114,20	123,00
	70	124,05	101,87	118,00	103,43	111,84
Repique 02	20	124,44	102,19	113,37	103,42	110,86
	30	127,27	104,51	122,43	106,82	115,26
	50	138,61	113,83	133,93	116,24	125,65
	70	134,25	110,24	130,58	112,53	121,90
Repique 03	20	133,33	109,49	123,35	111,25	119,36
	30	150,00	123,18	143,32	125,91	135,60
	50	144,33	118,52	142,08	121,55	131,62
Repique 04	70	142,03	116,63	139,90	119,42	129,49
	30	171,43	140,77	172,80	145,67	157,67
	50	177,22	145,52	178,27	150,21	162,8
	70	176,58	145	178,02	149,48	162,27

### LEITURA DE DADOS DOS ENSAIOS ECD EXECUTADOS COM OS PROTOTIPOS E RESULTADOS MÉDIOS CALCULADOS

TABELA 1.25 - DADOS ECD – ESTAPET – PROTOTIPO (270 cm) - LEITURA DE DADOS

	cota in.(cm)	cota fin. (cm)	hqueda (cm)	leitura repique(cm)	nega no repique
Repique 01	50	53,4	50	0,3	0,26
	50	53,4	75	0,5	0,275
	50	53,4	100	0,6	0,35
	50	53,4	150	0,7	0,45
Repique 02	75	76,2	50	0,4	0,015
	75	76,2	75	0,5	0,025
	75	76,2	100	0,55	0,045
	75	76,2	150	0,6	0,07

TABELA 1.26 - ECD – ESTAPET - PROTOTIPO (270 cm) – RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	hqueda	Carga (N)				Média (N)
	(cm)	Wellington	Hilley	Dinamarq	Janbu	
Repique 01	50	4329,27	3140,65	5319,63	3822,02	41528,94
	75	5071,43	3679,05	7290,00	4589,69	51575,42
	100	5461,54	3962,05	7816,21	4938,30	55445,23
	150	6656,25	4828,75	9219,19	5988,64	66732,08
Repique 02	50	8255,81	5989,15	20018,13	7812,53	105189,08
	75	9681,82	7023,64	23106,67	9174,77	122467,25
	100	11093,75	8047,92	23796,03	10412,89	133376,47
	150	14391,89	10440,55	26948,45	13272,09	162632,43

TABELA 1.27- DADOS ECD – ESTACA DE AÇO PROTOTIPO (270 cm) - LEITURA DE DADOS

	<b>cota in.(cm)</b>	<b>cota fin. (cm)</b>	<b>hqueda (cm)</b>	<b>leitura repique(cm)</b>	<b>nega no repique</b>
Repique 01	50	52,5	50	0,15	0,2
	50	52,5	75	0,17	0,3
	50	52,5	100	0,2	0,4
	50	52,5	150	0,25	0,5
Repique 02	97	97,4	50	0,08	0,02
	97	97,4	75	0,12	0,03
	97	97,4	100	0,15	0,06
	97	97,4	150	0,15	0,1

TABELA 1.28 - ECD – ESTACA DE AÇO - PROTOTIPO (270 cm) – RESULTADO MÉDIO DOS MÉTODOS

	<b>hqueda (cm)</b>	<b>Wellington</b>	<b>Hilley</b>	<b>Carga (N) Dinamarq</b>	<b>Janbu</b>	<b>Média (N)</b>
Repique 01	50	6454,55	3816,87	7949,08	5666,45	59717,35
	75	6915,58	4089,50	8104,23	6011,20	62801,29
	100	7100,00	4198,56	8199,64	6148,74	64117,35
	150	8520,00	5038,27	9854,71	7379,18	76980,42
Repique 02	50	29583,33	17493,99	40996,50	26051,20	285312,55
	75	29583,33	17493,99	45487,84	26761,12	298315,72
	100	26296,30	15550,21	38194,20	23787,70	259571,03
	150	30428,57	17993,82	37940,72	26904,42	283168,82



## APENDICE 2

**LEITURA DE DADOS DOS ENSAIOS ECE EXECUTADOS COM OS MODELOS REDUZIDOS NAS ETAPAS I E II DO EXPERIMENTO, E RESULTADOS GRÁFICOS POR VAN DER VEEN.**

TABELA 2.1 - ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO - ESTAPET 01-ETAPA I

<b>Carga</b>	<b>Tensão</b>	<b>Tempo</b>	<b>Leitura 1</b>	<b>Leitura 2</b>	<b>Média</b>
<b>N</b>	<b>(kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>min</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
<b>Carregamento</b>					
0	0	0	0	0	0
200	8	10	0,02	0,12	0,07
400	9	10	0,08	0,23	0,155
600	10,5	10	0,2	0,35	0,275
800	12	10	0,39	0,5	0,445
1000	13,5	10	0,57	0,69	0,63
1200	15	10	0,82	0,93	0,875
1400	16	10	1,09	1,2	1,145
1600	17,5	10	1,46	1,56	1,51
1800	19	10	1,93	2,03	1,98
2000	20,5	10	3,1	3,21	3,155
2200	22	10	7,91	8,01	7,96
2200	22	10	8,3	8,4	8,35
2200	22	10	8,58	8,73	8,655
<b>Descarregamento</b>					
2200	22	10	8,58	8,73	8,655
1650	17	10	8,58	8,71	8,645
1400	15,5	10	8,49	8,6	8,545
1050	13	10	8,24	8,34	8,29
720	10,5	10	7,87	7,85	7,86
500	9	10	7,63	7,63	7,63
200	7	30	7,24	7,24	7,24

TABELA 2.2 – TABELA TÍPICA PARA ELABORAÇÃO DO GRÁFICO PARA AVALIAÇÃO DE CRITÉRIO DE RUPTURA DA CURVA CARGA RECALQUE POR VAN DER VEEN - ESTAPET 01 - ETAPA I

carga (N)	Recalq (mm)	$n(1-Q/Qult)$	qult. 1 (N)	qult.2 (N)	qult. 3 (N)	qult. 4 (N)	qult. 5 (N)	qult. 8 (N)	q adot(N)
			1800	2200	2100	2000	1200	1600	2070
0	0		0	0	0	0	0	0	0
200	0,07		0,11778	0,09531	0,10008	0,10536	0,18232	0,13353	<b>0,10161</b>
400	0,155		0,25131	0,20067	0,21131	0,22314	0,40547	0,28768	<b>0,21472</b>
600	0,275		0,40547	0,31845	0,33647	0,35667	0,69315	0,47	<b>0,34229</b>
800	0,445		0,58779	0,45199	0,47957	0,51083	1,09861	0,69315	<b>0,48853</b>
1000	0,63		0,81093	0,60614	0,64663	0,69315	1,79176	0,98083	<b>0,65989</b>
1200	0,875		1,09861	0,78846	0,8473	0,91629		1,38629	<b>0,86681</b>
1400	1,145		1,50408	1,0116	1,09861	1,20397		2,07944	<b>1,12803</b>
1600	1,51		2,19722	1,29928	1,43508	1,60944			<b>1,48257</b>
1800	1,98			1,70475	1,94591	2,30259			<b>2,03688</b>
2000	3,155			2,3979	3,04452				<b>3,38681</b>
2200	7,96								

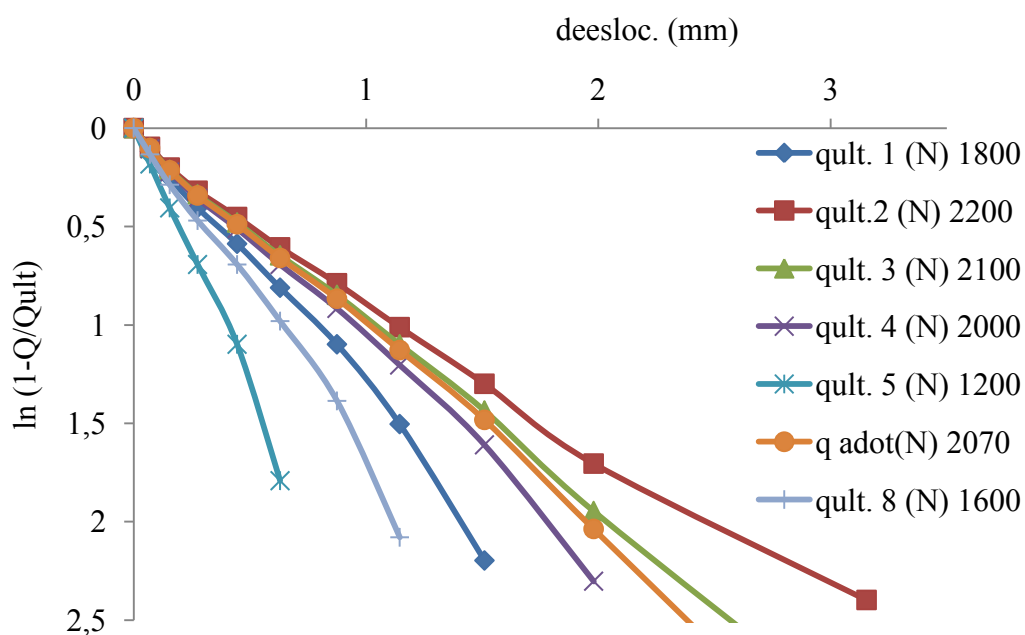


FIGURA 2.1 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE - CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTAPET I – ETAPA I

TABELA 2.3 - ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO - ESTAPET 02 - ETAPA I

Carga N	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo min	Leitura 01 Fim	Leitura 02 Fim	Média (mm)
0	0	0	0	0	0
200	8	5	0	0,01	0,005
400	9	5	0,01	0,05	0,03
600	10,5	5	0,04	0,11	0,075
800	12	5	0,15	0,24	0,195
1000	13	5	0,295	0,39	0,3425
1200	14,5	5	0,46	0,55	0,505
1400	16	10	0,72	0,81	0,765
1600	17	10	0,96	1,03	0,995
1800	18,5	10	1,26	1,34	1,3
2000	20	10	1,67	1,73	1,7
2200	22	10	2,43	2,51	2,47
2400	24	10	3,63	3,7	3,665
2600	26	10	6,56	6,64	6,6
Descarregamento					
2600		10	6,66	6,75	6,705
2600	26		6,66	6,75	6,705
2000	19	5	6,5	6,6	6,55
1400	15	5	6,17	6,28	6,225
800	11	5	5,67	5,8	5,735
200	7	5	4,99	5,12	5,055
0	0	10	4,49	4,79	4,64
0	0		4,27	4,57	4,42

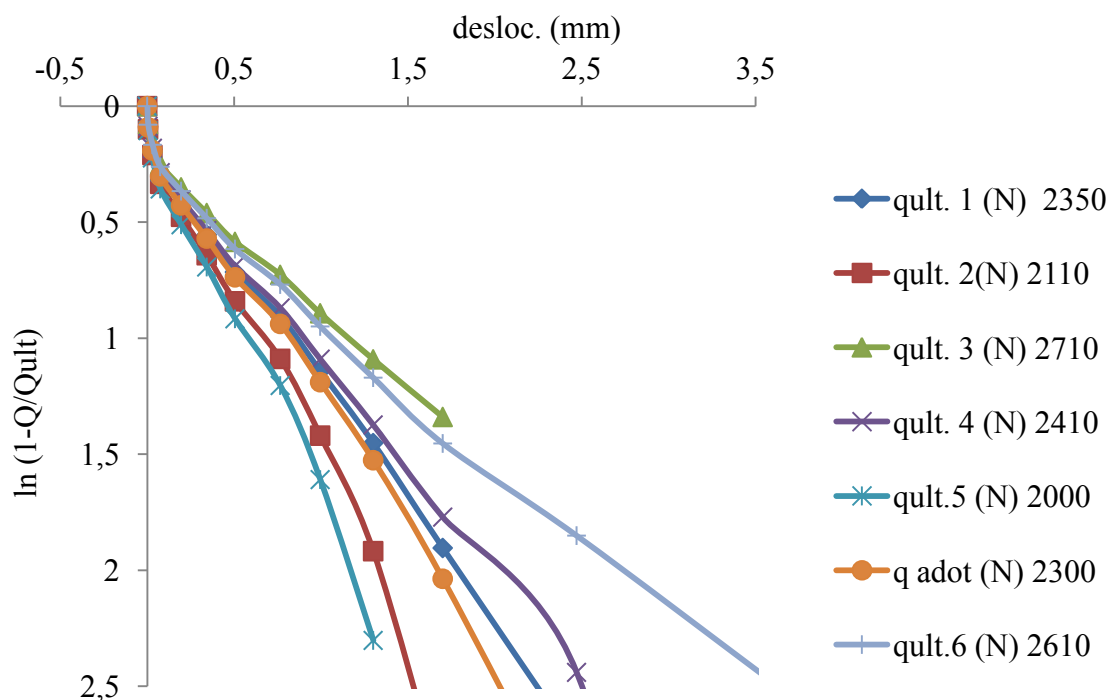


FIGURA 2.2 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE - CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTAPET 2 – ETAPA I.

TABELA 2.4 - ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO – ESTACA DE AÇO 03 - ETAPA I

Carga (N)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo (min)	Leitura 01 Fim	Leitura 02 Fim	Média (mm)
0	0	0	0	0	0
200	3	5	0,05	0	0,05
400	3	5	0,09	0	0,09
600	4	5	0,1	0	0,1
800	5	5	0,18	0	0,18
1000	7	5	0,38	0,14	0,26
1200	9	5	0,635	0,385	0,51
1400	16	5	1,22	0,97	0,8425
1600	17	5	1,3	1,05	1,175
1800	18,5	5	1,58	1,32	1,45
2000	20	10	1,94	1,685	1,8125
2200	21	10	2,7	2,45	2,575
2400	23	10	5,71	5,43	5,57
<b>Descarregamento</b>					
2400	23	10	5,85	5,56	5,705
2400	23	10	5,85	5,56	5,705
2000	19	10	5,84	5,55	5,695
1200	14	10	5,79	5,5	5,645
600	10	10	5,71	5,45	5,58
250	7	10	5,58	5,28	5,43
0	0	30	5,37	5,09	5,23

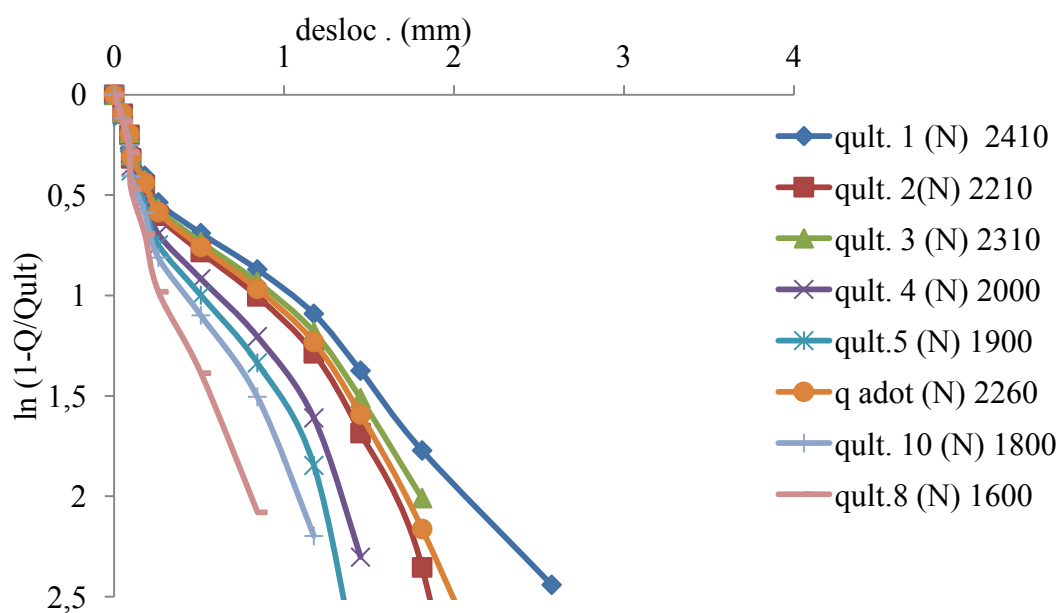


FIGURA 2.3 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE - CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTACA DE AÇO 3 – ETAPA I

TABELA 2.5 - ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO - ESTAPET 04 - ETAPA I

Carga (N)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo min	Leitura 01 Fim	Leitura 02 Fim	Média (mm)
0	0	0	0	0	0
200	8	10	0,05	0	0,025
400	9	10	0,05	0,13	0,09
600	10,5	10	0,05	0,32	0,185
800	12	10	0,05	0,55	0,3
1000	13,5	10	0,05	0,78	0,415
1200	15	10	1,09	1,07	1,08
1400	16	10	1,37	1,34	1,355
1600	17,5	10	1,7	1,67	1,685
1800	19	10	2,08	2,04	2,06
2000	20,5	10	2,53	2,48	2,505
2200	22	10	3,13	3,06	3,095
2400	23,5	10	4,73	4,61	4,67
2600	25	10	8,35	8,14	8,245
<b>Descarregamento</b>					
2600	25	10	8,67	8,57	8,62
2600	25	10	8,67	8,57	8,62
2000	20	10	8,42	8,32	8,37
1500	16,5	10	8,03	7,93	7,98
1000	13	10	7,42	7,35	7,385
600	10	10	6,68	6,65	6,665
250	7,5	10	5,99	6	5,995
0	0	10	5,28	5,16	5,22
0	0	10	5,23	5,11	5,17
0	0	10	5,17	5,05	5,11
0	0	10	5,15	5,03	5,09
0	0	10	5,13	5,01	5,07
0	0	30	4,94	4,83	4,885

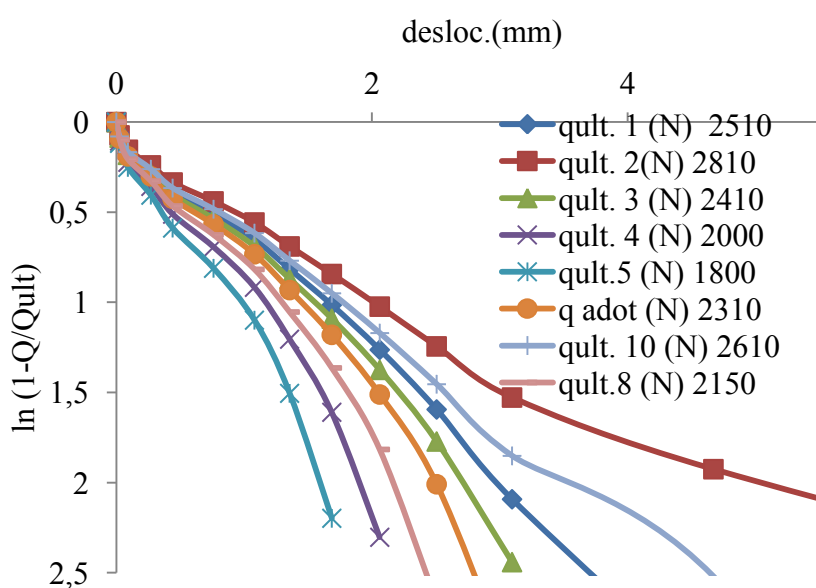


FIGURA 2.4 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE - CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTAPET 4 – ETAPA I.

TABELA 2.6 - ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO - ESTACA DE AÇO 5 - ETAPA I

Carga (N)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	TEMPO min	Leitura 1 Fim	Leitura 2 Fim	Média
0	0	0	0	0	0
200	8	5	0	0,01	0,005
400	9	5	0,02	0,04	0,03
600	10,5	5	0,065	0,085	0,075
800	12	5	0,1	0,13	0,115
1000	13	5	0,16	0,19	0,175
1200	15	5	0,24	0,29	0,265
1400	16	10	0,36	0,42	0,39
1600	17	10	0,515	0,58	0,5475
1800	18,5	10	0,755	0,83	0,7925
2000	20	10	1,14	1,19	1,165
2200	22	10	1,75	1,79	1,77
2400	23	10	3,24	3,3	3,27
2500	24	10	5,04	5,1	5,07
<b>Descarregamento</b>					
2500	24	10	5,37	5,42	5,395
2500	24	10	5,37	5,42	5,395
2000	20	10	5,37	5,42	5,395
1500	16	10	5,36	5,41	5,385
1000	13	10	5,33	5,38	5,355
600	10	10	5,28	5,31	5,295
250	7,5	10	5,16	5,18	5,17
0	0	10	4,98	5	4,99

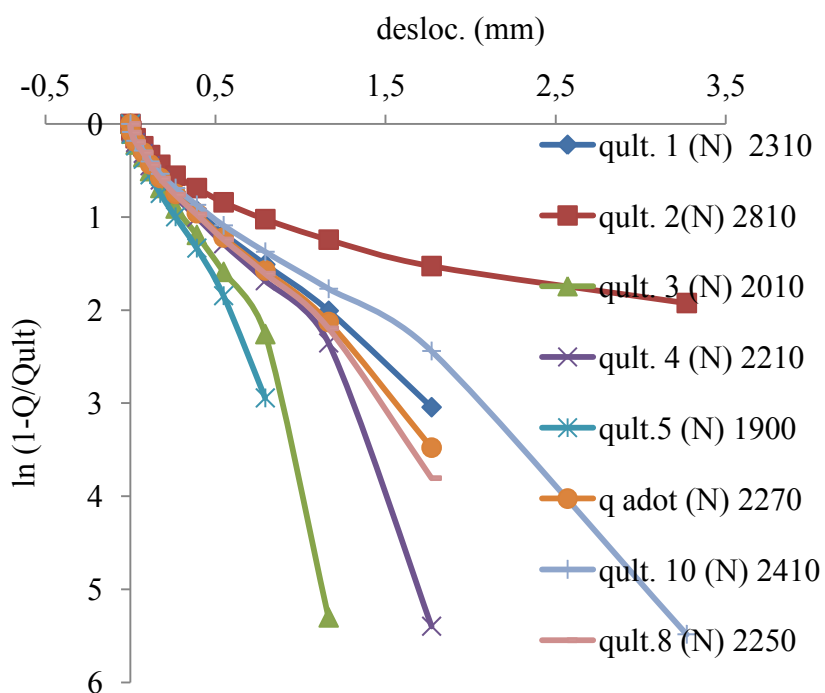


FIGURA 2.5 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE - CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTACA DE AÇO 5 – ETAPA I.

TABELA 2.7 - ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO – ESTACA DE AÇO 1 (120 cm ABERTA) - ETAPA II

Carga (N)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo (min)	Leitura 01 (mm)	Leitura 02 (mm)	Média (mm)
200	5	10	0	0	0
400	8	10	0,04	0,02	0,03
600	10	10	0,15	0	0,075
800	11,5	10	0,27	0,05	0,16
1000	13	10	0,36	0,05	0,205
1300	14,5	10	0,48	0,08	0,28
1400	16	10	0,61	0,12	0,365
1600	17	10	0,775	0,23	0,5025
1800	18,5	10	1,01	0,46	0,735
2000	20	10	2,14	1,15	1,645
2200	21,8	10	4,58	4,25	4,415
2300	22,5	10	5,85	5,57	5,71
<b>Descarregamento</b>					
2300	22,5	10	5,85	5,57	5,71
1910	19	10	5,83	5,485	5,6575
1310	15	10	5,79	5,435	5,6125
970	12,5	10	5,77	5,385	5,5775
610	10	10	5,7	5,285	5,4925
327	8	10	5,61	5,23	5,42
0	0	30	5,33	4,935	5,1325

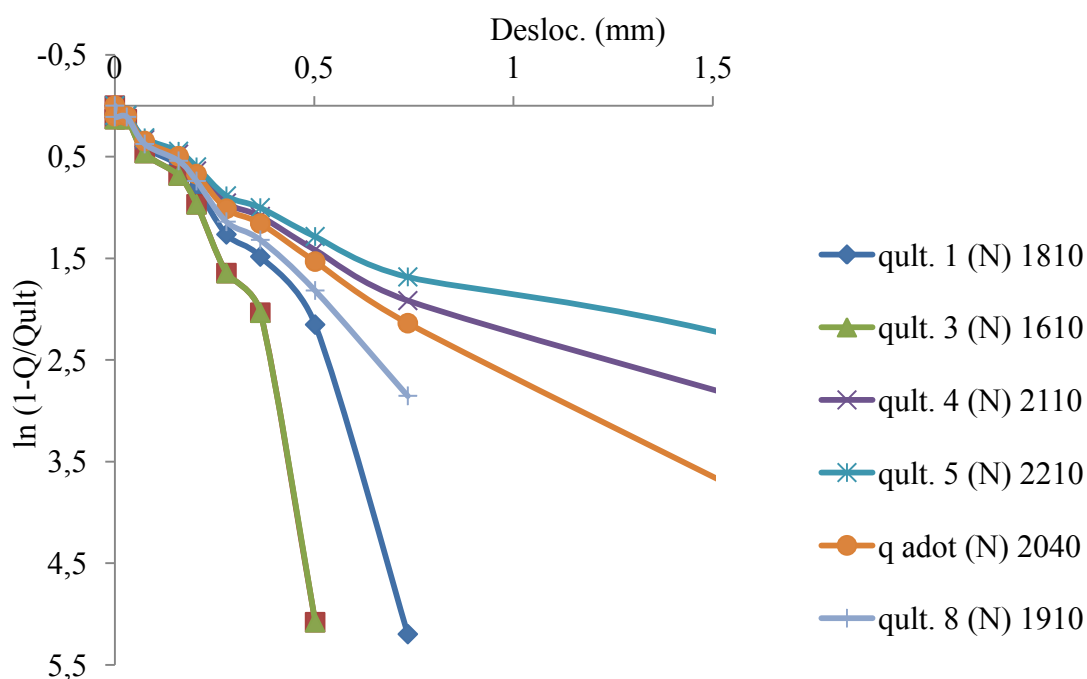


FIGURA 2.6 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE - CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTACA DE AÇO 1 (120 cm ABERTA) – ETAPA II.

TABELA 2.7 - ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO – ESTACA DE AÇO 2 (100 cm) -ETAPA II

Carga (N)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo (min)	Leitura 01 (mm)	Leitura 02 (mm)	Média (mm)
0	0	0	0	0	0
200	2	10	0,01	0,04	0,025
400	6	10	0,11	0,1	0,105
600	10	10	0,34	0,45	0,395
800	11,5	10	0,49	0,85	0,67
1000	13	10	0,72	1,13	0,925
1200	14,5	10	0,88	1,44	1,16
1400	15,75	10	1,16	1,61	1,385
1600	17,25	10	1,75	2,2	1,975
1700	18	10	6,69	6,52	6,605
<b>Descarregamento</b>					
1700	18	10	6,69	6,52	6,605
1300	15	10	6,625	6,48	6,5525
910	12	10	6,54	6,425	6,4825
710	11	10	6,47	6,41	6,44
390	8,5	10	6,35	6,37	6,36
0	0	30	6,12	6,35	6,235

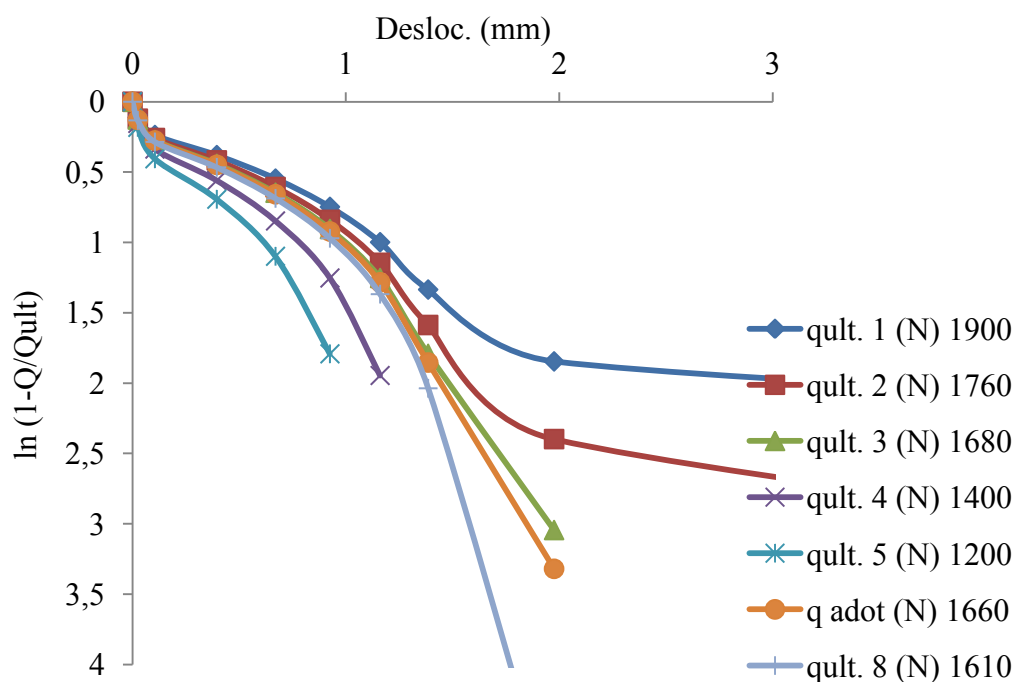


FIGURA 2.7 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE - CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTACA DE AÇO 2 (100 cm ABERTA) – ETAPA II.



TABELA 2.8 - ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO – ESTACA DE AÇO 3 (80 cm) - ETAPA II

Carga (N)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo (min)	Leitura 01 (mm)	Leitura 02 (mm)	Média (mm)
0	0	0	0	0	0
200	2	10	0	0	0
400	4	10	0	0	0
600	10	10	0,01	0,01	0,01
800	12	10	0,01	0,17	0,09
1000	13,5	10	0,02	0,38	0,2
1200	14,7	10	0,74	1,53	1,135
1300	15,1	10	4,9	5,85	5,375
Descarregamento					
1300	15,1	10	4,9	5,85	5,2
1020	13	10	4,9	5,85	5,375
720	10,5	10	4,85	5,83	5,34
333	8	10	4,71	5,79	5,25
0	0	10	4,11	5,71	4,91
0	0	30	4,11	5,71	4,91

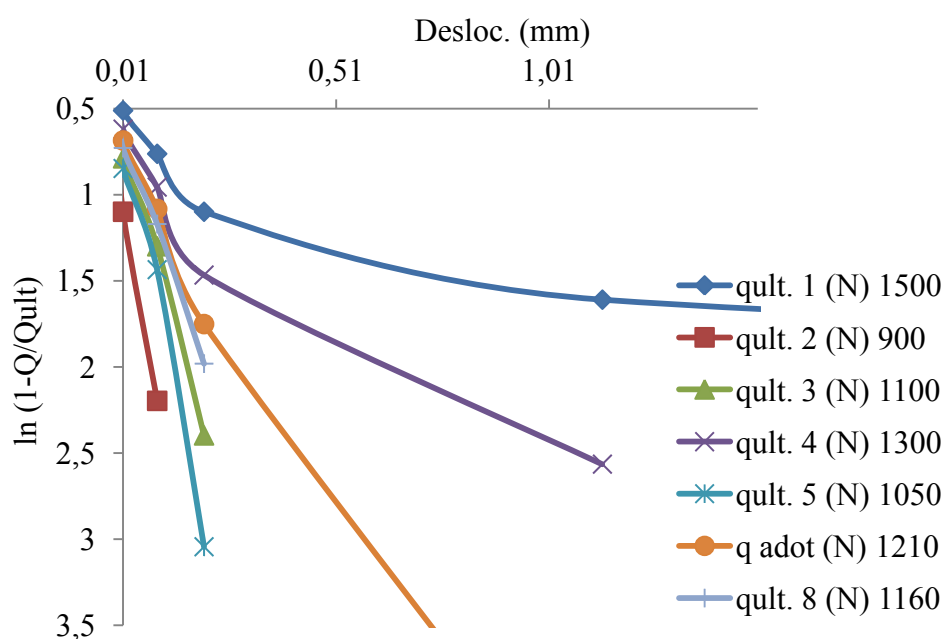


FIGURA 2.8 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE - CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTACA DE AÇO 3 (80 cm ABERTA) – ETAPA II

TABELA 2.9 - ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO – ESTAPET 4 (80 cm) - ETAPA II

Carga (N)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo (min)	Leitura 01 (mm)	Leitura 02 (mm)	Média (mm)
0	0	0	0	0	0
200	6	10	0,01	0,11	0,01
400	9	10	0,18	0,14	0,18
600	10,5	10	0,53	0,18	0,53
800	12	10	0,98	0,21	0,98
1000	13	10	1,49		1,49
1200	14,7	10	2,35		2,35
1300	16	30	7,81		7,81
1300	16	10	7,81		7,81
935	12,5	10	7,64	Falha no Extens.	7,64
600	10	10	7,35	Falha no Extens.	7,35
250	7,7	10	6,97		6,97
0	0	10	6,25		6,25
0		10	6,22		6,22
0		30	6,18		6,18

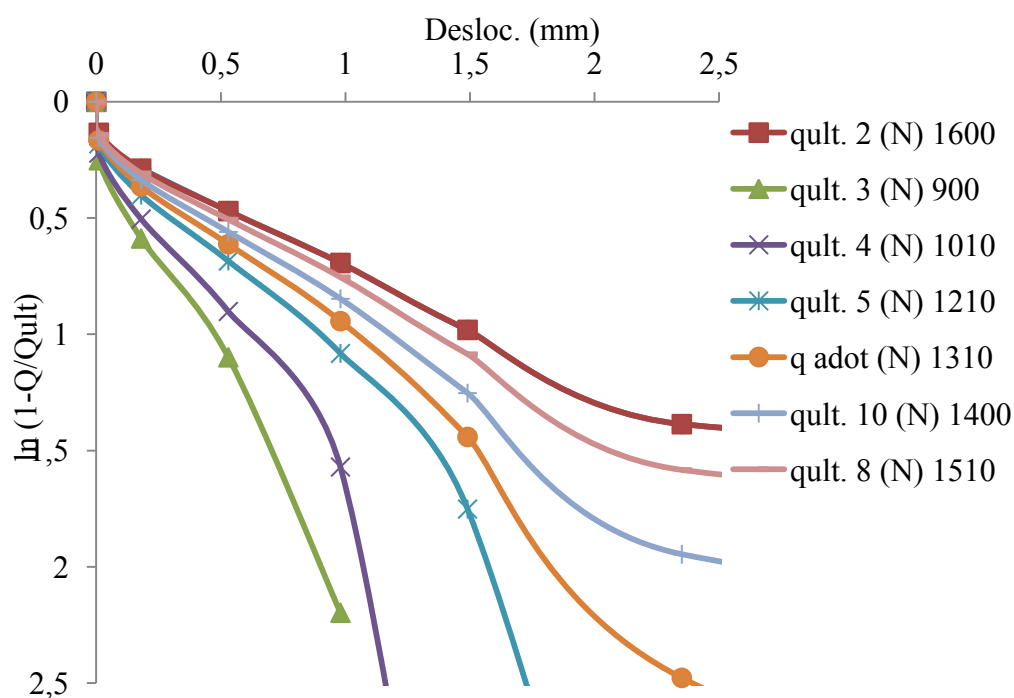


FIGURA 2.9 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE – CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTAPET 4- (80 cm ABERTA) – ETAPA II.

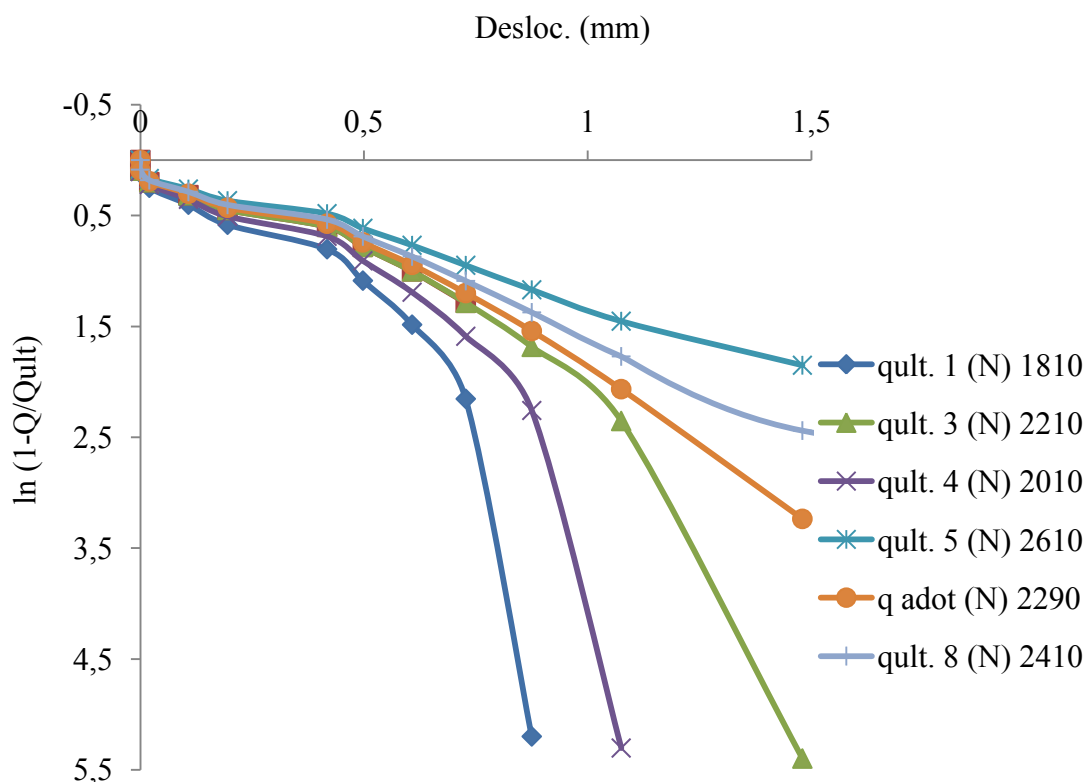


FIGURA 2.10 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE – CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTAPET 4- (80 cm ABERTA) – ETAPA II.

Tabela 2.10 - Ensaio rápido de carregamento estático – Estaca de aço 5 - (120 cm) - ponta fechada - Etapa II

Carga (N)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo (min)	Leitura 01 (mm)	Leitura 02 (mm)	Média (mm)
0	0	0	0	0	0
200	2	10	0	0	0
400	3	10	0,02	0,02	0,02
600	5	10	0,155	0,06	0,1075
800	12	10	0,3	0,09	0,195
1000	13	10	0,425	0,41	0,4175
1200	14,5	10	0,525	0,47	0,4975
1400	16	10	0,69	0,525	0,6075
1600	17,1	10	0,88	0,575	0,7275
1800	18,35	10	1,09	0,66	0,875
2000	20	10	1,31	0,84	1,075
2200	21,75	10	1,74	1,22	1,48
2400	23	10	6,15	5,52	5,835
<b>Descarregamento</b>					
2400	23	5	6,15	5,52	5,835
1450	16	5	6,09	5,49	5,79
900	12	5	6,01	5,4	5,705
500	9	5	5,92	5,3	5,61
0	0	5	5,63	5,06	5,345
0	0	10	5,63	5,06	5,345

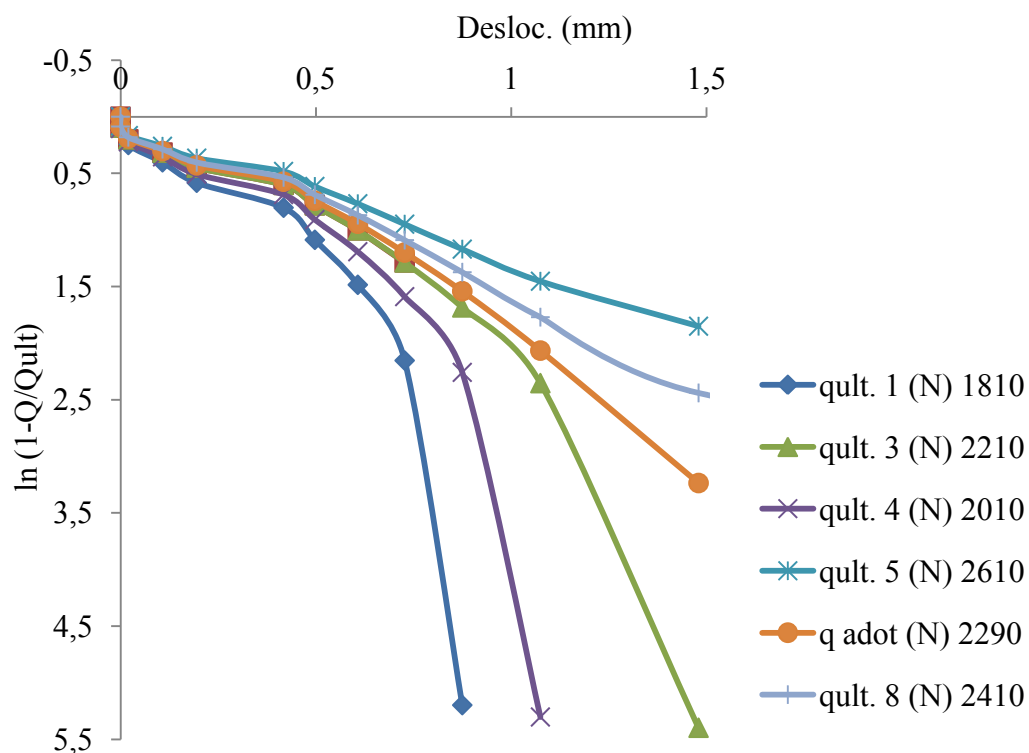


FIGURA 2.10 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE-CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA) – ESTACA DE AÇO 5 - (120 cm) - PONTA FECHADA - ETAPA II

TABELA 2.11 - ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO – ESTAPET 06 - (100 cm)- ETAPA II

Carga (N)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo (min)	Leitura 01 (mm)	Leitura 02 (mm)	Média (mm)
200	7,5	10	0,05	0,02	0,05
400	9	10	0,33	0,11	0,33
600	10,5	10	0,64	0,14	0,64
800	11,5	10	0,91	0,19	0,91
1000	13	10	1,34		1,34
1200	14,5	10	1,91		1,91
1400	16	10	2,83		2,83
1520	17	30	5,54		5,54
1520		10	5,54		5,54
1000	12	10	5,29	Falha no Extens.	5,29
750	11	10	5,1		5,1
250	7,5	10	4,51		4,51
0	0	10	3,8		3,8
0	0	10	3,73		3,73
0	0	30	3,65		3,65

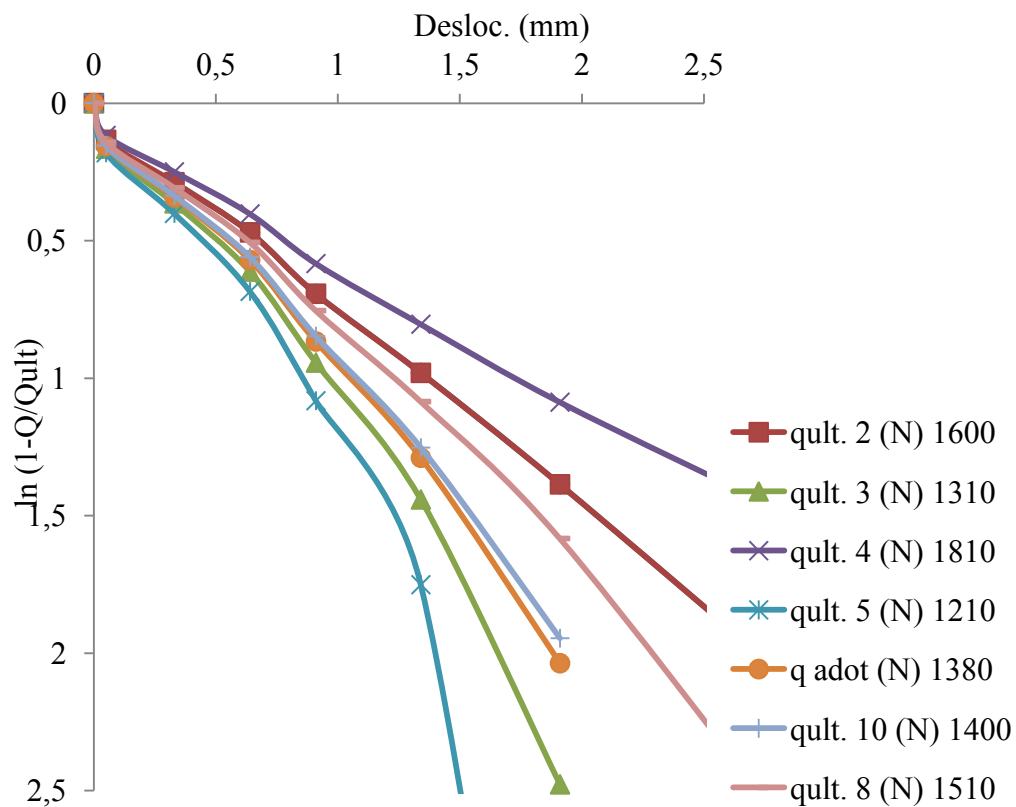


FIGURA 2.11 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE-CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA) – ESTAPET 6 - (100 cm)- PONTA FECHADA - ETAPA II

TABELA 2.12 - ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO – ESTAPET 07 - (120 cm) - ETAPA II

Carga (N)	Tensão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo (min)	Leitura 01 (mm)	Leitura 02 (mm)	Média Extens. (mm)
0	0	0	0	0	0
200	9	10	0,02	0,06	0,04
400	10,5	10	0,04	0,11	0,075
600	12	10	0,2	0,3	0,25
800	13	10	0,35	0,42	0,385
1000	14,5	10	0,46	0,55	0,505
1200	16	10	0,72	0,75	0,735
1400	17	10	1,03	0,9	0,965
1600	18,5	10	1,28	1,38	1,33
1800	20	10	1,69	1,78	1,735
2000	22	10	2,53	2,6	2,565
2200	24	10	3,83	4,02	3,925
2400	24	10	6,6	6	6,3
2400		10	6,66	6,17	6,415
<b>Descarregamento</b>					
2400	24	10	6,66	6,17	6,415
2000	19	10	6,5	6	6,25
1400	15	10	6,27	5,6	5,935
800	11	10	5,76	5,2	5,48
200	7	10	5,1	4,5	4,8
0	0	10	4,65	4,17	4,41
0	0	30	4,33	3,95	4,14

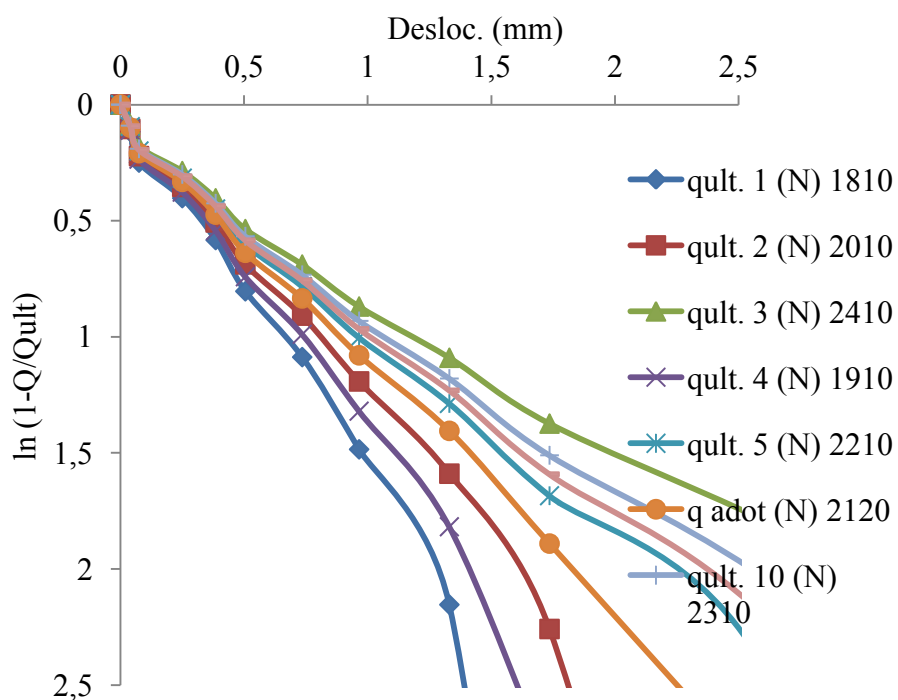
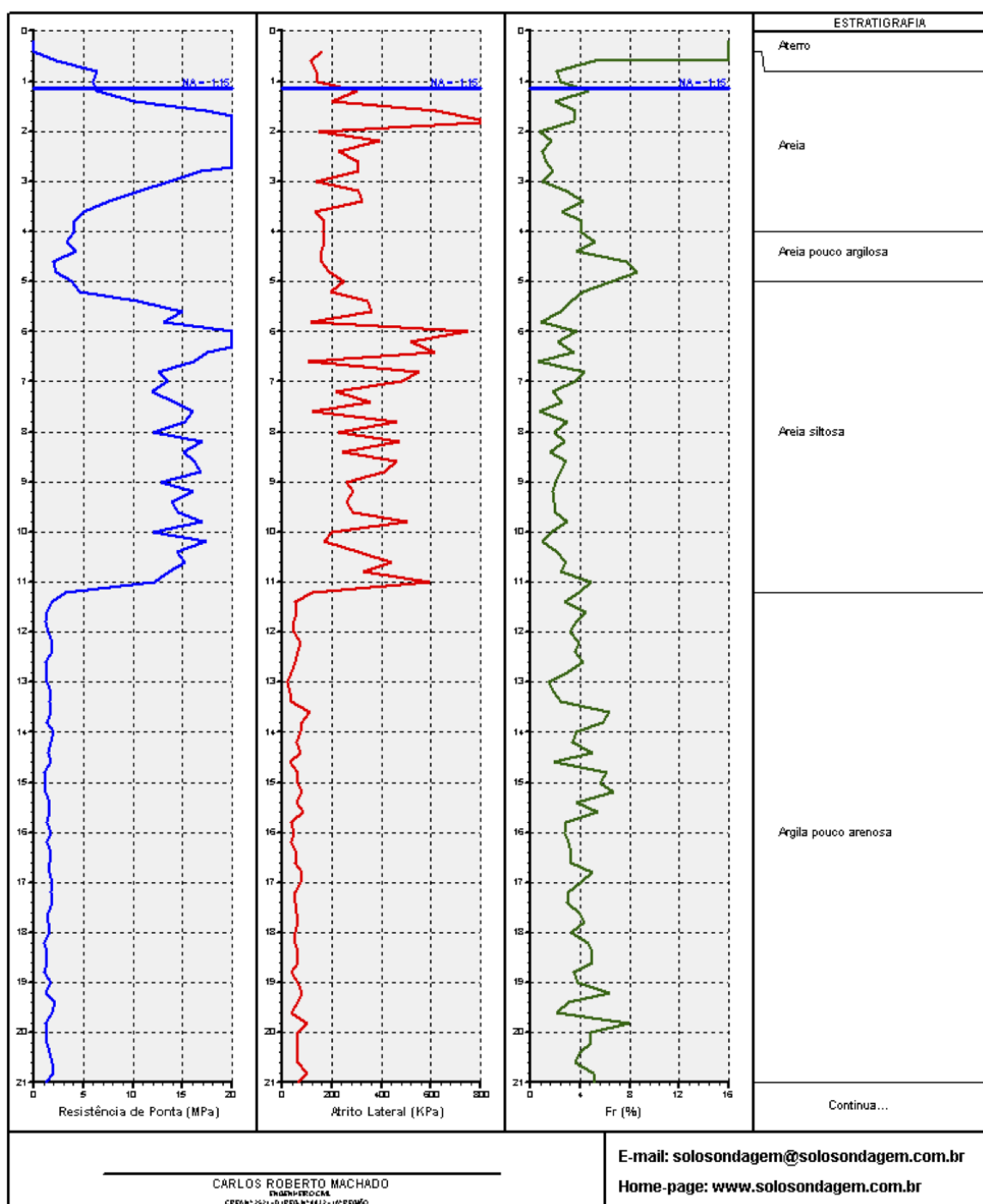


FIGURA 2.12 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE - CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA) – ESTAPET 7 - (120 cm)- PONTA FECHADA - ETAPA II.

### APENDICE 3

## SONDAGEM CPT E SPT DA REGIÃO DO PROTÓTIPO

 <b>SOLO</b> Sondagem e Construções Ltda	CLIENTE <b>Construtora Benke</b>				FURO <b>02</b>	
	LOCAL <b>Rua 248 - Meia Praia - Itapema - SC</b>					
	DATA <b>29/05/12</b>	PRÉ-FURO <b>0,40</b>	NÍVEL D'ÁGUA <b>1,15</b>	SONDADEI Nº <b>3564</b>		FOLHA <b>01/02</b>
<b>Rua 501, nº 110 - Balneário Camboriú - SC</b> <b>Fone / Fax: (47) 367-3700 / 367-8411</b>						







## APENDICE 4

### RESULTADOS DO ACOMPANHAMENTO DA CRAVAÇÃO E MÉTODO DOS HOLANDESES – PROTÓTIPOS E MODELOS

Seguem resultados do período de coleta de dados do modelo e protótipo:

#### A-Modelos:

TABELA 4.1 - LEITURA DO NÚMERO DE GOLPES, ALTURA DE QUEDA E PROFUNDIDADE. PRIMEIRO PERÍODO DE 24/07/2010 À 30/09/2010.

Seção	ESTAPET 01	ESTAPET 02	ESTAPET 04	ESTACA AÇO 03	ESTACA AÇO 05	cota final (cm)
	3,1cmx3,1cm	3,1cmx3,1cm	3,1cmx3,1cm	3,3cmx3,3cm	3,3cmx3,3cm	
Peso Estaca	1,08kg	1,08kg	1,08kg	2 Kg	2,5 Kg	
h queda (cm)	Nº de golpes	Nº de golpes	Nº de golpes	Nº de golpes	Nº de golpes	
10	0	0	0	0	0	0
10	33	43	40	30	42	10
20	29	25	23	18	25	20
20	29	29	22	18	28	30
20	30	33	21	25	31	40
20	33	38	34	29	35	50
20	37	52	40	40	40	60
20	52	66	49	41	47	70
30	49	43	31	30	37	80
30	56	45	42	34	43	90

TABELA 4.2 - LEITURA DO NÚMERO DE GOLPES, ALTURA DE QUEDA E PROFUNDIDADE. SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS DE 03/01/13 À 01/03/2013. ESTACAS DE AÇO.

Seção	ESTACA AÇO 01	ESTACA AÇO 2	ESTACA AÇO 03	ESTACA AÇO 05	cota final (cm)
	3,3cmx3,3	3,3cmx3,3cm	3,3cmx3,3cm	3,3cmx3,3cm	
Peso Estaca	2 Kg	1,66 Kg(100cm)	1,33Kg(80cm)	2 Kg(fechada)	
h queda (cm)	Nº de golpes	Nº de golpes	Nº de golpes	Nº de golpes	
10	0	0	0	0	0
10	42	40	30	66	10
20	31	40	36	37	20
20	35	45	42	45	30
20	42	50	43	52	40
20	39	43	45	47	50
20	33	50		49	60
20	42	53		47	70
30	30			32	80
30	40			41	90

TABELA 4.3 - LEITURA DO NÚMERO DE GOLPES, ALTURA DE QUEDA E PROFUNDIDADE. SEGUNDO ETAPA DE ENSAIOS DO PERÍODO DE 03/01/13 À 01/03/2013 (ESTAPETS).

	ESTAPET 04	ESTAPET 06	ESTAPET 07			
Seção	3,1cmx3,1cm	3,1cmx3,1cm	3,1cmx3,1cm			
Peso Estaca	0,72kg (80cm)	0,9kg(100cm)	1,08kg			
	Nº de golpes	Nº de golpes	Nº de golpes	cota inicial(cm)	cota final (cm)	h queda (cm)
	0	0	0		0	10
	47	54	55	0	10	10
	29	34	35	0	20	20
	36	41	44	20	30	20
	40	40	45	30	40	20
	38	40	51	40	50	20
		40	52	50	60	20
		37	53	60	70	20
			32	70	80	30
			40	80	90	30

Para as primeiras profundidades, não foram observadas diferenças significativas no número de golpes, mas à medida que a profundidade aumentava, o número de golpes para cravar as ESTAPETs aumentou em relação às estacas de aço. Este comportamento era esperado também devido a uma maior perda de energia pela compressibilidade das ESTAPETs, e maior efeito *Damping* do polímero reciclado.

A (FIGURA 4.1) exemplifica a medição da nega e repique de cravação das estacas de aço e ESTAPETs.

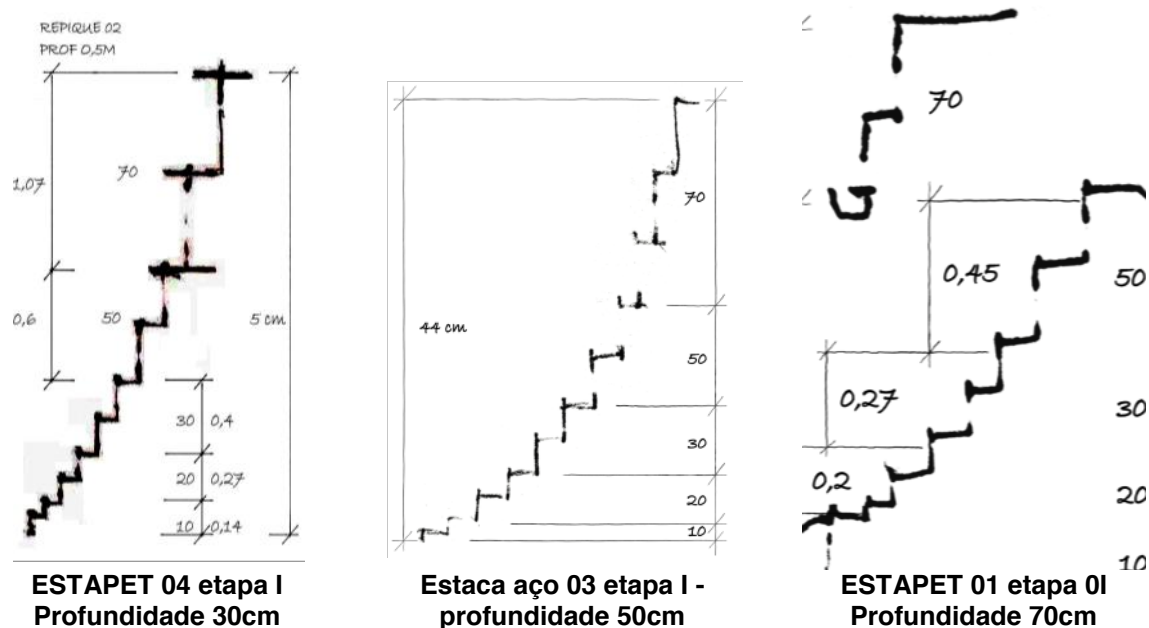


FIGURA 4.1 - EXEMPLOS DE MEDIÇÃO DE NEGA E REPIQUE ELÁSTICO DA ESTAPET E ESTACAS DE AÇO DA PRIMEIRA E SEGUNDA FASES DO EXPERIMENTO (SEM ESCALA).

O método dos holandeses, apesar das críticas, apresentou valores condizentes com a média de outros métodos que serão apresentados na

sequência. Como análise preliminar, ele demonstra a esperada tendência de aumento de energia dinâmica necessária à penetração, causada pelo maior número de golpes necessários, refletindo a ideia de maior capacidade de carga dinâmica. Abaixo seguem os dados de capacidade de suporte, de acordo com o comprimento cravado, demonstrando o ganho de resistência das estacas ao longo de sua cravação.

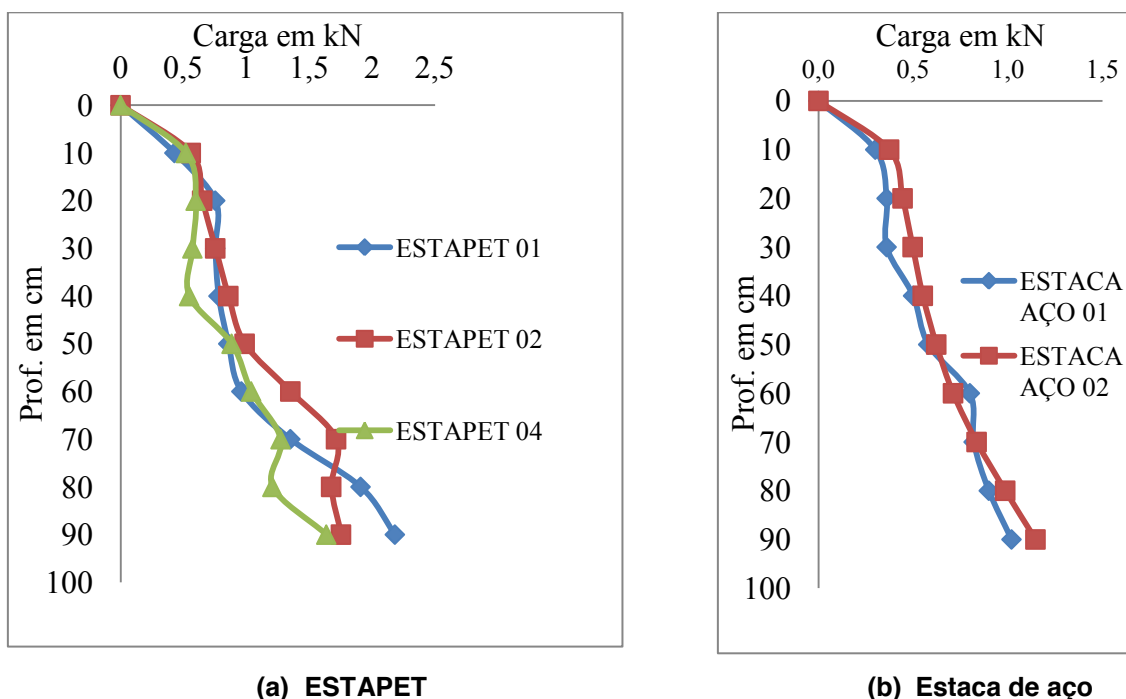


FIGURA 4.2 - CAPACIDADE DE SUPORTE PELO MÉTODO DOS HOLANDESES

Analisando o comportamento da ESTAPET em relação ao aço, verifica-se a uniformidade do ganho de resistência da estaca de aço em relação à forma irregular de ganho de resistência da ESTAPET, devido ao seu comportamento elástico.

A tabela abaixo relaciona a resistência dinâmica na profundidade de 90 cm de profundidade cravada:

TABELA 4.4 - RESULTADOS DO ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO PELO MÉTODO DOS HOLANDESES DURANTE A PRIMEIRA ETAPA DO EXPERIMENTO

Estaca	Carga última (ECD)-holandeses (N)
ESTAPET 01	2181,8
ESTAPET 01	1753,2
ESTAPET 01	1636,4
Estaca de aço 03	1020,0
Estaca de aço 05	1146,7

## B) Protótipo

Segue a coleta de dados de cravação do protótipo:

TABELA 4.5 - LEITURA DO NÚMERO DE GOLPES, ALTURA DE QUEDA E PROFUNDIDADE PARA O PROTÓTIPO (MARTELO DE 71 kgf E MARTELO DE 2750 kgf)

**DIAGRAMA DE CRAVAÇÃO COM MARTELO MANUAL**

Período: 05/04/2014

peso do martelo:71 Kg

peso da estaca:41 Kg

comprimento da ESTAPET: 282 cm

comprimento da estaca de aço: 287 cm-

Seção	h queda (cm)	ESTAPET	ESTACA DE AÇO	cota final (cm)
		14,5 x14,5cm	15x15cm	
Peso Estaca		41 kgf	85 kgf	
		Nº de golpes	Nº de golpes	
	0			0
	50	47	38	25
	100	124	47	50
	100	360	94	75
	100		308	100

**DIAGRAMA DE CRAVAÇÃO COM MARTELO HIDRÁULICO**

Período: 11/04/2014

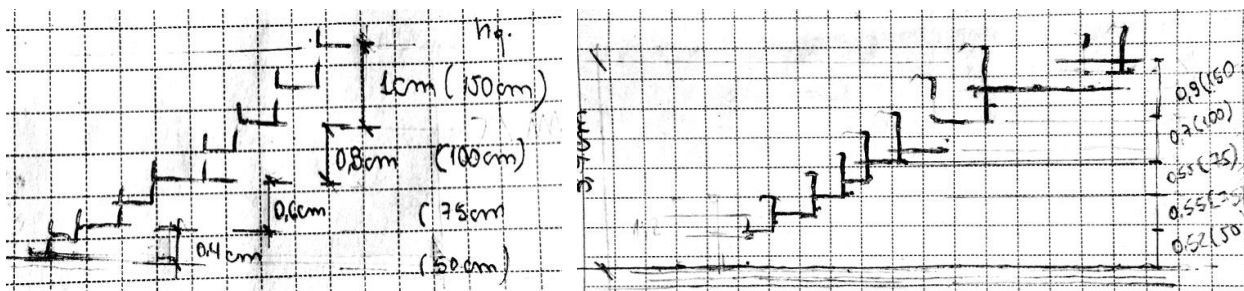
peso do martelo:2750 Kg

peso da estaca:41 Kg

comprimento da ESTAPET: 247 cm

comprimento da estaca de aço: 247cm -

Seção	h queda (cm)	ESTAPET	cota final (cm)
		14,5 x14,5cm	
Peso Estaca		41 kgf	
		Nº de golpes	
	0		0
	2,5	0	25
	2,5	18	50
	2,5	112	75
	2,5	120	80
	3	500	90



**Estaca de aço (martelo manual de 71 kgf),  
ECD aos 50cm**

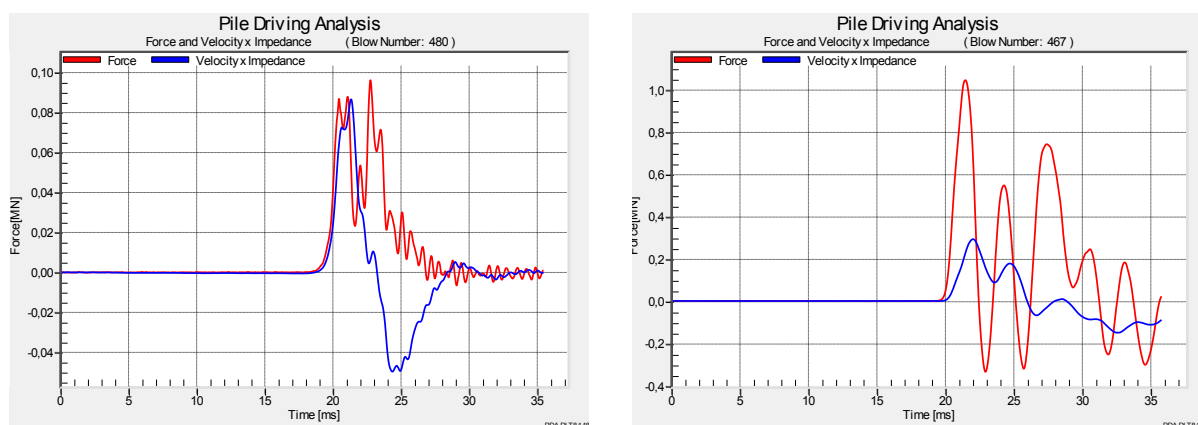
**Estapet (martelo manual de 71kgf). ECD realizado  
aos 50cm**

FIGURA 4.3 - EXEMPLOS DE MEDIÇÃO DE NEGA E REPIQUE ELÁSTICO DA ESTAPET E ESTACAS DE AÇO REALIZADOS NOS PROTÓTIPOS EM 05/04/2014.

## APENDICE 5

### TNOWAVE EM ESTACAS DE PLASTICO - ENSAIOS COM PROTÓTIPOS

Para efeito comparativo, seguem os sinais das estacas de aço e ESTAPET, utilizando o martelo manual de 710 N.



(a) Sinal obtido durante a cravação da estaca de aço

(b) Sinal obtido durante a cravação da ESTAPET

FIGURA 5.1 - COMPARATIVOS DE SINAIS UTILIZANDO MARTELO DE 71 kgf.

Na (FIGURA 5.1) é clara a diferença dos sinais da força oscilante no ESTAPET, devido às deformações reflete as ondas longas e contínuas. Já o comportamento, do aço é normal.

#### Ensaio de carregamento dinâmico do protótipo

Em primeira análise, seguem alguns diagramas utilizando gráficos do programa TNO. Confirmam-se as diferenças gerais entre ESTAPETs e estacas de aço, como era esperado, devido às diferenças relativas ao módulo de elasticidade, dez vezes maior do aço em relação à ESTAPET, confirmando-se que o número de golpes necessários à cravação é inversamente proporcional ao módulo de elasticidade para estacas de mesmas dimensões.

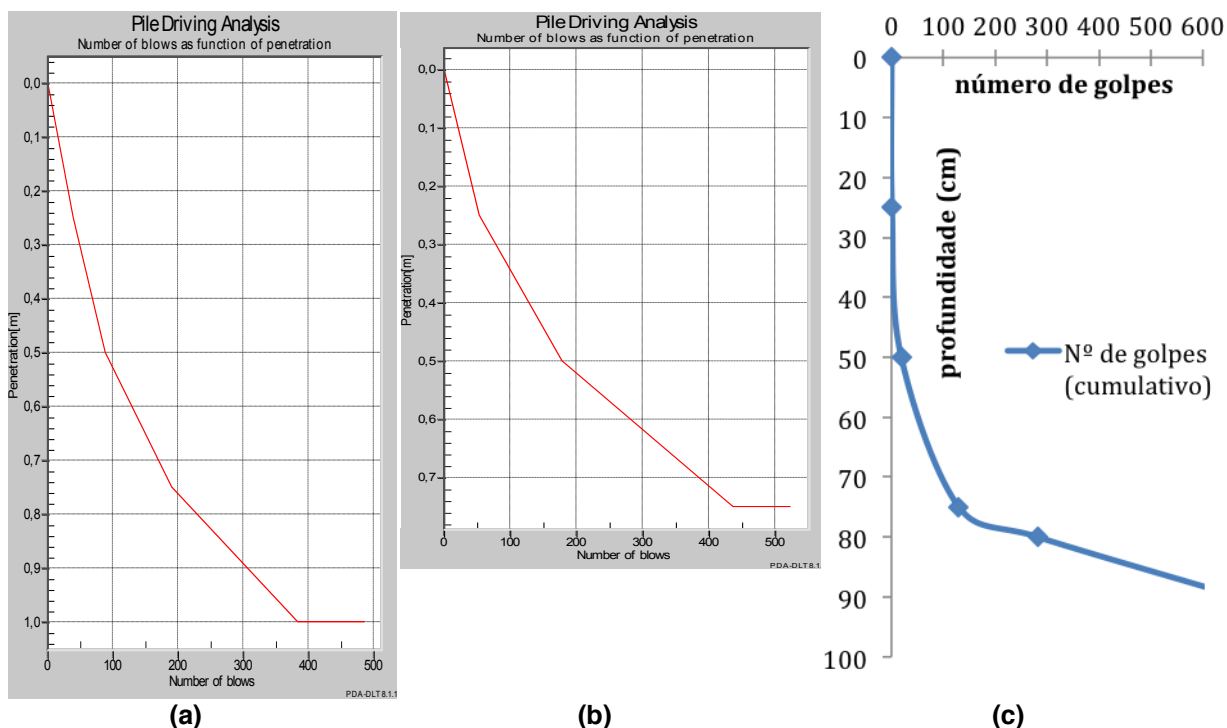


FIGURA 5.2 - NÚMERO DE GOLPES PELA PENETRAÇÃO: (a) ESTACAS DE AÇO (COM MARTELO DE 71 kgf), (b) ESTAPET (COM MARTELO DE 71 kgf) E (c) ESTAPET COM MARTELO HIDRÁULICO DE 2750 kgf, UTILIZANDO O PROGRAMA A EMPRESA TNO (MARTELO DE 71 kgf PARA (a) E (b))

Para as primeiras profundidades, não foram observadas diferenças significativas no número de golpes, mas, à medida que a profundidade aumentava, o número de golpes para cravar as ESTAPETs aumentou em relação às estacas de aço. Este comportamento também era esperado devido, não somente a maior perda de energia pela compressibilidade das ESTAPETs, mas o maior efeito *Damping* do polímero reciclado, causado por conta da altíssima compacidade do solo arenoso, a partir dos 75 cm de profundidade.

A seguir, serão apresentados os resultados de carregamento (dinâmico) utilizando o Método TNO.

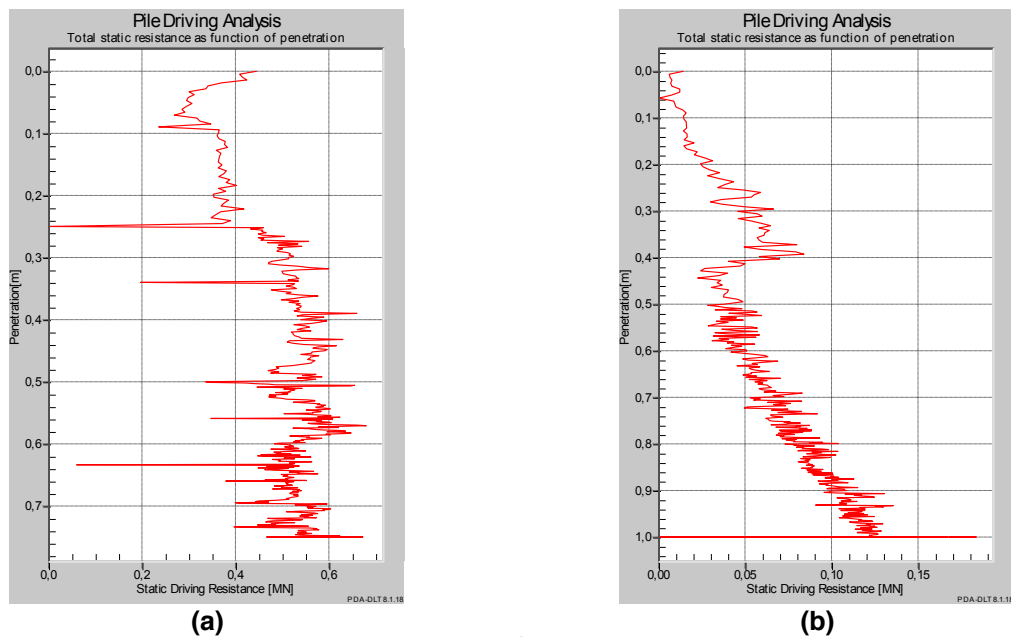


FIGURA 5.3 - DIAGRAMA DE RESISTÊNCIA POR PROFUNDIDADE UTILIZANDO O MÉTODO TNO, PARA MARTELO DE 71 kgf. (a) ESTAPET. (b) ESTACA DE AÇO

### Análise de Resultados dos Ensaios ECD

Na sequência, são apresentados outros resultados, por meio de gráficos, do Método TNO (comparativo entre estaca de ESTAPET e estaca de aço).

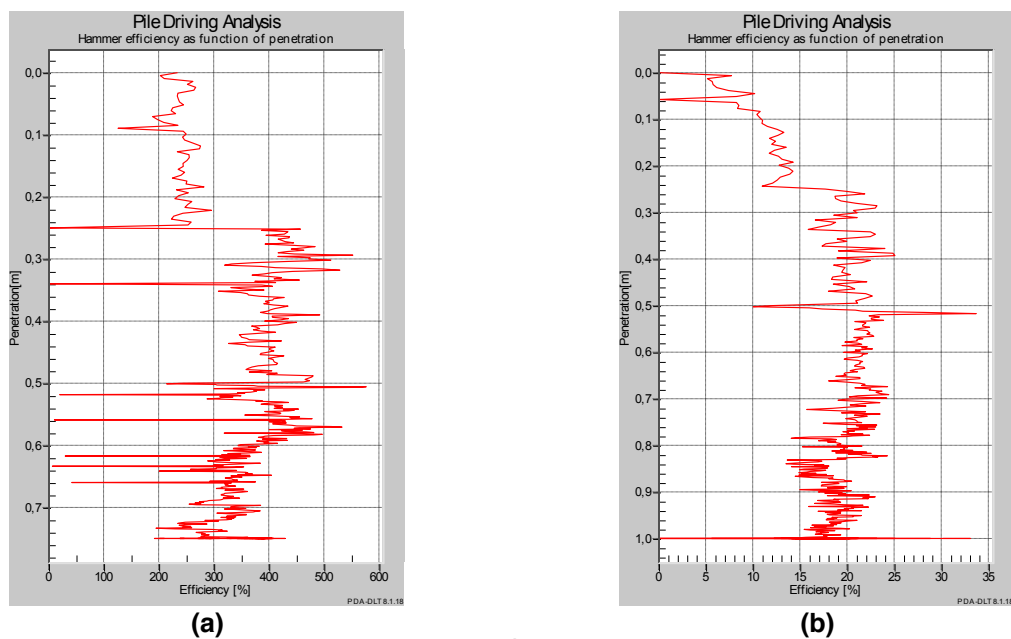


FIGURA 5.4 - DIAGRAMA DE EFICIÊNCIA DO MARTELO POR PROFUNDIDADE UTILIZANDO O MÉTODO TNO, PARA MARTELO DE 71 kgf. (a) ESTAPET. (b) ESTACA DE AÇO



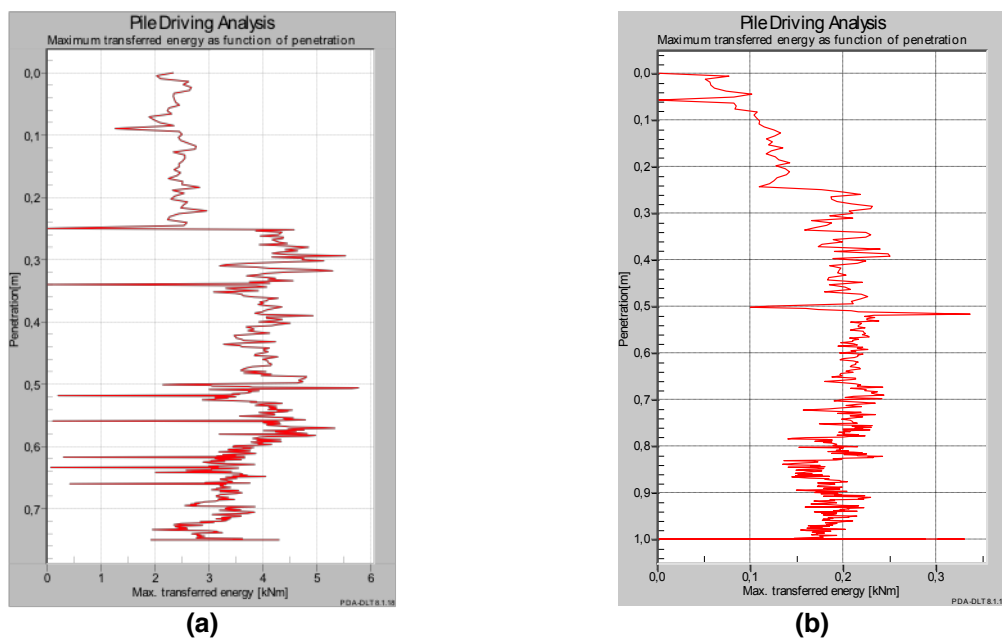
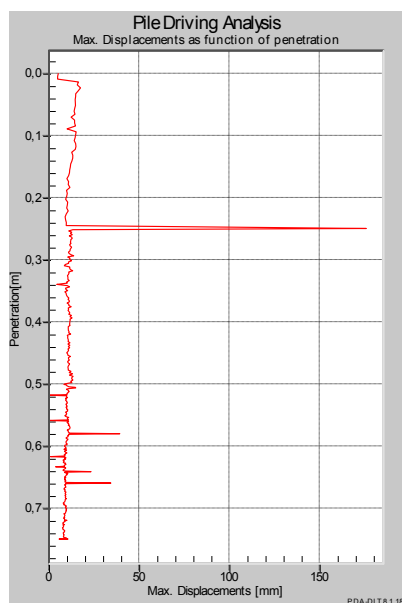


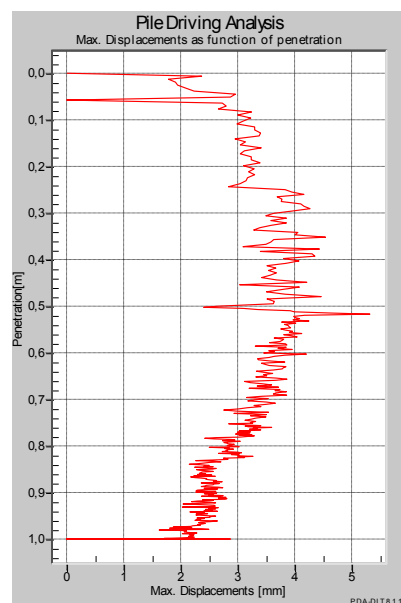
FIGURA 5.5 - DIAGRAMA DE ENERGIA TRANSFERIDA DO MARTELO POR PROFUNDIDADE UTILIZANDO O MÉTODO TNO, PARA MARTELO DE 71 kgf. (a) ESTAPET. (b) ESTACA DE AÇO

Os gráficos acima demonstram uma eficiência superior a 100% para ESTAPET e, em torno de 45%, para a estaca de aço. Este valor refere-se à energia real absorvida pela estaca após a aplicação do golpe, em relação ao momento imediatamente anterior à sua aplicação. Este valor de energia absorvida “excedente” deve-se à medição do deslocamento excessivo pela deformação elástica da ESTAPET.

A (FIGURA 4.6) deve ser avaliada com cuidado, pois as escalas de deslocamento estão diferentes, dando uma falsa impressão de que a estaca de aço se desloca mais, apesar dessa ser a realidade. Ela foi retirada diretamente do programa, por isso não pode ser modificado.

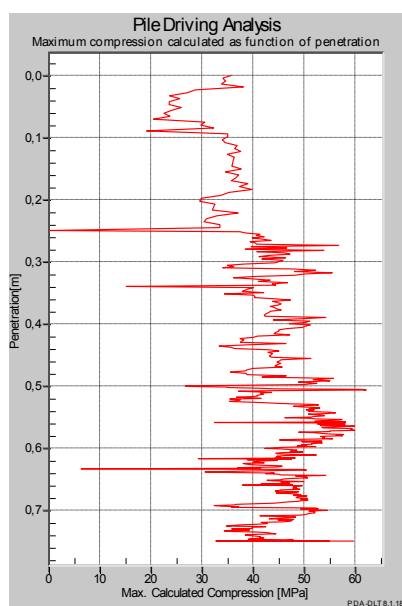


(a)

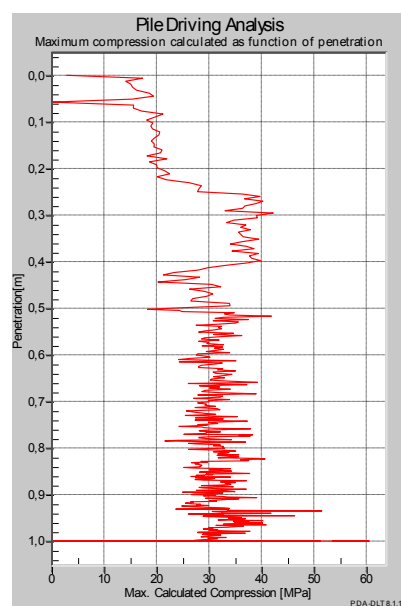


(b)

FIGURA 5.6 - DIAGRAMA DO DESLOCAMENTO EM FUNÇÃO DA CRAVAÇÃO POR PROFUNDIDADE UTILIZANDO O MÉTODO TNO, PARA MARTELO DE 71 kgf. (a) ESTAPET. (b) ESTACA DE AÇO



(a)



(b)

FIGURA 5.7 - DIAGRAMA DE TENSÃO DE COMPRESSÃO CALCULADA UTILIZANDO O MÉTODO TNO, PARA MARTELO DE 71 kgf. (a) ESTAPET. (b) ESTACA DE AÇO

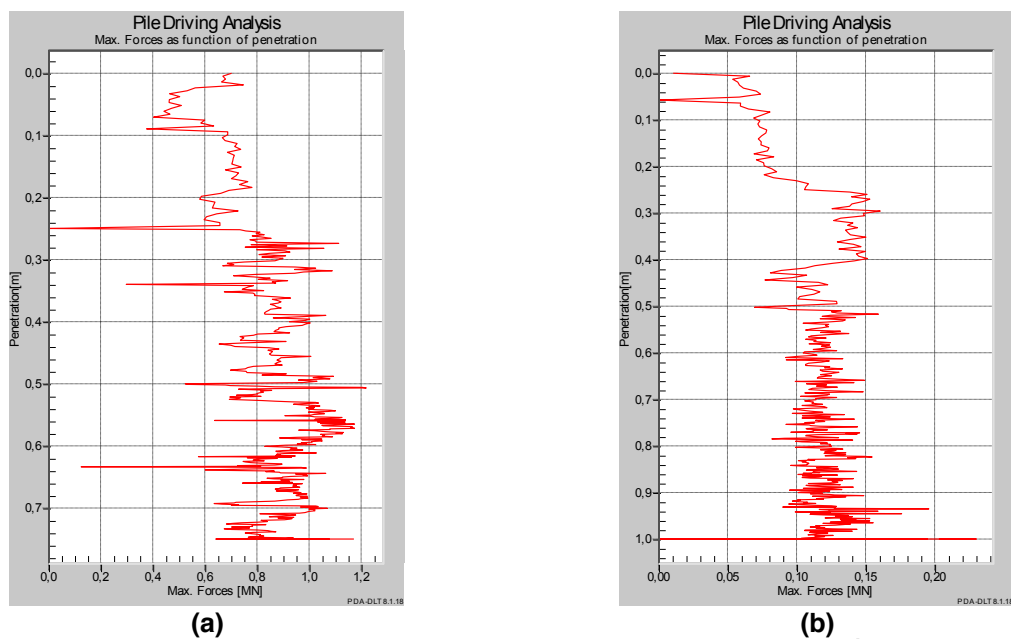


FIGURA 5.8 - DIAGRAMA DA FORÇA TOTAL UTILIZANDO O MÉTODO TNO, PARA MARTELO DE 71 kgf. (a) ESTAPET. (b) ESTACA DE AÇO

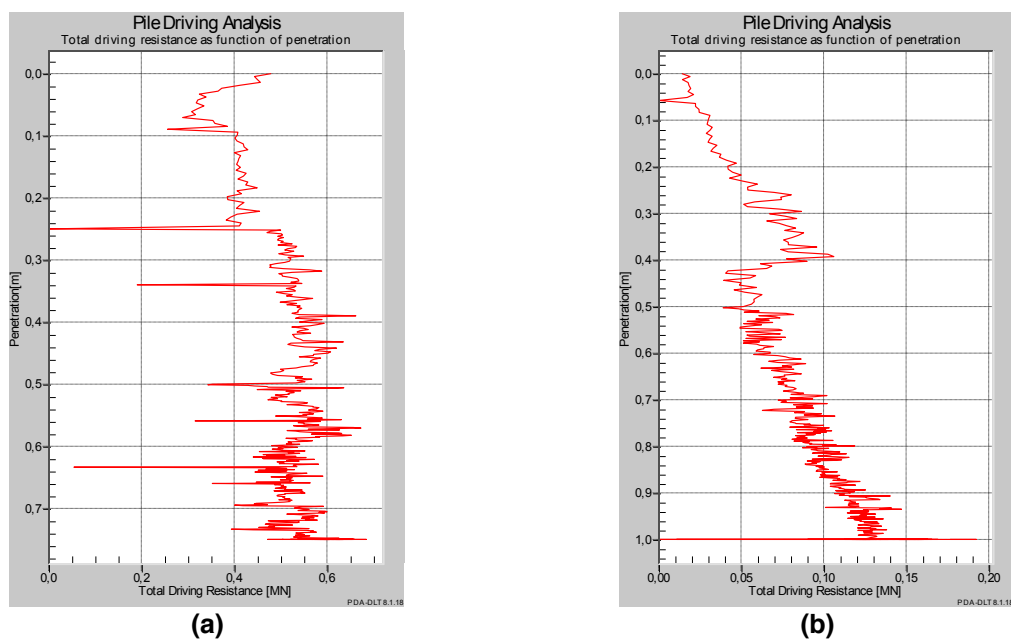


FIGURA 5.9 - DIAGRAMA DA FORÇA DINÂMICA UTILIZANDO O MÉTODO TNO, PARA MARTELO DE 71 kgf. (a) ESTAPET. (b) ESTACA DE AÇO

A força total calculada e a força dinâmica são medidas pelos sensores de deslocamento e pelo tipo de solo considerado na ponta ( $J_c$ ), onde se mede a força dinâmica. Maior deslocamento no mesmo tempo significa maior força, justificando os altos valores de resistência do ESTAPET.

A (FIGURA 5.9) apresenta valores similares de tensão para o ESTAPET, pois a área de ponta da estaca de aço (ponta aberta) é menor que a área maciça

da ESTAPET, como também é menor a força considerada aplicada (coincidentemente as tensões são similares).

## Resultados dos ensaios de carregamento estático dos protótipos

- ECE ESTAPET – Protótipo

TABELA 5.1 - LEITURA DOS DADOS DO ECE ESTAPET 1- ETAPA I

DATA: 17/04/2014  
INÍCIO:  
TÉRMINO:

CARGA CÉLULA (kgf)	CARGA MANÔM. (kgf/cm <sup>2</sup> )	TEMPO min	EXTENSÔM 1e 2 (mm)		EXTENSÔM 3 e 4 (mm)		média extens.(mm)
			INÍCIO	FIM	INÍCIO	FIM	
0	0	0	0	0	0	0	0
1000	20	10	1,24	1,25	1,45	1,45	1,35
2500	80	10	4,55	4,55	2,7	2,7	3,625
5000	150	10	9,35	9,57	4	4,05	6,81
7500	230	10	13,75	14,07	8,82	8,85	11,46
10000	300	10	19,31	21,05	16,8	18,8	19,925
10000	300	10	21,33	23,08	18,8	18,8	20,94
10000	300	10	23,31	24,05	18,8	18,8	21,425
	<b>DESCARREGAMENTO</b>						0
10000	300	10	24,05	24,05	18,8	18,8	21,425
8300	270	10	23,03	23,77	18,58	18,58	21,175
5300	160	10	18,74	19,48	14,33	14,33	16,905
1500	30	10	11,32	12,06	10,98	10,98	11,52
0	0	10	5,52	6,26	5,38	5,38	5,82
0	0	30	5	5,74	4,76	4,76	5,25
0	0	60	5,6	5,34	4,13	4,13	4,735
0	0	90	5,2	4,94	3,5	3,5	4,22

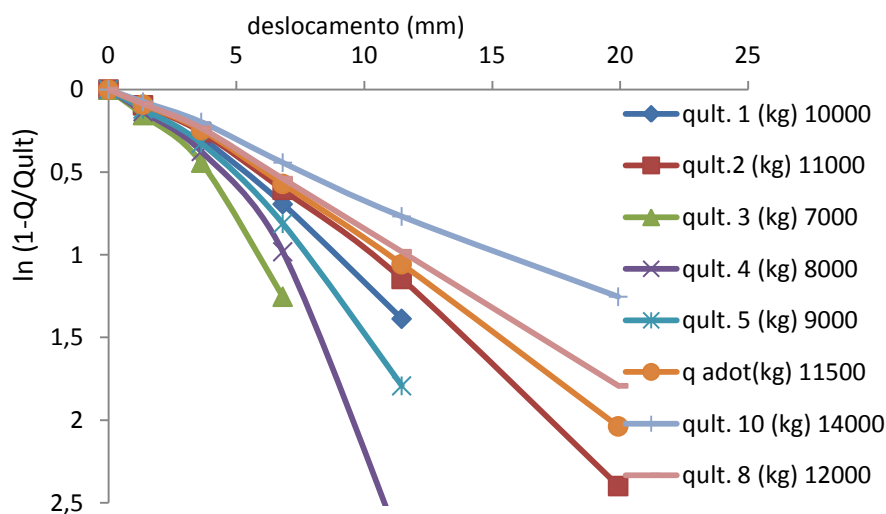


FIGURA 5.10 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO - CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTAPET PROTÓTIPO

## - ECE ESTACA DE AÇO – Protótipo

TABELA 5.2 - LEITURA DOS DADOS DO ECE ESTACA DE AÇO

## ENSAIO RÁPIDO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO - ESTACA AÇO

DATA:

INÍCIO:

TÉRMINO:

CARGA CÉLULA (kgf)	CARGA MANÔM. (kgf/cm <sup>2</sup> )	TEMPO min	EXTENSÔM 01 (mm)		EXTENSÔM 02 (mm)		média extens.(mm)
			INÍCIO	FIM	INÍCIO	FIM	
0	0	0					0
2500	80	10	0,22	0,25	0,49	0,52	0,385
5000	150	10	0,97	0,97	1,39	1,42	1,195
7500	225	10	1,7	1,76	2,26	2,34	2,05
10000	300	10	2,51	2,67	3,2	3,44	3,055
12500	370	10	3,07	4,22	4,06	4,31	4,265
15000	450	10	5,7	5,98	5,53	5,79	5,885
17500	520	10	8,6	9,22	8,02	8,76	8,99
17500	520	10		9,98		9,61	9,795
17500	520	10		10,05		9,68	9,865
<b>DESCARREGAMENTO</b>							
17500	520	10		10,05		9,68	9,865
12500	370	10		9,68		9,26	9,47
7500	225	10		9,15		8,64	8,895
2500	150	10		8,63		7,92	8,275
0	0	10		7,79		7,62	7,705
0	0	30		7,74		7,44	7,59
0	0	30		7,58		7,4	7,49

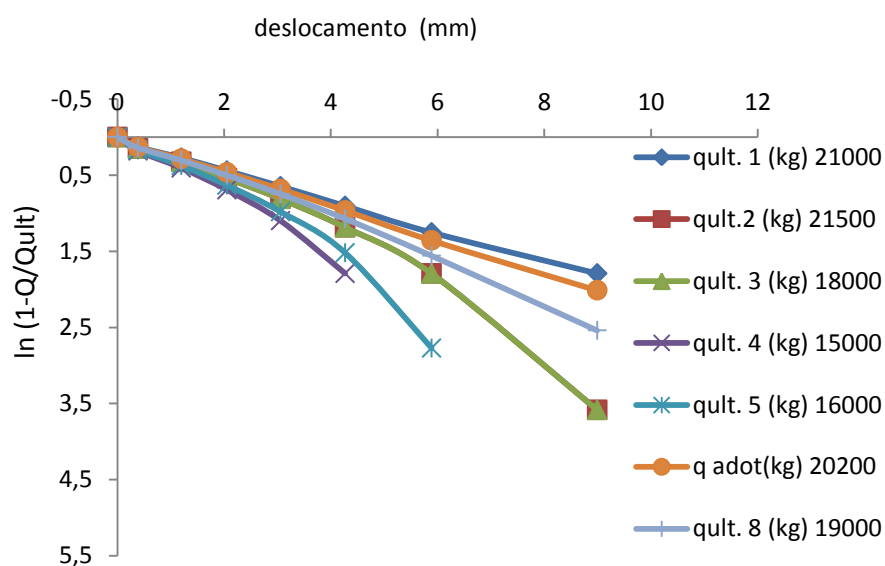


FIGURA 5.11 - AVALIAÇÃO DA CURVA CARGA X DESLOCAMENTO - CRITÉRIOS DE RUPTURA POR VAN DER VEEN (FÍSICA). ESTACA DE AÇO- PROTÓTIPO