

EDER CHAVEIRO ALVES

**UMA NOVA METODOLOGIA DE
EXTRAPOLAÇÃO DOS DADOS DA PROVA DE
CARGA DINÂMICA: MES-CASE**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação
em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal
de Goiás para obtenção do título de Mestre.
Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana
Co-orientador: Prof. Dr. Maurício Martines Sales

D0013G10 DO PPG-GECON
GOIÂNIA
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**GPT/BC/UFG**

A479n	Alves, Eder Chaveiro. Uma nova metodologia de extrapolação dos dados da prova de carga dinâmica: MES-CASE [manuscrito] / Eder Chaveiro Alves. - 2010. xxviii, 250 f. : il., figs, tabs. Orientador: Prof. Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana; Co-orientador: Maurício Martines Sales. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2010. Bibliografia. Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas. Apêndices. 1. Método de Extrapolação 2. Prova de Carga Dinâmica 3. Estaca Cravada I. Título. CDU: 620.179.12
-------	---

EDER CHAVEIRO ALVES

UMA NOVA METODOLOGIA DE EXTRAPOLAÇÃO DOS DADOS DA PROVA DE CARGA DINÂMICA: MES-CASE

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação
em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal
de Goiás para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em ____ / ____ / ____.

Prof. Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana (Presidente)
Universidade Estadual de Goiás

Prof. Dr. Maurício Martines Sales (Co-orientador)
Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Gilson de Farias Neves Gitirana Junior (Membro interno)
Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Alessandro Christopher Morales Kormann (Membro externo)
Universidade Federal do Paraná

DEDICATÓRIA

A Deus,

A minha mãe, pelo amor, carinho e confiança.

Ao meu pai e meus irmãos, pelo apoio dado nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás por ter me acolhido como aluno.

Ao Professor Paulo Márcio Fernandes Viana pela orientação, amizade e companheirismo mostrado durante o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Professor Mauricio Martines Sales por ter aceitado a função de co-orientador deste trabalho, dando dicas valiosas para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos Professores Alessandro Christopher Morales Kormann e Gilson de Farias Neves Gitirana Júnior, por aceitarem os convites para serem examinadores da banca de defesa deste trabalho.

A todos os professores do Programa de mestrado GECON, pela contribuição para o meu crescimento profissional. Em especial os professores Ademir Aparecido do Prado, Carlos Alberto Lauro Vargas e Gilson de Farias Neves Gitirana Júnior, pela amizade e dicas sugeridas durante a pesquisa.

Aos colegas de pós-graduação Alexandre, Camilla e Daniel Arthur, pela amizade, companheirismo e colaboração durante o curso. E ao Devonzir, pela ajuda na aquisição de algumas bibliografias.

À empresa SETE – Serviços Técnicos de Engenharia Ltda pelo fornecimento de todas as provas de carga dinâmica empregadas neste trabalho.

À AGETOP – Agência Goiana de Transportes, por proporcionar condições para o término do curso.

Aos meus familiares e amigos pelo estímulo.

“Nossa maior fraqueza está em desistir.

O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez”

Thomas Edison

RESUMO

Desde 1983, quando o ensaio de carregamento dinâmico foi introduzido no Brasil, a execução deste tipo de ensaio vem se tornando uma prática comum em obras de fundação em estacas de concreto pré-moldado cravadas. Em vários casos o ensaio de carregamento dinâmico não mobiliza a resistência última da estaca ensaiada, as causas desses eventos podem ser devido a: o equipamento disponível na obra não é capaz de obter energia cinética necessária para mobilizar a resistência última; o elemento estrutural apresenta rupturas; o cliente não deseja mobilizar toda resistência última; entre outros motivos. Sabendo a necessidade da determinação da resistência última, para a adequação da obra com os fatores de segurança exigidos pela NBR 6122/1996, este trabalho procura desenvolver uma metodologia de extrapolação da curva resistência estática mobilizada versus deslocamento máximo obtida pela prova de carga dinâmica (ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente), empregando o Método Simplificado CASE, para estacas de concreto pré-moldado cravadas. Por meio de estudos de 21 (vinte e uma) provas de carga dinâmica (PCD), desenvolveu-se uma metodologia de extrapolação intitulada como Método de Extrapolação Simplificado do Método CASE (MES-CASE). A metodologia é baseada no critério da energia complementar, apresentada por Aoki em 1997. Os resultados demonstraram que o método MES-CASE apresentou-se de fácil manuseio. Os valores estimados de energia complementar última, calculados pelo método MES-CASE, apresentaram-se bem próximos dos valores medidos, havendo apenas uma estaca que apresentou valor de erro maior que 10%. Os valores estimados de resistência estática última, obtidos pelo método MES-CASE, mostraram-se semelhantes aos valores medidos, tendo também um erro inferior a 10%. A função exponencial obteve os melhores resultados de coeficiente de ajuste (R^2) em relação aos pontos da curva resistência estática mobilizada versus deslocamento máximo medidos na prova de carga dinâmica. Além disso, empregando critérios de seleção de modelo obteve-se que a função exponencial é mais eficaz para estimar a curva resistência estática mobilizada versus deslocamento máximo do que as funções hiperbólica e parabólica.

Palavras Chave: Método de Extrapolação; Prova de Carga Dinâmica; Estaca Cravada

ABSTRACT

Since 1983, when the experiment of dynamic load has been plunged in Brazil, the execution of this kind of experiment has become a common practice in foundation sites on precast inserted piles. In many cases the experiment of dynamic load doesn't mobilize the ultimate strength of the tested pile; the causes of these events may be due to: the available equipment at the site isn't capable of obtaining enough kinetic energy to mobilize the ultimate strength; the structural element presents ruptures; the client desire of not mobilizing all the ultimate strength; among others. Knowing the necessity of determining the ultimate strength in order to adapt the construction to the security factors required by NBR 6122/1996, this essay pursuits developing a methodology of extrapolation of the curve of mobilized static resistance versus the maximum displacement obtained through the dynamic load proof (dynamic load experiment of crescent energy), applying the Simplified Method CASE, to inserted precast piles. Studying 21 (twenty-one) proofs of dynamic load (PDL), an extrapolation methodology has been developed entitled as Simplified Extrapolation Methodology of CASE Method (SEM-CASE). The methodology is based on the criteria of complementary energy, presented by Aoki in 1997. The results have demonstrated that the method SEM-CASE has presented itself as easy manipulation. The estimated values of ultimate complementary strength calculated by the SEM-CASE has presented pretty close to the measured values, existing only one pile which presented a value error bigger than 10%. The estimated values of ultimate pile strength, obtained by the SEM-CASE, showed themselves similar to the measured values, also having a value error inferior to 10%. The exponential function has obtained better results of adjustment coefficient (R^2) related to the points of the curve of mobilized static resistance versus the maximum displacement measured in the dynamic load proof. Besides, applying model selection criteria was obtained that the exponential function is more efficient to estimate the curve of mobilized static resistance versus the maximum displacement than the hyperbolic and parabolic functions.

Keywords: Extrapolation method; Proof of Load Dynamics; Driven Pile

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Leitura da curva carga x recalque em uma estaca submetida a carregamento de compressão axial (modificado pelo autor, KYFOR et al., 1992).....	12
Figura 2.2 – Gráfico carga x recalque (modificado pelo autor VARGAS, 1977 apud NIYAMA et al. 1996).....	13
Figura 2.3 – Curvas de Carga x Recalque típicas para ensaio de compressão axial (modificado pelo autor TOMLINSON, 1994).....	14
Figura 2.4 – Tipos de rupturas para estacas ensaiadas a compressão axial (modificado pelo autor KÉZDI, 1975 apud MURTHY, 2002).....	15
Figura 2.5 – Parcelas de resistência de atrito (R_{atrito}) e de ponta (R_{ponta}) que agem no elemento estrutural durante uma aplicação de compressão (Q) e a curva carga x recalque com as parcelas de resistências desmembradas (modificado pelo autor VELLOSO E LOPES, 2002).....	16
Figura 2.6 – Apresentação típica de resultados de transferência de carga (NIYAMA et al., 1996).....	17
Figura 3.1 – Sistema de medição para prova de carga de compressão (VELLOSO E LOPES, 2002).....	22
Figura 3.2 – Comparação dos Tempos de execução das provas de carga (modificado pelo autor FELLENIUS, 1975 apud FELLENIUS, 1980)	25
Figura 3.3 – Curva carga-recalque típica (modificado pelo autor FELLENIUS, 1975 apud FELLENIUS, 1980)	25
Figura 3.4 – Critério de Davisson.....	28
Figura 3.5 – Critério da NBR 6122.....	29
Figura 3.6 – Critério de Lopes (1979)	30

Figura 3.7 – Extrapolação da curva carga-recalque por Van der Veen (VELLOSO E LOPES, 2002).....	33
Figura 3.8 – Critério de Brinch Hansen/90% (FELLENIOUS, 1980).....	35
Figura 3.9 – Critério de Brinch Hansen/80% (FELLENIOUS, 1980).....	35
Figura 3.10 – Critério de Chin (FELLENIOUS, 1980).....	37
Figura 3.11 – Critério de Mazurkiewicz (1972) (APUD FELLENIOUS, 1980).....	38
Figura 3.12 – Critério de Massad (1986).....	39
Figura 3.13 – Critério de Décourt (FELLENIOUS, 2006).....	41
Figura 3.14 – Critérios de Fuller-Hoy e Butler-Hoy (FELLENIOUS, 1980).....	43
Figura 3.15 – Critério de De Beer (FELLENIOUS, 2006).....	43
Figura 4.1 – Tensões e deslocamento em uma barra (ALVES, 2004)	47
Figura 4.2 – Representação gráfica da solução de D'Alembert (ALVES, 2004).....	48
Figura 4.3 – Modelo de Smith (modificado NIYAMA, 1983; BOWLES, 1996; VELLOSO e LOPES, 2002).	51
Figura 4.4 - (a) Representação da estaca segundo modelo de Smith e (b) determinação da compressão $C_{m,n}$ da mola m (modificado VELLOSO e LOPES, 2002).....	52
Figura 4.5 – Diagrama de resistência “estática” versus deslocamento do solo na ponta da estaca (modificado pelo autor CHELLIS, 1961).....	53
Figura 4.6 – Diagramas de trajetória de ondas (modificado NIYAMA, 1991).....	58
Figura 4.7 – Registro típico das curvas de força e velocidade em função do tempo na seção dos sensores (modificado NIYAMA, 1991; GONÇALVES et al., 2000; GONÇALVES et al., 2007).....	59

Figura 4.8 – Energia de deformação e energia complementar (modificado pelo autor TIMONSHENKO e GERE, 1984).....	66
Figura 4.9 – Curva resistência “estática” mobilizada - deslocamento: origem única (modificado pelo autor AOKI, 1997).....	69
Figura 4.10 – Curva resistência total - deslocamento dinâmico no impacto (modificada pelo autor AOKI, 1997).....	72
Figura 4.11 – Diferença entre o modelo ideal e o modelo “real” considerando a curva (modificada pelo autor AOKI, 2000).....	76
Figura 5.1 – Bate-estacas realizando o ensaio de carregamento dinâmico.....	78
Figura 5.2 – Transdutores de deformação específica com blindagem (FOÁ, 2001).....	78
Figura 5.3 – Acelerômetro com blindagem (FOÁ, 2001).....	79
Figura 5.4 – Esquema para a realização da PCD com o uso do PDA.....	79
Figura 5.5 – PDA (<i>Pile Driving Analyser</i>) Modelo PAK.....	80
Figura 5.6 – PDA (<i>Pile Driving Analyser</i>) Modelo PAL (FOÁ, 2001).....	81
Figura 5.7 – Sistema de amortecimento composto por cepo, capacete metálico e coxim.....	88
Figura 5.8 – Curva Resistência Mobilizada (R) x Deslocamento máximo (D) da PCD.....	95
Figura 6.1 – Curva Resistência Mobilizada (R) x Deslocamento máximo (D) da PCD da Estaca 06.	98
Figura 6.2 – Curva Resistência Mobilizada (R) x Energia Cinética Aplicada (T) durante a PCD na Estaca 08.....	99
Figura 6.3 – Curva Energia Complementar (Vc) x Energia Cinética Aplicada (T) durante a PCD na Estaca 02.....	100
Figura 6.4 – Gráfico H_{queda} x R, Vc, T, da PCD realizada na Estaca 01.....	100

Figura 6.5 – Gráfico R x Var. R/Var. T da PCD realizada na Estaca 21.....	102
Figura 6.6 – Gráfico Var. R/Var. T x R, Vc, T, da PCD realizada na Estaca 21.....	103
Figura 6.7 – Gráfico Var. R/Var. T x Raito ilustrativo da Estaca 21.....	103
Figura 6.8 – Gráfico Var. R/Var. T x Rponta ilustrativo da Estaca 21.....	104
Figura 6.9 – Gráfico R versus Z ilustrativo da Estaca 21.....	104
Figura 6.10 – Gráficos R x Var. R/Var. T das Estacas 07 e 06.....	106
Figura 6.11 – Gráficos R x Var. R/Var. T das Estacas 03 e 15.....	107
Figura 6.12 – Gráficos R x Var. R/ Var.T das Estacas 08 e 10.....	108
Figura 6.13 – Gráficos R x Var. R/ Var. T das Estacas 04 e 16.....	108
Figura 6.14 – Gráfico R x D da Estacas 08.....	109
Figura 6.15 – Gráfico R x D dividido da Estaca 08.....	110
Figura 6.16 – Gráfico $V_{c_{n-1}}$ x V_{c_n} da Estaca 08.....	112
Figura 6.17 – Gráfico $V_{c_{n-1}}$ x V_{c_n} da Estaca 08 com a regressão quadrática.....	112
Figura 6.18 – Gráfico das curvas $V_{c_{n-1}}$ x V_{c_n} das Estacas de diâmetro de 0,42 m.....	113
Figura 6.19 – Gráfico R x D da Estaca 11.....	115
Figura 6.20 – Gráfico R x Var. R/ Var.T da Estaca 11.....	116
Figura 6.21 – Regressão linear dos últimos cinco pontos do gráfico R x Var. R/ Var. T da Estaca 11.....	117
Figura 6.22 – Gráfico R x D, da Estaca 11, dividido em trechos de deslocamentos máximo iguais.....	118
Figura 6.23 – Gráfico $V_{c_{n-1}}$ x V_{c_n} da Estaca 11 com regressão quadrática.....	119
Figura 6.24 – Comparação das curvas R x D medida e das calculadas.	121

Figura 6.25 – Fluxograma do Método MES-CASE.....	122
Figura 6.26 – Distribuição dos valores da relação V_{c_u} estimados pelos V_{c_u} medidos com a numeração das estacas analisadas.....	124
Figura 6.27 – Distribuição dos valores da relação R_u estimados pelos R_u medidos com a numeração das estacas estudadas.....	125
Figura 6.28 – Distribuição dos valores de R^2 da função exponencial.....	127
Figura 6.29 – Distribuição dos valores de R^2 da função hiperbólica.....	128
Figura 6.30 – Distribuição dos valores de R^2 da função parabólica.	130
Figura 6.32 – Gráfico de barras da relação R_u calculado pelo R_u medido dos critérios de extrapolação para PCE.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Dados das PCD.....	82
Tabela 5.1 – Dados das PCD (continuação).....	83
Tabela 5.1 – Dados das PCD (continuação).....	84
Tabela 5.1 – Dados das PCD (continuação).....	85
Tabela 5.2 – Dados geométricos dos elementos estruturais dos SIF.....	86
Tabela 5.3 – Dados dos solos circundantes dos SIF.....	87
Tabela 6.1 – Valores de $(Var. R/Var. T)_{RP}$ para os SIF estudados.....	105
Tabela 6.2 – Valores dos D e R interpolados e os V_c calculados da Estaca 08.....	111
Tabela 6.3 – Valores dos D, R, T, Var. R, Var. T e Var. R/Var. T da Estaca 11.....	115
Tabela 6.4 – Valores dos D e R interpolados e os V_c calculados da Estaca 11.....	118
Tabela 6.5 – Valores dos V_{cu} medidos e estimados e o erro.	123
Tabela 6.6 – Valores dos R_u medidos e estimados e o erro.....	124
Tabela 6.7 – Valores dos R^2 da função exponencial.....	126
Tabela 6.8 – Valores dos R^2 da função hiperbólica.....	128
Tabela 6.9 – Valores dos R^2 da função parabólica.	129
Tabela 6.10 – Valores dos R^2 das funções exponencial, hiperbólica e parabólica.....	132
Tabela 6.11 – Valores dos critérios de informação que avaliam as funções exponencial, hiperbólica e parabólica.....	133
Tabela 6.11 – Valores dos critérios de informação que avaliam as funções exponencial, hiperbólica e parabólica (continuação).....	134

Tabela 6.11 – Valores dos critérios de informação que avaliam as funções exponencial, hiperbólica e parabólica (continuação).....	135
Tabela 6.12 – Valores dos R_u das Estacas 2, 10, 11, 18, 20 e 21 calculados com critérios para PCE, MES-CASE e R_u medido.....	136
Tabela 6.13 – Valores da relação R_u calculado pelo R_u medido dos critérios de extrapolação do R_u para PCE e o método MES-CASE das Estacas 2, 10, 11, 18, 20 e 21.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – área da seção transversal da estaca

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AIC – critério de informação Akaike

AIC_C – critério de informação Akaike corrigido

B – diâmetro do círculo circunscrito à estaca

BIC – critério de informação bayesiano

c – velocidade de propagação da onda

CAPWAP – *Case Pile Wave Analysis Program*

CAPWAPC – *Case Pile Wave Analysis Program Continuous*

CASE – *Case Institute of Technology*

CRP – *Constant Rate of Penetration*

C_m – compressão da mola m

dV – elemento de volume

D – deslocamento máximo

D_m – deslocamento; do peso m medido em relação à posição inicial

D_u – deslocamento limite.

E – módulo de elasticidade do material da estaca

F_↑ – onda de compressão ascendente

F_↓ – onda de compressão descendente

$F_{1\downarrow}$ – força de compressão inicialmente gerada pelo golpe (

$F_{P\downarrow}$ – força que chega à ponta da estaca

$F_{A\downarrow}$ – força transmitida pelo golpe na seção dos sensores.

F_m – força exercida pela mola m

F_{t_1} – força medida no tempo t_1

F_{t_2} – força medida no tempo t_2

FPE – critério do erro de previsão final

h – altura de queda do martelo

H_{queda} – altura de queda do martelo

HQC – critério Hannan-Quinn

J – impedância do solo ou “*damping*”

J_c – coeficiente de amortecimento dinâmico do método simplificado CASE

J_m – fator de amortecimento do solo lateral

J_p – fator de amortecimento do solo de ponta

K – rigidez do sistema estaca-solo

K_u – parcela elástica (repique) limite

L – comprimento da estaca

m – peso no qual faz parte da barra

MDL – critério de comprimento mínimo

MES-CASE – Método de Extrapolação Simplificado do Método Simplificado CASE

MML – Mixed Maintained Load Test

N_{SPT} – número de golpes do martelo empregado no ensaio SPT

P – carga externa

PCD – prova de Carga Dinâmica

PCE – prova de carga estática

PDA – *Pile Driving Analyzer*

Q – carga de compressão ou máxima deformação do solo (*Quake*)

Q_L – parcela correspondente à resistência do atrito lateral ao longo do fuste

Q_{max} – maior valor da carga aplicada no ensaio de campo

Q_P – parcela correspondente à resistência de ponta

Q_{ult} – carga última de um sistema estaca-solo

QML – *Quick Maintained Load Test*

R – resistência “estática” mobilizada

R^2 – coeficiente de correlação ou de ajuste

R_{atrito} – parcela de resistência de atrito

R_d – parcela de resistência dinâmica

R_m - força ou resistência externa atuando no peso m

R_{ponta} – parcela de resistência de ponta

R_s - parcela de resistência estática

R_{su} – resistência estática última

R_t – resistência total

R_{tu} – resistência total limite

R_u – resistência estática última mobilizada

RP – resistência de ponta

s_k – valores teóricos de recalque

S – recalque no topo da estaca

SIF – sistema isolado de fundação

SML – *Slow Maintained Load Test*

SPT – *Standard Penetration Test*

S_u – parcela permanente (nega) limite

SSE – soma dos quadrados dos resíduos

SSR – soma dos quadrados da regressão

SST – soma dos quadrados totais

t – tempo de propagação da onda

t_1 – instante em que o golpe atinge a maior intensidade na seção dos sensores

t_2 – instante em que a onda refletida na ponta da estaca retorna a seção instrumentada

T – energia cinética total do sistema

T_c – energia cinética complementar

T_{cu} – energia cinética complementar última

T_u – energia cinética última

u – deslocamento longitudinal de um ponto qualquer da estaca ou energia de deformação por unidade de volume

v – velocidade de deslocamento

$v\uparrow$ – velocidade de deslocamento ascendente

$v\downarrow$ – velocidade de deslocamento descendente

v_p – velocidade de deslocamento da ponta da estaca

vt_1 – velocidade medida no tempo t_1

vt_2 – velocidade medida no tempo t_2

V – energia potencial do sistema

Var. R – variação da resistência “estática” mobilizada

Var. T – variação da energia cinética

V_c – energia potencial complementar

V_{cu} – energia potencial complementar última

V_e – energia de deformação potencial elástica

V_m – velocidade do peso m

V_s – parcela de energia de deformação potencial

w – recalque no topo da estaca

W – trabalho

W^* – trabalho complementar

W_a – trabalho das forças de amortecimento

W_{au} – trabalho das forças de amortecimento limite

W_e – peso do elemento estrutural da estaca

W_E – trabalho realizado por forças exteriores

W_m – peso do martelo

W_{nc} – trabalho efetuado pelas forças não conservativas que atuam no sistema

W_q – trabalho das forças estáticas

W_s – trabalho realizado pela parcela estática das forças

x – distância do ponto considerando ao topo da estaca

y_{med} – média dos valores observados para a variável dependente

Z – constante de proporcionalidade

Z_m – força resultante atuante no peso m

$(Var. R/Var. T)_{RP}$ – valor de $Var. R/ Var. T$ “aproximado” no qual começa a mobilizar a parcela de resistência de ponta

LISTA DE SÍMBOLOS

α – coeficiente que define a forma da curva da função exponencial de Van der Veen

δ – deformação do segmento da estaca ou deslocamento de deformação

δ_1 – valor máximo do deslocamento

ΔE – variação de energia

ΔL – variação da distância do segmento da estaca

ΔQ – incremento de carga

ΔU – variação de energia interna

ΔV – incremento de velocidade

Δt – intervalo de tempo

ΔT – incremento de energia cinética

ΔW_a – incremento de trabalho das forças não-conservativas

ε – deformação específica

ε_1 – deformação específica última

η – fator de modo de distribuição do atrito lateral

ξ – fator de mobilização da resistência de ponta

ρ – recalque no topo da estaca

σ – tensão sobre o material

σ_x – tensão que atua na extremidade da barra

$\Sigma RA(x)$ – atrito lateral acumulado até a profundidade x

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	3
1.1.1 Objetivos Específicos.....	4
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
CAPÍTULO 2 COMPORTAMENTO DE ESTACAS.....	6
2.1 INTRODUÇÃO.....	6
2.2 ELEMENTOS E EQUIPAMENTO DE ESTACAS CRAVADAS.....	7
2.2.1 Elementos de Uso da Estaca Pré-Moldada de Concreto.....	7
2.2.2 Equipamentos Utilizados na Cravação do Elemento Estrutural.....	8
2.3 TENSÕES DURANTE E APÓS A INSTALAÇÃO DA ESTACA NO SOLO.....	9
2.3.1 Comportamento do SIF Durante a Instalação da Estaca.....	10
2.3.2 Tensões Residuais Após a Instalação Da Estaca.....	10
2.4 COMPORTAMENTO CARGA VERSUS RECALQUE DA ESTACA ISOLADA SOBRE COMPRESSÃO AXIAL.....	11

2.5 TRANSFERÊNCIAS DE CARGA AO LONGO DA ESTACA.....	15
CAPÍTULO 3 PROVA DE CARGA ESTÁTICA.....	19
3.1 INTRODUÇÃO.....	19
3.2 EXECUÇÃO DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA.....	21
3.3 TIPOS DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA À COMPRESSÃO.....	22
3.4 CRITÉRIOS DE RUPTURA.....	26
3.4.1 Valores De Recalque.....	27
3.4.1.1 Valores Absolutos De Recalque.....	27
3.4.1.2 Valores Relativos De Recalque.....	27
3.4.2 Extrapolação Gráfica.....	30
3.4.2.1 Critério de Van der Veen.....	31
3.4.2.2 Critério dos 80% e 90% de Brinch-Hansen.....	33
3.4.2.3 Critério de Chin.....	36
3.4.2.4 Critério de Mazurkiewicz.....	37
3.4.2.5 Critério do Massad (1986)	38
3.4.3 Determinação da Carga de Ruptura Baseado na Análise da Rigidez Estaca-Solo.....	40
3.4.3.1 Critério de Décourt.....	40
3.4.3.2 Critério de Fuller e Hoy e Butler e Hoy.....	42
3.4.3.3 Critério de De Beer.....	43
3.4.4 Normas de Cidades e Estados.....	44
CAPÍTULO 4 ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO.....	45

4.1 INTRODUÇÃO.....	45
4.2 HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DA ONDA EM ESTACAS.....	46
4.3 MÉTODO SIMPLIFICADO CASE.....	54
4.4 ENERGIA DE DEFORMAÇÃO E ENERGIA COMPLEMENTAR.....	64
4.5 ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO DE ENERGIA CRESCENTE.....	67
4.6 CRITÉRIO DE ENERGIA COMPLEMENTAR.....	70
4.6.1 Princípio De Hamilton.....	71
4.6.2 Princípio Do Critério Da Energia Complementar.....	72
CAPÍTULO 5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	77
5.1 EXECUÇÃO E OS DADOS DOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO DINÂMICO DE ENERGIA CRESCENTE.....	77
5.2 CARACTERÍSTICAS DOS SIF ESTUDADOS.....	85
5.2.1 Características Dos Elementos Estruturais.....	85
5.2.2 Características Dos Solos Circundantes.....	86
5.2.3 Características Dos Sistemas De Cravação.....	87
5.3 REGRESSÃO LINEAR E QUADRÁTICA.....	88
5.3.1 Regressão Linear.....	88
5.3.2 Regressão Quadrática.....	89
5.3.3 Qualidade Do Ajustamento.....	90
5.3.4 Critério de Seleção Baseados em Medidas de Informação.....	92
5.3.4.1 Critério de Informação Akaike (AIC).....	92

5.3.4.2 Critério do Erro de Previsão Final (FPE).....	92
5.3.4.3 Critério de Comprimento Mínimo (MDL).....	93
5.3.4.4 Critério de Informação Bayesiano (BIC).....	93
5.3.4.5 Critério Hannan-Quinn (HQC).....	93
5.3.4.6 Critério de Informação Akaike Corrigido (AIC _C).....	93
5.4 EQUAÇÕES EXPONENCIAL, HIPERBÓLICA E PARABÓLICA EMPREGADAS COMO GEOMETRIA DA CURVA R x D.....	93
5.4.1 Equação Exponencial Empregada Como Geometria da curva R x D.....	94
5.4.2 Equação Hiperbólica Empregada Como Geometria da Curva R x D.....	95
5.4.3 Equação Parabólica Empregada Como Geometria da Curva R x D.....	96
CAPÍTULO 6 APRESENTAÇÃO E A DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	97
6.1 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS GRÁFICOS ORIUNDOS DOS DADOS DAS PCD.....	97
6.1.1 Gráfico R x D.....	97
6.1.2 Gráfico R x T.....	98
6.1.3 Gráfico V _c x T.....	99
6.1.4 Gráfico Hqueda x R, T, V _c	100
6.1.5 Gráfico R x Var. R/ Var. T.....	101
6.1.6 Gráfico V _{cn-1} x V _{cn}	109
6.2 METODOLOGIA DE EXTRAPOLAÇÃO PROPOSTA.....	114
6.2.1 Método MES-CASE.....	114
6.2.2 Fluxograma Do Método MES-CASE.....	121

6.3 COMPARAÇÃO DOS VALORES DE R_u E V_{cu} ESTIMADOS COM OS MEDIDOS.....	123
6.3.1 Comparação dos Valores de V_{cu} Medidos com os Estimados.....	123
6.3.2 Comparação dos Valores de R_u Medidos com os Estimados.....	124
6.4 ANÁLISES DAS FUNÇÕES DE EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA $R \times D$	125
6.4.1 Análise da Equação Exponencial na Extrapolação da Curva $R \times D$	125
6.4.2 Análise da Equação Hiperbólica na Extrapolação da Curva $R \times D$	127
6.4.3 Análise da Equação Parabólica na Extrapolação da Curva $R \times D$	129
6.4.4 Comparação do Uso das Equações Exponencial, Hiperbólica e Parabólica para a Extrapolação da Curva $R \times D$	130
6.5 ANÁLISES DE DIFERENTES CRITÉRIOS, EMPREGADOS EM PCE, APLICADOS NAS CURVAS $R \times D$	131
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	138
7.1 CONCLUSÕES.....	138
7.2 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	140
REFERÊNCIAS.....	141
APÊNDICE A – Gráficos $R \times D$ dos SIF estudados.....	146
APÊNDICE B – Gráficos $R \times T$ dos SIF estudados.....	154
APÊNDICE C – Gráficos $V_c \times T$ dos SIF estudados.....	162
APÊNDICE D – Gráficos $H_{queda} \times T, V_c, R$ dos SIF estudados.....	170
APÊNDICE E – Gráficos $Var. R / Var. T \times T, V_c, R$ dos SIF estudados.....	178
APÊNDICE F – Gráficos $R \times Var. R / Var. T$ dos SIF estudados.....	186

APÊNDICE G – Gráficos $R \times \text{Var. R/ Var.T}$ empregados no cálculo do R_u dos SIF estudados.....	197
APÊNDICE H – Gráficos $R \times D$ dividido em ΔD iguais dos SIF estudados.....	208
APÊNDICE I – Gráficos $V_{cn-1} \times V_{cn}$ empregado no cálculo do V_{cu} dos SIF estudados.....	216
APÊNDICE J – Gráficos $R \times D$ extrapolados pela função exponencial (tracejado) para os SIF estudados.....	227
APÊNDICE L – Gráficos $R \times D$ extrapolados pela função hiperbólica (tracejado) para os SIF estudados.....	235
APÊNDICE M – Gráficos $R \times D$ extrapolados pela função parabólica (tracejado) para os SIF estudados.....	243