

DANIEL KINA MURAKAMI

NOVO PROCEDIMENTO PARA A REALIZAÇÃO DE ANÁLISE
CAPWAP NO ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO EM
ESTACAS PRÉ-MOLDADAS

SÃO PAULO
2015

DANIEL KINA MURAKAMI

NOVO PROCEDIMENTO PARA A REALIZAÇÃO DE ANÁLISE
CAPWAP NO ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO EM
ESTACAS PRÉ-MOLDADAS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração:
Engenharia Geotécnica

Orientador:
Prof. Dr. Faiçal Massad

SÃO PAULO
2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Murakami, Daniel Kina

**Novo procedimento para a realização de análise capwap no ensaio de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas
D. K. Murakami – São Paulo, 2015
538 p**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

**1.Estacas 2.Ensaio de carregamento dinâmico 3.CAPWAP
4.Prova de carga estática 5.Match quality de recalques.
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t.**

“One expert’s test is worth a thousand unprofessional attempts”

Frank Rausche and Mohamad Hussein

“Um carro de corrida não ganha a corrida sozinho, é preciso de um bom piloto para obter o melhor resultado. Macacos hidráulicos e PDAs fazem os testes sozinhos? O que esperar das provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico?”

Daniel Murakami

Sumário

RESUMO	7
ABSTRACT	8
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
1.1 – OBJETIVOS	17
1.2 – GENERALIDADES.....	18
1.3 – JUSTIFICATIVA	20
1.4 – METODOLOGIA.....	22
1.5 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 – Capacidade de carga e carga admissível	25
2.2 – Prova de carga estática	26
2.3 – Ensaio de carregamento dinâmico.....	27
2.4 – Variação dos resultados do CAPWAP.....	36
2.5 – Métodos semi-empíricos.....	39
2.6 – Métodos Dinâmicos.....	41
2.6.1 – Fórmulas Dinâmicas.....	44
2.6.2 – Teoria da Equação da onda	47
2.7. – Influência de tensões residuais	51
2.7.1 – Influência de tensões residuais segundo Fellenius (2002, 2009).....	51
2.7.2 – Influência de tensões residuais segundo Massad (1995).....	53
2.8. – Influência do atrito negativo.....	57
2.9. – Perda do atrito lateral em função do drapejamento.....	61
2.10. – Variação da capacidade de carga em função do tempo	63
2.11. – Interpretação de provas de carga estática e dinâmica	66
2.11.1 – Formato da curva $P_o \times Y_o$	66
2.11.2 – Critério do Limite (“Offset”) de Davisson para definição de ruptura.....	72
2.11.3 – Método NBR 6122/2010 para definição de ruptura	74
2.11.4 – Métodos para extrapolação da capacidade de carga.....	74
2.11.4.1 – Método de Van der Veen	74
2.11.4.2 – Método de Chin-Kondner (1970)	76
2.11.4.3 – Método da Rigidez de Décourt.....	77
2.11.5 – Correlação entre prova de carga estática e ensaio de carregamento dinâmico.....	78
CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTO PROPOSTO	86
CAPÍTULO 4 – CASOS DE OBRA ANALISADOS.....	93
4.1 – Primeiro Caso: Obra em Jacareí.....	93

4.1.1 – Características do subsolo e seus reflexos na cravação das estacas.....	94
4.1.2 – Provas de carga estática (PCE).....	95
4.1.3. – Ensaio de carregamento dinâmico (ECD).....	96
4.2 – Segundo Caso: Obra em Osasco	97
4.2.1 – Descrição do subsolo	97
4.2.2 – Prova de carga estática (PCE)	98
4.2.3 – Ensaio de carregamento dinâmico (ECD).....	99
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS OBTIDOS.....	100
5.1. - Jacareí.....	100
5.1.1 - Correlação entre as estacas P49 (PCE) e P56 (ECD) de seção 20x20cm.....	100
5.1.1.1 – Análise para altura de queda de 50cm	101
5.1.1.2 – Análise para altura de queda crescente	105
5.1.2 - Correlação entre as estacas E01 (PCE) e E53 (ECD) de seção ϕ 33cm.....	114
5.1.2.1 – Análise para altura de queda de 60cm	115
5.1.2.2 – Análise para altura de queda crescente	119
5.1.3 - Correlação entre as estacas E01 (PCE) e E41 (ECD) de seção ϕ 33cm.....	129
5.1.3.1 – Análise para altura de queda de 70cm	130
5.1.3.2 – Análise para altura de queda crescente	134
5.2. – Osasco.....	145
5.2.1 - Correlação entre estacas E01 (PCE) e E02 (ECD) de seção ϕ 38cm.....	145
5.2.1.1 – Análise para altura de queda de 60cm	146
5.2.1.2 – Análise para altura de queda crescente	150
5.3. – Resumo dos resultados obtidos – capacidade de carga.....	159
5.4. – Resumo dos resultados obtidos – recalques.....	166
5.4.1 – Carregamento estático com o peso próprio do martelo (CEPM) realizado antes do Ensaio de carregamento dinâmico (ECD)	166
5.4.2 – Carregamento estático com o peso próprio do martelo (CEPM) realizado após o Ensaio de carregamento dinâmico (ECD)	174
5.5. – Comparação entre os diferentes testes em estacas (PCE e PDA)	181
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	183
6.1 – Generalidades	183
6.2 – Sobre o Procedimento Proposto.....	183
6.3 – Sobre a determinação de q_s e do novo conceito “MQr”	183
6.4 – Sobre a proporcionalidade entre a Resistência Dinâmica Total (R_d) e a Velocidade máxima do topo da estaca.....	185
6.5 – Sobre as Relações de Cambefort.....	186
6.6 – Sobre as tensões residuais e o fenômeno de atrito negativo.....	186
6.7 – Considerações Finais	187

CAPÍTULO 7 – SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	190
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	191
ANEXO A – SONDAGEM TÍPICA DE JACAREÍ – SEÇÃO GEOLÓGICA.....	197
ANEXO A – SONDAGEM TÍPICA DE JACAREÍ – SEÇÃO GEOLÓGICA.....	198
ANEXO B – SONDAGEM TÍPICA DE OSASCO – SEÇÃO GEOLÓGICA.....	199
ANEXO B – SONDAGEM TÍPICA DE OSASCO – SEÇÃO GEOLÓGICA.....	200
ANEXO B – SONDAGEM TÍPICA DE OSASCO – SEÇÃO GEOLÓGICA.....	201
ANEXO C – PROVAS DE CARGA ESTÁTICA	202
ANEXO C – EVOLUÇÃO DA CURVA CARGA-RECALQUE	204
ANEXO D – ANÁLISES CAPWAP – OBRA DE JACAREÍ.....	218
ANEXO E – ANÁLISES CAPWAP – OBRA DE OSASCO	219

RESUMO

Desde a década de 1980 diversos autores apresentaram correlações entre provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico em estacas. Para uma boa correlação é fundamental que os testes sejam bem executados e que atinjam a ruptura segundo algum critério, como o de Davisson, por exemplo, além de levar em conta o intervalo de tempo entre a execução da prova de carga estática e do ensaio dinâmico, face ao efeito “set up”. Após a realização do ensaio dinâmico realiza-se a análise CAPWAP que permite a determinação da distribuição do atrito lateral em profundidade, a carga de ponta e outros parâmetros dos solos tais como quakes e damping. A análise CAPWAP é realizada por tentativas através do procedimento “signal matching”, isto é, o melhor ajuste entre os sinais de força medido pelos sensores e o calculado. É relativamente fácil mostrar que a mesma solução pode ser obtida através de dados de entrada diferentes. Isso significa que apesar de apresentarem cargas mobilizadas próximas o formato da curva da simulação de prova de carga estática, obtida pelo CAPWAP, assim como a distribuição do atrito lateral, podem ser diferentes, mesmo que as análises apresentem “match quality” (MQ_{WU}) satisfatórios. Uma forma de corrigir o formato da curva simulada do CAPWAP, assim como a distribuição do atrito lateral, é através da comparação com provas de carga estática (PCE). A sobreposição das duas curvas, a simulada e a “real”, permite a determinação do quake do fuste através do trecho inicial da curva carga-recalque da prova de carga estática, que por sua vez permite uma melhor definição da distribuição do atrito lateral e da reação de ponta. Neste contexto surge o conceito de “match quality de recalques” (MQ_R). Quando a PCE não está disponível, propõe-se efetuar um carregamento estático utilizando o peso próprio do martelo do bate-estaca (CEPM). Mostra-se, através de dois casos de obra, em que estavam disponíveis ensaios de carregamento dinâmico e PCEs, que esse procedimento permite obter uma melhor solução do ponto de vista físico, isto é, consistente com as características do subsolo e com a curva carga-recalque da PCE, e não apenas matemático, através da avaliação do “match quality” (MQ_{WU}).

Palavras chave: ensaio de carregamento dinâmico, análise CAPWAP, prova de carga estática, “match quality de recalques”.

ABSTRACT

Since the 1980s a lot of authors showed correlations between static load tests and dynamic load tests on piles. For a good correlation it is necessary a good execution of the load test, also it is necessary to choose a capacity value from the results of the static load test, for example, the Davisson Offset limit load. The time of execution between the static load test and the dynamic load test should be considered because of the set up effect. Dynamic data may be further analyzed by CAPWAP Method to evaluate the soil resistance distribution, the toe resistance, quake and damping values. It is a signal matching method. Its results are based on the “best possible match” between computed pile top variable such as the pile top force and its measured equivalent. It is easy to demonstrate almost the same pile capacity on CAPWAP using different soil parameters. It means that even the pile capacity is almost the same, the shape of the pile top load-displacement of the CAPWAP Method and the shaft friction distribution can be different, although all results confirm good match quality. One way to correct the shape of the top load-displacement of the CAPWAP Method, as well as the shaft friction distribution, is by comparison to a static load test. Overlaying both curves, the static load test and the CAPWAP Method, it is possible to determine the shaft quake value on the initial loads on the top load-displacement curve, allowing this way a improvement of the shaft resistance distribution and the toe resistance. In this context arises the concept of “match quality of settlements”. When the static load test is not available, this thesis proposes a static load test using the hammer’s weight of the pile driving machine. It is shown by two case studies that were available static load tests and dynamic load tests, this procedure allows a better solution on physics aspects, this is consistent with the subsoil conditions and the load-settlement curve of the static load test, not only a mathematical solution based on match quality.

Key words: dynamic load test, CAPWAP analysis, static load test, “match quality of settlements”.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação dos diversos métodos utilizados para avaliação do desempenho das fundações	21
Figura 2 – Prova de carga mista (Décourt, 2008).	27
Figura 3 - Marcação da estaca para instalação dos sensores (Fonte: própria do autor)	29
Figura 4 – Furação da estaca para instalação dos chumbadores (Fonte: própria do autor) .	29
Figura 5 – Instalação dos chumbadores (Fonte: própria do autor)	30
Figura 6 – Posicionamento dos chumbadores de expansão na estaca (Fonte: própria do autor)	30
Figura 7 – Acelerômetro e transdutor de deformação (Fonte: própria do autor).....	31
Figura 8 – Aplicação dos golpes do martelo do bate-estaca (Fonte: própria do autor)	31
Figura 9 – Captação do sinal do golpe do martelo aplicado na estaca (Fonte: própria do autor)	32
Figura 10 – Modelo do solo para o fuste da estaca (CAPWAP Manual, 2006).....	33
Figura 11 - Modelo do solo para a ponta da estaca (CAPWAP Manual, 2006)	34
Figura 12 – Modelo “Radiation Damping” (CAPWAP Manual, 2006)	34
Figura 13 – Solução inicial do CAPWAP (Fonte: própria do autor, Obra de Osasco)	35
Figura 14 – Solução final do CAPWAP (Fonte: própria do autor, Obra de Osasco)	35
Figura 15 – Variação da distribuição do atrito lateral.	38
Figura 16 – Correlação entre valores calculados e medidos do Método Aoki e Velloso (1975)	40
Figura 17 – Correlação entre o Método Decourt e Quaresma (1978)	41
Figura 18 – Observação da resposta à cravação de uma estaca: a) medida simples da nega, b) medida da nega e repique e c) monitoração da cravação com instrumentos eletrônicos (Velloso e Lopes, 2002).	43
Figura 19 – Correlação utilizando a fórmula original	46
Figura 20 – Correlação utilizando o fator de segurança corrigido	47
Figura 21 – Propagação de onda na estaca (Fonte: Niyama, 1983)	48
Figura 22 – Influência de tensões residuais (Fellenius, 2002).....	53
Figura 23 – Primeira relação de Cambefort	54
Figura 24 – Segunda relação de Cambefort.....	54
Figura 25 – Curva carga-recalque teórica	55
Figura 26 – Equilíbrio de forças	55
Figura 27 – Relações de Cambefort Modificadas	57
Figura 28 – Definição da linha neutra (Fellenius, 1998).....	58
Figura 29 – Comportamento de estacas submetidas a diferentes tipos de carregamentos. .	61
Figura 30 – Perda da capacidade de carga em função da relaxação	66
Figura 31 – Curva do tipo aberta (Cintra et al, 2013)	67
Figura 32 – Ruptura nítida (Cintra et al, 2013)	68
Figura 33 – Ruptura física (Cintra et al, 2013).....	68
Figura 34 – Prova de carga sem indício de Ruptura (Cintra et al, 2013)	69
Figura 35 – Conceito de ruptura convencional de Terzaghi (Cintra et al, 2013).....	70
Figura 36 – Curva RMX-DMX.....	71
Figura 37 – Curva RMX-DMX.....	71
Figura 38 – Curva RMX-DMX.....	72
Figura 39 – Método de Davisson e Davisson Modificado (Fonte: própria do autor, Obra de Jacarei).	73
Figura 40 – Método NBR 6122:2010.....	74

Figura 41 – Solução gráfica de Van der Veen (Cintra et al, 2013).....	75
Figura 42 – Método Chin-Kondner (Fellenius, 2009).....	77
Figura 43 – Método de Décourt (Décourt, 1996).....	78
Figura 44 – Comparação CAPWAP (procedimento automático) x prova de carga estática..	84
Figura 45 – Comparação CAPWAP (“best match quality”) x prova de carga estática	84
Figura 46 – Comparação CAPWAP (modelo Radiation Damping) x prova de carga estática	85
Figura 47 – Curva “Wave Up” com $q_s=0,868\text{mm}$ (Fonte: própria do autor, Obra de Osasco)	88
Figura 48 – Curva “Wave Up” com $q_s=3,5\text{mm}$ (Fonte: própria do autor, Obra de Osasco)...	88
Figura 49 – Procedimento para realização da PCE.....	90
Figura 50 – Procedimento para realização da PCE.....	91
Figura 51 – Curva RMX-DMX e ruptura de Davisson (Osasco)	99
Figura 52 – Correlação entre PCE x CAPWAP x Case (Jacareí).....	100
Figura 53 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Jacareí).....	101
Figura 54 - Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Jacareí).....	102
Figura 55 – Influência do quake do fuste da curva carga-recalque considerando melhor MQR ($q_s=2,25\text{mm}$) e pior MQR ($q_s=7,5\text{mm}$) (Jacareí)	103
Figura 56 – Variações da força axial em profundidade para diversos valores de quake do fuste (Estaca P56 – Jacareí)	105
Figura 57 – Relação entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca (Estaca P56 – Jacareí).....	106
Figura 58 – Evolução da curva carga-recalque com a energia aplicada na estaca P56, comparando com a estaca P49 (PCE) - Jacareí.....	107
Figura 59 – variação da força axial em profundidade (Estaca P56 – Jacareí).....	108
Figura 60 – Evolução do J_c com o golpe aplicado (Estaca P56 – Jacareí).....	108
Figura 61 – Variação do atrito lateral - Primeira Relação de Cambefort – Procedimento Proposto (Estaca P56 – Jacareí)	109
Figura 62 – Comportamento da ponta da estaca - Segunda Relação de Cambefort – Procedimento Proposto (Estaca P56 – Jacareí)	110
Figura 63 – Efeito de SS (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca P56 – Jacareí)	111
Figura 64 - Efeito de ST (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca P56 – Jacareí)	111
Figura 65 - Redução dos valores de "Match Quality" (MQ_{WU}) (Estaca P56 – Jacareí).....	112
Figura 66 - Segunda Relação de Cambefort do procedimento tradicional (Estaca P56 – Jacareí)	112
Figura 67 – Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total e a velocidade máxima do topo (Estaca P56 – Jacareí)	113
Figura 68 – Correlação entre PCE x CAPWAP x Case (Estaca E53 - Jacareí).....	114
Figura 69 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E53 - Jacareí). 115	
Figura 70 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E53 - Jacareí). 116	
Figura 71 – Influência do quake do fuste da curva carga-recalque considerando melhor MQR ($q_s=1,614\text{mm}$) e pior MQR ($q_s=7,5\text{mm}$) (Estaca E53 - Jacareí)	117
Figura 72 – Variações da força axial em profundidade para diversos valores de quake do fuste (Estaca E53 - Jacareí)	119
Figura 73 – Relação entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca (Estaca E53 – Jacareí).....	120
Figura 74 – Evolução das curvas carga-recalque com o golpe aplicado na estaca E53, comparando com a estaca E01 (PCE) - Jacareí.....	122
Figura 75 – Variação da força axial em profundidade com o golpe aplicado (Estaca E53 – Jacareí)	122
Figura 76 – Evolução do J_c com o golpe aplicado (Estaca E53 – Jacareí).....	123

Figura 77 – Comportamento do atrito lateral – Primeira Relação de Cambefort – Procedimento Proposto (Estaca E53 – Jacareí)	124
Figura 78 – Comportamento da ponta da estaca – Segunda Relação de Cambefort – Procedimento Proposto (Estaca E53 – Jacareí)	124
Figura 79 – Efeito de SS (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca E53 – Jacareí)	125
Figura 80 - Efeito de ST (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca E53 – Jacareí)	126
Figura 81 - Redução dos valores de "Match Quality" (MQ_{WU}) (Estaca E53 – Jacareí)	126
Figura 82 - Segunda Relação de Cambefort do procedimento tradicional (Estaca E53 – Jacareí)	127
Figura 83 – Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total e a velocidade máxima do topo – procedimento tradicional (Estaca E53 – Jacareí)	127
Figura 84 – Recalque para o peso do martelo (Estaca E53 – Jacareí).....	128
Figura 85 – Correlação entre PCE x CAPWAP x Case (Estaca E41 - Jacareí).....	130
Figura 86 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E41 - Jacareí). 131	
Figura 87 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E41 - Jacareí). 131	
Figura 88 – Influência do quake do fuste da curva carga-recalque considerando melhor MQR ($q_s=2,033\text{mm}$) e pior MQR ($q_s=7,5\text{mm}$) (Estaca E41 - Jacareí)	132
Figura 89 – Variações da força axial em profundidade para diversos valores de quake do fuste (Estaca E41 – Jacareí)	134
Figura 90 - Relação entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca (Estaca E41 – Jacareí).....	135
Figura 91 – Evolução das curvas carga-recalque com o golpe aplicado na estaca E41, comparando com a estaca E01 (PCE) - Jacareí	137
Figura 92 – Força axial em profundidade (Estaca E41 – Jacareí)	137
Figura 93 – Evolução do J_c com a energia do golpe aplicado (Estaca E41 – Jacareí)	138
Figura 94 – Variações do atrito lateral – Primeira Relação de Cambefort (Estaca E41 – Jacareí)	139
Figura 95 – Comportamento da ponta da estaca – Segunda Relação de Cambefort (Estaca E41 – Jacareí).....	139
Figura 96 – Efeito de SS (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca E41 – Jacareí)	140
Figura 97 - Efeito de ST (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca E41 – Jacareí)	141
Figura 98 - Redução dos valores de "Match Quality" (MQ_{WU}) (Estaca E41 – Jacareí)	141
Figura 99 - Segunda relação de Cambefort do procedimento tradicional (Estaca E41 – Jacareí)	142
Figura 100 – Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total e a velocidade máxima do topo – procedimento tradicional (Estaca E41 – Jacareí)	143
Figura 101 – Recalque para o peso do martelo (Estaca E41 – Jacareí).....	144
Figura 102 – Correlação entre PCE x CAPWAP x Case (Estaca E02 - Osasco)	146
Figura 103 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E02 - Osasco)	147
Figura 104 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E02 - Osasco)	147
Figura 105 – Influência do quake do fuste da curva carga-recalque considerando melhor MQR ($q_s=0,868\text{mm}$) e pior MQR ($q_s=6,5\text{mm}$) (Jacareí).....	148
Figura 106 – Variações da força axial em profundidade para diversos valores de quake do fuste (Estaca E02 – Osasco).....	150
Figura 107 – Relação entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca (Estaca E02 – Osasco)	151

Figura 108 – Evolução da curva carga-recalque como golpe aplicado na estaca E02, comparando com a estaca E01 (PCE) – Osasco.....	152
Figura 109 – variação da força axial em profundidade (Estaca E02 – Osasco)	153
Figura 110 – Evolução do J_c com o golpe aplicado (Estaca E02 – Osasco)	153
Figura 111 – Variação do atrito lateral – Primeira Relação de Cambefort (Estaca E02 – Osasco).....	154
Figura 112 – Comportamento da ponta da estaca – Segunda Relação de Cambefort (Estaca E02 – Osasco)	155
Figura 113 - Efeito de SS (Damping do fuste) com a energia aplicada Estaca E02 – Osasco)	156
Figura 114 - Efeito de ST (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca E02 – Osasco)	156
Figura 115 - Redução dos valores de "Match Quality" (MQ_{WU}) (Estaca E02 – Osasco)	157
Figura 116 - Segunda Relação de Cambefort do procedimento tradicional (Estaca E02 – Osasco).....	158
Figura 117 - Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total e a velocidade máxima do topo no procedimento tradicional (Estaca E02 – Osasco).....	158
Figura 118 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento automático (AT) e pela prova de carga estática (PCE).....	161
Figura 119 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento "best match quality" (BM) e pela prova de carga estática (PCE).....	162
Figura 120 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento utilizando "Radiation Damping" (RD) e pela prova de carga estática (PCE)	162
Figura 121 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento utilizando "Radiation Damping" com $q_s=2,5\text{mm}$ e pela prova de carga estática (PCE)	163
Figura 122 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento utilizando "Radiation Damping" com $q_s=7,5\text{mm}$ e pela prova de carga estática (PCE)	163
Figura 123 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento proposto (DK) e pela prova de carga estática (PCE)	164
Figura 124 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo Método Case e pela prova de carga estática (PCE).....	164
Figura 125 – Desvio padrão da relação PDA/PCE	165
Figura 126 – Relação PDA/PCE	165
Figura 127 – R^2 da relação PDA/PCE.....	166
Figura 128 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento automático (AT) e pela prova de carga estática (PCE).....	168
Figura 129 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento "best match quality" (BM) e pela prova de carga estática (PCE).....	169
Figura 130 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento utilizando "Radiation Damping" (RD) e pela prova de carga estática (PCE)	169
Figura 131 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento utilizando "Radiation Damping" com $q_s=2,5\text{mm}$ (RD2,5) e pela prova de carga estática (PCE)	170
Figura 132 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento utilizando "Radiation Damping" com $q_s=7,5\text{mm}$ (RD7,5) e pela prova de carga estática (PCE)	170
Figura 133 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento proposto (DK) e pela prova de carga estática (PCE)	171
Figura 134 – Correlação entre os recalques determinados pelo Método Case e pela prova de carga estática (PCE).....	171
Figura 135 – Relação PDA/PCE para os recalques	172
Figura 136 – Desvio padrão da relação PDA/PCE para os recalques	172
Figura 137 – R^2 da relação PDA/PCE para os recalques.....	173

Figura 138 – Correlação de recalques entre o procedimento automático e a prova de carga estática	175
Figura 139 – Correlação de recalques entre o procedimento “best match quality” e a prova de carga estática	176
Figura 140 – Correlação de recalques entre o procedimento utilizando “Radiation Damping” e a prova de carga estática.....	176
Figura 141 – Correlação de recalques entre o procedimento utilizando “Radiation Damping” com $q_s=2,5\text{mm}$ e a prova de carga estática	177
Figura 142 – Correlação de recalques entre o procedimento utilizando “Radiation Damping” com $q_s=7,5\text{mm}$ e a prova de carga estática	177
Figura 143 – Correlação de recalques entre o procedimento proposto e a prova de carga estática	178
Figura 144 – Correlação de recalques entre o Método Case e a prova de carga estática ..	178
Figura 145 – Relação PDA/PCE para os recalques	179
Figura 146 – Desvio padrão da relação PDA/PCE para os recalques	179
Figura 147 – R^2 da relação PDA/PCE para os recalques	180

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação dos resultados do CAPWAP (Fellenius, 1988).	37
Tabela 2 - Estimativa da capacidade de carga das estacas através dos métodos dinâmicos.	46
Tabela 3 – Efeito do drapejamento no valor do atrito lateral	63
Tabela 4 – Negas de recuperação	64
Tabela 5 - Verificação do efeito set up através de ensaios de carregamento dinâmico e prova de carga estática	65
Tabela 6 – Relação entre CAPWAP e provas de carga estática	83
Tabela 7 – Influência do valor de q_s na curva Wave Up	Erro! Indicador não definido.
Tabela 8 – Características das estacas cravadas	93
Tabela 9 – Dados das estacas submetidas à PCE (Jacareí)	95
Tabela 10 – Dados das PCE (Jacareí)	96
Tabela 11 – ECD realizados (Jacareí)	96
Tabela 12 – Características das estacas cravadas	97
Tabela 13 – Características da estaca submetida a PCE (Osasco)	98
Tabela 14 – Dados da PCE (Osasco)	98
Tabela 15 – ECD realizado (Osasco)	99
Tabela 16 - Resultados do CAPWAP com diferentes valores de q_s (Estaca P56 – Jacareí)	103
Tabela 17 – Resumo dos resultados obtidos no ECD com energia crescente (Estaca P56 – Jacareí)	109
Tabela 18 – Comparação dos resultados com diferentes valores de q_s (Estaca E53 – Jacareí)	117
Tabela 19 – Resumo dos resultados obtidos no ECD com energia crescente (Estaca E53 – Jacareí)	123
Tabela 20 – Recalque para o peso do martelo de 40kN (Estaca E53 – Jacareí)	128
Tabela 21 – Resultados do CAPWAP com diferentes valores de q_s (Estaca E41 – Jacareí)	132
Tabela 22 – Resumo dos resultados obtidos no ECD com energia crescente (Estaca E41 – Jacareí)	138
Tabela 23 – Recalque para o peso do martelo de 40kN (Estaca E41 – Jacareí)	143
Tabela 24 – Comparação dos resultados com diferentes valores de q_s (Estaca E02 – Osasco)	148
Tabela 25 – Resumo dos resultados obtidos no ECD com energia crescente (Estaca E02 – Osasco)	154
Tabela 26 – Resumo dos resultados obtidos quanto à Capacidade de Carga	160
Tabela 27 – Resumo dos resultados obtidos	161
Tabela 28 – Resumo dos resultados obtidos	161
Tabela 29 – Resumo dos resultados obtidos - Recalques	167
Tabela 30 – Resumo dos resultados obtidos	167
Tabela 31 – Resumo dos resultados obtidos	168
Tabela 32 – Resumo dos resultados obtidos - Recalques	174
Tabela 33 – Resumo dos resultados obtidos	175
Tabela 34 – Resumo dos resultados obtidos	175
Tabela 35 – Comparação entre os diferentes métodos	181

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área da seção transversal da estaca
a	aceleração da partícula
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AT	análise CAPWAP obtida através do procedimento automático
BM	análise CAPWAP com "Best Match Quality", sem a utilização do modelo "Radiation Damping"
BT	"Radiation damper" da ponta
c	velocidade de propagação da onda
CAPWAP	Case Pile Wave Analysis Program
CEPM	Carregamento estático com o peso próprio do martelo
CS	Shaft quake multiplier
CT	Toe quake multiplier
d	diâmetro da estaca
DK	análise CAPWAP obtida através do procedimento proposto
DMX	Deslocamento dinâmico máximo
E	Módulo de elasticidade da estaca
ε	deformação
ECD	Ensaio de carregamento dinâmico
EOID	final da cravação (End of initial driving)
F	força na estaca
f	atrito lateral unitário (Primeira Relação de Cambefort)
FS	Fator de segurança
GRL	Globe, Rausche, Likins & Associates
Jc	Case damping factor
JS	Case shaft damping
JT	Case toe damping
Kr	rigidez da estaca
L	comprimento da estaca
LS	Shaft reloading
LT	Toe reloading
μ	fator de majoração da carga residual
MQ _R	"Match Quality" de recalques
MQ _{WU}	"Match Quality" da curva Wave Up
MS	"Shaft support soil mass"
NBR	Norma brasileira emitida pela ABNT
Ns	Número de elementos de solo
OP	modelo de damping (Viscoso, Smith, Smith-Viscoso)
P	Carga aplicada no topo da estaca
Padm	Carga admissível
PCE	Prova de carga estática
PDA	Pile Driving Analyser
PDI	Pile Dynamics, Inc
Ph	Carga residual aprisionada na ponta

PI	Pile damping
PL	Toe plug
PL	Atrito lateral na ruptura
Pn	acréscimo de carga devido ao fenômeno de atrito negativo
PP	Carga de ponta na ruptura
PS	"Plug" do fuste (Shaft Plug)
q	resistência de ponta (Segunda Relação de Cambefort)
Qs ou qs	Quake do fuste da estaca (Shaft quake)
Qt ou qt	Quake da ponta da estaca (Toe quake)
ρ	massa específica do material
R	Parâmetro da Segunda Relação de Cambefort
R ²	Coeficiente de correlação
RD	análise CAPWAP com "Best Match Quality", com a utilização do modelo "Radiation Damping"
RD2,5	análise CAPWAP com "Best Match Quality", com a utilização do modelo "Radiation Damping", utilizando $q_s=2,5\text{mm}$
RD7,5	análise CAPWAP com "Best Match Quality", com a utilização do modelo "Radiation Damping", utilizando $q_s=7,5\text{mm}$
Relaxação	Perda de capacidade de carga da estaca
RMX	Máxima resistência estática (Método Case)
RS	Atrito lateral (Shaft resistance)
RSA	"Residual Stress Analysis"
RSTR-n	recravação após n dias (Restrike n)
RU	Capacidade de carga (Ultimate Resistance)
Set Up	"cicratização" do solo
SK	"Radiation damper" do fuste
SPT	Sondagem de simples reconhecimento (Standard Penetration Test)
SS	Smith Shaft Damping
ST	Smith Toe Damping
TG	"GAP" da ponta (Toe Gap)
UN	Unloading level
v	velocidade da partícula
y	Recalque associado à carga P
z	impedância da estaca

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os objetivos, justificativa, metodologia e estrutura desta dissertação.

1.1 – OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo apresentar um novo procedimento para a análise CAPWAP, de tal modo que o formato da curva carga-recalque do topo, simulada pelo CAPWAP, fique mais próxima da curva “real” da prova de carga estática (PCE). Quando a PCE não está disponível, propõe-se efetuar um carregamento estático utilizando o peso próprio do martelo do bate-estaca (CEPM). Basicamente, o procedimento adotado consiste em determinar o quake do fuste através do trecho inicial da curva carga-recalque “real”. Com esse procedimento pretende-se não apenas aprimorar o significado físico da simulação de prova de carga do CAPWAP como também obter uma melhor definição: a) da distribuição do atrito lateral; b) da reação de ponta; c) da carga de ruptura e d) dos recalques. Nesse contexto é introduzido um novo conceito de “match quality de recalques” (MQ_R) envolvendo a curva simulada e a “real”. No caso do ensaio de carregamento dinâmico ser feito com energia crescente, o procedimento inclui também as seguintes etapas: a) corrigir os valores de damping e quake da ponta da estaca; b) verificar a evolução do atrito lateral e da carga de ponta da estaca com o acréscimo de energia aplicada; e c) determinar o limite inferior da tensão residual aprisionada na ponta da estaca durante a recravação.

1.2 – GENERALIDADES

O ensaio de carregamento dinâmico vem sendo utilizado de forma intensa em função da rapidez e economia na sua execução.

Segundo Rausche et al (1994), após a coleta de dados pelos sensores no ensaio de carregamento dinâmico, os mesmos podem ser analisados através do Método CAPWAP que avalia a distribuição do atrito lateral em profundidade, capacidade de carga de ponta, parâmetros do solo (quake e damping), além de simular a relação carga-recalque da estaca sob carregamento estático. O método visa buscar o “best match quality” (MQ_{WU}), ou seja, o sinal de força medido pelos sensores é comparado com o sinal calculado; quanto mais próximo forem as duas curvas, melhor deverá ser o resultado obtido ("signal matching"). Trata-se portanto de um cálculo realizado por diversas tentativas, não é uma solução fechada.

Há casos específicos onde é inevitável que a solução obtida pela análise CAPWAP apresente valores elevados de quake da ponta da estaca, conforme apresentado por Authier e Fellenius (1980), Likins (1983), Murakami e Cabette (2014). Nesses casos a não utilização de quakes elevados para a ponta da estaca faz com que o “match quality” (MQ_{WU}) piore consideravelmente.

Entretanto, conforme apresentado por Fellenius (1988) e Edde (1991), os resultados da análise CAPWAP podem variar em função do operador que executa esta análise e do tipo de subsolo. Fellenius (1988) concluiu que, em geral, a carga total mobilizada varia pouco quando analisada por diferentes operadores, podendo apresentar maior variação em subsolos mais peculiares. Qualitativamente, houve uma concordância na distribuição do atrito lateral quando analisada por diferentes operadores; entretanto os valores de quake e damping podem variar. Edde (1991) verificou que os resultados do CAPWAP podem variar em função do golpe analisado, podendo apresentar diferenças de distribuição do atrito lateral, carga de ponta, valores de quakes e damping.

Com o objetivo de tentar reduzir a variabilidade dos resultados do CAPWAP e obter uma solução mais próxima da realidade no sentido físico (e não apenas na solução matemática medida pelo "match quality" (MQ_{WU})), este trabalho propõe um novo procedimento para a realização de análises CAPWAP, incluindo uma nova

forma de avaliar a solução obtida através do conceito de “match quality de recalques” (MQ_R).

Dependendo da obra torna-se inviável a realização ao mesmo tempo de provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico (exemplo: obras de pequeno porte com recursos limitados e/ou cronograma “apertado”). A norma brasileira ABNT NBR 6122/2010 até permite a substituição de parte das provas de carga estática por ensaios dinâmicos.

Adicionalmente, o trabalho propõe a realização de um carregamento estático com o peso próprio do martelo do bate-estaca antes da realização do ensaio dinâmico, medindo o recalque com relógio comparador segundo a ABNT NBR 12131:2006.

Este procedimento tem a vantagem de não necessitar de instalação de um sistema de reação, reduzindo custos e prazos, além de representar o comportamento da estaca no exato momento da realização do ensaio dinâmico, (despreza-se a influência do efeito “set up”).

Conforme a Norma ABNT NBR 6122/2010 para fins exclusivamente geotécnicos não há distinção entre estacas pré-moldadas e pré-fabricadas, e para os efeitos desta Norma elas são denominadas pré-moldadas. Neste trabalho, utilizando a mesma notação da NBR 6122/2010, as estacas pré-fabricadas serão chamadas de estacas pré-moldadas.

1.3 – JUSTIFICATIVA

No Brasil, durante a fase de projeto de um empreendimento, as fundações são projetadas na grande maioria dos casos com base em sondagens de simples reconhecimento (SPT). Este ensaio fornece a descrição do tipo de solo em profundidade além do número de golpes para a penetração dos últimos 30cm do amostrador padrão (Nspt). Com base nos resultados da sondagem e dos esforços provenientes da estrutura é realizado o dimensionamento das fundações.

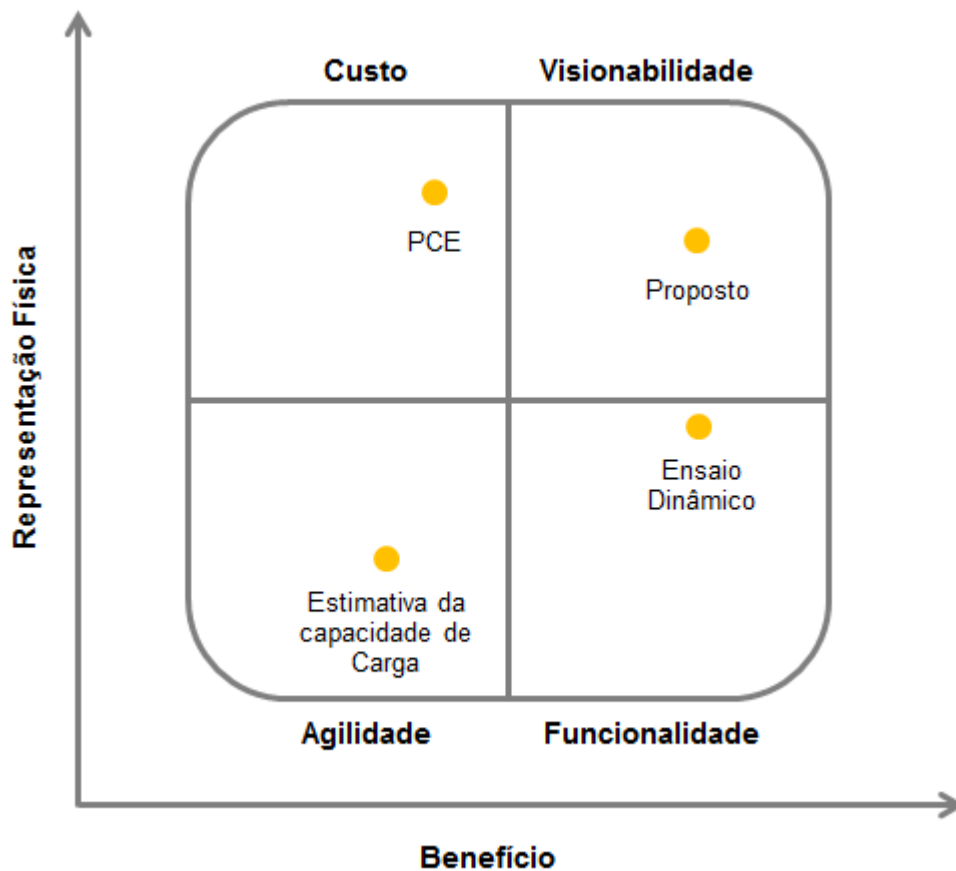
O primeiro método brasileiro de estimativa de capacidade de carga de estacas foi proposto por Aoki & Velloso (1975), posteriormente modificado por Aoki (1985). Décourt & Quaresma (1978) também apresentaram sua proposta de estimativa de capacidade de carga, modificado posteriormente por Décourt (1982). Esses métodos, os mais utilizados no Brasil, baseiam-se nos resultados de sondagens SPT e possibilitam uma estimativa das parcelas de atrito e ponta da capacidade de carga. Eles foram desenvolvidos comparando os resultados da sondagem SPT com provas de carga estáticas à compressão.

Durante a cravação das estacas pré-moldadas de concreto pode ser realizado o controle de nega e repique em estacas, assim como o preenchimento do diagrama de cravação, conforme prevê a NBR 6122/2010. As fórmulas dinâmicas, que utilizam dados como nega, repique, comprimento cravado e energia aplicada, visam estimar a capacidade de carga das estacas durante a cravação. Uma forma de avaliar o ganho ou perda de capacidade de carga em função do tempo seria através da comparação da nega obtida no final da cravação com a nega obtida em recravações em diversas datas.

As estacas podem ser testadas visando a verificação da capacidade de carga e das premissas adotadas na fase de projeto. Esses testes podem ser através de provas de carga estática ou ensaios de carregamento dinâmico.

A figura 1 ilustra a comparação dos diversos métodos normalmente utilizados para avaliação do desempenho das fundações, relacionando seis quesitos: benefício x representação física, assim como custo, agilidade, funcionalidade, visionabilidade. Esta figura é uma adaptação do quadrante de Gartner (2015).

Figura 1 – Comparação dos diversos métodos utilizados para avaliação do desempenho das fundações



Através da figura 1 percebe-se que a estimativa de capacidade de carga, através de métodos semi-empíricos e fórmulas dinâmicas, apresenta maior agilidade, porém menor relação representação física x benefício face à maior variabilidade dos resultados em relação ao valor “real” da capacidade de carga. A estimativa da capacidade de carga é indispensável na fase de projeto porém não comprova o real valor da capacidade de carga.

A prova de carga estática é o método que melhor representa o desempenho da estaca (representação física), entretanto o elevado custo e elevado tempo de execução fazem com que a relação representação física x benefício não seja a maior entre os demais métodos.

Os ensaios dinâmicos apresentam melhor funcionalidade entre os demais métodos por apresentar maior agilidade e menor custo em relação às provas de carga estática, além de obter parâmetros em tempo real durante a cravação da estaca ou recravação (capacidade de carga, tensões de compressão e tração),

apresentando o melhor benefício entre os demais métodos, porém perdem para a prova de carga estática no quesito representação física (valor “real”).

O procedimento proposto procura melhorar a representação física dos ensaios dinâmicos, mantendo a funcionalidade, diminuindo os custos e tempo de execução das provas de carga estática convencionais, apresentando uma nova forma de realização de análise CAPWAP, através da aplicação de um carregamento estático utilizando o peso próprio do martelo do bate-estaca (visionabilidade).

1.4 – METODOLOGIA

De forma semelhante ao apresentado por Likins (1996), os resultados do CAPWAP, obtidos através de diferentes procedimentos, serão comparados com provas de carga estática. Serão avaliados os procedimentos tradicionais (procedimento automático (AT), “best match quality” (BM) e utilização do modelo “Radiation Damping” (RD)) comparando com o procedimento proposto (DK). Será avaliada também a capacidade de carga obtida através da curva RMX-DMX do Método Case. Os diferentes métodos serão comparados sempre com o Método de Davisson, que permite definir a carga de ruptura através da curva carga-recalque. Segundo Rausche (1994) os ensaios dinâmicos são sempre comparados com PCEs através do Método de Davisson.

Os recalques obtidos da curva simulada do CAPWAP através de diferentes procedimentos (procedimento automático(AT), “best match quality”(BM), utilização do modelo “Radiation Damping” (RD), procedimento proposto (DK)) serão comparados com os recalques da prova de carga estática (PCE) e do carregamento estático utilizando o peso próprio do martelo (CEPM). Será avaliado também o deslocamento dinâmico máximo (DMX) da curva RMX-DMX do Método Case, comparando com os recalques da PCE e CEPM.

Comparações serão feitas utilizando resultados de provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas de concreto de duas obras, Jacareí e Osasco, em São Paulo / SP. Quando necessário, recorrer-se-á a métodos de extrapolação da curva carga recalque para as provas de carga estática. Nos ensaios dinâmicos, quando o limite de Davisson não for atingido, será utilizado o Método de Davisson Modificado, traçando uma reta paralela à reta original,

passando pelo recalque máximo da curva carga-recalque. Neste caso, para a comparação entre o ensaio dinâmico e a prova de carga estática deve-se tomar o menor valor dos recalques máximos.

1.5 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O desenvolvimento da pesquisa envolve as etapas que seguem:

- **Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica**

Neste capítulo serão apresentados os conceitos necessários para a compreensão do trabalho.

Primeiramente serão apresentados os conceitos de capacidade de carga, prova de carga estática e ensaio de carregamento dinâmico, assim como a variabilidade dos resultados do CAPWAP.

Em seguida serão apresentados alguns métodos de estimativa de capacidade de carga e os fenômenos que podem afetar: a capacidade de carga de estacas e sua determinação; o formato da curva carga-recalque. Esses fenômenos devem ser levados em consideração na análise CAPWAP.

Também serão apresentados métodos de interpretação de provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico, assim como procedimentos e possíveis influências nas correlações entre PCE e ECD.

- **Capítulo 3 – Procedimento Proposto**

Neste capítulo será apresentado o procedimento proposto para a realização da análise CAPWAP, indicando as vantagens da utilização do mesmo.

- **Capítulo 4 – Casos de Obras Analisadas**

Neste capítulo serão apresentados dois casos de obra, a primeira em Jacareí no interior de São Paulo, a segunda em Osasco, São Paulo. Nos dois casos serão

apresentados um breve histórico da obra, descrição do subsolo local, tipos de estacas executadas, resultados de PCE e ECD.

- **Capítulo 5 – Resultados Obtidos**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através de diferentes métodos (Case x CAPWAP x PCE), indicando a variabilidade dos resultados do CAPWAP para o golpe analisado de mesma energia, mostrando resultados do CAPWAP utilizando o procedimento proposto.

Também serão apresentadas correlações de capacidade de carga e de recalques entre os diferentes métodos (CAPWAP tradicional, Método Case e Procedimento Proposto), comparando com a curva carga recalque da PCE.

Após a comparação dos resultados de capacidade de carga e de recalques serão analisados os diferentes métodos (PCE comum, PCE instrumentada, PDA tradicional e Procedimento Proposto), indicando vantagens e desvantagens em diversos quesitos:.

- **Capítulo 6 - Considerações Finais**

Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais baseados nos resultados obtidos através do procedimento proposto.

- **Capítulo 7 – Sugestões para futuras pesquisas**

Neste capítulo serão apresentadas sugestões para futuras pesquisas baseadas nos assuntos discutidos ao longo da dissertação.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados assuntos como capacidade de carga ou carga de ruptura, provas de carga estática, ensaios de carregamento dinâmico, métodos semi-empíricos, fórmulas dinâmicas, fatores que influenciam a interpretação da capacidade de carga por atrito lateral (tensões residuais e variação da capacidade de carga em função do tempo), métodos de interpretação de provas de carga (extrapolação e correlação entre provas de carga estática e ensaio de carregamento dinâmico).

2.1 – Capacidade de carga e carga admissível

A norma brasileira ABNT NBR 6122/2010 define a carga última (ou de ruptura) de uma fundação como “carga aplicada à fundação que provoca deslocamentos que comprometem a sua segurança ou desempenho”, enquanto que a carga admissível de uma estaca ou tubulão, a norma define como “força adotada em projeto que, aplicada sobre a estaca ou sobre o tubulão, isolados, atende, com coeficientes de segurança predeterminados, aos estados-limites último (ruptura) e de serviço (recalques, vibrações etc.). Esta grandeza é utilizada quando se trabalha com ações em valores característicos.”

Para a determinação da carga admissível ou resistente de projeto de estacas a NBR 6122/2010 diz que a mesma deve ser determinada a partir da carga de ruptura. Já a carga de ruptura deve ser determinada a partir da utilização e interpretação de provas de carga estática ou ensaios de carregamento dinâmico.

Em relação ao fator de segurança de fundações profundas a norma brasileira diz que é igual a 2,0 quando a resistência é calculada por método semi-empírico. Quando a resistência é obtida por provas de carga executadas na fase de elaboração ou adequação do projeto é necessário que:

- a) A(s) prova(s) de carga seja(m) estática(s);
- b) A(s) prova(s) de carga seja(m) especificada(s) na fase de projeto e executadas no início da obra, de modo que o projeto possa ser adequado para as demais estacas;
- c) A(s) prova(s) de carga seja(m) levada(s) até uma carga no mínimo duas

vezes a carga admissível prevista em projeto.

O fator de segurança a ser utilizado para a determinação da carga admissível é de 1,6.

2.2 – Prova de carga estática

A prova de carga estática, segundo a ABNT 12131/2006, consiste, basicamente, em aplicar esforços estáticos à estaca e registrar os deslocamentos correspondentes. Os esforços aplicados podem ser axiais, de tração ou de compressão, ou transversais.

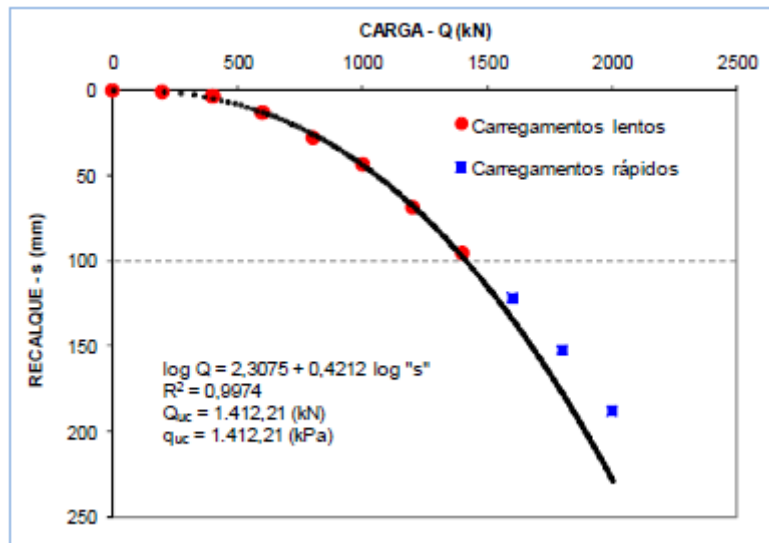
O dispositivo de aplicação de carga é constituído por um ou mais macacos hidráulicos alimentados por bombas elétricas ou manuais, atuando contra um sistema de reação estável. O sistema de reação deve ser projetado, montado e utilizado de forma que a carga aplicada atue na direção desejada, sem produzir choques ou vibrações. Quando se utilizar mais de um macaco hidráulico, deve ser feita uma programação de carregamento de modo a garantir a direção e o ponto de aplicação da carga.

O macaco ou macacos utilizados devem ter capacidade ao menos 20% maior que o máximo carregamento previsto para o ensaio e curso de êmbolo compatível com os deslocamentos máximos esperados entre o topo da estaca e o sistema de reação, sendo no mínimo igual a 10% do diâmetro da estaca.

A norma brasileira permite, a critério do projetista, que o ensaio seja realizado com carregamento lento, rápido, misto (lento seguido de rápido), carregamento cíclico (lento ou rápido).

No carregamento misto até uma determinada carga o ensaio é feito lentamente e, após essa carga, o ensaio é executado rapidamente. Décourt (2008) mostrou que o carregamento rápido altera a relação carga-recalque, conforme indicado na figura abaixo.

Figura 2 – Prova de carga mista (Décourt, 2008).



2.3 – Ensaio de carregamento dinâmico

O Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD), segundo a ABNT NBR 13208/2007, tem como objetivo avaliar as cargas mobilizadas na interface solo estaca, a eficiência do sistema de impacto, as tensões de compressão e de tração ao longo da estaca, a integridade estrutural e as características dinâmicas do sistema solo-estaca.

O ensaio de carregamento dinâmico, ou prova de carga dinâmica, é um ensaio que objetiva principalmente determinar a capacidade de carga da interação estaca-solo, para carregamentos estáticos axiais. Ele difere das tradicionais provas de carga estática pelo fato do carregamento ser aplicado dinamicamente, através de golpes de um sistema de percussão adequado. A medição é feita através da instalação de sensores no fuste da estaca, em uma seção situada pelo menos duas vezes o diâmetro abaixo do topo da mesma. O sinal dos sensores são enviados por cabo ao equipamento “Pile Driving Analyser” (PDA), que armazena e processa os sinais, através da Teoria da Equação de Onda aplicada à estaca, com base no modelo idealizado por Smith (1960).

O equipamento PDA, utilizado na obtenção dos sinais de campo analisados nesta pesquisa, realiza um cálculo da capacidade de carga através do Método Case. Este método consiste em uma solução matemática fechada, baseada em hipóteses

simplificadoras, tais como a homogeneidade e uniformidade da estaca e deve ser confirmado por uma análise numérica. O Método admite que toda a anergia aplicada vai para a ponta da estaca.

A análise numérica executada através do programa CAPWAP, por exemplo, realiza um processo iterativo baseado na teoria da equação da onda. Neste método, uma curva dependente de parâmetros adotados é ajustada através de tentativas à curva de força medida.

São usados dois pares de sensores, dois acelerômetros e dois transdutores de deformação como os mostrados na figura 6, posicionados diametralmente opostos. O sensor da direita é um transdutor de deformação específica. Ele gera uma tensão proporcional à deformação sofrida pelo material da estaca durante o golpe. O sensor da esquerda é um acelerômetro, que gera uma tensão proporcional à aceleração das partículas da estaca.

O sinal de cada um dos transdutores de deformação é multiplicado pelo módulo de elasticidade do material da estaca e pela área de seção na região dos sensores, para obtenção da evolução da força em relação ao tempo. Por isso esses transdutores as vezes são chamados de sensores de força. O PDA tira a média dos dois sinais de força assim obtidos, a fim de detectar e compensar os efeitos da excentricidade do golpe.

O sinal de cada um dos acelerômetros é integrado, para obtenção da evolução da velocidade de deslocamento da partícula com o tempo. Por isso esses transdutores as vezes são chamados de sensores de velocidade. Da mesma forma que os sinais de força, o PDA também trabalha com a média dos dois sinais de velocidade assim obtidos.

Os sensores são fixados nos chumbadores de expansão nas estacas de concreto através de parafusos (figura 6), ou são feitos furos com rosca nas estacas tubulares metálicas. No caso de perfis metálicos ou trilhos, são feitos furos passantes, e os parafusos apertados através de porcas.

As figuras seguintes mostram a sequencia executiva para a realização do ensaio de carregamento dinâmico.

Figura 3 - Marcação da estaca para instalação dos sensores (Fonte: própria do autor)



Figura 4 – Furação da estaca para instalação dos chumbadores (Fonte: própria do autor)



Figura 5 – Instalação dos chumbadores (Fonte: própria do autor)



Figura 6 – Posicionamento dos chumbadores de expansão na estaca (Fonte: própria do autor)

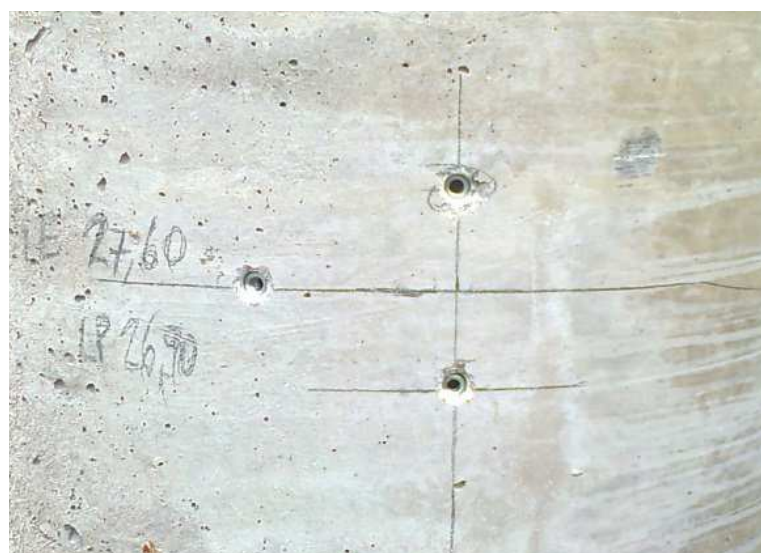


Figura 7 – Acelerômetro e transdutor de deformação (Fonte: própria do autor)



Figura 8 – Aplicação dos golpes do martelo do bate-estaca (Fonte: própria do autor)



Figura 9 – Captação do sinal do golpe do martelo aplicado na estaca (Fonte: própria do autor)



Após a coleta de dados pelos sensores, os mesmos podem ser analisados através do Método CAPWAP que avalia a distribuição do atrito lateral em profundidade, capacidade de carga de ponta, parâmetros do solo, além de estimar a relação carga-recalque da estaca sob carregamento estático. O método visa buscar o “best match quality”, ou seja, o sinal de força medido pelos sensores é comparado com o sinal calculado, quanto mais próximo forem as duas curvas, melhor deverá ser o resultado obtido (“signal matching”).

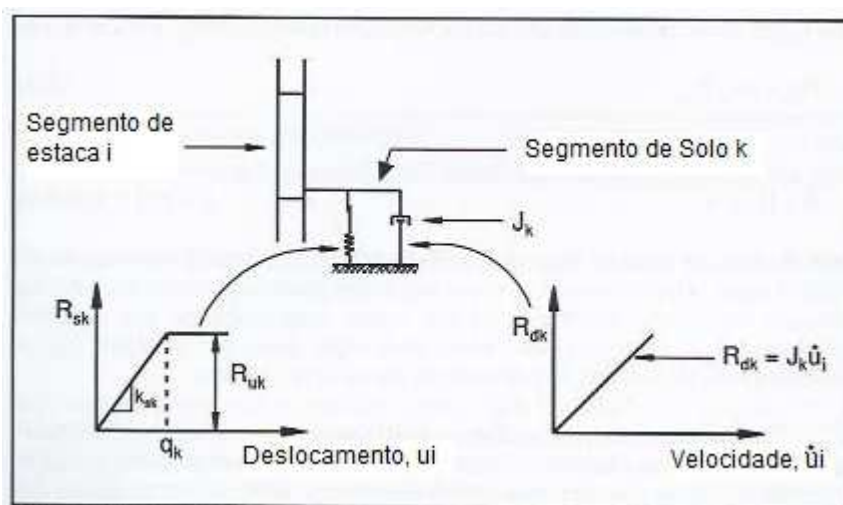
A análise CAPWAP pode ser realizada através de procedimentos automáticos ao clicar no botão “AC”, ajustando automaticamente todos os parâmetros do solo (valores de quakes, damping, gap, plug, distribuição do atrito lateral e ponta), ou do botão “AQ”, ajustando automaticamente os parâmetros citados anteriormente, exceto na distribuição do atrito lateral e carga de ponta (o ajuste destes é opcional), permitindo definir limites de cada variável.

No modelo CAPWAP o solo é dividido em N_s elementos. Assim, tem-se N_s variáveis de resistência por atrito lateral mais uma de carga de ponta. Para cada segmento de solo há 3 variáveis segundo o modelo de Smith (resistência, *quake* e

damping), então há 3 ($N_s + 1$) variáveis. Entretanto, na maioria dos casos, é assumido que o *quake* do fuste e *damping* do fuste é igual em toda a extensão da estaca, então há $N_s + 1$ variáveis de resistência mais 2 variáveis de *quake* e 2 variáveis de *damping*. As variáveis das extensões do modelo CAPWAP incluem: 2 variáveis para *unloading quake* (fuste e ponta), 1 para *unloading level* (resistência do fuste), 2 para *reloading levels*, 3 para opções de *damping* da ponta, 3 opções de *damping* do fuste, 1 para *gap* na ponta da estaca e 1 para *plug* (embuchamento na ponta da estaca). Dessa forma o total de variáveis é $N_s + 18$.

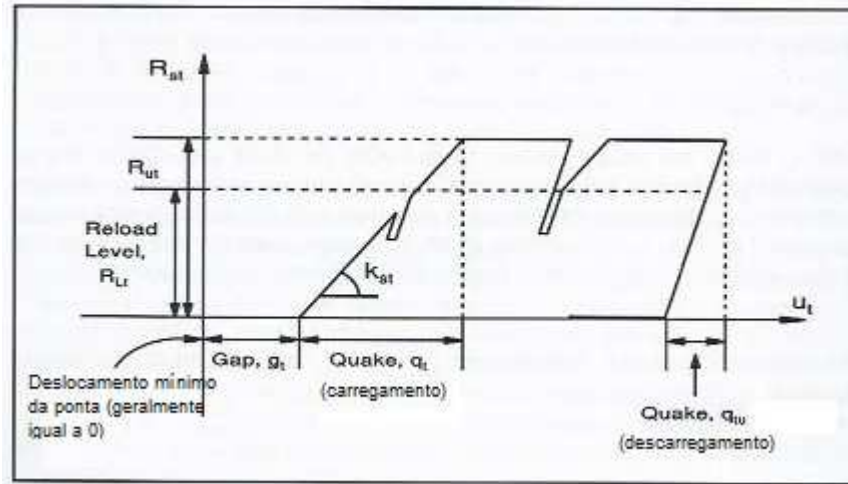
Cada elemento de solo é representado através do modelo elasto plástico ideal (resistência estática) e amortecedor linear (resistência dinâmica), conforme indicado na figura 10. Este modelo proposto por Smith (1960) admite que o solo ao redor da estaca é fixo.

Figura 10 – Modelo do solo para o fuste da estaca (CAPWAP Manual, 2006)



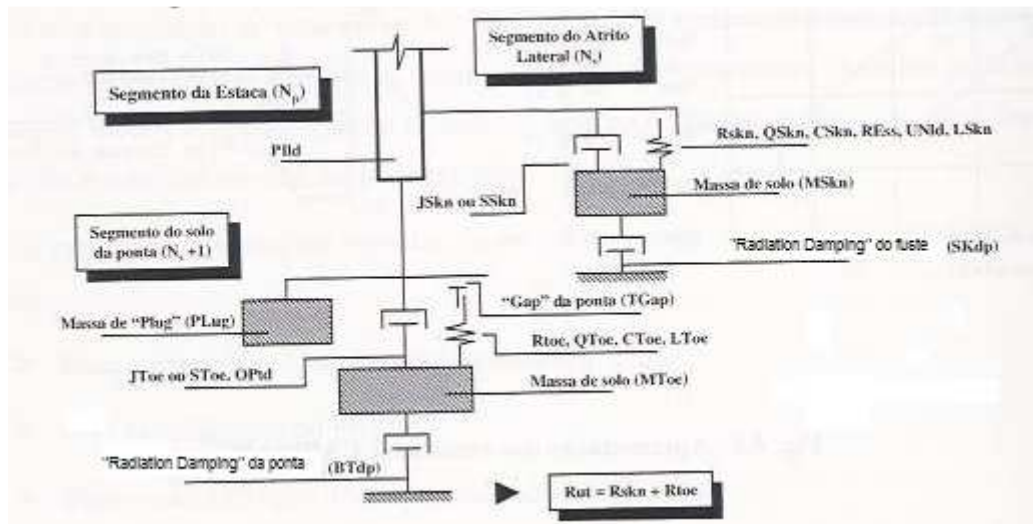
De forma semelhante ao comportamento do solo do fuste da estaca, a ponta é representada através do modelo elasto plástico ideal, permitindo a existência de um "GAP", um vazio abaixo da ponta da estaca. Neste caso a ponta da estaca se desloca sem mobilização de capacidade de carga, conforme indicado na figura 11.

Figura 11 - Modelo do solo para a ponta da estaca (CAPWAP Manual, 2006)



O modelo “Radiation Damping” é uma extensão do modelo original de Smith (1960), permitindo o deslocamento da massa de solo ao redor do fuste (SK) e da ponta (BT), conforme indicado na figura 12. O modelo “Radiation Damping” para a ponta da estaca raramente é utilizado.

Figura 12 – Modelo “Radiation Damping” (CAPWAP Manual, 2006)



As figuras 13 e 14 indicam as variáveis envolvidas na modelagem CAPWAP. A modelagem é realizada através da análise do formato da propagação da onda ascendente na estaca (“Curva Wave Up”). A curva cheia indica a curva medida, enquanto que a curva tracejada indica a curva calculada. Os valores em vermelho indicam que o aumento desses parâmetros de forma isolada faz a curva calculada

aumentar, enquanto que a diminuição dos valores em azul, de forma isolada, faz a curva calculada aumentar.

A figura 13 indica a solução inicial fornecida pelo CAPWAP, sem nenhum ajuste dos parâmetros envolvidos na análise. A figura 14 indica a solução obtida através de diversas tentativas, apresentando melhor ajuste da curva Wave Up. Quando a solução obtida foi a melhor entre as demais, surge na tela do programa na parte superior à direita um símbolo escrito “Best”.

Figura 13 – Solução inicial do CAPWAP (Fonte: própria do autor, Obra de Osasco)

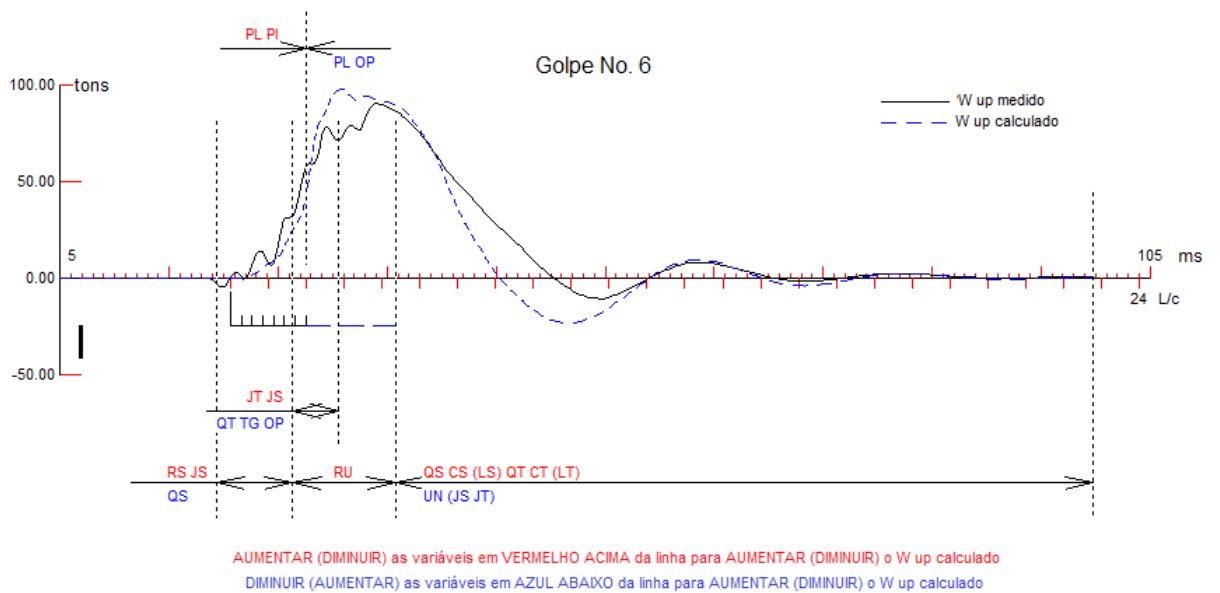
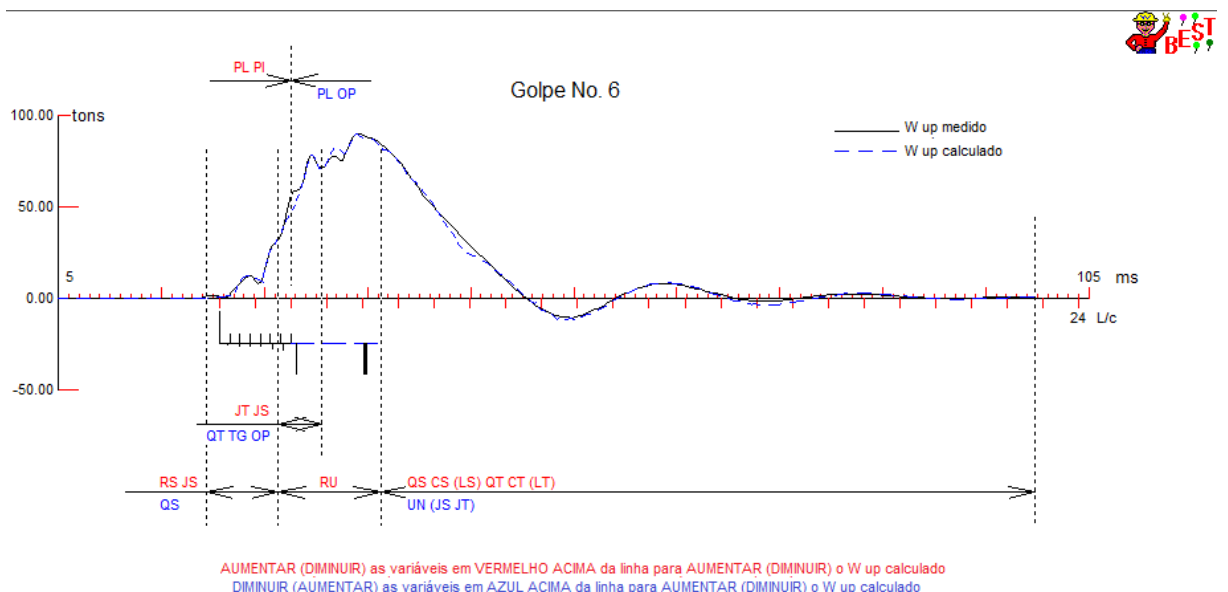


Figura 14 – Solução final do CAPWAP (Fonte: própria do autor, Obra de Osasco)



As variáveis utilizadas na análise CAPWAP, indicadas nas figuras 13 e 14, são:

PL = Toe plug

PI = Pile damping

OP = modelo de damping (Viscoso, Smith, Smith-Viscoso)

JT = Case toe damping

JS = Case shaft damping

QT = Toe quake

TG = Toe gap

PS = Shaft plug

RS = Shaft resistance

QS = Shaft quake

RU = Ultimate resistance

CS = Shaft quake multiplier

LS = Shaft reloading

CT = Toe quake multiplier

LT = Toe reloading

UN = Unloading level

SK = Shaft radiation damper

BT = Toe radiation damper

RSA = Residual stress analysis

2.4 – Variação dos resultados do CAPWAP

Fellenius (1988) mostrou que os resultados da análise CAPWAP podem variar em função do operador que executa esta análise. Participaram deste estudo 18 operadores de CAPWAP de diversas regiões do mundo, inclusive Garland Likins e Frank Rausche da GRL Associates, idealizadores do método. Entre os participantes estavam presentes desde operadores muito experientes até operadores que estavam realizando suas primeiras análises CAPWAP. Foram analisadas quatro estacas metálicas, sendo três tubadas e um perfil W. As quatro estacas foram

cravadas em regiões diferentes.

De forma geral, Fellenius (1988) concluiu que a carga total mobilizada varia pouco quando analisada por diferentes operadores. Qualitativamente, houve uma concordância na distribuição do atrito lateral quando analisada por diferentes operadores. A tabela 1 indica a variação dos resultados da carga total, valores de damping e quakes. Nota-se que as capacidades de carga obtidas foram próximas, porém os valores de quake e damping (fuste e ponta) apresentam grande variação entre os diferentes operadores.

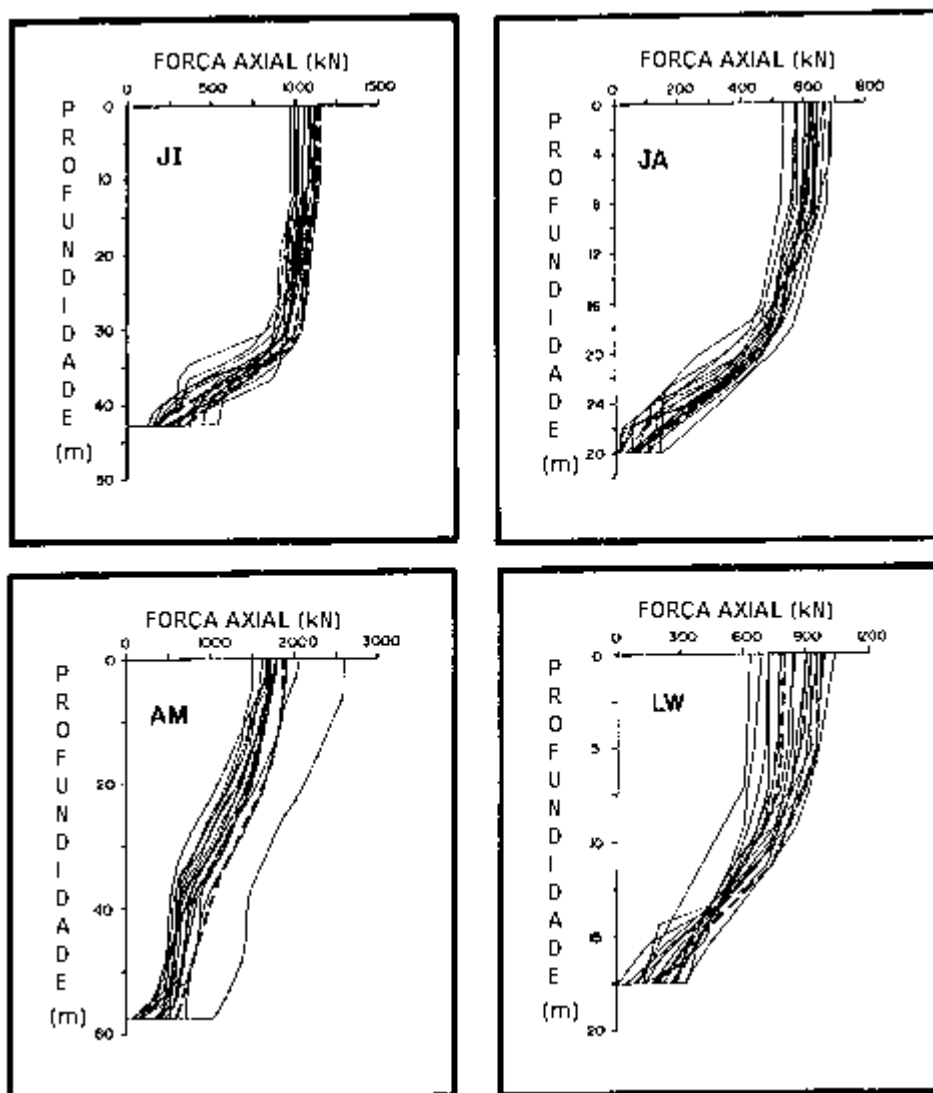
Tabela 1 – Variação dos resultados do CAPWAP (Fellenius, 1988).

PARTICIPANTE #	CAPACIDADE DE CARGA (kN)				QUAKE DO FUSTE (mm)				QUAKE DA PONTA (mm)				DAMPING DO FUSTE (Case)				DAMPING DA PONTA (Case)			
	JI	JA	AM	LW	JI	JA	AM	LW	JI	JA	AM	LW	JI	JA	AM	LW	JI	JA	AM	LW
1	1,100	666	2,072	851	3.1	2.6	4.0	2.0	3.0	4.8	6.0	1.0	0.16	0.48	0.30	1.06	0.38	0.31	0.31	0.21
2	1,103	632	1,810	780	2.5	2.5	5.0	2.5	2.8	4.0	5.0	2.5	0.00	0.90	0.10	1.00	0.45	0.06	0.60	0.30
3	1,122	645	1,681	927	1.0	1.5	4.0	1.5	2.8	2.0	2.8	2.0	0.25	0.25	0.25	1.20	0.22	0.48	0.45	0.20
4	1,103	647	1,715	908	2.5	2.5	2.5	3.5	8.9	0.4	2.5	1.3	0.49	0.82	1.14	1.10	0.24	0.06	0.19	0.28
5	1,081	829	2,617	958	0.3	1.4	0.5	1.4	5.0	1.0	4.2	7.0	0.16	0.66	0.11	1.06	0.43	0.04	0.18	0.10
6	1,030	540	1,734	888	2.2	3.0	3.0	2.6	13.5	6.5	1.8	3.3	0.18	1.19	1.00	1.15	0.35	0.01	0.05	0.58
7	1,065	624	1,919	988	1.6	2.5	2.5	2.5	5.1	2.5	3.9	3.7	0.65	0.83	1.11	1.12	0.19	0.04	0.22	0.06
8	1,000	575	1,500	900	2.0	2.5	2.5	2.5	4.0	5.0	6.5	5.0	0.10	0.69	0.42	0.60	0.58	0.42	0.65	0.51
9	1,122	583	1,667	838	6.0	2.0	8.0	1.5	6.0	5.0	3.0	1.5	0.30	0.66	0.10	1.20	0.30	0.30	0.60	0.10
10	1,021	609	1,799	721	4.2	2.5	5.0	3.2	8.0	4.5	6.0	4.0	0.70	0.97	0.85	1.02	0.17	0.11	0.35	0.54
11	1,132	644	1,891	803	2.0	2.3	3.9	3.0	4.0	2.5	3.9	3.0	0.34	0.73	1.24	0.81	0.07	0.08	0.19	0.51
12	1,166	670	1,799	778	2.0	2.5	6.0	2.5	4.0	2.5	6.5	2.5	0.27	0.40	0.27	0.76	0.05	0.27	0.59	0.64
13	1,051	621	1,696	636	1.5	3.0	4.0	3.0	5.0	3.0	4.0	3.0	0.60	0.60	0.50	0.80	0.40	0.30	0.40	0.80
14	1,091	687	1,819	1,042	3.5	3.5	4.5	3.0	8.0	0.8	3.0	3.0	0.15	0.32	0.25	0.73	0.30	0.39	0.62	0.46
15	1,006	608	1,684	725	1.4	2.2	3.5	1.0	6.9	2.5	3.0	8.1	0.40	0.82	0.81	0.98	0.26	0.10	0.13	0.36
16	981	690	1,619	976	2.8	1.8	2.0	1.7	7.0	4.5	2.6	2.0	0.56	0.54	1.27	0.84	0.23	0.07	0.12	0.33
17	1,144	622	1,726	960	2.5	2.8	3.0	2.0	5.5	3.3	6.5	6.5	0.28	0.85	0.80	1.01	0.16	0.07	0.18	0.26
18	1,126	580	1,770	921	2.9	2.5	6.5	3.2	8.8	2.5	6.5	6.5	0.37	0.95	1.05	1.27	0.11	0.02	0.17	0.14
Média	1,080	626	1,807	856	2.5	2.4	3.9	2.4	6.0	3.2	4.3	3.7	0.33	0.70	0.64	0.98	0.27	0.17	0.33	0.35
Desv. Padrão	55	39	238	116																
Desv. Padrão % 5	6	13	14																	

Nota: JI, JA, AM, LW são as iniciais dos locais das obras onde foram realizados os ensaios (Apud Fellenius, 1988).

A figura 15 indica a variação da distribuição do atrito lateral para as quatro estacas analisadas pelos 18 participantes.

Figura 15 – Variação da distribuição do atrito lateral.



Edde (1991) estudou a variação dos resultados do CAPWAP em função do golpe aplicado. O mesmo operador de CAPWAP analisou uma série de golpes de uma mesma estaca, de forma aleatória para não influenciar o direcionamento do resultado quando analisados golpes consecutivos (por exemplo, influência de tensões residuais, perda de “set up”).

O autor verificou variação de capacidade de carga de 10% para análises realizadas de estacas ensaiadas no final da cravação, enquanto que a variação do atrito lateral foi de 15% e para a ponta foi de 45%. Na recravação a variação da distribuição do atrito lateral foi de 33% e para a ponta foi de 68%, esta maior variação em relação às análises realizadas no final da cravação é devido à perda de “set up”. Os valores de quakes e damping variaram até 40% nas análises de estacas

realizadas no final da cravação, não indicando nenhuma tendência. Na recravação, os valores de damping (Smith) do fuste e da ponta demonstraram uma tendência inversa em relação à resistência do atrito lateral e carga de ponta. Os valores de quake do fuste indicaram uma tendência de proporcionalidade com a resistência do atrito lateral. O valor do damping (Case) e quake da ponta não indicaram uma tendência.

2.5 – Métodos semi-empíricos

Desde 1975, quando surgiu o primeiro método brasileiro para a estimativa da capacidade de carga de estacas, proposto por Aoki e Velloso (1975), vários outros autores, seguindo a mesma linha de raciocínio, apresentaram métodos semelhantes, existindo hoje uma experiência bastante razoável no meio técnico nacional.

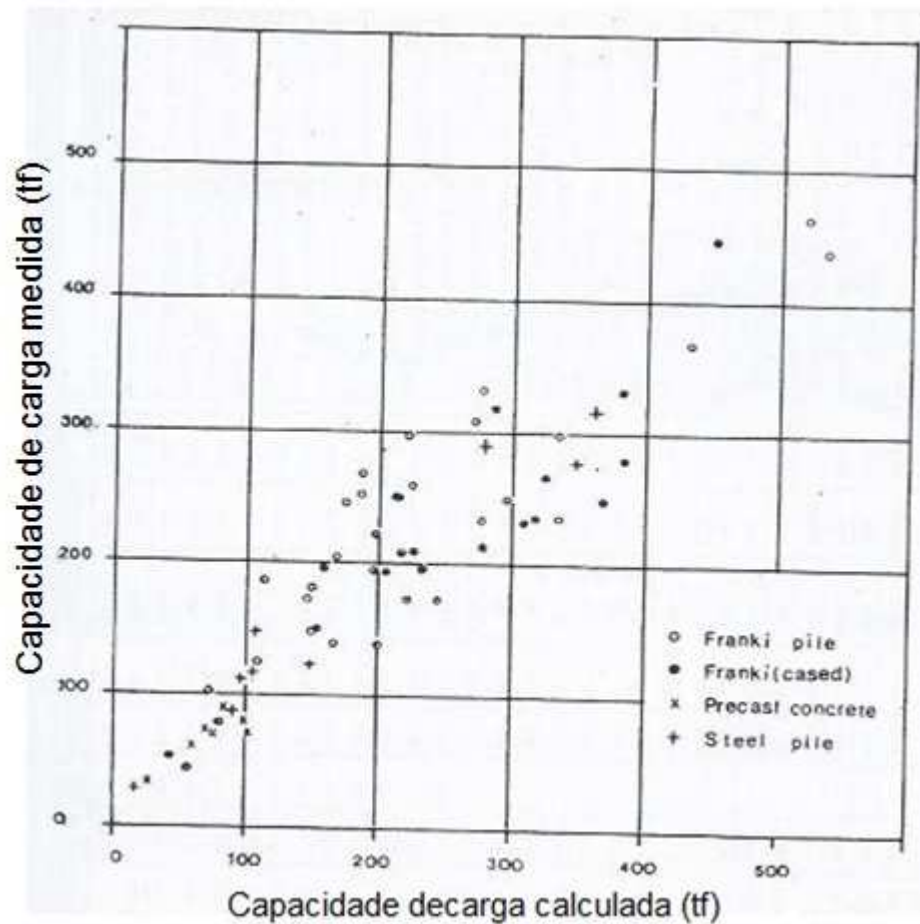
Para estimativa da capacidade de carga das estacas através de métodos semi-empíricos baseados no Nspt serão apresentados os resultados obtidos pelos autores através dos métodos Aoki e Velloso (1975) e Decourt e Quaresma (1978) por serem os mais utilizados e difundidos no meio técnico nacional, lembrando aqui que esses métodos estão sempre sofrendo atualizações e foram idealizados com base em elementos técnicos especificados de cada região onde foram desenvolvidos.

Esses métodos foram realizados comparando os resultados da sondagem SPT com provas de carga estática. Para as provas de carga que não atingiram a ruptura os autores adotaram critérios para definição da carga de ruptura através de extrapolação (Aoki e Velloso) ou convenção (Decourt e Quaresma). Na época não eram realizadas provas de carga instrumentadas, dessa forma os autores utilizaram critérios para separação da parcela do atrito lateral e carga de ponta.

Basicamente o atrito lateral calculado através destes métodos depende do valor do Nspt e da área lateral da estaca, enquanto que a carga de ponta da depende do Nspt e da área da ponta da estaca. Decourt e Quaresma (1978) não considera a influência do tipo de solo no valor do atrito lateral, enquanto que Aoki e Velloso (1975) há a influência do tipo de solo no valor do atrito lateral. Para a carga de ponta os dois métodos consideram a influência do tipo de solo.

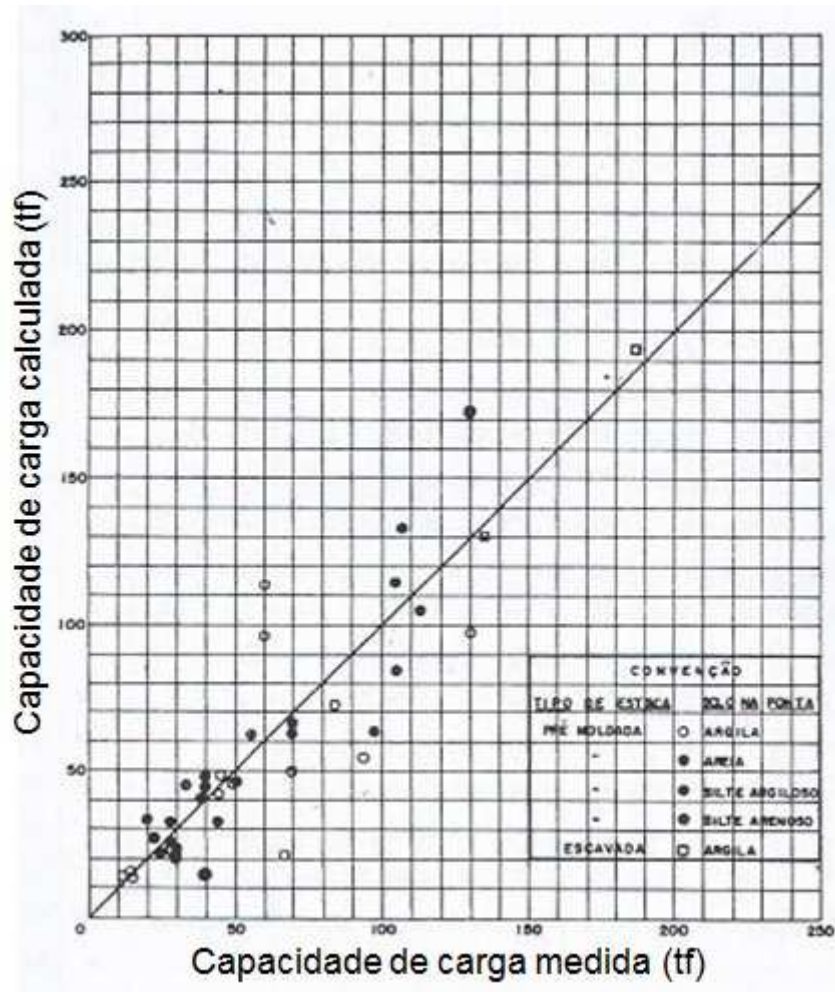
A figura 16 mostra a correlação entre os valores calculados através do Método Aoki e Velloso (1975), indicado no eixo x, e os resultados de prova de carga estática (eixo y).

Figura 16 – Correlação entre valores calculados e medidos do Método Aoki e Velloso (1975)



A figura 17 indica a correlação entre a carga admissível determinada pelo Método Decourt e Quaresma (1978), indicada no eixo y, e o resultado da prova de carga (eixo x).

Figura 17 – Correlação entre o Método Decourt e Quaresma (1978)



Através das figuras 16 e 17 verifica-se que os métodos citados fornecem estimativas de capacidade de carga próximas das provas de cargas, entretanto há casos onde as fórmulas subestimam ou superestimam a capacidade de carga.

2.6 – Métodos Dinâmicos

Os métodos de previsão de capacidade de carga de estacas cravadas que se baseiam na observação da sua resposta durante o processo de cravação são chamados de “métodos dinâmicos” (Velloso e Lopes, 2002).

Os métodos dinâmicos podem se dividir em duas formas, conforme se baseiam: em fórmulas dinâmicas ou solução da equação de onda:

- 1) As fórmulas dinâmicas são expressões que utilizam o princípio da conservação de energia, a teoria do choque de Newton e a lei de Hooke para corpos perfeitamente elásticos, relacionando grandezas medidas durante a cravação com a resistência do conjunto estaca – solo;
- 2) As soluções da equação da onda, que utilizam as equações da propagação unidimensional de onda de tensões, estudando a estaca como uma barra ao longo da qual uma onda gerada pelo golpe se propaga e esta onda está sujeita a atenuação por ação do solo que envolve a estaca. (Smith, 1960)

No uso das fórmulas dinâmicas, deve se considerar que a resistência oferecida pelo solo à penetração da estaca não é a capacidade de carga estática da estaca, já que a cravação de uma estaca é um fenômeno dinâmico e, portanto, mobiliza resistências inercial e viscosa, além da resistência estática. Nas fórmulas dinâmicas, que fornecem a capacidade de carga estática, a carga de trabalho é obtida dividindo-a por um coeficiente que fará o devido desconto da resistência dinâmica. Este coeficiente de correção tem uma variabilidade muito grande porque depende da fórmula utilizada, já que estas são baseadas em hipóteses diferentes. Portanto, as fórmulas dinâmicas são melhor empregadas no controle do estaqueamento e recomenda-se o seguinte procedimento. (Velloso e Lopes, 2002):

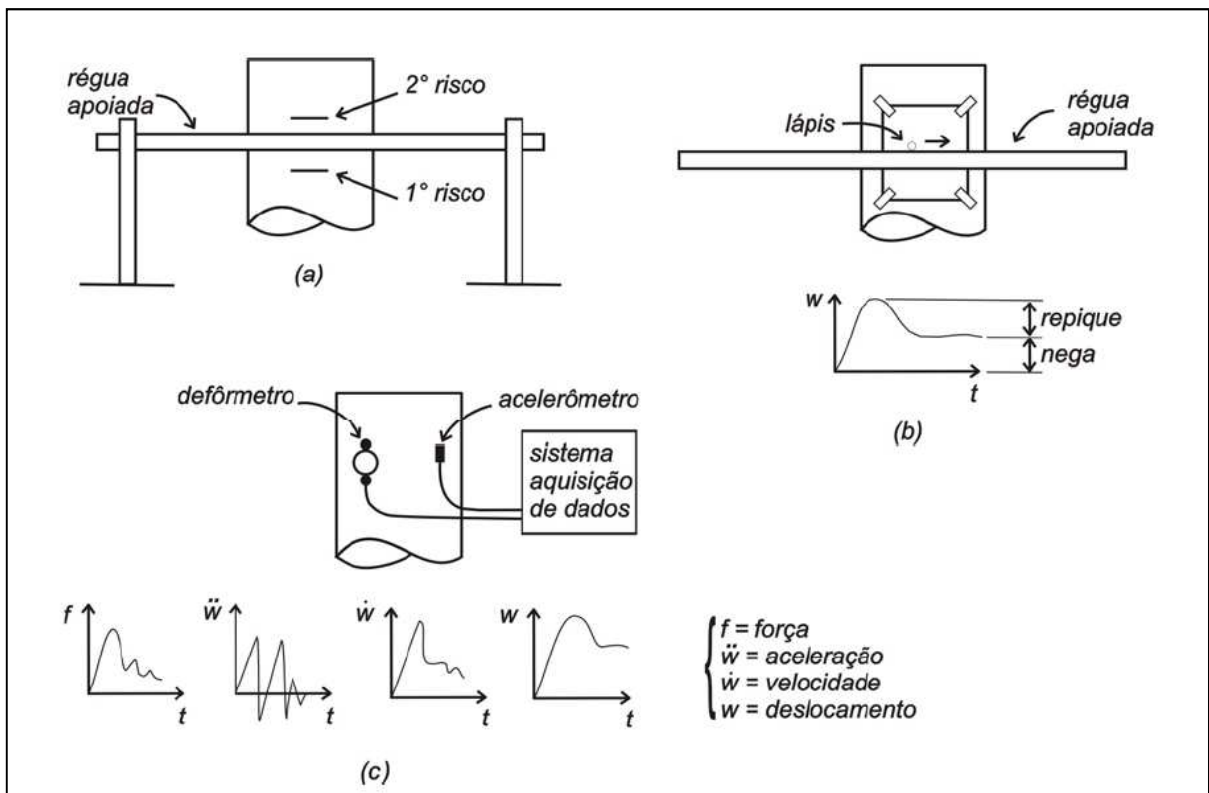
- Cravar uma estaca, próximo a uma sondagem, até a profundidade prevista por um método estático, anotando a nega e/ou repique;
- Executar uma prova de carga (quanto mais provas de carga, melhor) para obter o coeficiente de correção para a fórmula escolhida;
- Empregar a fórmula escolhida em todo o estaqueamento, como o coeficiente de correção obtido.

Existem várias maneiras de se observar a resposta a cravação de uma estaca. A nega, que representa o deslocamento permanente da estaca para uma determinada energia de cravação, é a maneira mais simples de se fazer a observação. Ela é obtida riscando-se uma linha horizontal na estaca com auxílio de uma régua apoiada em dois pontos da torre do bate estacas, aplicando dez golpes

com o martelo, riscando novamente, medindo a distância entre as duas linhas e dividindo esta distância por dez para obter a penetração permanente média por golpe (nega), figura 18a. Outra maneira consiste em prender uma folha de papel no fuste da estaca, riscar uma linha horizontal com uma régua apoiada em pontos fora da estaca e manter o lápis apoiado na régua durante a aplicação do golpe, indicando a nega e o repique da estaca, conforme a figura 18b.

Já a monitoração da cravação com instrumentos eletrônicos (figura 18c) é uma maneira mais sofisticada. São feitos registros de aceleração e forças no topo da estaca ao longo do tempo através de dois instrumentos, como foi citado anteriormente.

Figura 18 – Observação da resposta à cravação de uma estaca: a) medida simples da nega, b) medida da nega e repique e c) monitoração da cravação com instrumentos eletrônicos (Velloso e Lopes, 2002).



2.6.1 – Fórmulas Dinâmicas

Likins et al (2012) cita que no início dos anos 1900 era comum a utilização das fórmulas dinâmicas para estimativa da capacidade de carga de estacas cravadas e diversas comparações foram realizadas com provas de carga estática. Entretanto, os autores salientam as condições da época em que foram criadas essas fórmulas dinâmicas: as estacas eram muito menores que as atuais; estacas de madeira eram comuns nessa época; martelos de queda livre e de ação simples predominavam; não existiam martelos de dupla ação, martelos hidráulicos ou à diesel; a mecânica dos solos ainda estava em sua “infância” na era “pré-Terzaghi-Peck”; não haviam normas para realização e interpretação das provas de carga; não havia um consenso sobre as diferentes fórmulas utilizadas na época.

Chelis (1951) Apud Likins et al (2012) afirma que as fórmulas dinâmicas podem ser aplicadas apenas em casos de solos não coesivos, entretanto atualmente esta premissa é esquecida.

Com o surgimento dos métodos que utilizam a “Teoria da Equação da Onda” (Smith, 1960), houve um avanço muito grande na instrumentação de campo (PDA, TNO, IFCO, IPT-CASE e outros) para controle de fundações profundas com base no ensaio de carregamento dinâmico. Entretanto, a norma brasileira ABNT NBR6122/2010 obriga que sejam anotados a nega e o repique elástico em todas as estacas executadas, atendendo as condições de segurança.

Redtenbacher (1859) Apud Rosa (2000) propôs uma das fórmulas mais antigas, denominada racional ou completa, na qual são considerados todos as perdas de energia supostamente ocorridas durante a cravação.

$$\underbrace{e \times W \times h}_1 = \underbrace{R_u \times s}_2 + \underbrace{\frac{e \times W \times h \times P(1 - \mu^2)}{W \times P}}_3 + \underbrace{\frac{R_u^2 \times L}{2E \times A}}_4 + \underbrace{\frac{R_u^2 \times L''}{2E'' \times A''}}_5 + \underbrace{E \times s}_6 \quad (1)$$

Onde:

- 1 (Energia total transmitida pelo golpe do martelo);
- 2 (Trabalho realizado para deslocar a estaca);

- 3 (Termo da eficiência do impacto de Newton);
- 4 (Energia dissipada na compressão elástica da estaca);
- 5 (Energia dissipada na compressão elástica dos acessórios de cravação);
- 6 (Energia dissipada na compressão elástica do solo (Es));
- μ (Coeficiente de restituição);
- L (Comprimento total da estaca);
- A (Área da seção da estaca);
- E (Módulo de elasticidade da estaca);
- L", A" e E" (Valores de L, A e E referentes ao capacete).

A partir da equação (18) é possível deduzir inúmeras outras, desde que admitidas determinadas simplificações, normalmente referente a dissipação de energia.

Bilfinger (2002) cita a utilização das seguintes fórmulas: Janbu (1953), Dinamarqueses (1957), Holandeses (1812), Brix (1957), Hiley (1925), Engineering News Record (1988), Energy Approach (1992). Cada fórmula apresenta um fator de segurança próprio de forma a melhor se correlacionar com provas de carga estática.

Cabette e Murakami (2014) apresentaram uma forma de ajustar o fator de segurança de cada fórmula dinâmica com base nos resultados obtidos no ensaio de carregamento dinâmico, na obra de Jacareí. A figura 19 ilustra a comparação dos resultados com a utilização dos fatores de segurança dos autores originais das fórmulas, enquanto que na figura 20 estão indicados os resultados modificando o fator de segurança de cada fórmula dinâmica visando obter melhor correlação com os resultados do ensaio de carregamento dinâmico. A tabela 2 indica a comparação dos resultados considerando o fator de segurança recomendado pelo autor e o fator de segurança corrigido.

Tabela 2 - Estimativa da capacidade de carga das estacas através dos métodos dinâmicos.

Fórmulas Dinâmicas	Ru (kN)	R ²	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	FS do autor	FS Corrigido
Janbu	581	0,62	144	0,25	2	2,41
Dinam.	588	0,67	177	0,30	2	2,14
Holand.	588	0,45	224	0,38	10	10,72
Brix	596	0,55	243	0,41	4 a 5	3,95
Hiley	582	0,72	142	0,24	2 a 6	1,50
Eng. News Record	585	0,80	149	0,25	6	1,25
Energy Approach	586	0,80	153	0,26	2	1,16
CAPWAP RMX / 2	585	X	129	0,22	2	2,00

Figura 19 – Correlação utilizando a fórmula original

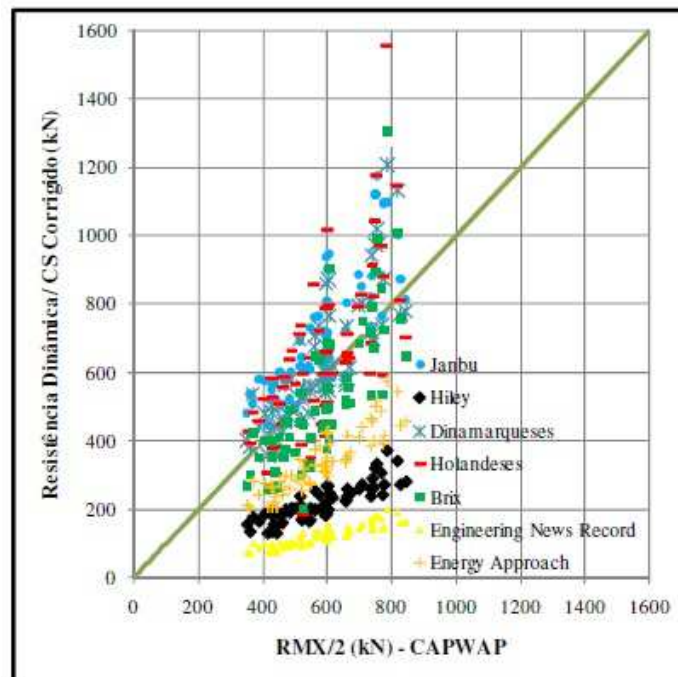
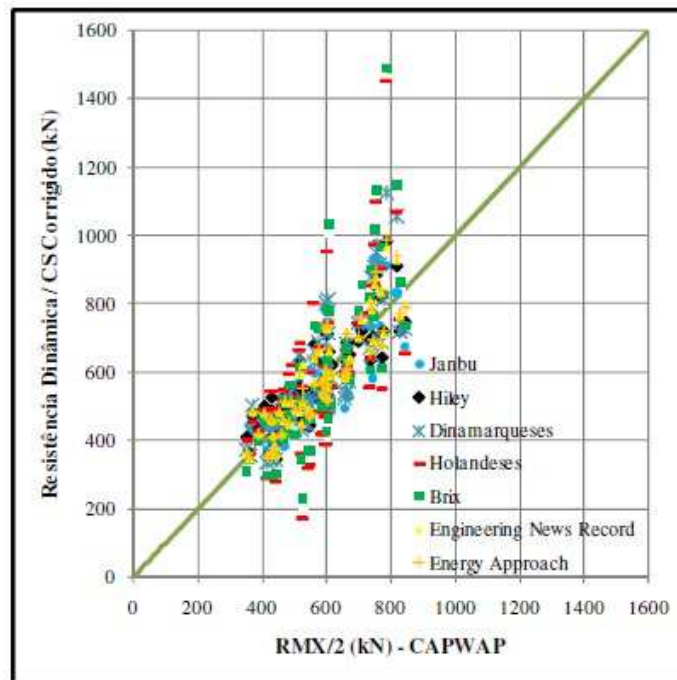


Figura 20 – Correlação utilizando o fator de segurança corrigido



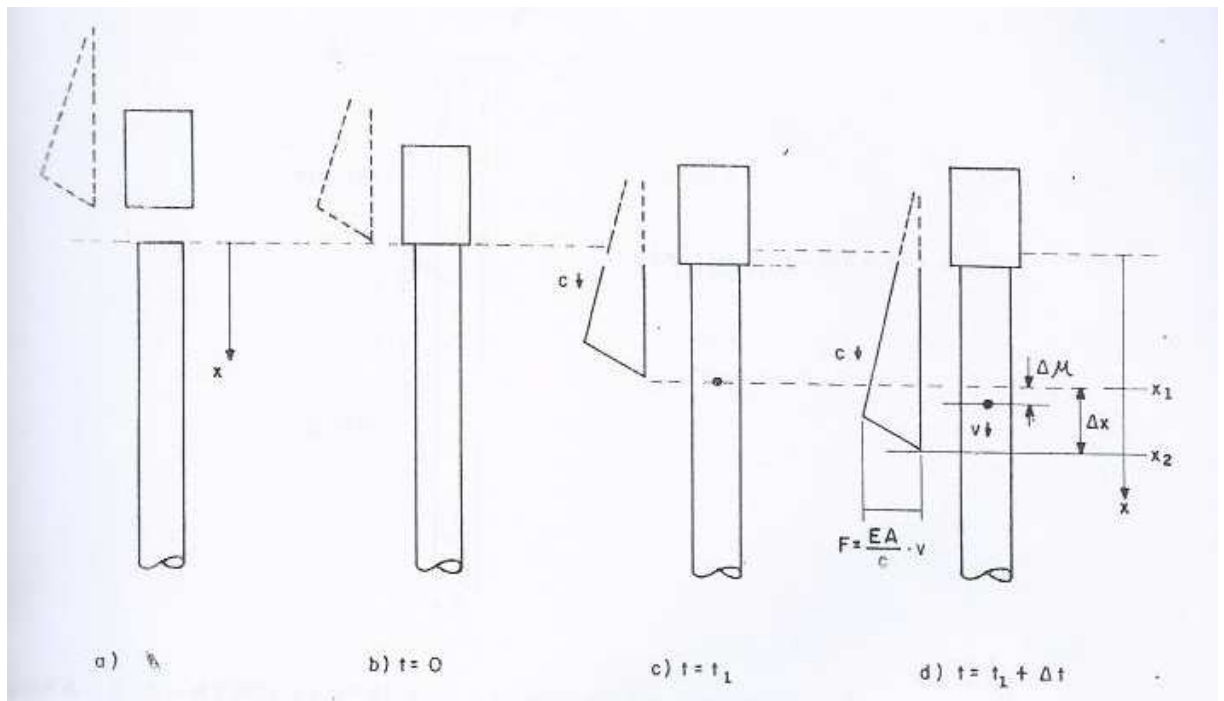
Com auxílio do coeficiente de variação (CV) obtido na tabela 2, destacam-se as fórmulas dinâmicas que obtiveram menores valores os quais apresentam menor dispersão em relação ao valor médio da capacidade de carga das estacas, são elas as fórmulas propostas por Hiley, Janbu, Eng. New Record e a fórmula Energy Approach que apresentam melhor uniformidade em relação as demais fórmulas com CV mínimo de 0,24 e máximo de 0,26.

2.6.2 – Teoria da Equação da onda

Segundo Niyama (1983), a primeira análise da propagação unidimensional da onda, aplicável à cravação de estaca, foi apresentada por Saint-Venant em 1865. Ele formulou uma equação diferencial que governa a propagação unidimensional da onda numa barra elástica, bem como a sua respectiva solução.

A formação da onda que se propaga na estaca durante a sua cravação é devida ao impacto do martelo como se observa na figura 21.

Figura 21 – Propagação de onda na estaca (Fonte: Niyama, 1983)



A parte superior da estaca é comprimida e as partículas do material da estaca são aceleradas. A onda de tensão propaga-se através da estaca com uma velocidade c , que depende do meio, portanto das características do material da estaca.

Num determinado intervalo de tempo, Δt , a onda atravessa um segmento Δx da estaca, intervalo no qual a partícula situada na frente da onda, que tinha uma velocidade $v = 0$ (no instante $t = t_1$) terá sido acelerada até a velocidade v , deslocando-se Δu da sua posição inicial.

A deformação da zona comprimida, no caso, coincide com o deslocamento do topo da estaca e portanto, tem-se:

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (3)$$

$$v = \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (4)$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (5)$$

De (2), (3), (4) resulta que:

$$\mathcal{E} = \frac{v}{c} \quad (6)$$

Considerando-se A como área da seção transversal da estaca e E o módulo de elasticidade do material da estaca, tem-se pela lei de Hooke, a relação:

$$F = \frac{E \times A}{c} \times v \quad (7)$$

Observa-se que existe a proporcionalidade entre força F e velocidade v quando a onda de tensão se propaga numa direção da estaca.

Aplicando-se a segunda lei de Newton na seção Δx , pode-se obter:

$$F = m \times a = \rho \times A \times \Delta x \times \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (8)$$

Onde ρ é a densidade específica do material da estaca.

Desta forma de (2), (7), (8) e considerando-se o elemento em repouso (ou seja $v_{\text{inicial}} = 0$) tem-se que $\Delta v = v$, resultando:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (9)$$

O fator de proporcionalidade entre força e a velocidade é denominado de impedância da estaca:

$$Z = \frac{E \times A}{c} = c \times \rho \times A \quad (10)$$

Desta última expressão se deduz que tal impedância é a massa da estaca através da qual a onda de tensão se propaga por unidade de tempo, e a força pode ser escrita como:

$$F = Z \times v \quad (11)$$

A propagação de onda pode ser expressa através de equação diferencial. Considerando-se um segmento da estaca, conforme a figura 12, e segundo as leis de Newton e de Hooke, tem-se:

$$\begin{aligned} \sum F &= 0 \\ F_2 - F_1 - F_i &= 0 \\ E \times A \times \frac{du}{dx} + \frac{d}{dx} \left(E \times A \times \frac{du}{dx} \right) - E \times A \times \frac{du}{dx} - \rho \times A \times dx \times \frac{d^2u}{dt^2} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Da expressão (9) tem-se a equação geral do movimento da onda unidimensional, conhecida como equação da onda:

$$\frac{d^2u}{dx^2} - \frac{1}{c^2} \times \frac{d^2u}{dt^2} = 0 \quad (13)$$

A solução geral desta equação diferencial parcial de segunda ordem é dada por:

$$u(x,t) = f(x-ct) + g(x+ct) = u \downarrow + u \uparrow \quad (14)$$

Segundo Niyama (1983) diversos autores tem utilizado uma notação conveniente para as ondas descendente e ascendente que representam a solução da equação (13). As funções f e g correspondem a duas ondas que se propagam com a mesma velocidade, mas em direções contrárias. As ondas se deslocam em direções opostas no tempo, mas não mudam de forma.

Similarmente, a força e a velocidade de deslocamento da partícula podem ser representadas por duas funções, e, esquematicamente, teremos:

$$F = F \downarrow + F \uparrow = V \downarrow Z - V \uparrow Z \quad e \quad V = V \uparrow + V \downarrow \quad (15)$$

Quando uma estaca é instrumentada, obviamente os instrumentos só medem os valores totais de força e velocidade. Por outro lado, as ondas ascendentes (“Wave Up”), originadas da reflexão, é que conduzem informações dos efeitos externos (e internos se houver) que provocam justamente estas reflexões.

Desta forma temos que:

$$F \downarrow = \frac{F + Z \times v}{2} \quad (16)$$

$$F \uparrow = \frac{F - Z \times v}{2} \quad (17)$$

2.7. – Influência de tensões residuais

Diversos autores estudaram a influência das tensões residuais em estacas cravadas. Neste trabalho serão apresentadas as contribuições de Fellenius (2002) e Massad (1995).

2.7.1 – Influência de tensões residuais segundo Fellenius (2002, 2009)

Segundo Fellenius (2009), a dissipação de poro-pressão induzida implica na aplicação de uma carga (carga residual) na estaca através de um atrito negativo na

parte superior da estaca, que por sua vez é resistida pelo atrito positivo na parte inferior da estaca e pela resistência de ponta. Em estacas cravadas, a carga residual surge das deformações durante o processo de cravação (carga aprisionada). A carga residual, assim como a capacidade de carga, deve continuar crescendo mesmo com a dissipação da poro-pressão.

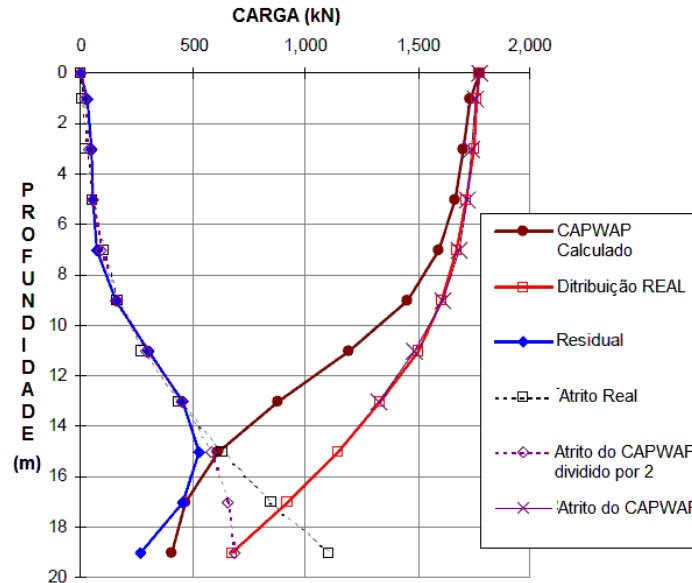
O efeito quantitativo de não reconhecer a influência da carga residual na avaliação dos resultados de provas de carga estática é a conclusão errada de um aparente valor de atrito lateral maior que o real, enquanto que a carga de ponta aparentemente é menor que a real. Tipicamente, quando a carga residual não é conhecida, a distribuição da carga na estaca apresentará uma curvatura decrescente em profundidade (curva em formato de “S” conforme indicada da figura 22, Fellenius, 2002), indicando um atrito lateral unitário que diminui com a profundidade, em oposição ao formato real do atrito lateral (em solo homogêneo) através de uma curvatura crescente, indicando progressivamente um acréscimo no valor do atrito lateral.

Na figura 22 nota-se a diferença nas curvas de força axial em profundidade e distribuição do atrito lateral do CAPWAP e do valor real. A curva real da força axial em profundidade é obtida subtraindo-se a carga residual da curva do CAPWAP. Observa-se que a partir dos 13m de profundidade o atrito lateral dividido por dois supera a carga residual, indicando a existência de uma linha neutra nesta profundidade.

A existência de carga residual em estacas, também conhecida como *carga aprisionada*, é conhecida há um longo tempo. Nortlund (1963) Apud Fellenius (2002) é provavelmente o primeiro autor a relatar a sua importância para avaliação da distribuição da carga em provas de carga estática instrumentadas. Entretanto, não é fácil demonstrar que os dados do teste são influenciados por cargas residuais. A quantificação desses efeitos são ainda mais difíceis. A prática é, lamentavelmente, considerar que as cargas residuais são pequenas e não significativas para a análise e prosseguir a avaliação baseando na premissa de “zerar” todos os *strain gages* imediatamente antes do teste. Isto é, o problema é “resolvido” simplesmente declarando que o mesmo não existe (Fellenius, 2009). Esta é a razão pela qual a literatura da mecânica dos solos inclui teorias aplicando o conceito de “profundidade crítica” e premissas de que o atrito lateral unitário deve reduzir em função da

profundidade em solos homogêneos.

Figura 22 – Influência de tensões residuais (Fellenius, 2002).



2.7.2 – Influência de tensões residuais segundo Massad (1995)

Massad (1995) apresentou um modelo matemático para análise de estacas levando em consideração a rigidez relativa do sistema estaca-solo e de tensões residuais. Foi introduzido um fator de majoração (μ) que considera a carga residual como carga de atrito lateral. O modelo tem, como aplicações práticas, determinar: a) o formato da curva carga-recalque no topo da estaca; b) as parcelas carga de ruptura do atrito lateral e carga de ponta; c) os limites dos métodos de extrapolação de carga de ruptura de estacas não levadas à ruptura.

O modelo é baseado nas relações de Cambefort, onde a figura 23 a representa o comportamento do atrito lateral e a figura 24 representa o comportamento da carga de ponta.

Figura 23 – Primeira relação de Cambefort

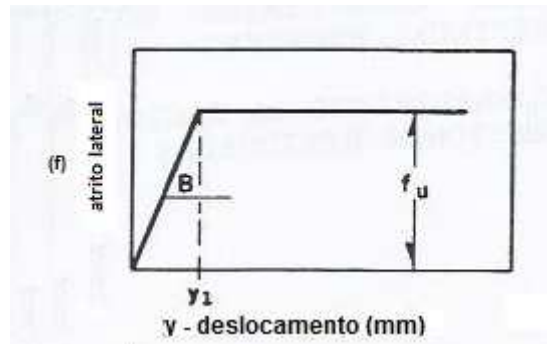
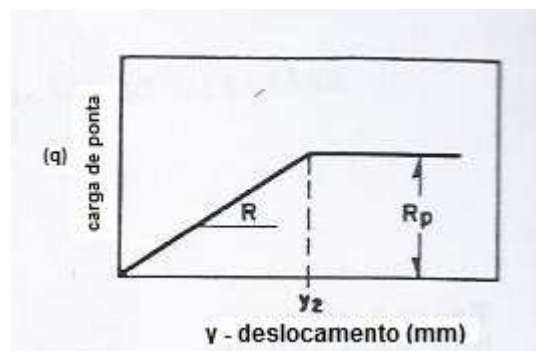


Figura 24 – Segunda relação de Cambefort



Das figuras 23 e 24 resulta em:

$$f = B \cdot y \text{ (para } y \leq y_1) \text{ e } f = f_u = B \cdot y_1 \text{ (para } y \geq y_1) \quad (18)$$

$$q = R \cdot y \text{ (para } y \leq y_2) \text{ e } q = R_p = R \cdot y_2 \text{ (para } y \geq y_2) \quad (19)$$

É conhecido que o valor de y_1 é da ordem de alguns milímetros, independente do solo, tipo de estaca e dimensões da estaca, enquanto que y_2 é da ordem de dezenas de milímetros e depende das dimensões da base da estaca.

A curva carga-recalque teórica está indicada na figura 25. Durante o carregamento é possível identificar quatro regiões relacionadas ao fenômeno de transferência de carga. O primeiro trecho (0-3) corresponde ao desenvolvimento do atrito lateral e carga de ponta ao longo dos trechos pseudo-elásticos da primeira e segunda Relação de Cambefort; em particular, no ponto 3 temos $y = y_1$ e $f = f_u$. O

segundo trecho (3-4) é relacionado com a progressiva mobilização da carga de ruptura do atrito lateral (f_u) do topo (ponto 3) até a base (ponto 4). No terceiro trecho (4-5), com o acréscimo de carga no topo da estaca, o solo na base reage ao longo da parcela pseudo-elástica da segunda Relação de Cambefort. Finalmente, o ponto 5 é atingido, caracterizando a ruptura, resultando no quarto trecho (5-6).

Figura 25 – Curva carga-recalque teórica

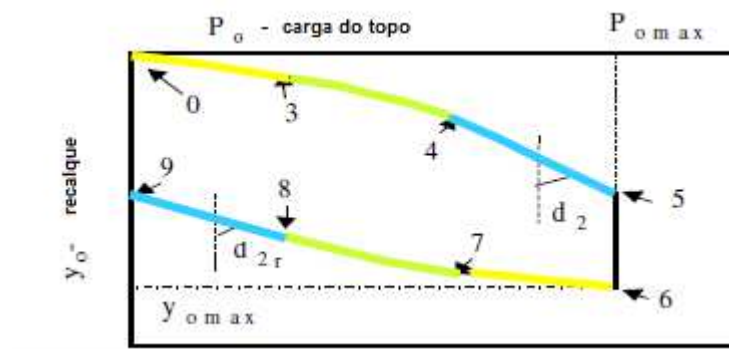
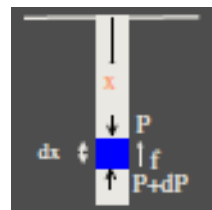


Figura 26 – Equilíbrio de forças



Do equilíbrio de forças indicadas na figura 26, resulta nas seguintes equações:

$$\frac{dP}{dx} = -\pi \cdot D \cdot f \quad (20)$$

$$\varepsilon = \frac{dy}{dx} = -\frac{P}{E \cdot S} \quad (21)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\pi \cdot P \cdot D \cdot f}{E \cdot S} \quad (22)$$

Das equações 21 e 22, a equação 22 pode ser reescrita como:

Para $y \leq y_1$:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{k}{h^2} \cdot y \quad (23)$$

Para $y \geq y_1$:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{k}{h^2} \cdot y_1 \quad (24)$$

O coeficiente k é dado por:

$$k = \frac{Alr}{Kr \cdot y_1} = 4 \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^2 \cdot \left(\frac{B \cdot D}{E}\right) \quad (25)$$

Onde Kr é dado por:

$$Kr = \frac{E \cdot S}{h} \quad (26)$$

A tabela 3 classifica as estacas em diferentes tipos:

Tabela 3 – tipos de estacas em relação a k

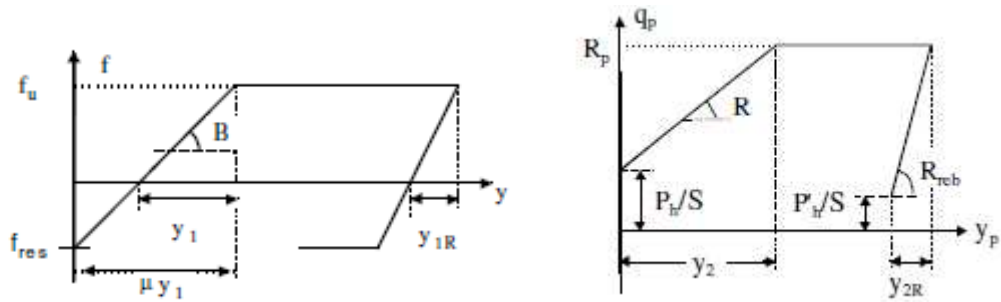
Tipo de Estaca	Condição
Rígida ou curta	$k \leq 2$
Intermediária	$2 \leq k \leq 8$
Compressível ou Longa	$k \geq 8$

O fator de majoração (μ) pode ser definido como:

$$\mu = 1 + \frac{Ph}{Alr} \quad (27)$$

Com a introdução do fator de majoração (μ) as Relações de Cambefort podem ser modificadas conforme indicado na figura 27:

Figura 27 – Relações de Cambefort Modificadas



Para cada trecho, podem ser utilizadas as seguintes equações:

Trecho 0-3:

$$Po3 = \mu \cdot Alr \cdot \frac{\beta'^3}{z} \cdot \frac{y_0}{\mu \cdot y_1} \quad (28)$$

Trecho 3-4:

$$\frac{y_0}{\mu \cdot y_1} = \left[1 - \frac{(\beta')^2}{2} \right] + \left(\frac{k}{2} \right) \cdot \left(\frac{Po}{\mu \cdot Alr} \right)^2 \quad (29)$$

Trecho 4-5:

$$\frac{Po - \mu \cdot Alr}{y_0 - \frac{\mu \cdot Alr}{2 \cdot Kr}} = \frac{1}{\frac{1}{R \cdot S} + \frac{1}{Kr}} \quad (30)$$

A carga residual é considerada como parte do atrito lateral, pois $\mu \cdot Alr = Ph + Alr$. Segundo Vesic (1977) apud Massad (1995) a mobilização da parcela da carga residual (Ph) causa uma redução no recalque da estaca sem alterar a capacidade de carga.

2.8. – Influência do atrito negativo

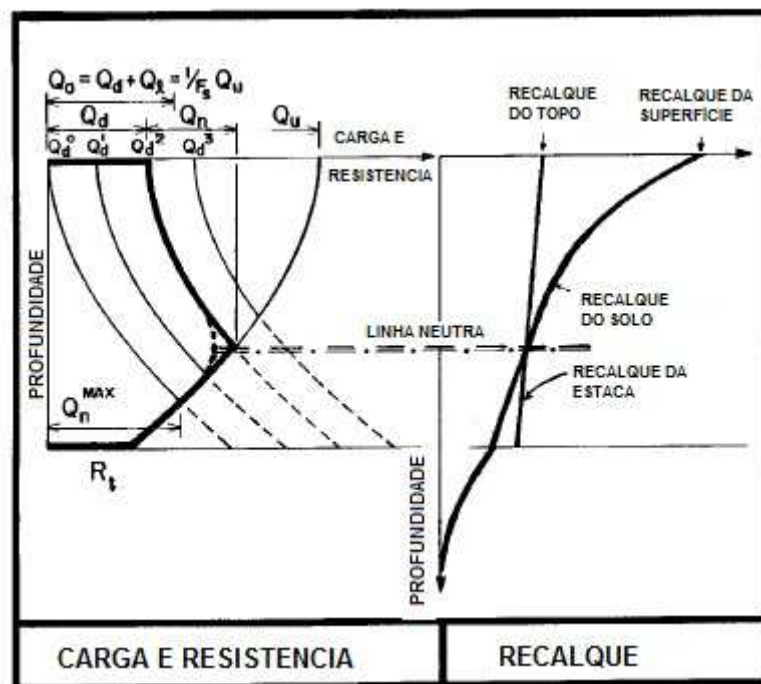
Segundo Bjerrum (1969), nas estacas implantadas em solos adensáveis, pode ocorrer o fenômeno de atrito negativo, pelo qual o recalque de adensamento supera o recalque da estaca. Em consequência, a camada adensável, em vez de

contribuir como atrito lateral resistente (positivo), passa a gerar acréscimo de solicitação vertical na estaca, de cima para baixo.

Uma situação típica para deflagrar esse fenômeno é o lançamento de sobrecargas na superfície, provenientes de aterro, estoque de materiais, etc. O solo entra em processo de adensamento, propiciando a ação do atrito negativo, com o decorrer do tempo.

Bjerrum (1969) define a linha neutra como sendo a região onde o movimento relativo estaca-solo é nulo, é a localização de equilíbrio de recalques. Este conceito está representado na figura 28.

Figura 28 – Definição da linha neutra (Fellenius, 1998)



Fellenius (1998) cita que a dissipação de poro-pressão induzida pela instalação de uma estaca e a reconsolidação do solo (efeito *set up*) deverá introduzir atrito negativo e tensões residuais na estaca. O autor ainda cita alguns aspectos relevantes da observação de casos ocorridos em obras:

- 1) O atrito lateral na estaca (positivo ou negativo) se desenvolve através de um pequeno movimento do solo, geralmente para valores menores que a carga de projeto.
- 2) A máxima carga aplicada na estaca ocorre na linha neutra e seu valor é

a soma da carga proveniente da estrutura e do atrito negativo. Esta carga não deve exceder o limite estrutural da estaca.

3) A carga de atrito negativo não deverá apresentar influência na capacidade de carga da estaca e esta carga não deverá ser subtraída da capacidade de carga na determinação da carga admissível da estaca.

4) Do ponto de vista geotécnico a carga devido ao atrito negativo é uma força de pré-compressão benéfica na estaca reduzindo a deformação que ocorre da carga viva proveniente da estrutura. Além do nome não há nada de negativo no atrito lateral negativo.

5) Historicamente, o atrito negativo é associado com um recalque elevado. Entretanto o problema não é o valor da carga de atrito negativo e sim do recalque provocado pelo mesmo.

6) Recalques excessivos deverão se desenvolver para estacas flutuantes, onde a ponta da estaca fica apoiada sobre solos compressíveis. O recalque é função da carga aplicada na estaca e aumento da tensão efetiva causada por outros fatores, como por exemplo, rebaixamento do nível d'água ou aplicação de sobrecarga no terreno. Estacas longas de resistência de ponta devem apresentar tensões elevadas na linha neutra.

7) O atrito negativo pode ser substancialmente reduzido com aplicação de uma camada fina de betume, que por sua vez deverá reduzir a carga máxima de compressão na estaca. Entretanto, o betume deverá reduzir a capacidade de carga da estaca, que é um efeito não desejável.

Fellenius (1984, 2004) apresentou um método unificado para determinar a capacidade de carga de estacas, considerando a carga de atrito negativo, recalque do solo e recalque da estaca, que consiste basicamente:

1) Cálculo da capacidade de carga última da estaca, definindo a distribuição de carga por atrito lateral e ponta na condição de ruptura e na condição de carga de trabalho.

2) Cálculo do recalque no topo da estaca e ponta da estaca provocada pela carga de trabalho.

3) Cálculo do recalque do solo provocado pelo adensamento do solo.

4) Determinação da linha neutra, verificando se a carga nesta região

excede o limite estrutural da estaca.

Fellenius (1984) apresentou o comportamento de estacas em diferentes condições de carregamento na presença do fenômeno de atrito negativo, conforme indicado na figura 29. As estacas podem ser carregadas axialmente no topo da estaca comprimindo ou tracionando. Quando a estaca está comprimida a seção transversal da estaca aumenta em função do coeficiente de Poisson, resultando no aumento do coeficiente de empuxo do solo. Quando a estaca está tracionada ocorre a diminuição da seção transversal da estaca (coeficiente de Poisson), resultando na diminuição do coeficiente de empuxo do solo e diminuição da tensão efetiva.

O modo A da figura 29 indica o comportamento de uma estaca submetida a uma carga de compressão no topo. O resultado é uma deformação para baixo das camadas de solo, como mostrado na parte da esquerda da estaca, e uma resistência de atrito lateral para cima. A estaca está em compressão, o que resulta no aumento da seção transversal (coeficiente de Poisson) e o empuxo de solo aumenta. Além disso, o atrito lateral positivo transfere carga da estaca para o solo, conseqüentemente, a tensão efetiva aumenta no solo. Ambos efeitos (coeficiente de Poisson e aumento da tensão efetiva) resultarão no aumento do atrito lateral.

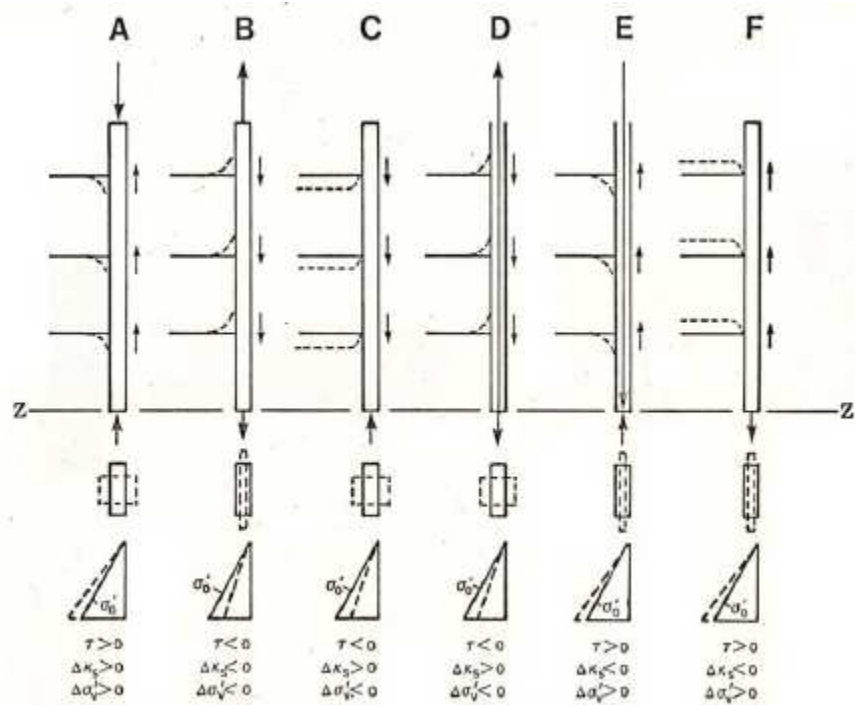
O modo B da figura 29 indica uma estaca submetida à esforço de tração no topo. O esforço de tração resultará numa deformação para cima das camadas de solo e um atrito lateral negativo. Este modo é caracterizado pela diminuição da pressão lateral e diminuição da tensão efetiva. O teste da estaca submetida à tração é um conceito representativo para o atrito negativo, entretanto, enquanto a resistência aparece na direção negativa e a tensão efetiva está reduzindo, em contraste com a estaca submetida ao efeito de atrito negativo, modo C da figura 29, o modo B está em tração e não em compressão. Conseqüentemente, a tentativa de estimar o atrito negativo através de prova de carga à tração deve subestimar a carga de atrito negativo.

Uma tentativa de realizar o teste à tração na estaca para estudar a magnitude do atrito negativo é o arranjo indicado no modo D da figura 29, onde o esforço de tração é aplicado na ponta da estaca, conseqüentemente os três aspectos são similares ao modo do atrito negativo.

O modo E da figura 29 indica um teste à compressão na ponta da estaca. O objetivo deste teste é simular o comportamento do modo F, que é afetado pela

expansão do solo acima do plano Z-Z.

Figura 29 – Comportamento de estacas submetidas a diferentes tipos de carregamentos.



A norma brasileira ABNT NBR 6122/2010 cita que estacas que estiverem sujeitas ao fenômeno do atrito negativo a carga admissível deverá ser reduzida, conforme a equação (31).

$$P_{adm} = (PL+PP) / FS - P_n \quad (31)$$

Onde:

PL = atrito lateral na ruptura;

PP = carga de ponta da estaca;

P_n = acréscimo de carga devido ao fenômeno de atrito negativo;

2.9. – Perda do atrito lateral em função do drapejamento

É por demais conhecido o fenômeno de drapejamento em estacas de deslocamento de pequena seção transversal (estacas pré-moldadas e perfil

metálico) que causam uma diminuição do valor do atrito lateral das estacas. Esse fenômeno decorre da vibração das estacas induzida pela cravação, que provoca um descolamento do solo ao redor do fuste da estaca nos metros iniciais.

Este efeito foi estudado por Paschoalin Filho (2008) que comparou o comportamento de estacas hélice contínua, escavada, ômega, raiz, pré-moldada, perfil metálico e trilho. As estacas foram submetidas a provas de carga estática à tração e comparadas com métodos de estimativa de capacidade de carga.

Paschoalin Filho (2008) concluiu que as estacas hélice contínua e escavada apresentaram o mesmo comportamento em relação à mobilização da resistência lateral unitária. A diferença do atrito lateral unitário apresentada entre ambas as estacas foi de apenas 3%.

A estaca raiz apresentou, após a estaca ômega, o maior valor de resistência lateral unitária dentre as estacas de 12m, enquanto que a estaca pré-moldada apresentou o menor valor dentre todas. Os menores valores de atrito lateral unitário foram para as estacas tipo trilho e pré-moldada de concreto, ou seja, estacas de pequena seção transversal e mais susceptíveis aos efeitos do drapejamento.

Considerando-se o tipo de material e forma de instalação, o atrito lateral unitário dos perfis metálicos tipo I e trilho, provavelmente deveriam estar mais próximos, o que não ocorreu. O perfil metálico de 18m de comprimento apresentou valor de atrito unitário 1,5 vezes superior ao obtido pelo trilho de 18m. Pelo tipo de material, provavelmente o atrito unitário da estaca de pré-moldada deveria estar mais próximo ou ser superior ao da estaca escavada, provavelmente não ocorrendo isto pelo efeito do drapejamento da estaca pré-moldada.

A tabela 4 ilustra a comparação do atrito lateral dos diversos tipos de estacas, indicando o efeito do drapejamento em estacas de deslocamento (pré-moldadas, perfil e trilho). Observa-se que as estacas de deslocamento apresentaram maior relação PU/PC, indicando menor capacidade de carga à tração em relação aos métodos de estimativa de capacidade decarga.

Tabela 4 - Efeito do drapejamento no valor do atrito lateral

TIPO DE ESTACA	L (m)	Diâmetro (m)	PC (kN)	PU	PU/PC	PU/PC Médio por tipo de estaca
RAIZ TI	12	410	910	1056	1,16	1,13
RAIZ T2	12	410	980	1056	1,07	1,13
RAIZ T3	12	410	910	1056	1,16	1,13
RAIZ T4	23	310	1410*	1941	1,38	1,38
PERFIL I P1 - w250x32,7	18/14 [#]	350**	998	1646/1107#	1,65/1,11#	1,66/1,12#
PERFIL I P2- w250x32,7	18/14 [#]	350**	980	1646/1107#	1,68/1,13#	1,66/1,12#
PERFIL I P3- w250x32,7	12/8 [#]	350**	500	832/450#	1,66/0,90#	1,66/0,90#
TRILHO TR1- TR37	18/14 [#]	140**	267	676/453#	2,53/1,70#	2,53/1,70#
TRILHO TR2 – TR37	20,5/16,5 [#]	140**	278	817/550#	2,94/1,98#	2,94/1,98#
PRÉ-MOLDADA	14	180	200	576	2,88	2,88
ESTACA ESCAVADA EC01	12	400	700*	1063	1,52	1,66
ESTACA ESCAVADA EC02	12	400	600*	1063	1,77	1,66
ESTACA ESCAVADA EC03	12	400	630*	1063	1,68	1,66
ESTACA HÉLICE HC01	12	400	700*	1063	1,52	1,60
ESTACA HÉLICE HC02	12	400	600*	1063	1,77	1,60
ESTACA HÉLICE HC03	12	400	700*	1063	1,52	1,60
ESTACA OMEGA OM 01	12	370	1051*	956	0,91	0,91

Onde: PC= Carga obtida em prova de carga; L=comprimento da estaca; PU=resistência última a tração estimada.* Estimado por meio de Van der Veen.** Diâmetro equivalente calculado em função da área lateral. #=Valor estimado pelo método considerando comprimento total da estaca, #=Valor estimado considerando o drapejamento ocorrido durante a cravação.

2.10. – Variação da capacidade de carga em função do tempo

Segundo a norma ABNT NBR 6122/2010 há terrenos que têm comportamento de relaxação e outros de cicatrização (efeito *set up*). Para a sua identificação é recomendada a determinação de nega descansada (alguns dias após o término da cravação). A relaxação ou cicatrização variam de poucas horas para solos não coesivos a até alguns dias para os solos argilosos. Quando a nova nega for superior à obtida no final da cravação, as estacas devem ser recravadas.

Quando a nova nega for inferior à obtida ao final da cravação, deve-se limitar o número de golpes para não causar danos à estaca. Neste caso a nega originalmente especificada deve ser analisada.

Golombek e Fletchman (1981) verificaram o efeito *set up* através de negas obtidas na recravação de estacas. Inicialmente as negas eram da ordem de 300mm, apresentando na recravação negas de aproximadamente 7mm. A tabela 5 ilustra o efeito *set up* através de negas de recuperação.

Tabela 5 – Negas de recuperação

Apoio	Estaca	Comprimento (m)	Nega inicial (mm)	Nega de recuperação (mm)	Horas decorridas
1A	6	53,48	41	7	24
2A	2	49,47	53	4	24
4A	5	49,12	520	13	24
5A	6	47,45	240	3	250
6A	3	50,14	176	0	211
7A	2	50,13	300	12	26
8A	5	50,17	334	12	140
9A	1	51,19	300	7	151
11A	4	50,07	254	4	31
12D	4	48,12	257	3	45
14D	1	45,13	226	3	189
16A	6	45,01	460	0	24
18A	5	46,12	100	10	23
21A	5	44,13	200	6	24
24D	4	44,15	280	2	24
26A	10	44,40	130	3	74

Fellenius et al (1989) verificaram o efeito *set up* através da realização de ensaios de carregamento dinâmico e provas de carga estática em diversas idades conforme indicado na tabela 6. Os autores verificaram o aumento da capacidade de carga com o tempo, a estaca A-2, por exemplo, apresentava capacidade de carga de 212 kips no final da cravação. Após 1 dia de descanso a mesma estaca obteve capacidade de carga de 422 kips.

Tabela 6 - Verificação do efeito set up através de ensaios de carregamento dinâmico e prova de carga estática

Estaca (1)	Comprimento (pés) (2)	Golpe Analisado (3)	Dia (4)	Carga (kips) (5)
A-2	117	EOID	0	212
		RSTR-1	1	422
A-4	117	EOID	0	270
		STAT	9	508
B-2	155	EOID	0	110
		RSTR-1	2	270
		RSTR-3	7	340
		STAT	15	314-570
B-4	155	RSTR-4	16	450
		EOID	0	146
		RSTR-1	1	272
		RSTR-2	9	400
E-2	140	STAT	15	660
F-1	142	EOID	0	188
		RSTR-1	1	460
		STAT	51	660
G-1	140	EOID	0	156
		RSTR-1	1	448
		RSTR-2	3	454
		STAT	21	660
H-1	144	RSTR-1	5	400
		STAT	14	380
H-2	142	RSTR-1	3	372
I-1	139	RSTR-1	7	530
		STAT	18	560
I-2	139	RSTR-1	7	366
		B-3	142	EOID
RSTR-1	1	236		
STAT	10	204-348		
E-4	153	RSTR-3	13	336
		EOID	0	220
		RSTR-1	1	418

Nota : 1 pé = 0,3048 m; 1 kip = 4,448 kN.

Onde:

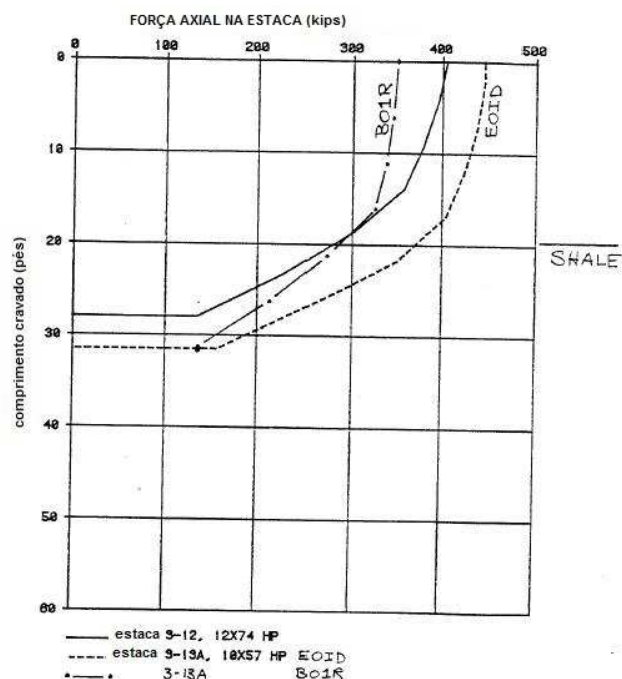
EOID = final da cravação

RSTR-n = recravação após n dias

STAT = prova de carga estática

Ao contrário do efeito *set up*, na relaxação ocorre perda da capacidade de carga. Likins (1985) verificou o fenômeno de relaxação em estacas cravadas em rocha sedimentar (*shale*) através da realização de ensaios de carregamento dinâmico no final da cravação, comparando o resultado com a realização do ensaio dinâmico na recravação, conforme indicado na figura 30.

Figura 30 – Perda da capacidade de carga em função da relaxação



Onde:

EOID = final da cravação

BOIR = início da recravação

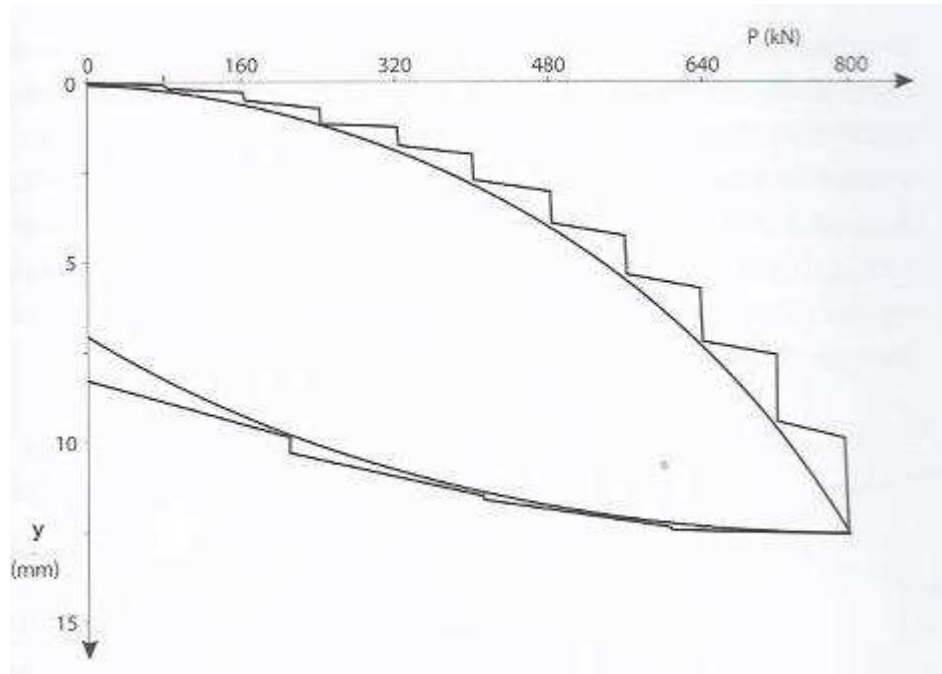
2.11. – Interpretação de provas de carga estática e dinâmica

2.11.1 – Formato da curva $P_o \times Y_o$

Como produto principal do ensaio, a prova de carga estática resulta em uma curva carga-recalque, $P \times y$, em que P é a carga aplicada no topo da estaca, representada no eixo das abscissas, e y é o recalque do topo da estaca, representado no eixo das ordenadas voltado para baixo, na tradição das fundações. Essa curva passa pelos pontos referentes ao final de cada estágio (recalques estabilizados), como esboçado na figura 31, na qual estão inseridos também os pontos iniciais dos estágios. Essa curva, que denominamos do tipo aberta, retrata a condição mais comum, em que, se fosse possível continuar o carregamento além da carga máxima programada, maior resistência seria mobilizada, à custa de mais recalques. Com esse tipo de curva, consideramos que a prova de carga não atinge a ruptura e que a definição do valor da capacidade de carga é passível de

interpretação.

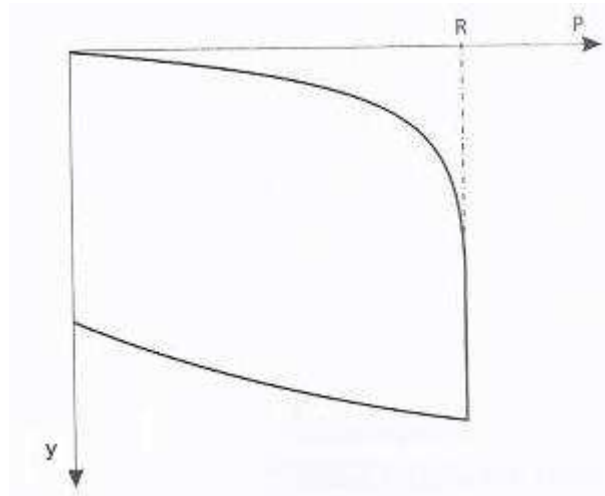
Figura 31 – Curva do tipo aberta (Cintra et al, 2013)



Cintra et al (2013) cita três possíveis modos de ruptura geotécnica em provas de carga estática em estacas, considerando que as estacas sejam suficientemente resistentes, sem dano estrutural ou estrangulamento do fuste.

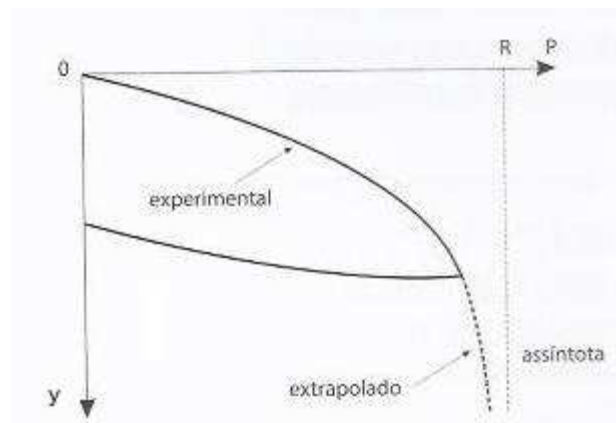
Às vezes, podemos obter um tipo de curva carga-recalque em que, antes do 10º estágio de carregamento, ocorre a sua verticalização, pois os recalques são incessantes, impossibilitando a continuidade do carregamento (deformações continuadas sem novos acréscimos de carga, segundo a NBR 6122/2010). A carga correspondente ao trecho vertical define o valor da capacidade de carga sem qualquer ambiguidade, conforme apresentado na figura 32. É chamada de *ruptura nítida*, uma vez que não necessita de interpretação para determinação do valor da capacidade de carga geotécnica.

Figura 32 – Ruptura nítida (Cintra et al, 2013)



Analisando a curva do tipo aberta, pode ocorrer uma condição peculiar em que os pontos obtidos na fase de carregamento constituem parte de um gráfico assintótico a uma reta vertical, conforme indicado na figura 33 (que inclui o trecho extrapolado para melhor compreensão). Neste caso o valor da capacidade de carga é definido pela assíntota vertical e é definida como *ruptura física*.

Figura 33 – Ruptura física (Cintra et al, 2013)



De Beer (1988) Apud Décourt (2008) ainda define a ruptura física como:

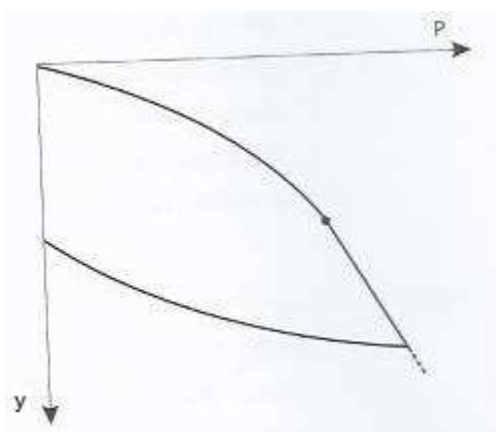
$$\Delta\rho/\Delta P = \infty \quad (32)$$

Dessa forma, Cintra et al (2013) cita que na ruptura física o valor da carga de ruptura é inatingível no ensaio. Mesmo com a capacidade de carga inferior ao limite

do sistema de reação é impossível chegar ao valor da carga de ruptura, bem como à carga máxima programada, devendo o descarregamento ser efetuado em razão dos recalques elevados. Não se vê nenhum senão em lidar com a irrealidade de um recalque infinito, pois se trata de uma forma de modelar casos reais de ruptura inatingível em provas de carga, ainda que aumentássemos o limite de reação.

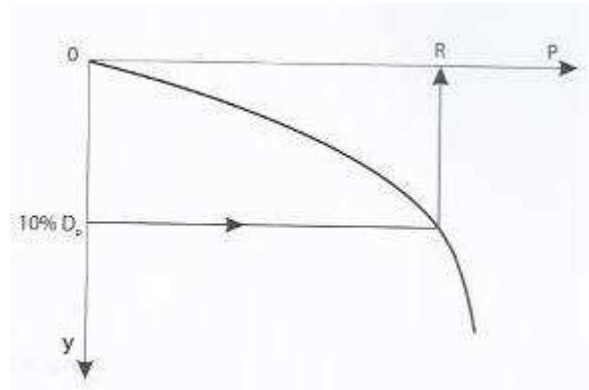
Nem todas as curvas carga-recalque do tipo aberta correspondem ao modelo de ruptura física, conforme indicado na figura 34. Segundo Cintra et al (2013), nos últimos estágios de carregamento a curva se transforma em um segmento linear não vertical. A carga aplicada poderia aumentar continuamente, com recalques crescentes, mas sem qualquer indício de ruptura (nem física nem nítida) ou de um limite para a mobilização de resistência do sistema estaca-solo (com exceção da resistência estrutural da estaca, obviamente).

Figura 34 – Prova de carga sem indício de Ruptura (Cintra et al, 2013)



Nesses casos onde há uma indefinição da carga de ruptura, convém adotar arbitrariamente um ponto da curva de carregamento para que a carga correspondente seja convencionado como a carga de ruptura ou a capacidade de carga. Daí a denominação de *ruptura convencional*. Segundo Décourt (2008) a *ruptura convencional* é definida como sendo a carga para uma deformação da ponta da estaca de 10% de seu diâmetro (figura 35).

Figura 35 – Conceito de ruptura convencional de Terzaghi (Cintra et al, 2013)



Aoki (1989) apresentou um novo conceito de ensaio de carregamento dinâmico. Aoki (1997) mostra que a curva resistência estática – deslocamento dinâmico até a ruptura, apresenta duas formas básicas, similares às curvas carga-recalque da prova de carga estática. Essas curvas são:

- 1) Trecho inicial linear seguido de trecho onde a curvatura muda e de um segmento final em que a curva tende para uma assíntota vertical bem definida (figura 36).
- 2) Trecho inicial linear seguido de trecho onde a curvatura pouco muda e atinge um pico de carga máxima onde a curva apresenta uma inflexão; segue-se um trecho de descarregamento onde a resistência cai até um determinado valor; no final a curva tende para uma assíntota vertical bem definida (figura 37).

Figura 36 – Curva RMX-DMX

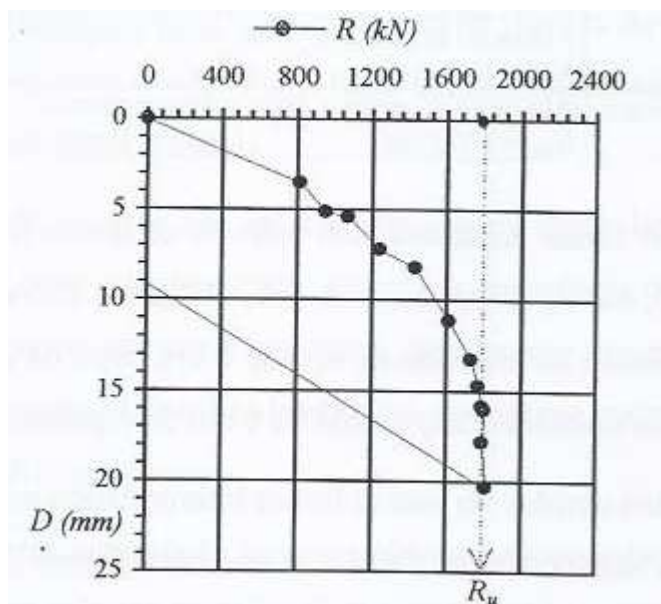
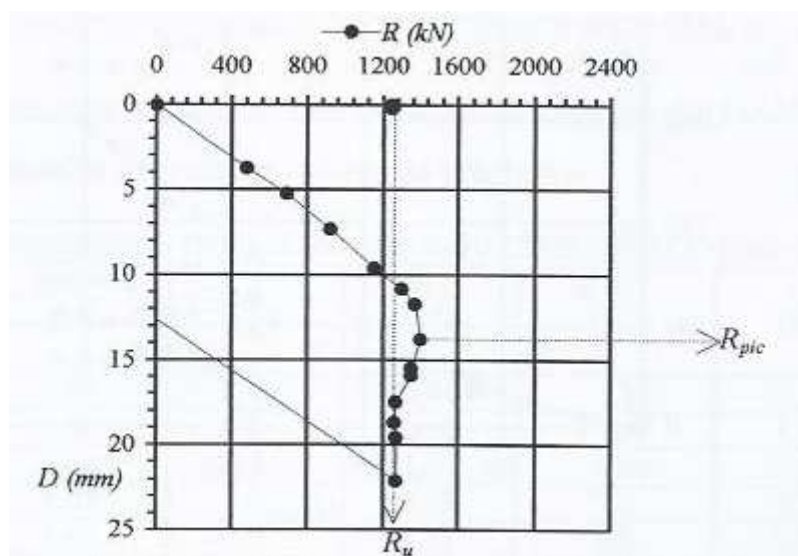
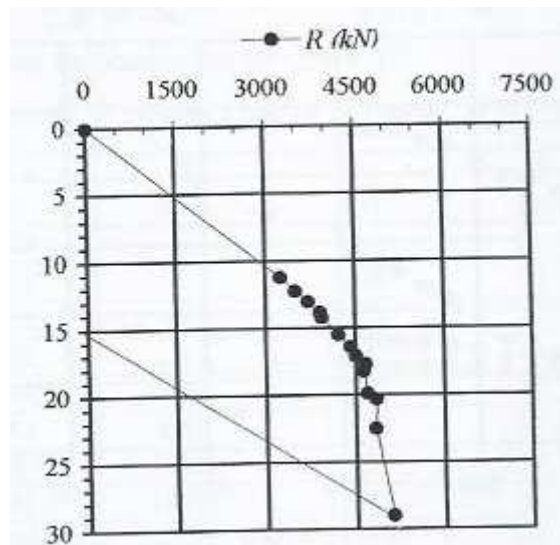


Figura 37 – Curva RMX-DMX



Aoki (1997) cita também um caso onde a curva RMX-DMX não há indício de ruptura (figura 38). Neste caso a estaca continua mobilizando carga mesmo com negas muito abertas (negas maiores que 10mm).

Figura 38 – Curva RMX-DMX



Fellenius (1975, 1980) apresentou nove diferentes formas de determinar a capacidade de carga de estacas avaliadas segundo os dados da curva carga-recalque de provas de carga estáticas. Cinco dessas formas são de interesse maior, a saber: Método de Davisson (ou Davisson Offset), Método de Hansen, Método de Chin-Kondner, Método de Décourt e Método de DeBeer. O sexto método é o ponto de máxima curvatura.

Serão apresentados os métodos: Davisson, Van der Veen, Chin-Kondner, Décourt, NBR 6122/2010.

2.11.2 – Critério do Limite (“Offset”) de Davisson para definição de ruptura

O Método de Davisson (1972) estabelece um limite de capacidade de carga definido como a carga associada ao recalque correspondente à compressão elástica da estaca como se fosse um pilar, somado ao valor de 4mm (0,15 polegadas) e o diâmetro da estaca (em mm) dividido por 120, conforme indicado na equação (33):

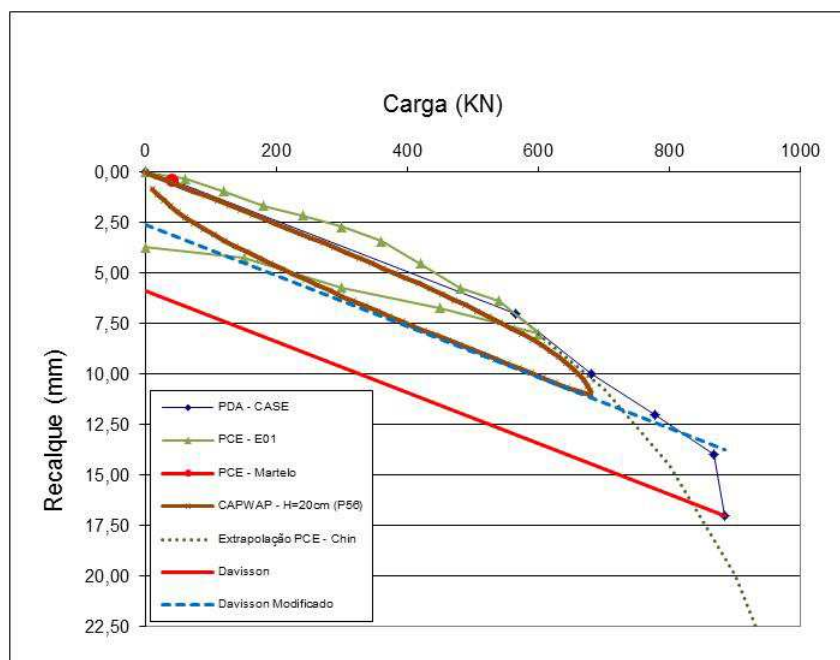
$$R = \frac{P \times L}{E \times A} + \frac{D}{120} + 4 \quad (33)$$

Fellenius (2009) salienta que o Método de Davisson não leva necessariamente a uma estimativa da carga de ruptura. O método é baseado na

premissa de que a capacidade de carga é atingida para um pequeno deslocamento da ponta da estaca e tenta estimar esse deslocamento pela compensação da rigidez da estaca (comprimento e diâmetro).

Fellenius (2009) cita ainda que inicialmente o método foi desenvolvido para estacas cravadas quando submetidas a provas de carga (ensaio rápido) e ganhou popularidade devido à popularidade da análise da equação da onda de estacas cravadas e ensaios dinâmicos.

Figura 39 – Método de Davisson e Davisson Modificado (Fonte: própria do autor, Obra de Jacarei).



Nesta dissertação será utilizado o Método de Davisson Modificado nos casos em que a curva carga-recalque não atingiu o limite segundo o método original. O Método de Davisson modificado consiste em traçar uma reta paralela à reta do Método original, passando pelo recalque máximo da curva carga-recalque. Quando se dispõe de curvas de diferentes tipos de ensaios, deve-se tomar o menor valor dos recalques máximos.

2.11.3 – Método NBR 6122/2010 para definição de ruptura

O método da norma brasileira NBR 6122:2010 é semelhante ao Método de Davisson. Cintra et al (2013) cita que a NBR 6122:2010 não contempla o modo de ruptura física, passando diretamente da nítida para a convencional.

A carga de ruptura está associada à um recalque correspondente ao valor de:

$$y = \frac{NL}{EA} + \frac{D}{30} \quad (34)$$

Onde:

N: Carga aplicada

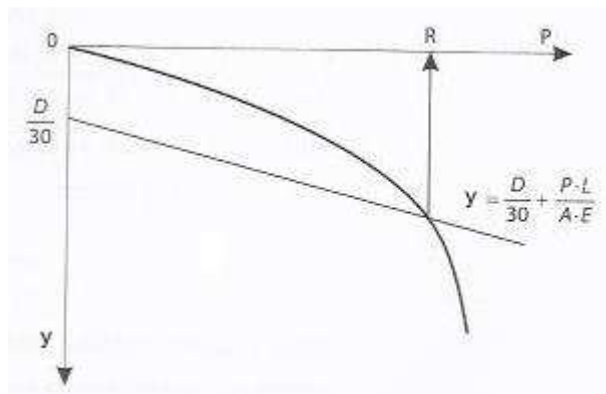
L: Comprimento da estaca

E: módulo de elasticidade do material da estaca

A: área da seção transversal da estaca

D: diâmetro da estaca

Figura 40 – Método NBR 6122:2010



2.11.4 – Métodos para extrapolação da capacidade de carga

2.11.4.1 – Método de Van der Veen

Van der Veen (1953) associa à curva carga-recalque a seguinte função exponencial:

$$P = R (1 - e^{-a y}) \quad (35)$$

Onde:

a = coeficiente que define a forma da curva (em unidades de mm^{-1} quando y está em mm)

e = base dos logarítimos naturais

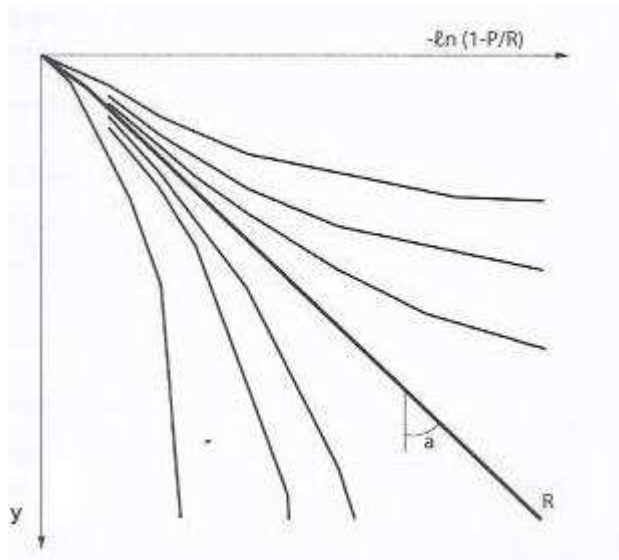
R = interseção da assíntota vertical com o eixo das cargas (carga de ruptura).

Reescrevendo essa equação, é possível obter a equação de uma reta:

$$a y + \ln(1 - P/R) = 0 \quad (36)$$

em que a e R são duas constantes determinadas em um processo por tentativas, adotando-se valores para R e desenhando-se os respectivos gráficos de $-\ln(1 - P/R)$ contra y . O gráfico que mais se aproximar de uma reta indicará o valor procurado de R , bem como o valor de a , dado pelo coeficiente angular da reta, conforme indicado na figura 41.

Figura 41 – Solução gráfica de Van der Veen (Cintra et al, 2013)



Aoki (1976) propõe uma alteração interessante no método de Van der Veen, deixando de impor que a curva ajustada passe pela origem do sistema de coordenadas. A equação é modificada para:

$$P = R (1 - e^{-a y + b}) \quad (37)$$

Onde:

b = intercepto da reta obtida na escala semilogarítima no eixo dos recalques.

A utilização deste artifício é possível obter um valor de r^2 mais próximo de 1, proporcionando um melhor ajuste da curva carga-recalque com os pontos intermediários e finais do carregamento, o que é mais relevante na análise da capacidade de carga, apesar de não haver significado físico no fato de a curva carga-recalque não se iniciar na origem do sistema de coordenadas.

2.11.4.2 – Método de Chin-Kondner (1970)

O método admite uma curva carga-recalque hiperbólica quando a curva se aproxima da ruptura, cuja equação é:

$$P = \frac{y}{C + m y} \quad (38)$$

Onde:

m = constante cuja unidade é kN^{-1}

C = constante cuja unidade é mm/kN

Reescrevendo a equação da hipérbole, obtemos:

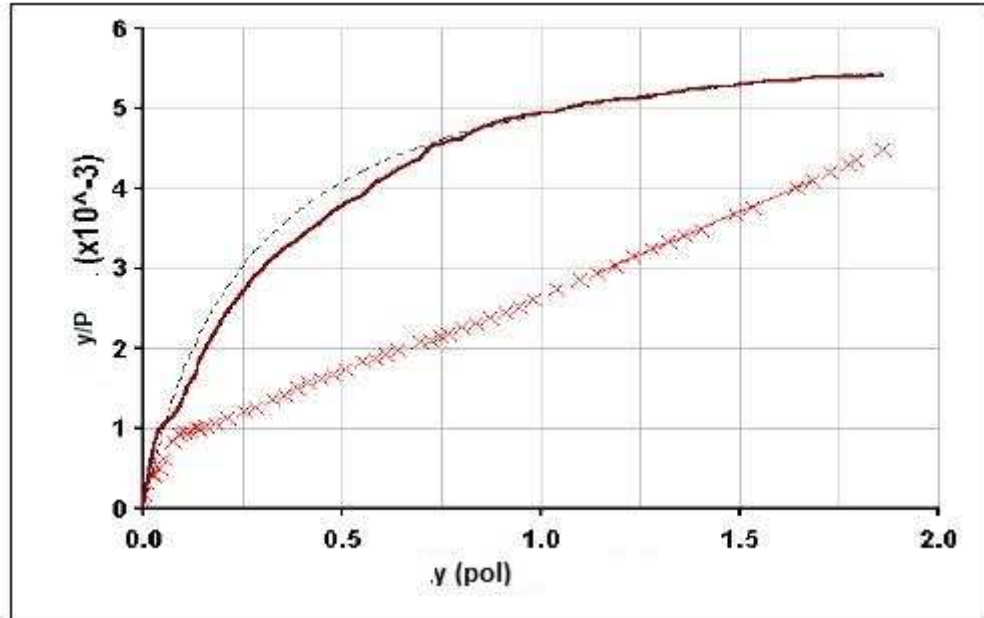
$$y / P = m y + C \quad (39)$$

Essa equação pode ser apresentada em um gráfico do tipo y/P x y . Excluindo-se os primeiros pontos, forma uma reta de coeficiente angular m . O valor da capacidade de carga é dado por:

$$R = 1 / m$$

(40)

Figura 42 – Método Chin-Kondner (Fellenius, 2009)



Com base nas equações (38), (39) e (40) é possível obter a equação da curva extrapolada, conforme a equação (41):

$$y_i = \frac{Y_{max} \times (R \div P_{max} - 1)}{(R \div P_i - 1)} \quad (41)$$

Onde:

y_i : recalque do ponto extrapolado

Y_{max} : recalque máximo obtido na prova de carga

P_{max} : carga máxima obtida na prova de carga

P_i : carga correspondente ao recalque y_i

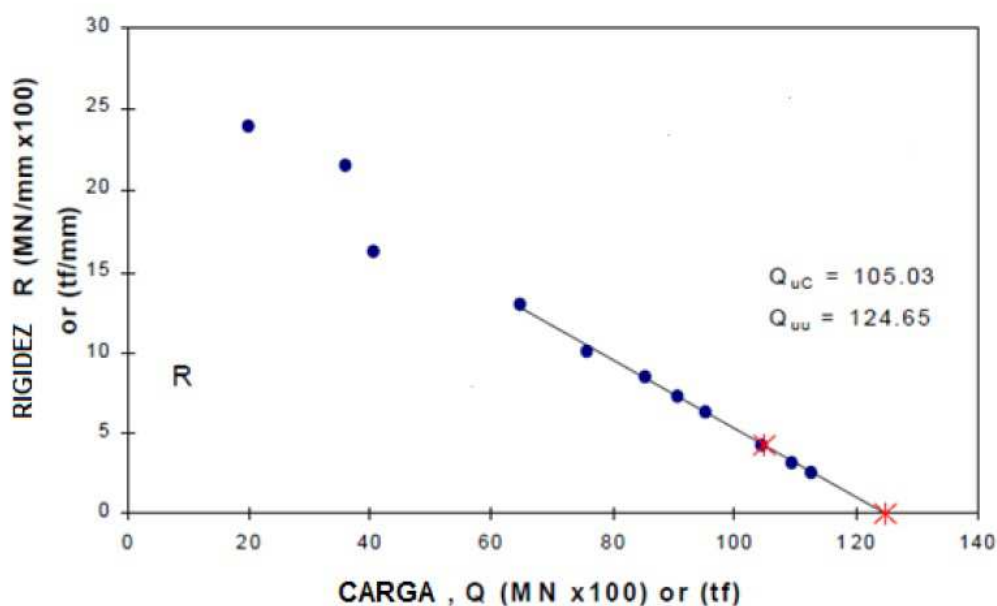
2.11.4.3 – Método da Rigidez de Décourt

Invertendo-se a relação y/P do Método de Chin, Décourt (1996) apresenta o conceito de rigidez P/y , que diminui com a evolução dos recalques, e propõe a

utilização do gráfico $P/y \times P$, o qual retrata uma função decrescente.

No modelo de ruptura física, esse gráfico torna-se linear e sua extrapolação determina o valor da carga de ruptura ao interceptar o eixo das cargas, ou seja, quando o valor da rigidez é nulo ($P/y = 0$).

Figura 43 – Método de Décourt (Décourt, 1996)



2.11.5 – Correlação entre prova de carga estática e ensaio de carregamento dinâmico

Diversos autores compararam os resultados de provas de carga estática com ensaios de carregamento dinâmico, podendo ser citados Rausche et al (1972), Likins e Makredes (1982), da Silva et al. (1986), Fellenius et al.(1989), Niyama e Aoki (1991), Likins et al. (1996), entre outros.

Convém destacar o trabalho de Likins et al (1996) onde os autores apresentaram considerações a serem feitas para uma boa correlação entre provas de carga estática e o ensaio de carregamento dinâmico, assim como procedimentos utilizados durante a análise CAPWAP (análise CAPWAP realizada através do procedimento “automático” (AT), “best match quality”(BM) e utilização do modelo “Radiation Damping” (RD)). Por serem os idealizadores do Método CAPWAP acredita-se que as correlações apresentadas devem conduzir a melhores resultados

conforme comentado por Bilfinger (2000).

Segundo Likins et al (1996), foram analisadas mais de 200 casos onde foram realizadas provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico na mesma estaca, de diversas regiões do mundo, seguindo as seguintes premissas:

- a prova de carga estática apresentou ruptura segundo o critério de Davisson. Caso não tenha atingido a ruptura segundo este critério, pode ser realizada uma extrapolação de no máximo 110% da máxima carga aplicada. Dados mínimos necessários: descrição da estaca, comprimento, data de execução, data do ensaio, curva carga-recalque;
- o ensaio dinâmico foi realizado após um intervalo de tempo significativo depois da instalação da estaca (semelhante ao intervalo da prova de carga estática). Para melhor comparação com provas de carga estática foram utilizadas análises CAPWAP em ensaios realizados na recravação;
- disponibilidade de informações sobre a descrição do solo, como por exemplo, sondagens SPT; e
- registro de cravação da estaca (ou pelo menos a nega no final da cravação e recravação), incluindo o comprimento abaixo dos sensores da estaca, as cotas da ponta na cravação e recravação, o tipo de martelo e do sistema de cravação.

Em diversos tipos de solo a capacidade de carga da estaca varia em função do tempo devido ao fenômeno de *set up* ou relaxação. A prova de carga estática e o ensaio de carregamento dinâmico geralmente são realizados em intervalos de tempo diferentes; dessa forma é de se esperar diferenças ao comparar os dois resultados. Essa diferença entre os resultados deve aumentar quando há maior diferença entre a data de execução entre os dois métodos.

As principais razões que impossibilitam concordância exata entre provas de carga estática e ensaio de carregamento dinâmico são: possíveis erros de execução nos dois tipos de testes, diferentes definições de ruptura na prova de carga estática (por esse motivo os dois tipos de testes são comparados segundo o critério de Davisson) e diferenças nas datas de execução dos dois tipos de testes.

Fellenius (1984) relatou erros na execução de provas de carga estática. No teste inicial de uma prova de carga foi verificada que a célula de carga estava

indicando uma carga muito superior à pressão da bomba hidráulica do macaco. A célula de carga estava descalibrada, dessa forma o teste foi refeito com uma nova célula de carga devidamente calibrada. Fellenius (1984) verificou uma diferença entre 10 e 20% na força aplicada pela leitura da pressão da bomba hidráulica e a célula de carga devidamente calibrada. O autor concluiu que a força medida pela leitura da pressão do macaco é menor que o valor da célula de carga devido ao atrito no macaco hidráulico em função de inevitáveis aplicações de cargas com excentricidades e inclinação.

Gonçalves et al (2008) relataram erros na realização de ensaios de carregamento dinâmico. Inicialmente foi realizado o ensaio dinâmico por uma Empresa A, após quatro dias do final da cravação, indicando um resultado não coerente com a coleta de nega e repique no final da cravação e na recravação. Os sinais coletados indicavam pelo Método Case que a estaca estava quebrada ($\beta \leq 60$). Esse resultado condenou a estaca e seria realizada uma estaca de reforço, porém por questões éticas e morais, o executor da fundação solicitou a realização de um novo ensaio, a ser executado por outra empresa. A Empresa B fez o ensaio apresentando um resultado satisfatório em relação à integridade e capacidade de carga. Posteriormente, o inusitado ocorreu. O executor da fundação em conjunto com o projetista acordaram em executar uma prova de carga estática nesta mesma estaca, levando a uma carga 2,3 vezes a carga de trabalho. Os resultados foram satisfatórios, confirmando o ensaio realizado pela Empresa B e descartando o diagnóstico inicial dado pela Empresa A. Gonçalves et al (2008) concluiu que inúmeras são as hipóteses que podem acarretar o insucesso de um ensaio desse tipo, que vão desde a avaria e/ou descalibragem dos sensores, algum desajuste quanto à fixação em um ou mais dos sensores, excessiva excentricidade dos golpes aplicados em relação ao topo da estaca e até mesmo a falta de capacitação do profissional que o executa.

Visando comparar o efeito da diferença de tempo de execução dos dois testes, Likins et al (1996) utilizou a razão ($T1/T2$), onde $T1$ é o número de dias entre a data de execução da estaca e a data da realização do ensaio dinâmico, $T2$ é o número de dias entre a data de execução da estaca e a data da prova de carga estática. Os autores verificaram que a comparação é melhor quando a razão ($T1/T2$) está entre 0,33 e 1,25.

Geralmente os ensaios dinâmicos são realizados dentro de dois dias após a execução da estaca principalmente para minimizar custos e prazos de execução da obra, além de agilizar a definição dos critérios de cravação das estacas. Para areias puras o efeito *set up* é mais rápido e não deverá haver ganhos de capacidade de carga significativos com o decorrer do tempo. Entretanto, como é mais usual que as estacas estejam embutidas em camadas de diferentes tipos de solos ou em solos argilosos, deverá ocorrer o efeito *set up* após a realização do ensaio dinâmico e antes da realização da prova de carga estática. Dessa forma a capacidade de carga realizada através do ensaio dinâmico é menor que o valor encontrado pela prova de carga estática. Portanto a razão entre as capacidades é menor que a unidade quando a razão ($T1/T2$) é menor que 0,33.

A correlação é melhor quando o ensaio dinâmico é realizado após a realização da prova de carga estática. Quando o ensaio dinâmico é realizado com aplicação de muitos golpes, antes da prova de carga estática, em um pequeno intervalo de tempo, a capacidade de carga em solos sensíveis é reduzida (temporariamente) ao longo da aplicação dos golpes do ensaio dinâmico. Neste caso não deverá haver tempo suficiente para a recuperação (*set up*) e a prova de carga estática deverá apresentar capacidade de carga menor que o ensaio dinâmico. Ensaio dinâmico com aplicação de muitos golpes imediatamente antes de provas de carga estática não são aconselháveis. Em alguns casos a recavação na realização do ensaio dinâmico acaba fazendo com que a estaca penetre em uma nova camada de solo, neste caso os ensaios dinâmicos não podem ser comparados diretamente com provas de carga estática. Em função de todos esses motivos Likins et al (1996) conclui que o ensaio dinâmico deve ser realizado após a realização da prova de carga estática o mais breve possível a fim de obter a melhor correlação entre os dois testes.

Likins et al (1996) cita que os valores de *damping* costumam ser maiores na recavação da estaca, enquanto que os valores de *quake* costumam ser menores na recavação da estaca. Em relação aos valores de *Radiation Damping* os autores recomendam:

$$MS = N_{fac} \times 5,0 \times C_i \quad (42)$$

$$SK = A_3 \times N_{fac} \times \Omega / Z \quad (43)$$

Onde:

MS = *Shaft support soil mass*

SK = *Shaft radiation damper*

A3 = media dos três maiores valores de atrito por unidade de comprimento

Nfac = razão entre o número de segmentos de estaca e segmentos de solo

Ω = valor entre 4 e 8

Ci = perímetro da estaca

Z = impedância da estaca

A utilização do modelo *Radiation Damping* leva a melhores correlações com provas de carga estática. Entretanto, conforme indicado por Likins et al (1996) o valor adotado para SK deve ser cuidadosamente selecionado. A utilização de valores de SK mais elevados tendem a apresentar valores mais próximos da solução “best match quality” (BM), enquanto que a utilização de valores mais baixos para SK podem superestimar a capacidade de carga. A solução encontrada deve apresentar as seguintes condições:

$$\text{Smith shaft damping factor (JS)} \leq 1,3 \text{ s/m} \quad (44)$$

$$\text{Shaft unloading quake (CS)} \geq 0,3 \text{ shaft loading quake (QS)} \quad (45)$$

Além disso, os autores não recomendam a utilização de *Radiation Damping* para valores de negas muito abertas (resistência à cravação menor que 80 golpes/m ou nega maior que 12,5cm /10 golpes), apresentando um acréscimo da capacidade de carga que não se justifica, uma vez que elevadas velocidades e elevados valores de nega causam elevados valores de viscosidade e damping.

A tabela 7 indica os valores médios da relação entre as cargas calculadas pelo Método CAPWAP e as fornecidas pela PCE assim como o coeficiente de variação. Percebe-se que o coeficiente de variação é menor com o modelo *Radiation Damping*, maior para o *procedimento automático*, enquanto que o “best macth quality” está entre os dois anteriores.

Tabela 7 -- Relação entre CAPWAP e provas de carga estática

RESUMO DOS RESULTADOS DO CAPWAP COM DIFERENTES INTERVALOS DE TEMPO							
Intervalo de Tempo	No. de estacas	Média ((CW/PCE)			Coeficiente de variação		
		Automático	Best Match	Radiation Damping	Automático	Best Match	Radiation Damping
menor que 0.33	30	0.94	0.89	1.00	0.29	0.17	0.21
0.33 - 1.25	41	0.98	0.95	1.03	0.18	0.15	0.09
maior que 1.25	11	0.97	0.96	1.04	0.20	0.16	0.13

As figuras 44 a 46 ilustram a comparação do CAPWAP com provas de carga estáticas. Percebe-se que com a utilização de *Radiation Damping* os pontos estão mais próximos da reta a 45°, apresentando menor coeficiente de variação.

Figura 44 – Comparação CAPWAP (procedimento automático) x prova de carga estática

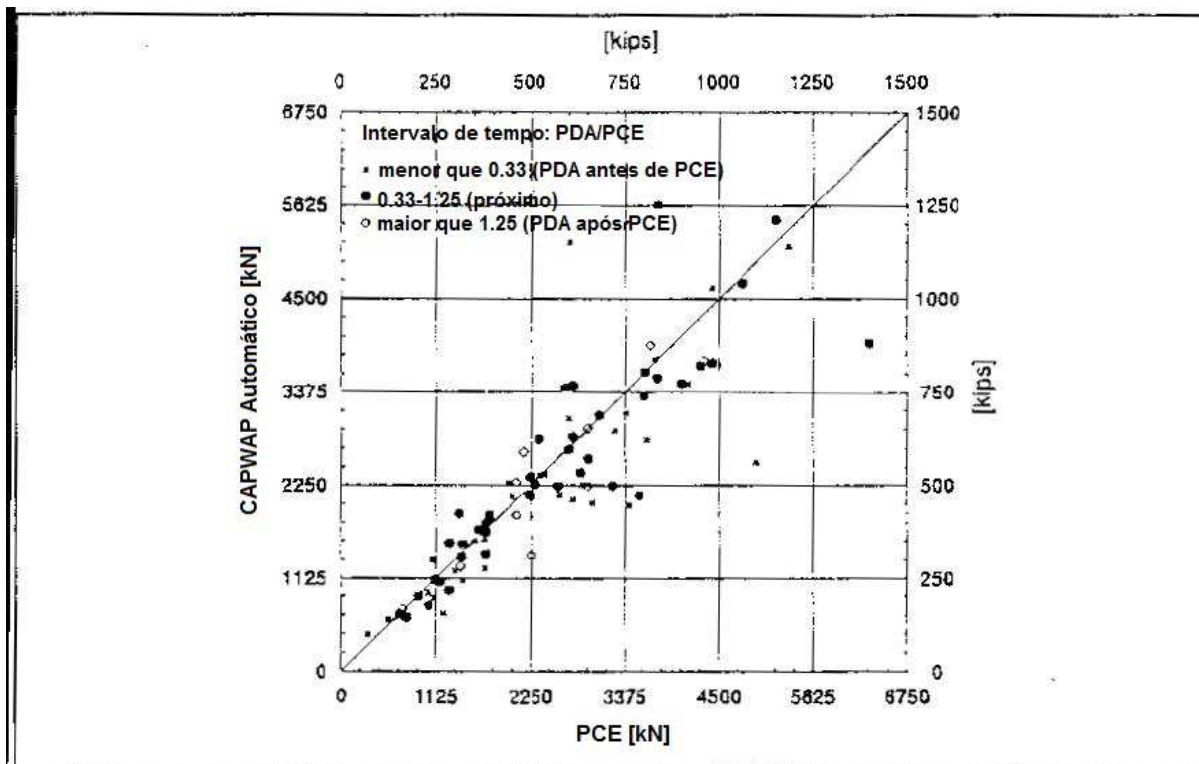


Figura 45 – Comparação CAPWAP (“best match quality”) x prova de carga estática

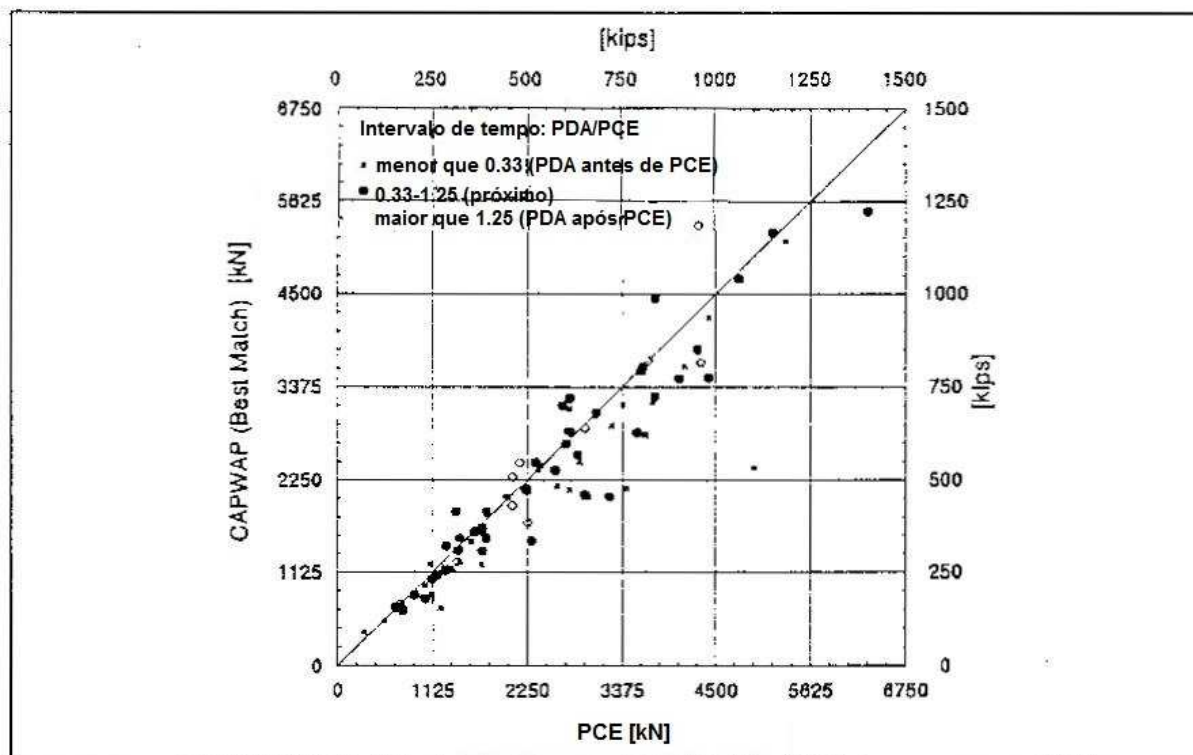
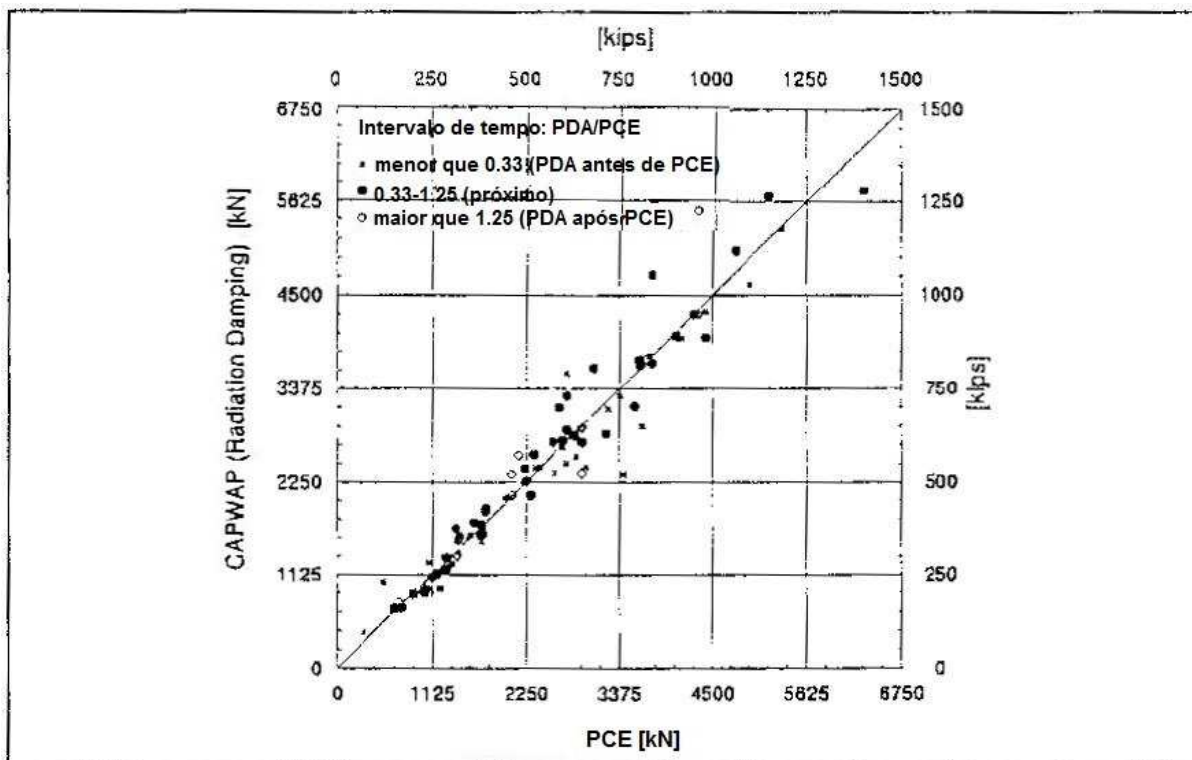


Figura 46 – Comparação CAPWAP (modelo Radiation Damping) x prova de carga estática



CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTO PROPOSTO

Conforme apresentado anteriormente no item 2.3 a análise CAPWAP envolve diversas variáveis ($N_s + 18$). Quando a estaca apresenta algum dano, o manual do CAPWAP ainda cita a possibilidade de modelar a estaca utilizando redução de impedância, *slack* de compressão e *slack* de tração. Essas variáveis podem mudar em magnitude e em profundidade, portanto o número de variáveis apresentado por Rausche (1994) $N_s + 18$, pode ser superior, dificultando ainda mais a análise.

A solução é obtida através de diversas tentativas procurando obter a melhor aproximação da curva de força calculada em relação à curva de força medida pelos sensores (*signal matching*). Matematicamente é fácil demonstrar que o mesmo resultado pode ser obtido através de dados de entrada diferentes (distribuição do atrito lateral, carga de ponta, valores de quake e damping), conforme apresentado por Fellenius (1988) e Edde (1991), em alguns casos os resultados podem apresentar divergências nos parâmetros adotados na análise CAPWAP em relação à provas de carga estáticas, conforme apresentado por Teixeira (2000) Apud Gonçalves et al (2008).

Além da dificuldade mencionada acima no estabelecimento dos dados de entrada na análise CAPWAP, na revisão bibliográfica foram indicados fatores que influenciam a interpretação de provas de carga estáticas e ensaios de carregamento dinâmico. Com certeza esses fatores devem ser levados em consideração no momento da realização da análise CAPWAP: efeito *set up* ou relaxação, drapejamento, atrito negativo, tensões residuais, variação nos valores de quake e damping com o tempo.

Inicialmente a análise CAPWAP é realizada buscando o “best match quality”, determinando a carga total mobilizada. Concluída a análise o trecho inicial da curva simulada é ajustado através da correção do quake do fuste (q_s) da estaca de forma que a curva simulada apresente melhor aproximação com a PCE ou CEP (melhor relação carga-recalque). Este procedimento permite a determinação do valor de q_s , (Murakami e Massad, 2014) eliminando uma das variáveis envolvidas na análise CAPWAP. As demais variáveis envolvidas na análise são ajustadas de forma a obter um novo “best match quality”. Nota-se que a solução obtida através da determinação do valor de q_s apresenta “match quality” (MQ_{WU}) melhor do que os procedimentos

tradicionais.

O aumento do valor do quake do fuste causa um aumento nos recalques no trecho inicial, conforme previsto pelo modelo proposto por Smith (1960) que é utilizado pelo CAPWAP, assim como previsto por modelos matemáticos utilizados na interpretação de provas de carga estática (Massad, 1995).

A tabela 8 indica para cada trecho da curva “Wave Up” quais variáveis de forma isolada devem ser alteradas para se obter o “best match quality”, quando há um aumento ou redução nos valores do quake do fuste (q_s) para que a simulação de prova de carga estática do CAPWAP se aproxime do ponto obtido com o peso próprio do bate-estaca.

Tabela 8 - Influência do valor de q na curva Wave Up

Trecho	q_s	Aumenta	Diminui
1	aumenta	RS, JS	-
1	diminui	-	RS, JS
2	aumenta	JS, JT, UN	CS, QT, CT
2	diminui	CS, QT, CT	JS, JT, UN

Nota: Ver a lista dos símbolos

Os trechos 1 e 2 indicados na tabela 8 estão nas figuras 13 e 14. O trecho 1 corresponde ao início do impacto até $2L/c$. O trecho 2 compreende o período após $2L/c$.

O quake do fuste também apresenta forte influência na distribuição do atrito lateral. Quanto maior for o quake do fuste maior será o tempo necessário para mobilização do atrito lateral, de forma que na curva “Wave Up” o atrito lateral de cada elemento de solo vai ficando cada vez mais defasado quanto maior for o quake do fuste adotado na análise.

De fato, na análise CAPWAP a estaca é dividida em i elementos. Seja V_i a velocidade da estaca em cada elemento. Isto é, $V_i = \Delta s / \Delta t$, onde Δs é o deslocamento necessário para o elemento de estaca i percorrer o intervalo de tempo Δt . Para cada elemento de solo o deslocamento necessário para mobilização total do atrito lateral é q_s . Então tem-se que $V_i = q_s / \Delta t$. Isolando a variável Δt tem-se que $\Delta t = q_s / V_i$, comprovando que quanto maior for o valor de q_s maior será o tempo necessário para cada elemento de solo mobilizar o atrito lateral. Dependendo do

valor de q_s adotado na análise o tempo necessário para mobilizar todo o atrito lateral poderá ser superior ou inferior a $2L/c$.

As figuras 47 ($q_s=0,868\text{mm}$) e 48 ($q_s=3,5\text{mm}$) ilustram a influência de q_s na curva “Wave Up” calculada para a estaca estudada de Osasco. Nota-se que para o último elemento de solo a utilização de $q_s=3,5\text{mm}$ fez com que o atrito lateral ficasse defasado $1L/c$ em relação ao $q_s=0,868\text{mm}$, indicando uma distribuição do atrito lateral diferente.

Figura 477 – Curva ‘Wave Up’ com $q_s=0,868\text{mm}$ (Fonte: própria do autor, Obra de Osasco)

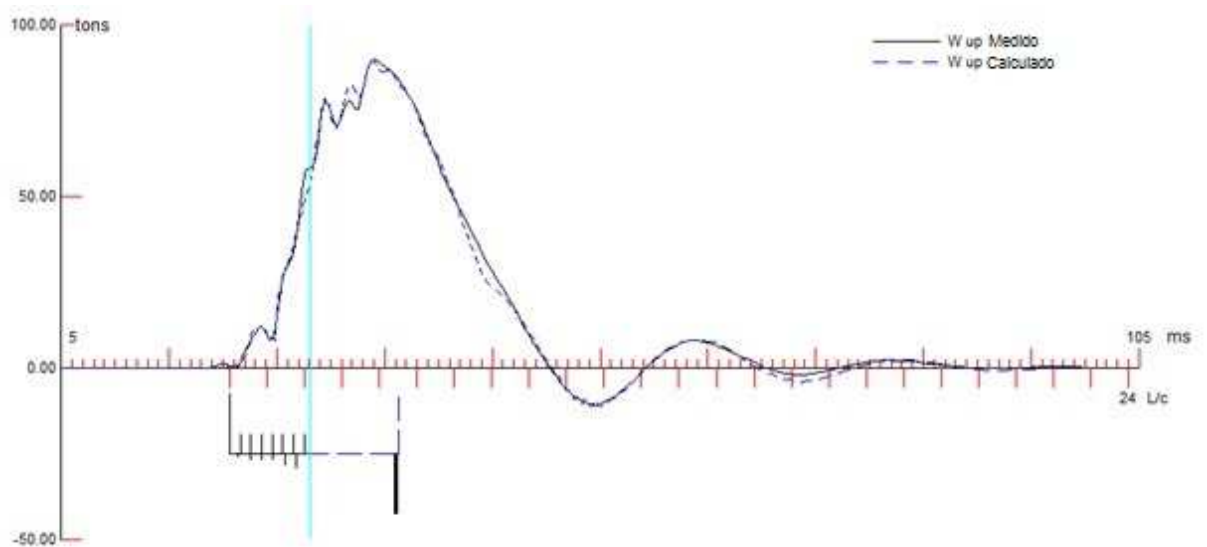
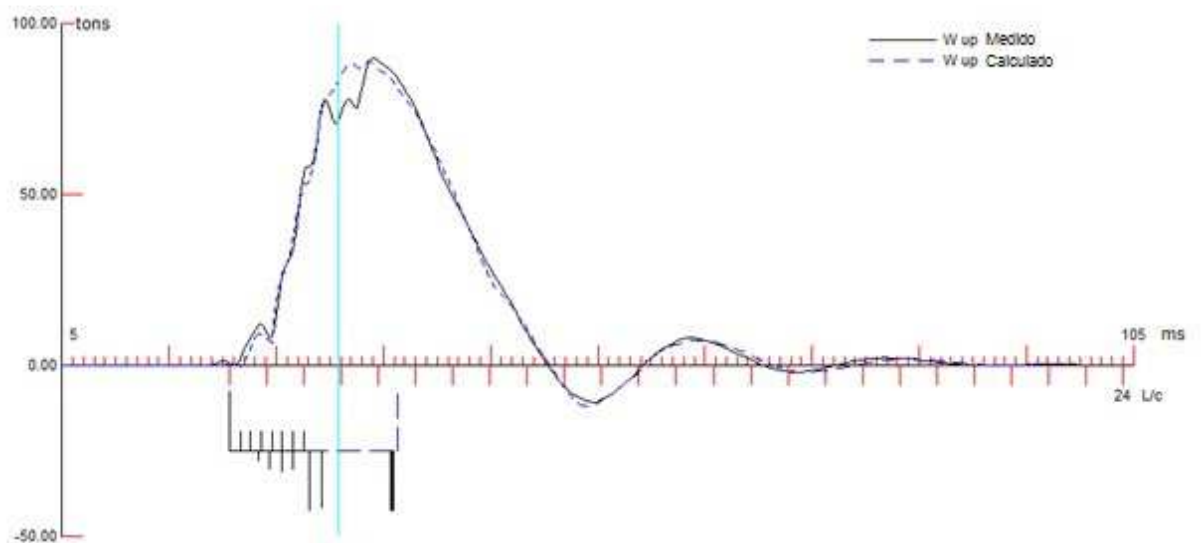


Figura 488 – Curva “Wave Up” com $q_s=3,5\text{mm}$ (Fonte: própria do autor, Obra de Osasco)



Nota-se que a nova solução obtida corrigindo o valor do quake do fuste da estaca deve apresentar capacidade de carga próxima da primeira solução obtida (procedimento tradicional), além de apresentar praticamente o mesmo trecho inicial de uma prova de carga estática. O “match quality” (MQ_{WU}) também deverá melhorar, assim como o “match quality de recalques” (MQ_R).

O “match quality de recalques” pode ser definido através da equação (46) e deve ser calculado no mesmo domínio das funções P x Y da prova de carga estática e simulação de prova de carga do CAPWAP:

$$MQ_R = \sum_0^n (|Y_{ci} - Y_{cwi}| + |Y_{ci+1} - Y_{cwi+1}|) \times (P_{i+1} - P_i) / (2 \times Y_{cmax}) \quad (46)$$

Onde:

Y_{ci} = recalque da prova de carga estática

Y_{cwi} = recalque do CAPWAP

P_i = carga associada ao recalque Y

n = número de pontos da prova de carga

Y_{cmax} = recalque máximo da prova de carga estática

MQ_R = “match quality de recalques”

A medida do recalque provocado pelo peso do martelo do bate-estaca foi feita com relógio comparador, conforme indicados nas figuras 49 e 50.

Quando o ensaio de carregamento dinâmico é realizado com energia crescente há a possibilidade de correção dos valores de damping e quake da ponta da estaca impondo duas condições de contorno:

- 1) Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total (atrito lateral médio e ponta) e a velocidade máxima do topo da estaca, para cada golpe aplicado com energia crescente;
- 2) Relação elasto-plástica aproximada entre a resistência e o quake da ponta da estaca, para cada golpe aplicado (manter o parâmetro R da Segunda Relação de Cambefort).

Dessa forma, no ECD com energia crescente há a possibilidade de verificar a evolução do atrito lateral e resistência de ponta em função da energia aplicada, identificando os pontos notáveis das Relações de Cambefort.

A utilização dessas duas condições de contorno em conjunto com o valor do quake do fuste, determinado conforme citado anteriormente, deve apresentar melhores resultados, diminuindo os valores de “match quality” da curva “Wave Up” (MQ_{WU}) e “match quality de recalques” (MQ_R).

Figura 49 – Procedimento para realização da PCE



Figura 50 – Procedimento para realização da PCE



O procedimento proposto com o uso do peso próprio do martelo (CEPM) apresenta uma série de vantagens como:

- 1) Não há necessidade de execução de um sistema de reação para realização da prova de carga estática, reduzindo custo e tempo de execução;
- 2) Apesar de possibilitar apenas obter um ponto Po-yo do peso próprio do martelo do bate-estaca, o mesmo representa o comportamento da estaca quando submetido a um carregamento estático;
- 3) O ponto obtido Po-yo pode ser utilizado como condição de contorno na modelagem CAPWAP; dessa forma o trecho inicial da simulação da prova de carga estática do modelo CAPWAP se *correlaciona* com uma prova de carga estática (CEPM);
- 4) Caso o ponto Po-Yo esteja fora da curva da simulação de prova de carga estática do CAPWAP basta ajustar a distribuição do atrito lateral e o valor do quake do fuste da estaca para que o ponto Po-Yo fique o mais próximo possível da simulação de prova de carga estática;
- 5) A idade do carregamento estático realizado com o peso próprio do martelo

(CEPM) e do ensaio dinâmico pode ser considerada a mesma, não sendo influenciado pelo fator *set up* ou pela influência de outros fenômenos, como por exemplo o atrito negativo. Neste caso, a relação (T1/T2) apresentada por Likins (1996) pode ser considerada igual a 1 (um);

- 6) Quando o ensaio dinâmico é realizado com energia crescente há a possibilidade de correção dos valores de damping e quake da ponta, para cada golpe aplicado através das duas condições de contorno.

Este procedimento proposto pode ser aplicado caso se disponha de uma PCE.

CAPÍTULO 4 – CASOS DE OBRA ANALISADOS

Serão analisadas duas obras em locais diferentes onde foram executadas fundações profundas através de estacas pré-moldadas de concreto. Foram realizadas provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico.

4.1 – Primeiro Caso: Obra em Jacareí

A obra está localizada em Jacareí, no interior de São Paulo. Antes da execução das fundações foi executado um aterro de cerca de 1,5m de espessura sobre o terreno natural (argila orgânica preta de cerca de 6m de espessura). Em função do adensamento da camada de solo mole o aterro sofreu um recalque de cerca de 40cm até o final da execução das fundações.

Foram executadas estacas pré-moldadas de concreto de seções quadradas maciças de 20x20cm, 23x23cm, 26x26cm, e seção circular vazada de $\phi 33_{17,8}$. As características das estacas cravadas estão na tabela 9.

Tabela 9 – Características das estacas cravadas

Seção	Área Cheia (cm ²)	Área de Concreto (cm ²)	Perímetro (cm)	Furo Central (cm)	Parede (cm)	Carga Admissível (tf)		E (GPa)
						Compressão (Nk)	Tração (Tk)	
20x20	400	400	80	X	X	50	7,9	32
23x23	529	529	92	X	X	69	7,9	32
26x26	676	676	104	X	X	90	10,4	32
$\phi 33$	855	607	104	17,8	7,6	83	10,9	32

Os comprimentos cravados variaram entre 13,80m e 19,60m. Os valores de nega variaram entre zero e 10mm, os valores de repique elástico entre 8mm e 18mm.

As estacas foram cravadas com bate-estacas com martelo de queda livre com massas de 2800kg, 4000kg e 4200kg. Foram realizadas quatro provas de carga estática (PCE) e mais de 70 ensaios de carregamento dinâmicos (ECD), dentre os quais foram selecionadas 2 PCE e 3 ECD para a análise. Os ECD foram realizados

1 ou 3 dias após a instalação da estaca na grande maioria dos casos, enquanto que as PCE foram realizadas após aproximadamente 6 meses da cravação das estacas. Espera-se maior influência do fenômeno de atrito negativo nas estacas onde foram realizadas PCE em função do adensamento da camada de solo mole.

4.1.1 – Características do subsolo e seus reflexos na cravação das estacas

O subsolo apresenta basicamente uma camada de aterro de cerca de 1,5m de espessura, seguida de uma camada aluvionar de argila muito mole, preta, de espessura da ordem de 6,0m, e de uma camada de areia siltosa, fofa a compacta até cerca de 17,5m. Subjacente a esta camada as sondagens detectaram a presença de sedimentos de argila siltosa dura. O nível d'água foi detectado a 2,0m de profundidade. A sondagem típica da região está no Anexo A.

Foi observado que o efeito “set up” se manifesta de forma rápida neste subsolo. Estacas com nega de aproximadamente 5mm no final da cravação, praticamente “zeravam” na recravação após 12h.

O início da cravação das estacas foi imediatamente após o término da execução do aterro. Durante a vida útil as estacas deverão estar submetidas ao efeito do atrito negativo, em função do adensamento da camada de solo mole.

Durante a cravação das estacas foi verificado o fenômeno de drapejamento, instabilidade dinâmica durante a cravação, apresentando um pequeno descolamento ao redor do fuste da estaca. Visando minimizar essa instabilidade dinâmica foi utilizada areia para justapor o fuste das estacas. Esse fenômeno já foi observado por outros autores como Paschoalim Filho, J. A (2008). No caso de solos não saturados, esses autores chegaram à conclusão de que ocorreu a perda de atrito lateral nos metros iniciais devido ao fenômeno de drapejamento.

O ensaio de carregamento dinâmico e a prova de carga estática foram influenciadas pelo fenômeno de atrito negativo em função do intervalo de tempo da realização dos mesmos em relação à data de término da cravação das estacas. Pode ser prevista uma menor influência da atuação do atrito negativo no ensaio de carregamento dinâmico em função dos mesmos serem realizados geralmente após 3

dias do término da cravação (em alguns casos os ensaios foram realizados após 2 semanas do término da cravação), enquanto que a prova de carga estática foi realizada após cerca de 180 dias do término da cravação.

Após meses da execução do aterro e da cravação das estacas, ainda era possível ver aflorar água ao redor do fuste de algumas estacas, indicando elevada poro-pressão.

4.1.2 – Provas de carga estática (PCE)

As provas de carga foram realizadas nas estacas de seções 20x20cm, 23x23cm, 26x26cm e $\phi 33_{17,8}$.cm, conforme a NBR 12131, com carregamento do tipo lento, mantendo a carga aplicada até a estabilização e por 30 minutos no mínimo. As provas de carga foram carregadas até o dobro da carga admissível das estacas, apresentando 10 estágios de carregamento e 4 estágios de descarregamento.

Não foram realizadas provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico na mesma estaca, porém para comparação entre esses dois métodos, nas proximidades das estacas que foram realizadas provas de carga estáticas foram realizados ensaios de carregamento dinâmico. A tabela 10 indicam os dados da cravação das estacas submetidas à PCE:

Tabela 10 – Dados das estacas submetidas à PCE (Jacareí)

Estaca	Data de Cravação (DD/MM/AA)	Seção (cm)	Martelo (kg)	Comprimento Cravado (m)	Nega (mm)	Repique (mm)	Altura de Queda (cm)
P49	16/08/12	20X20	2800	15,10	1	9	40
E01	31/10/12	$\phi 33_{17,8}$	4000	16,20	3	12	60

A tabela 11 indica as datas de execução, as cargas admissíveis e as cargas atingidas nas provas de carga estática:

Tabela 11 – Dados das PCE (Jacareí)

Estaca	Data de Cravação (DD/MM/AA)	Prova de Carga (DD/MM/AA)	Set Up (dias)	Carga admissível (tf)	Carga máxima (tf)	Recalque máximo (mm)
P49	16/08/12	21/02/13	189	30	60	8,00
E01	31/10/12	19/02/13	111	60	120	7,14

As provas de carga executadas não apresentaram ruptura nítida, muito menos ruptura convencional segundo o Método de Davisson ou a NBR 6122. Dessa forma as provas de carga foram extrapoladas para melhor correlacionar com os valores obtidos pelo ensaio de carregamento dinâmico. No Anexo B estão as curvas carga-recalque das estacas ensaiadas.

4.1.3. – Ensaio de carregamento dinâmico (ECD)

Os ensaios de carregamento dinâmico foram realizados nas estacas de seções 20x20cm, 23x23cm, 26x26cm e $\phi 33_{17,8}$.cm, conforme a NBR 13208, com energia crescente, até a mobilização de no mínimo duas vezes a carga admissível das estacas. A tabela 12 indica os resultados obtidos das 3 estacas analisadas.

Tabela 12 – ECD realizados (Jacareí)

Estaca	Seção (cm)	Martelo (kg)	Comprimento cravado (m)	H queda (cm)	Dx (mm)	Ruptura Davisson	Jc	MQ	Set Up (dias)	Pmob Fuste (tf)	Pmob Ponta (tf)	Pmob Total (tf)	FS
P56	20x20	4000	15,35	40	16,600	NÃO	0,63	2,07	43	60,6	25,5	86,1	$\geq 2,87$
E53	$\phi 33_{17,8}$	4000	16,1	60	17,1	NÃO	0,80	1,99	6	72,8	74,2	147	$\geq 2,45$
E41	$\phi 33_{17,8}$	4000	17,4	70	20	NÃO	0,88	2,81	7	73,6	80,9	154,5	$\geq 2,58$

H queda: altura de queda do martelo; Dx: recalque da simulação de prova de carga estática do CAPWAP; Jc: Damping (Case); MQ: Match Quality; Set Up: tempo decorrido entre data do ensaio e data de cravação da estaca; Pmob fuste: carga mobilizada de atrito lateral; Pmob ponta: carga de ponta mobilizada; Pmob Efetivamente: carga total mobilizada (atrito e ponta); FS: fator de segurança.

Com base nos resultados apresentados na tabela 12 percebe-se que o fator de segurança mínimo variou entre 2,45 e 2,87, apresentando média de 2,63. Dos mais de 60 ensaios realizados, apenas 12 ensaios atingiram ruptura segundo o critério de Davisson. Os ensaios foram realizados visando mobilizar o máximo de

carga desde que não comprometesse a integridade da estaca. Durante a realização dos mesmos a grande maioria das negas permaneceram “zeradas”. Segundo Fellenius (1992), os ensaios realizados não foram levados à ruptura, uma vez que é necessário que durante o ensaio a nega abra pelo menos 2mm.

Para possibilitar a comparação dos resultados, a prova de carga estática foi extrapolada através do Método de Chin e a carga de ruptura foi determinada através do Método de Davisson. Nos casos onde o ensaio dinâmico não atingiu a carga segundo o Método de Davisson, os resultados foram comparados através do Método de “Davisson Modificado”, traçando uma reta paralela ao Método considerado.

4.2 – Segundo Caso: Obra em Osasco

A obra está localizada em Osasco, São Paulo. Foram executadas estacas pré-moldadas de concreto de seção $\phi 38\text{cm}$. A tabela 13 indica as características das estacas cravadas. Nesta obra não foi executado aterro recente, não apresentando influência do fenômeno de atrito negativo nas estacas.

Tabela 13 – Características das estacas cravadas

Seção	Área Cheia (cm ²)	Área de Concreto (cm ²)	Perímetro (cm)	Furo Central (cm)	Parede (cm)	Carga Admissível(tf)		E (GPa)
						Compressão (Nk)	Tração (Tk)	
38	1134	810	119	20,3	8,8	116	10,9	32

Os comprimentos variavam entre 10,5m e 17,5m, enquanto que as negas variaram entre zero e 6mm, os repiques variaram entre 8mm e 15mm. Foi executada uma prova de carga estática (PCE) e um ensaio de carregamento dinâmico (ECD).

4.2.1 – Descrição do subsolo

O subsolo apresenta basicamente uma camada de aterro de cerca de 3,5m de espessura, seguida de uma camada de argila siltosa, pouco arenosa, muito mole,

marrom e amarela, até 8,0m de profundidade, e de uma camada de argila orgânica, pouco siltosa, muito mole, cinza escura, até 9,1m de profundidade. Subjacente a esta camada as sondagens detectaram a presença de solo de alteração de rocha de areia siltosa, marrom, amarelo e cinza, variegado, fofa à compacta, apresentando à partir de 14m de profundidade valores de N_{spt} entre 25 e 55 golpes. O nível d'água foi detectado a 2,9m de profundidade. A sondagem típica da obra está no Anexo A.

4.2.2 – Prova de carga estática (PCE)

A prova de carga foi realizada conforme a NBR 12131, com carregamento do tipo lento, mantendo a carga aplicada até a estabilização ou por 30 minutos no mínimo, carregada até o dobro da carga admissível das estacas, apresentando 10 estágios de carregamento e 4 estágios de descarregamento.

Não foi realizada prova de carga estática e ensaio de carregamento dinâmico na mesma estaca, porém os ensaios dinâmicos estão próximos da prova de carga estática. A tabela 14 indica as características da estaca testada (Estaca E01):

Tabela 14 – Características da estaca submetida a PCE (Osasco)

Estaca	Data de Cravação (DD/MM/AA)	Seção (cm)	Martelo (kg)	Comprimento Cravado (m)	Nega (mm)	Repique (mm)	Altura de Queda (cm)
E01	16/09/13	φ38	4000	13,80	2	13	60

A tabela 15 indica a data de execução, a carga admissível e a carga atingida na prova de carga estática:

Tabela 15 – Dados da PCE (Osasco)

Estaca	Data de Cravação (DD/MM/AA)	Prova de Carga (DD/MM/AA)	Set Up (dias)	Carga admissível (tf)	Carga Máxima (tf)	Recalque máximo (mm)
E01	16/09/13	27/11/13	72	89	178	9,22

4.2.3 – Ensaios de carregamento dinâmico (ECD)

Os ensaios de carregamento dinâmico foram realizados conforme a NBR 13208, com energia crescente, até a mobilização de no mínimo duas vezes a carga admissível das estacas. A tabela 16 indica os resultados obtidos.

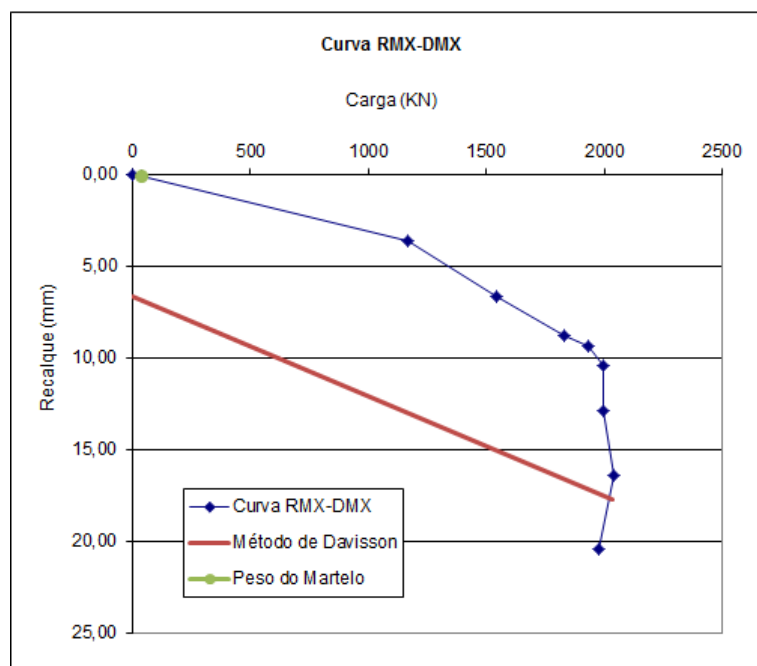
Tabela 16 – ECD realizado (Osasco)

Estaca	Seção (cm)	Martelo (kg)	Comprimento cravado (m)	H queda (cm)	Dx (mm)	Ruptura Davisson	Jc	Set Up (dias)	Pmob Fuste (tf)	Pmob Ponta (tf)	Pmob Efetivamente (tf)	FS
E02	φ38	4000	14,6	50	13,8	NÃO	0,63	6	76,0	105,4	181,4	2,09

H queda: altura de queda do martelo; Dx: recalque da simulação de prova de carga estática do CAPWAP; Jc: Damping (Case); MQ: Match Quality; Set Up: tempo decorrido entre data do ensaio e data de cravação da estaca; Pmob fuste: carga mobilizada de atrito lateral; Pmob ponta: carga de ponta mobilizada; Pmob Efetivamente: carga total mobilizada (atrito e ponta); FS: fator de segurança.

Na Estaca E02 foi realizado carregamento estático com peso próprio do martelo (CEPM) antes do ensaio dinâmico, além disso o ensaio foi realizado até a altura de queda de 80cm, apresentando uma ruptura do tipo nítida ao analisar a curva RMX-DMX do método Case. O ensaio apresentou ruptura segundo o critério de Davisson, conforme indicado na figura 51.

Figura 51 – Curva RMX-DMX e ruptura de Davisson (Osasco)



CAPÍTULO 5 – RESULTADOS OBTIDOS

5.1. - Jacareí

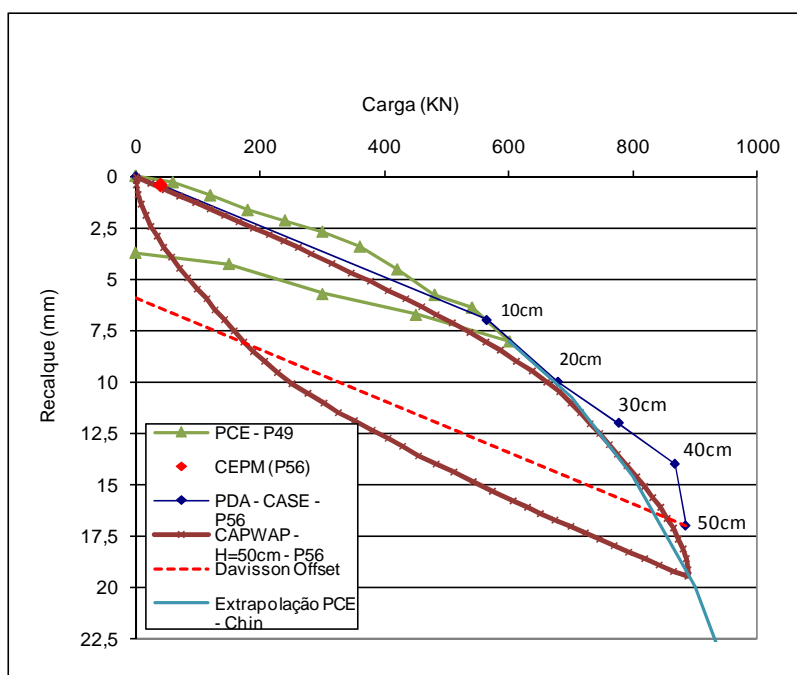
5.1.1 - Correlação entre as estacas P49 (PCE) e P56 (ECD) de seção 20x20cm

A estaca estudada, P56 de seção transversal de 20x20cm (ver tabela 11), foi ensaiada utilizando as seguintes alturas de queda: 10cm, 20cm, 30cm, 40cm e 50cm. Antes da realização do ensaio dinâmico foi feito um carregamento estático com o peso próprio do martelo do bate-estaca (CEPM), obtendo um recalque de 0,40mm para uma carga de 40kN.

O ensaio dinâmico foi interrompido por solicitação do cliente visando não causar danos estruturais à estaca ao aplicar golpes com maior energia. Os resultados dos Métodos CASE, CAPWAP e prova de carga estática estão indicados na figura 52. A prova de carga estática foi extrapolada segundo o Método de Chin.

Na estaca P49, de seção transversal 20x20cm (ver tabelas 8 e 9), foi realizada prova de carga estática. As estacas P49 e P56 são estacas de pilares vizinhos, apresentando distância de cerca de 5m entre elas.

Figura 52 – Correlação entre PCE x CAPWAP x Case (Jacareí)



5.1.1.1 – Análise para altura de queda de 50cm

A análise CAPWAP que apresentou melhor “match quality” (MQ_{WU}), assim como melhor “match quality de recalques” (MQ_R) foi realizada utilizando o quake do fuste de 2,25mm. As figuras 53 e 54 ilustram a influência do quake do fuste nos recalques calculados pelo CAPWAP.

Figura 53 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Jacareí)

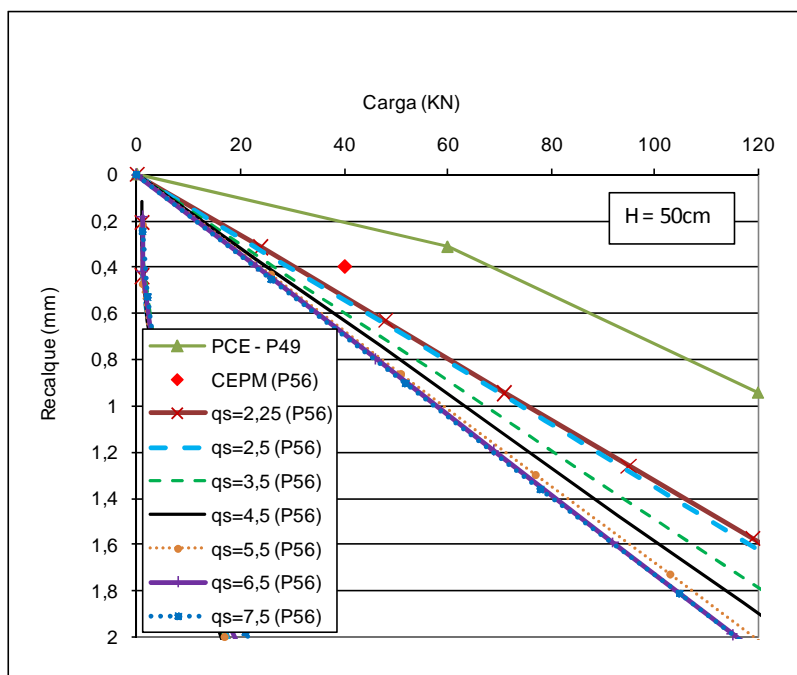
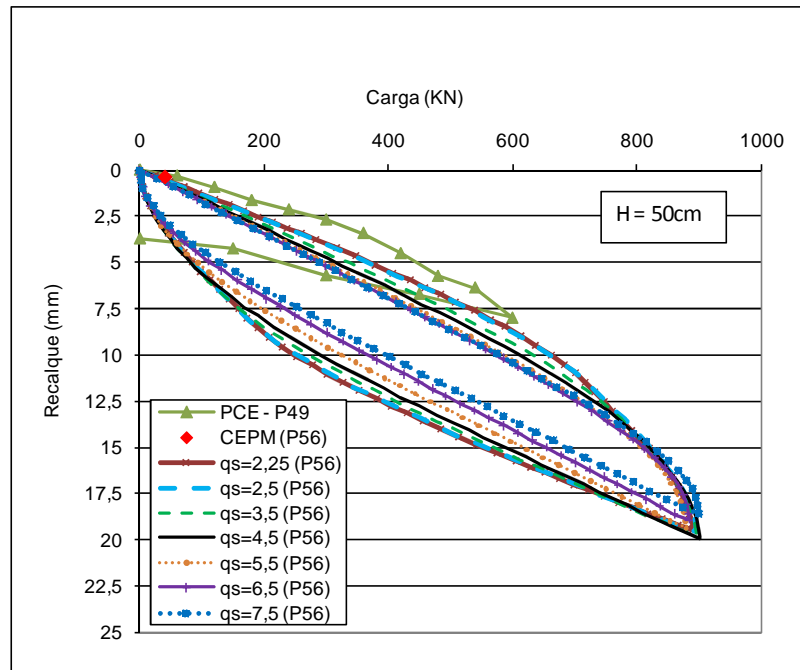


Figura 54 - Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Jacareí)



Nota-se que o recalque no trecho inicial da curva é diretamente proporcional ao quake do fuste da estaca, conforme previsto pelo modelo de Smith e pelas Relações de Cambefort. A solução usando quake do fuste de 2,25mm foi a que mais se aproximou do recalque do peso próprio do martelo assim como da curva da prova de carga estática. A figura 55 ilustra a comparação dos resultados obtidos com melhor “match quality de recalques” ($qs=2,25\text{mm}$) e pior “match quality de recalques” ($qs=7,5\text{mm}$). Nota-se na tabela 17 que o “match quality” da curva “Wave Up” (MQ_{WU}) é satisfatório para os dois casos e a carga máxima mobilizada foi praticamente a mesma.

Figura 55 – Influência do quake do fuste da curva carga-recalque considerando melhor MQR ($q_s=2,25\text{mm}$) e pior MQR ($q_s=7,5\text{mm}$) (Jacareí)

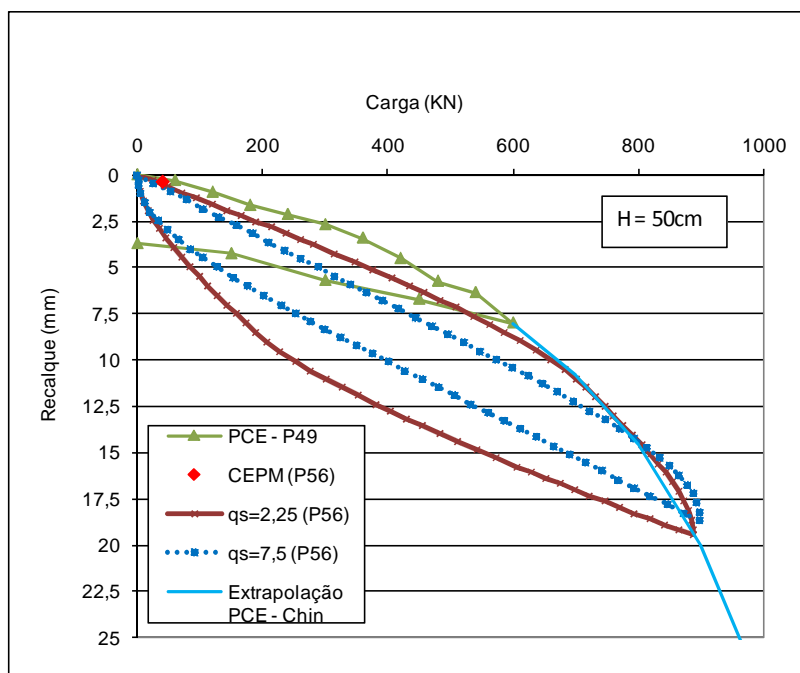


Tabela 17 - Resultados do CAPWAP com diferentes valores de q_s (Estaca P56 – Jacareí)

Análise	MQ_R	MQ_{WU}	J_c	RMX (kN)	Atrito (kN)	Ponta (kN)	SS (s/m)	ST (s/m)	qt (mm)
$q_s=2,25$	71,2	1,78	0,72	889	574	315	0,838	0,948	6,537
$q_s=2,5$	73,6	2,16	0,68	895	583	313	0,808	0,933	6,604
$q_s=3,5$	101	2,03	0,68	895	583	313	0,871	0,936	6,779
$q_s=4,5$	121	1,94	0,65	901	589	313	0,880	0,859	6,892
$q_s=5,5$	141	2,14	0,77	879	567	313	0,903	1,034	6,729
$q_s=6,5$	151	2,16	0,75	883	569	314	0,872	0,978	6,427
$q_s=7,5$	152	2,34	0,66	899	601	298	0,793	0,839	6,228

Nota: ver lista de símbolos

A tabela 17 permite comparar os resultados obtidos para diferentes valores de quake do fuste. Observa-se que a solução utilizando quake do fuste de 2,25mm foi a que apresentou menor “match quality” (MQ_{WU}) assim como menor “match quality de recalques” (MQ_R). As análises realizadas utilizando valores de q_s maiores (a partir de $q_s=5,5\text{mm}$) indicaram valores de quake do fuste decrescentes com a profundidade, indicando que o atrito lateral “não se esgotou”. A extrapolação do atrito lateral através do modelo elasto-plástico ideal indicaria valor de carga máxima mobilizada superior à da prova de carga estática, mostrando que valores de q_s superiores à 5,5mm não tem significado físico, apesar de matematicamente

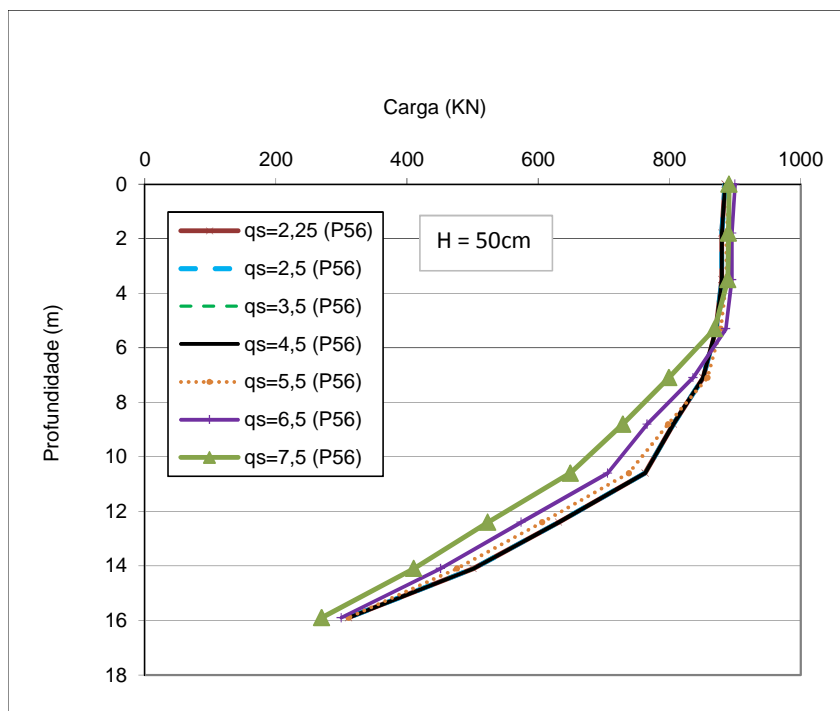
resolverem a equação da onda.

A realização do carregamento estático com o peso próprio do martelo (CEPM) após o ensaio dinâmico costuma apresentar um recalque “ligeiramente” maior do que se o mesmo fosse realizado antes do ensaio dinâmico.

A utilização de quake do fuste menores que o valor utilizado (2,25mm) aproximaria a curva do CAPWAP do ponto medido do peso do martelo, porém o “match quality” (MQ_{WU}) pioraria. Isso significa que o provável valor do quake é o valor utilizado (2,25mm).

A figura 56 ilustra variações da força axial em profundidade para os diversos valores de quake do fuste. Nota-se que qualitativamente há uma concordância na distribuição do atrito lateral indicando maiores valores de atrito unitário nos últimos elementos, consistente com as sondagens (Anexo A). Foi possível obter bons valores de “match quality” (MQ_{WU}) utilizando a mesma distribuição de atrito lateral para valores de quake do fuste entre 2,25mm e 4,5mm. Visando melhorar o MQ_{WU} utilizando valores de quake do fuste entre 5,5mm e 7,5mm, foi necessário mudar a distribuição do atrito lateral, distanciando o formato da curva força axial em profundidade em relação aos melhores resultados obtidos (utilizando valores de quake do fuste entre 2,25mm e 4,5mm).

Figura 56 – Variações da força axial em profundidade para diversos valores de quake do fuste (Estaca P56 – Jacareí)



As diferentes análises CAPWAP apresentaram cargas mobilizadas muito próximas, o mesmo ocorrendo com os valores de J_c . Isso significa que a curva RMX-DMX do Método Case deve ser parecida para essas diferentes análises CAPWAP, sendo portanto independente do operador que executa a análise CAPWAP.

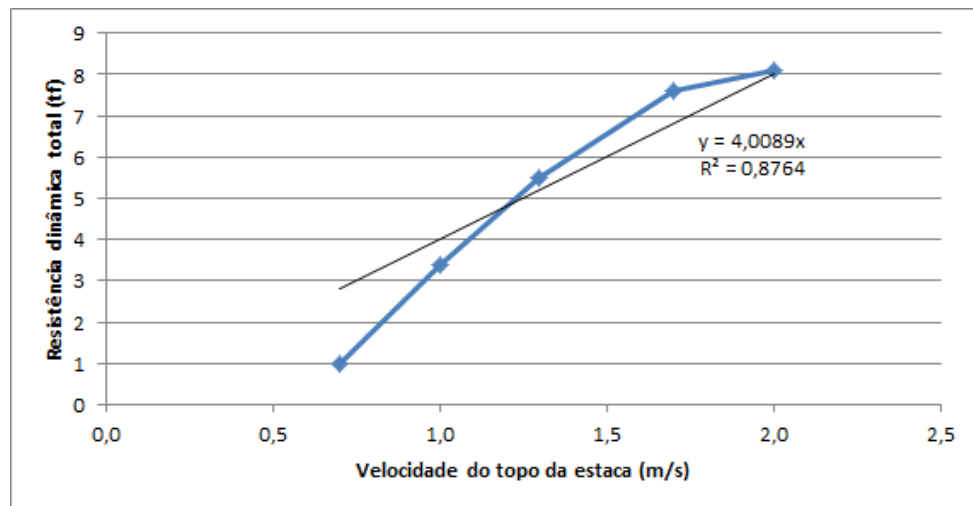
Através das figuras 55 e 56 é possível verificar a variabilidade dos resultados do CAPWAP, conforme apresentado por Fellenius (1988). Nota-se que os valores de capacidade de carga são muito próximos, assim como os valores de “match quality” da curva “wave up” (MQ_{WU}); entretanto os valores de MQ_R aumentam à medida que os valores de quake se distanciam do provável valor real ($q_s=2,25$ mm).

5.1.1.2 – Análise para altura de queda crescente

Todos os golpes aplicados no ensaio dinâmico foram submetidos à análise CAPWAP, utilizando como referência os parâmetros obtidos pela análise do golpe com altura de queda de 50cm. Foram mantidas as seguintes hipóteses para a realização da análise dos demais golpes:

- O quake do fuste foi o mesmo para todas as análises, exceto nos golpes de menor energia onde não se mobilizou todo o atrito lateral nos últimos elementos de solo (trecho 3-4 das Relações de Cambefort). Neste caso o quake diminui proporcionalmente com a carga;
- A partir do golpe onde houve esgotamento do atrito lateral (30cm), ponto 4 das Relações de Cambefort, todo acréscimo de capacidade de carga é exclusivamente devido à carga de ponta; neste caso o acréscimo de carga de ponta é proporcional ao acréscimo do quake da ponta da estaca (segunda condição de contorno), segundo o modelo elasto-plástico ideal, até atingir a ruptura do sistema (ponto 5 das Relações de Cambefort);
- A resistência dinâmica é proporcional à velocidade do topo da estaca (primeira condição de contorno), como ilustra a figura 57, que por sua vez é proporcional à energia aplicada, assim como os valores de Jc (Case Damping Factor).

Figura 57 – Relação entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca (Estaca P56 – Jacareí)



A figura 58 ilustra a evolução das curvas carga-recalque com a energia aplicada. No Anexo C estão os gráficos da evolução das curvas carga-recalque para cada golpe analisado. O limite de Davisson foi atingido para a carga de 825 kN, referente à altura de queda de 50cm, segundo a curva do CAPWAP, enquanto que na curva RMX-DMX o valor obtido foi de 900kN. A curva da prova de carga estática

foi extrapolada através do Método de Chin (método que melhor se ajustou à curva), tendo-se obtido o valor de 835 kN através do limite de Davisson. As variações das capacidades de carga obtidas no CAPWAP e na curva RMX-DMX em relação à prova de carga estática foram de -1,2% e de +7,8%, respectivamente. Segundo Rausche, (1994), os ensaios dinâmicos devem ser sempre comparados com provas de carga estática através do limite de Davisson.

A estaca P49 que foi submetida à PCE sofreu maior influência do fenômeno de atrito negativo face ao tempo decorrido entre sua cravação e sua realização, de 189 dias, conforme a tabela 11. Entretanto a capacidade de carga da estaca submetida à PCE não sofreu redução em relação à estaca P56 onde foi realizado o ensaio dinâmico. Os resultados obtidos foram muito próximos (desvio de -1,2%). Uma explicação para o ocorrido é que fenômeno de atrito negativo gera uma tensão residual na estaca, que, como foi visto na Revisão Bibliográfica (item 2.7), não afeta a capacidade de carga.

A figura 59 ilustra a variação da força axial em profundidade para cada um dos golpes analisados. Nota-se que a partir do golpe de altura 30cm as curvas são paralelas indicando que houve esgotamento do atrito lateral. A partir deste ponto todo acréscimo de carga é devido exclusivamente à reação de ponta.

Figura 58 – Evolução da curva carga-recalque com a energia aplicada na estaca P56, comparando com a estaca P49 (PCE) - Jacareí

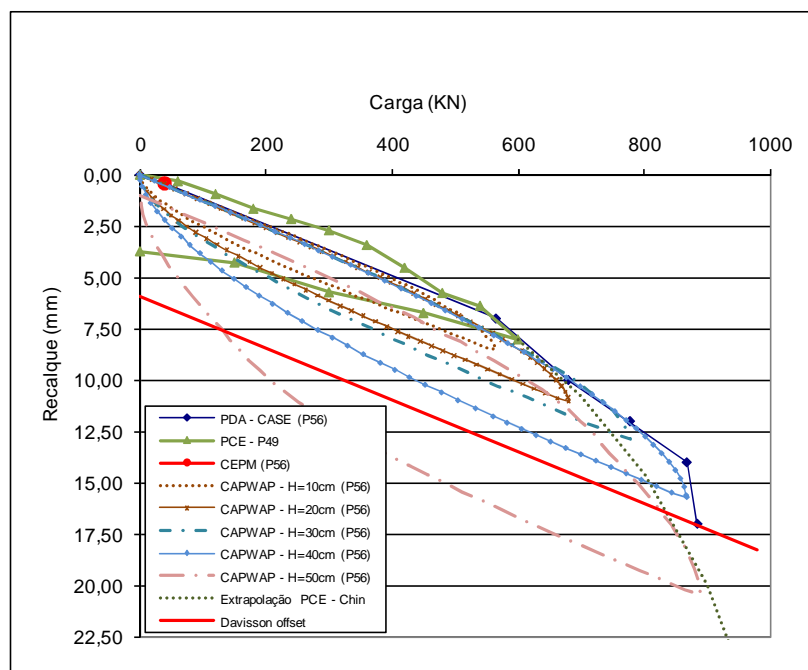
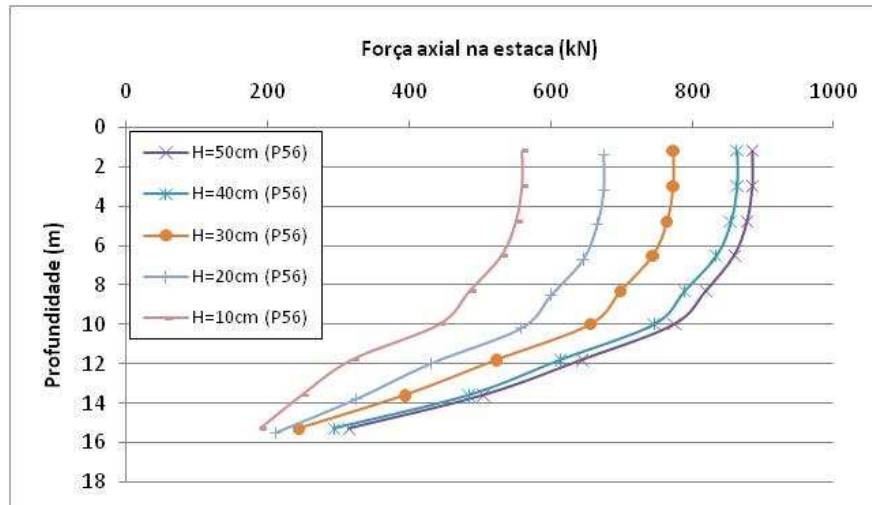
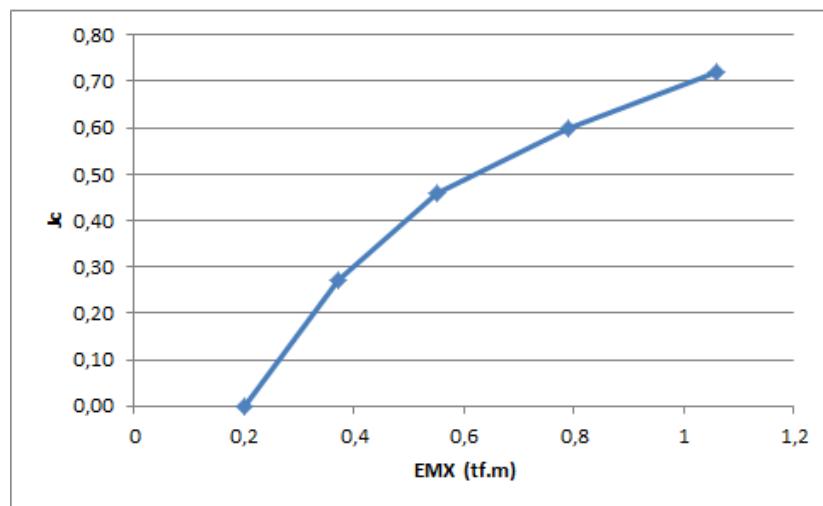


Figura 59 – variação da força axial em profundidade (Estaca P56 – Jacareí)



A figura 60 ilustra a evolução do Jc (Case Damping Factor) em função da energia aplicada. Notam-se valores menores de Jc para os golpes de menor energia em função de menores resistências dinâmicas mobilizadas. A curva RMX-DMX do Método Case indicada nas figuras 52 e 58 foi obtida utilizando os valores de Jc indicados na figura 60.

Figura 60 – Evolução do Jc com o golpe aplicado (Estaca P56 – Jacareí)



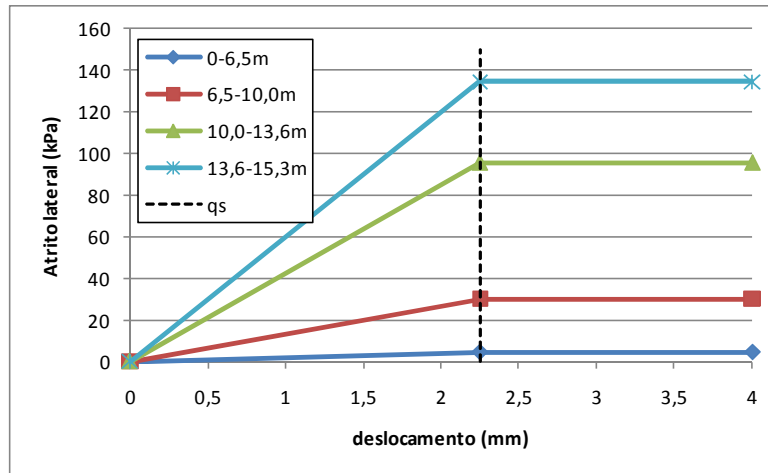
A tabela 18 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os diversos golpes aplicados na estaca P56 no ECD com energia crescente.

Tabela 18 – Resumo dos resultados obtidos no ECD com energia crescente (Estaca P56 – Jacarei)

H (cm)	RMX (kN)	MQ _{WU}	MQ _R	Jc	Atrito (kN)	Ponta (kN)	SS (s/m)	ST (s/m)	Qs (mm)	Qt (mm)
10	565	2,26	47,1	0,00	375	190	1,410	1,380	2,25	1,511
20	680	2,15	60,7	0,27	468	212	1,178	1,313	2,25	2,299
30	778	2,07	60,8	0,46	534	244	0,936	1,081	2,25	2,696
40	868	1,68	63,0	0,60	574	294	0,840	0,880	2,25	3,913
50	885	1,91	71,2	0,74	574	311	0,832	0,956	2,25	6,540

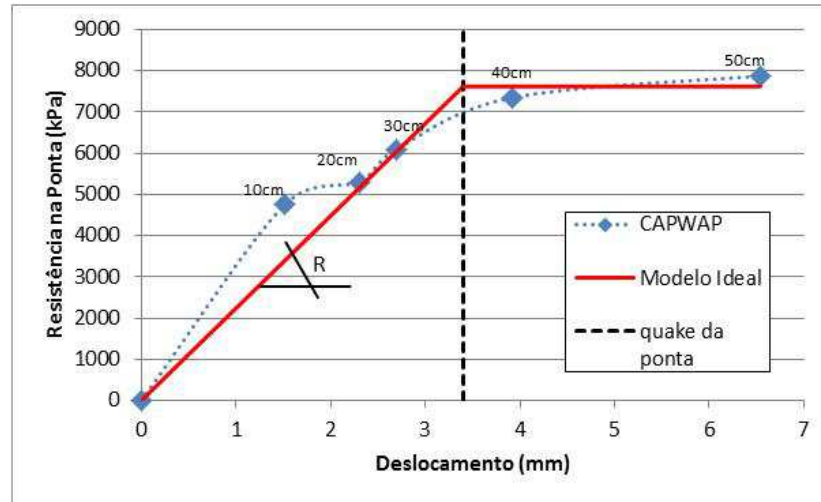
A figura 61 ilustra a variação do atrito lateral para cada profundidade (Primeira Relação de Cambefort). Percebe-se que para valores de deslocamento maiores que o quake do fuste ocorre o esgotamento do atrito lateral para cada profundidade.

Figura 61 – Variação do atrito lateral - Primeira Relação de Cambefort – Procedimento Proposto (Estaca P56 – Jacarei)



A figura 62 ilustra o comportamento da ponta da estaca (Segunda Relação de Cambefort). Percebe-se que os resultados obtidos nas análises CAPWAP para cada golpe estão próximos do modelo elasto-plástico ideal, apresentando boa definição do parâmetro “R” da Segunda Relação de Cambefort.

Figura 62 – Comportamento da ponta da estaca - Segunda Relação de Cambefort – Procedimento Proposto (Estaca P56 – Jacareí)



Os resultados do CAPWAP apresentados somente foram possíveis graças a uma boa qualidade dos sinais de força e velocidade coletados. A aplicação de golpes excêntricos faz com que o sinal de força x tempo coletado apresente diferenças entre os dois transdutores de deformação, conseqüentemente podem haver diferenças no formato da curva “wave up” em golpes consecutivos, apresentando uma “falsa” aparência de que a distribuição do atrito lateral mudou nos diferentes golpes aplicados.

Nos primeiros golpes de menor energia a curva “Wave Up” apresenta uma “falsa” aparência de que há um aumento do atrito lateral nos primeiros metros. Analisando de forma isolada cada um desses golpes de menor energia chega-se a esse equívoco; entretanto, ao analisar todos os golpes de forma global, adotando as hipóteses listadas anteriormente, conclui-se que o aumento da força da curva “Wave Up” nos primeiros instantes é devido ao efeito de “damping”. De fato, conforme indicado nas figuras 13 e 14, o trecho inicial da curva “Wave Up” pode ser aumentado através do aumento JS ou SS (damping do fuste) e JT ou ST (damping da ponta); não se trata de um efeito exclusivo de RS (atrito lateral). Outro argumento de que o aumento da força da curva “Wave Up” é devido ao aumento de JS e JT é que, caso fosse feito o aumento de RS desses golpes de menor energia e se fosse feita a soma dos máximos valores de atrito lateral para cada golpe e da carga máxima de ponta, o resultado obtido excederia o valor obtido pela prova de carga estática, piorando a correlação; além disso a proporcionalidade entre resistência

dinâmica e velocidade do topo da estaca se manteve (figura 57). As figuras 63 e 64 indicam o aumento de SS e ST nos golpes de menor energia.

Figura 63 – Efeito de SS (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca P56 – Jacareí)

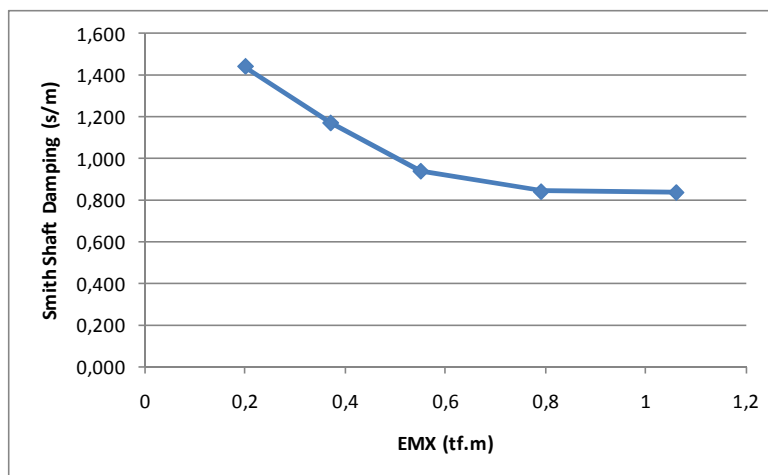
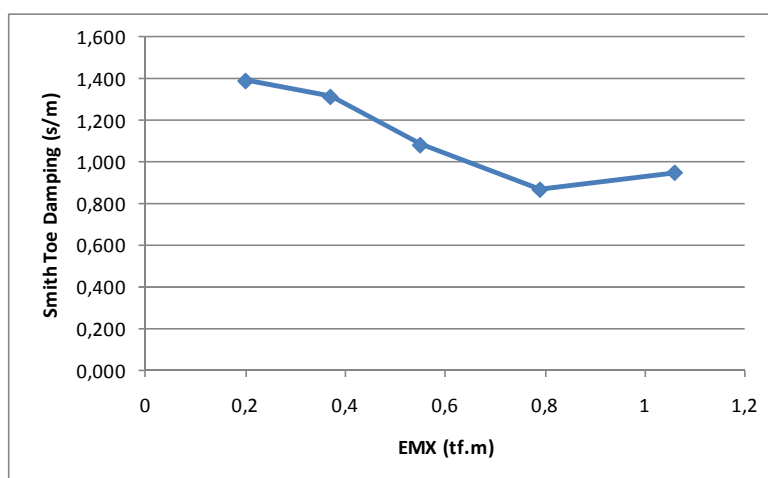
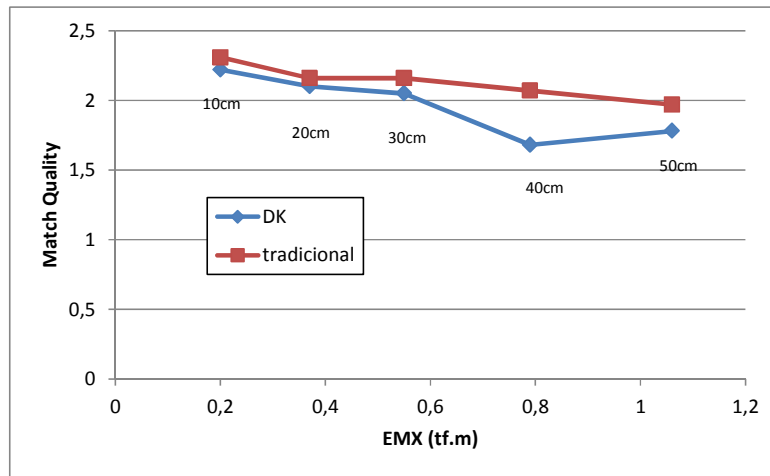


Figura 64 - Efeito de ST (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca P56 – Jacareí)



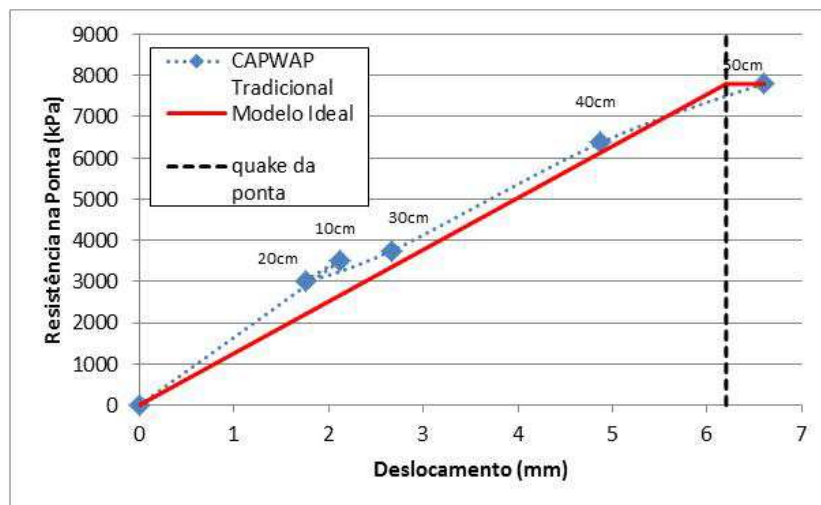
As figuras 65 a 67 apresentam os resultados obtidos através do procedimento tradicional baseado exclusivamente na redução do valor de “Match Quality” (MQ_{WU}). A figura 65 ilustra a comparação do procedimento proposto (DK) com o procedimento tradicional. Nota-se que o procedimento proposto (DK) apresentou redução dos valores de “Match Quality” (MQ_{WU}).

Figura 65 - Redução dos valores de "Match Quality" (MQ_{WU}) (Estaca P56 – Jacareí)



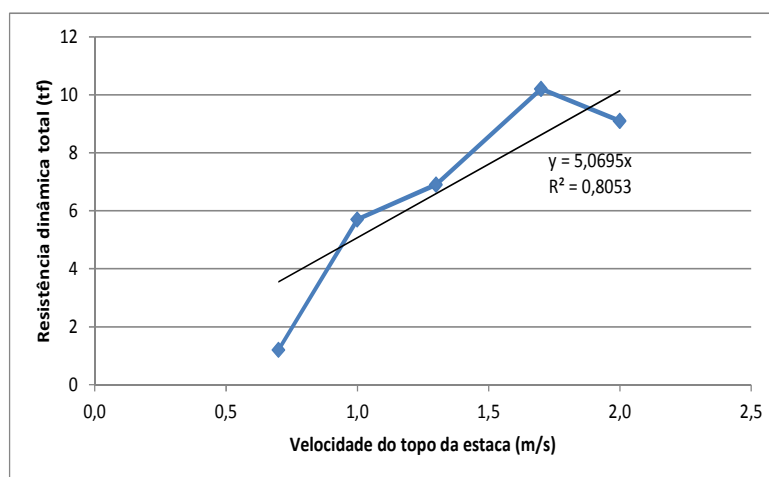
O procedimento proposto (ver figura 62) apresentou melhor definição do parâmetro “R” da Segunda Relação de Cambefort em relação ao procedimento tradicional (figura 66). Nota-se que no procedimento tradicional foi possível realizar análise CAPWAP no golpe de altura de queda de 20cm com menores valores de quake e resistência da ponta em relação ao golpe de altura de queda de 10cm. Além disso os valores de quake do fuste e distribuição do atrito lateral foram diferentes para cada golpe analisado com altura de queda crescente.

Figura 66 - Segunda Relação de Cambefort do procedimento tradicional (Estaca P56 – Jacareí)



O procedimento proposto (ver figura 57) também apresentou melhor coeficiente de correlação R^2 (0,8764) na relação entre resistência dinâmica total (atrito lateral médio e resistência de ponta) e velocidade máxima do topo quando comparado com o procedimento tradicional, que obteve coeficiente de correlação R^2 de 0,8053 (figura 67).

Figura 67 – Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total e a velocidade máxima do topo (Estaca P56 – Jacareí)



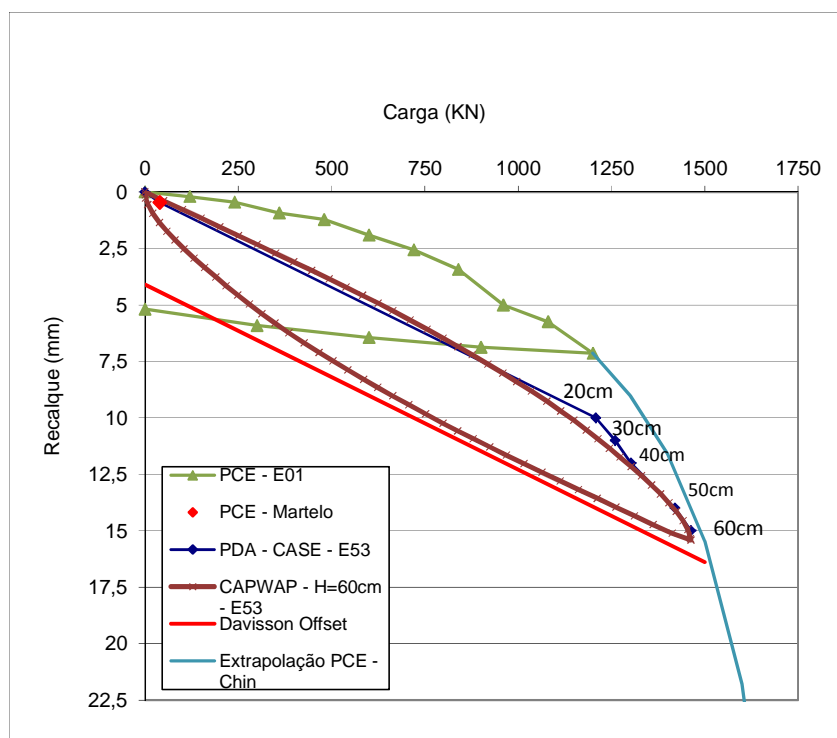
5.1.2 - Correlação entre as estacas E01 (PCE) e E53 (ECD) de seção $\phi 33\text{cm}$

Na estaca E53 de seção $\phi 33\text{cm}$ (ver Tabela 11) foi realizado um carregamento estático com peso próprio do martelo (CEPM) de 40kN após a realização do ensaio dinâmico (recalque de 0,47mm). Foi verificado um recalque maior em relação à estaca E49 de seção 20x20cm (recalque de 0,40mm); nesta estaca (E49) o carregamento estático com peso do martelo (CEPM) foi realizado antes do ensaio dinâmico.

O ensaio dinâmico foi interrompido visando não causar danos estruturais à estaca ao aplicar golpes com maior energia. Os resultados dos Métodos CASE, CAPWAP e prova de carga estática estão indicados na figura 68. A prova de carga estática foi extrapolada segundo o Método de Chin.

Na estaca E01, de seção transversal $\phi 33\text{cm}$ (ver Tabelas 8 e 9), foi realizada prova de carga estática. As estacas E01 e E53 estão localizadas a cerca de 40m de distância entre elas.

Figura 68 – Correlação entre PCE x CAPWAP x Case (Estaca E53 - Jacareí)



5.1.2.1 – Análise para altura de queda de 60cm

A análise CAPWAP que apresentou melhor “match quality” (MQ_{WU}), assim como melhor “match quality de recalques” (MQ_R) foi realizada utilizando o quake do fuste de 1,1614mm. As figuras 69 e 70 ilustram a influência do quake do fuste nos recalques calculados pelo CAPWAP. A figura 69 é uma ampliação do trecho inicial da figura 55.

Figura 69 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E53 - Jacareí)

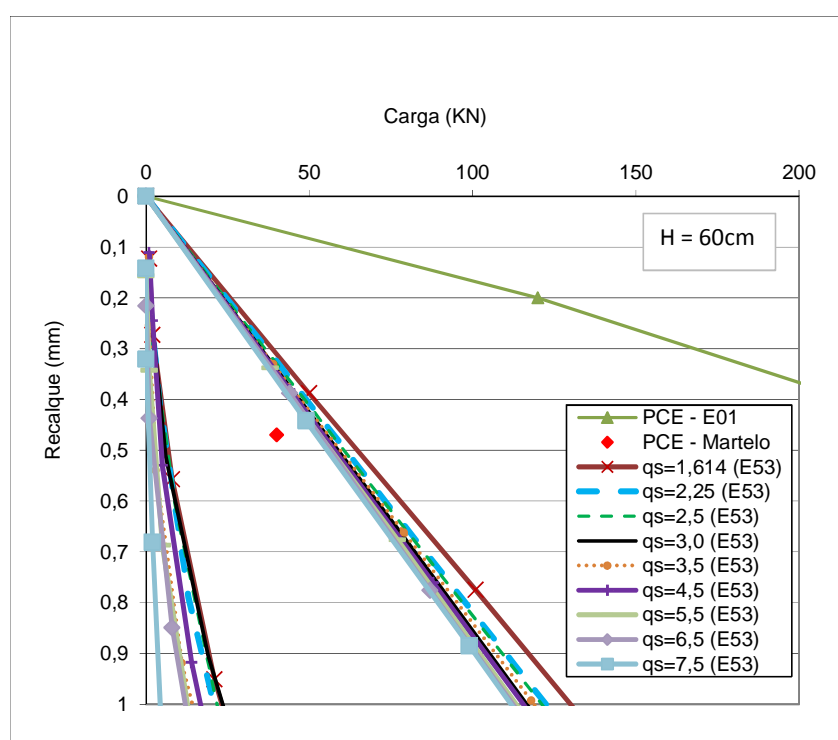
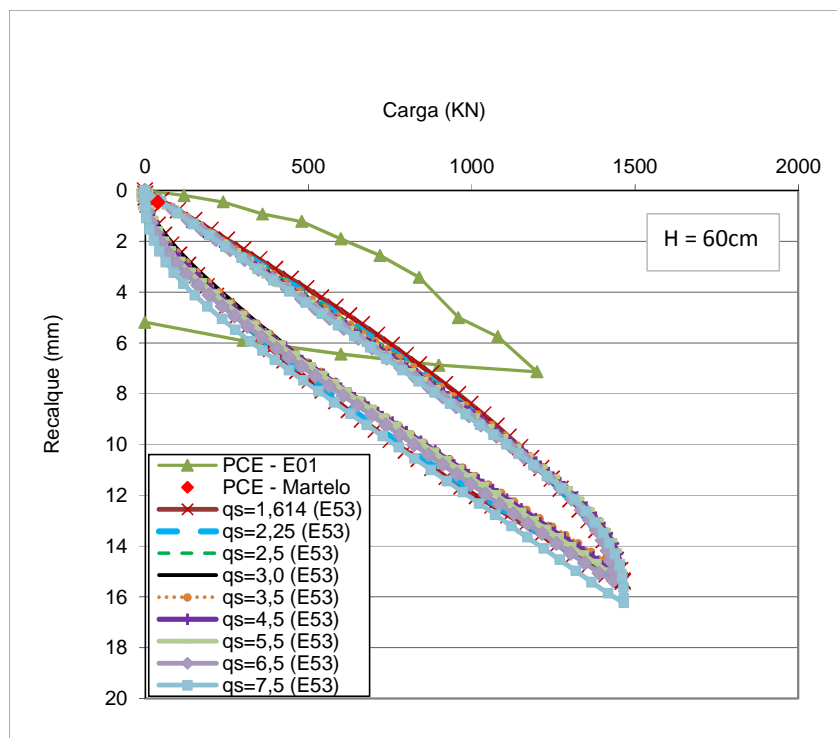


Figura 70 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E53 - Jacareí)



Nota-se que o recalque no trecho inicial da curva é diretamente proporcional ao quake do fuste da estaca, conforme previsto pelo modelo de Smtih e pelas Relações de Cambefort. A solução usando quake do fuste de 1,614mm foi a que mais se aproximou do recalque da prova de carga estática. A figura 71 ilustra a comparação dos resultados obtidos com melhor “match quality de recalques” ($qs=1,614\text{mm}$) e pior “match quality de recalques” ($qs=7,5\text{mm}$). Nota-se na tabela 19 que o “match quality” da curva “Wave Up” (MQ_{WU}) são satisfatórios para os dois casos e a capacidade de carga obtida foi praticamente a mesma.

Figura 71 – Influência do quake do fuste da curva carga-recalque considerando melhor MQR ($q_s=1,614\text{mm}$) e pior MQR ($q_s=7,5\text{mm}$) (Estaca E53 - Jacareí)

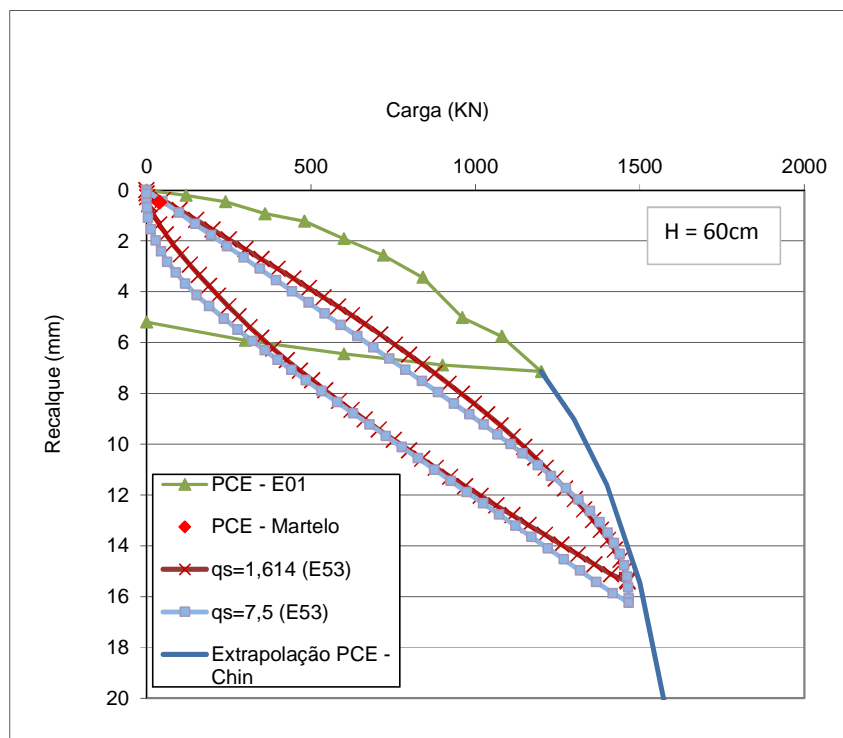


Tabela 19 – Comparação dos resultados com diferentes valores de q_s (Estaca E53 – Jacareí)

Análise	MQ_R	MQ_{wu}	J_c	RMX (kN)	Atrito (kN)	Ponta (kN)	SS (s/m)	ST (s/m)	q_t (mm)
$q_s=1,614$	402	1,56	0,95	1463	870	593	0,595	0,870	3,370
$q_s=2,25$	437	1,61	0,95	1459	896	593	0,529	0,929	3,407
$q_s=2,5$	442	1,68	0,95	1456	896	560	0,530	0,902	3,353
$q_s=3,0$	461	1,90	0,95	1463	910	553	0,549	0,883	3,356
$q_s=3,5$	443	2,01	0,95	1445	905	540	0,388	1,013	2,897
$q_s=4,5$	458	2,03	0,95	1461	961	500	0,336	1,083	2,865
$q_s=5,5$	473	2,40	0,95	1449	871	578	0,336	1,022	2,835
$q_s=6,5$	482	2,53	0,95	1433	849	584	0,302	1,003	2,722
$q_s=7,5$	487	2,65	0,89	1467	832	635	0,277	0,825	2,815

Nota: ver lista de símbolos

A tabela 19 permite comparar os resultados obtidos para diferentes valores de quake do fuste. Observa-se que a solução utilizando quake do fuste de $1,614\text{mm}$ foi a que apresentou menor “match quality” (MQ_{wu}) assim como menor “match quality de recalques” (MQ_R). As análises realizadas utilizando valores de q_s maiores (a partir de $q_s=3,5\text{mm}$) indicaram valores de quake do fuste decrescentes com a profundidade, mostrando que o atrito lateral “não se esgotou”. A extrapolação do

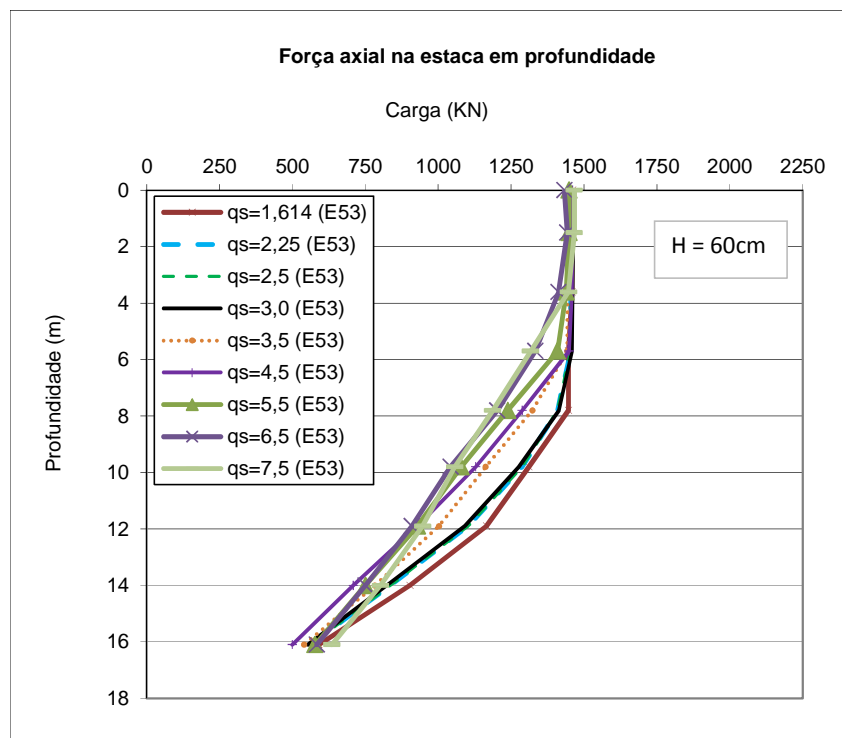
atrito lateral através do modelo elasto-plástico ideal conduziria a um valor de capacidade de carga superior à da prova de carga estática, indicando que valores de q_s superiores à 3,5mm não apresentam significado físico, apesar de matematicamente resolverem a equação da onda.

A realização de CEPM após o ensaio dinâmico costuma apresentar um recalque “ligeiramente” maior do que se o mesmo fosse realizado antes do ensaio dinâmico. Na figura 69 nota-se que o recalque do peso próprio do martelo superou os recalques de todas as análises, inclusive a análise com $q_s=7,5\text{mm}$, indicando uma possível influência de tensões residuais, conforme será discutido adiante.

A utilização de quakes do fuste menores que o valor utilizado (1,614mm) aproximaria a curva do CAPWAP da prova de carga estática, porém o “match quality” (MQ_{WU}) pioraria. Isso significa que o provável valor do quake é o valor utilizado (1,614mm).

A figura 72 ilustra variações da força axial em profundidade para os diversos valores de quake do fuste. Nota-se que qualitativamente há uma concordância na distribuição do atrito lateral indicando maiores valores de atrito unitário nos últimos elementos, consistente com a sondagem (Anexo A). Foi possível obter bons valores de “match quality” (MQ_{WU}) utilizando a mesma distribuição de atrito lateral para valores de quake do fuste entre 1,614mm e 3,0mm. Visando melhorar o MQ_{WU} utilizando valores de quake do fuste entre 3,5mm e 7,5mm, foi necessário mudar a distribuição do atrito lateral, distanciando o formato da curva força axial em profundidade em relação aos melhores resultados obtidos (utilizando valores de quake do fuste entre 1,614mm e 3,0mm).

Figura 72 – Variações da força axial em profundidade para diversos valores de quake do fuste (Estaca E53 - Jacarei)



As diferentes análises CAPWAP apresentaram capacidades de carga muito próximas, o mesmo ocorrendo com os valores de J_c próximos. Isso significa que a curva RMX-DMX do Método Case deve ser parecida para essas diferentes análises CAPWAP, sendo portanto independente do operador que execulta a análise CAPWAP.

Através das figuras 69 e 70 é possível verificar a variabilidade dos resultados do CAPWAP, conforme apresentado por Fellenius (1988) e Edde (1991). Nota-se que os valores de capacidade de carga são muito próximos, assim como os valores de "match quality" da curva "wave up" (MQ_{WU}); entretanto os valores de MQ_R aumentam à medida que os valores de quake se distanciam do provável valor real ($qs=1,614mm$).

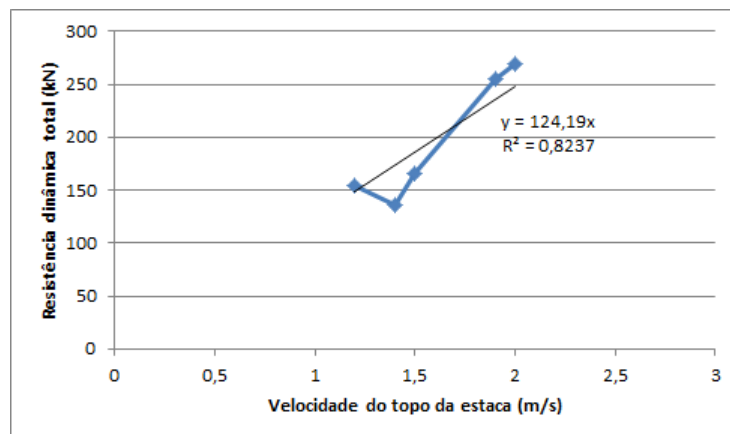
5.1.2.2 – Análise para altura de queda crescente

Todos os golpes aplicados no ensaio dinâmico foram submetidos à análise CAPWAP, utilizando como referência os parâmetros obtidos pela análise do golpe

com altura de queda de 60cm. Foram mantidas as seguintes hipóteses para a realização da análise dos demais golpes:

- O quake do fuste foi o mesmo para todas as análises, exceto nos golpes de menor energia onde não se mobilizou todo o atrito lateral nos últimos elementos de solo (trecho 3-4 das Relações de Cambefort). Neste caso o quake diminui proporcionalmente com a carga;
- A partir do golpe onde houve esgotamento do atrito lateral (40cm), ponto 4 das Relações de Cambefort, todo acréscimo de capacidade de carga é exclusivamente devido à carga de ponta; neste caso o acréscimo de carga de ponta é proporcional ao acréscimo do quake da ponta da estaca (segunda condição de contorno), segundo o modelo elasto-plástico ideal, até atingir a ruptura do sistema (ponto 5 das Relações de Cambefort);
- A resistência dinâmica é proporcional à velocidade do topo da estaca (primeira condição de contorno), como mostra a figura 73, que por sua vez é proporcional à energia aplicada, assim como os valores de Jc (Case Damping Factor).

Figura 73 – Relação entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca (Estaca E53 – Jacareí)



A figura 74 ilustra a evolução das curvas carga-recalque com o golpe aplicado. No Anexo C estão os gráficos da evolução dessas curvas para cada golpe analisado. O limite de Davisson não foi atingido no ensaio de carregamento dinâmico. Para a realização da comparação entre o ensaio dinâmico e a prova de

carga estática foi utilizado o Método de Davisson Modificado de forma que a reta atingisse o recalque máximo da simulação de prova de carga do CAPWAP, apresentando carga de 1463 kN, referente à altura de queda de 60cm. Em relação à curva RMX-DMX o Método de Davisson Modificado atingiu a mesma carga. A curva da prova de carga estática foi extrapolada através do Método de Chin (método que melhor se ajustou à curva), tendo-se obtido o valor de 1511 kN através do limite de Davisson Modificado. A variação da capacidade de carga obtida no CAPWAP e na curva RMX-DMX em relação à prova de carga estática foi de -3,1%. Segundo Rausche, (1994), os ensaios dinâmicos devem ser sempre comparados com provas de carga estáticas através do limite de Davisson.

A análise da curva RMX-DMX indica que o ensaio dinâmico não atingiu a ruptura. Caso o ensaio fosse prosseguido, aplicando maiores energias, provavelmente deveria apresentar uma capacidade de carga maior do que a obtida (1463kN), melhorando a correlação com a prova de carga estática.

A estaca E01 que foi submetida à PCE sofreu maior influência do fenômeno de atrito negativo em função do tempo decorrido entre a cravação da estaca e sua realização (ver tabela 12). Entretanto a capacidade de carga da estaca E01 submetida à PCE não sofreu redução em relação à estaca E53 em que foi realizado o ensaio dinâmico. Os resultados obtidos foram muito próximos (desvio de -3,1%). Uma explicação para o ocorrido é que fenômeno de atrito negativo gera uma tensão residual na estaca, sem alterar a capacidade de carga (item 2.7).

A figura 75 ilustra a variação da força axial em profundidade para cada um dos golpes analisados. Nota-se que a partir do golpe de altura 40cm as curvas são paralelas indicando que houve esgotamento do atrito lateral. A partir deste ponto todo acréscimo de carga é devido exclusivamente à reação de ponta.

Figura 74 – Evolução das curvas carga-recalque com o golpe aplicado na estaca E53, comparando com a estaca E01 (PCE) - Jacareí

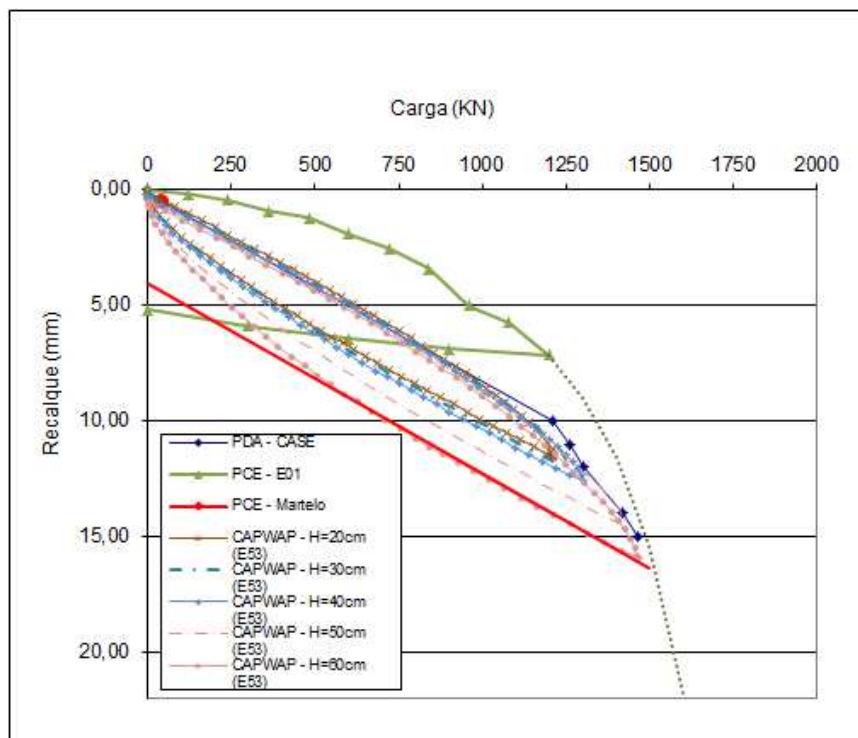
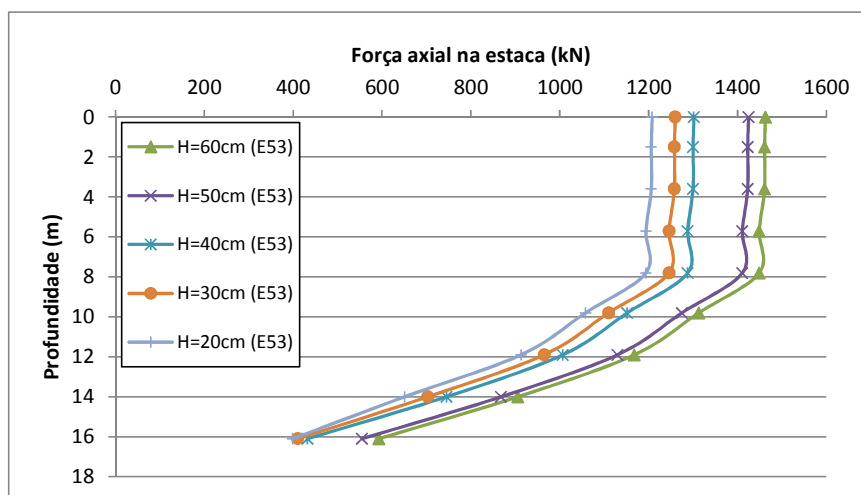
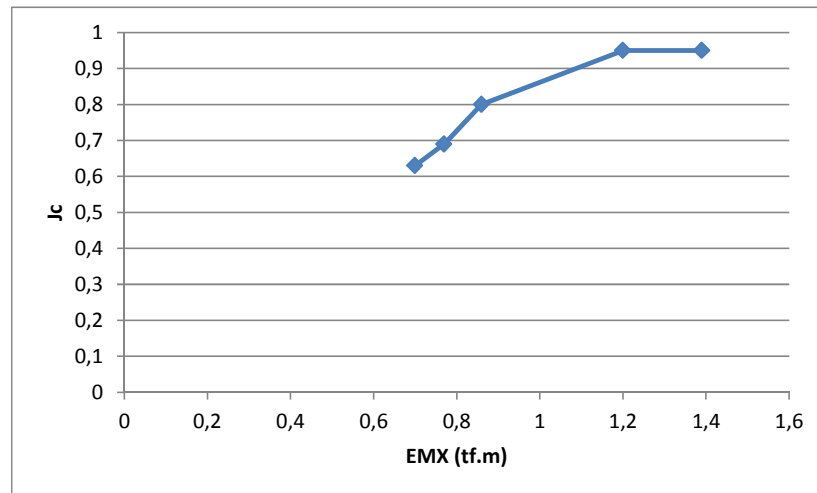


Figura 75 – Variação da força axial em profundidade com o golpe aplicado (Estaca E53 – Jacareí)



A figura 76 ilustra a evolução do Jc (Case Damping Factor) em função da energia aplicada. Notam-se valores menores de Jc para os golpes de menor energia em função de menores resistências dinâmicas mobilizadas. A curva RMX-DMX do Método Case, indicada nas figuras anteriores, foi obtida utilizando os valores de Jc indicados na figura 76.

Figura 76 – Evolução do Jc com o golpe aplicado (Estaca E53 – Jacareí)



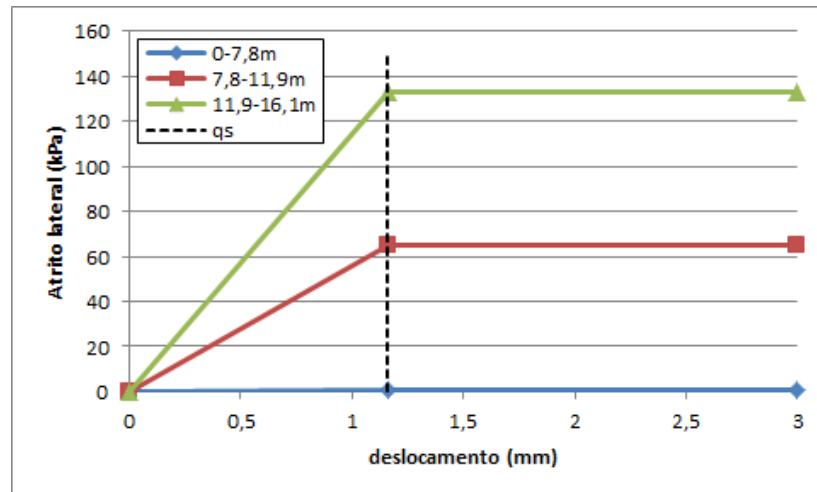
A tabela 20 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os golpes aplicados na estaca E53 no ECD com energia crescente.

Tabela 20 – Resumo dos resultados obtidos no ECD com energia crescente (Estaca E53 – Jacareí)

H (cm)	RMX (kN)	MQ _{WU}	MQ _R	Jc	Atrito (kN)	Ponta (kN)	SS (s/m)	ST (s/m)	Qs (mm)	Qt (mm)
20	1208	2,03	406,6	0,63	809	651	1,010	1,380	1,1614	1,880
30	1260	1,81	401,3	0,69	850	703	0,714	0,951	1,1614	1,909
40	1302	1,86	400,4	0,80	870	745	0,498	0,890	1,1614	2,000
50	1420	1,91	400,9	0,95	870	863	0,530	0,880	1,1614	2,613
60	1463	1,56	402,3	0,95	870	906	0,595	0,870	1,1614	3,370

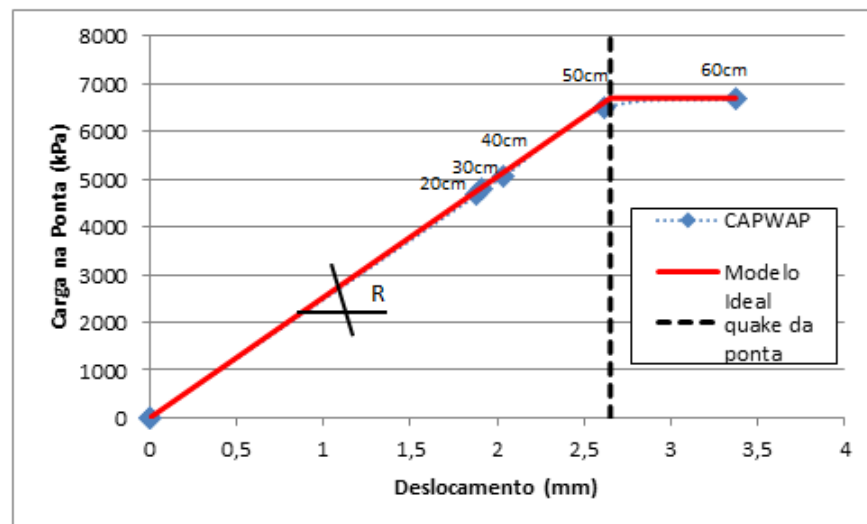
A figura 77 ilustra a variação do atrito lateral para cada profundidade (Primeira Relação de Cambefort). Percebe-se que para valores de deslocamento maiores que o quake do fuste ocorre o esgotamento do atrito lateral para cada profundidade.

Figura 77 – Comportamento do atrito lateral – Primeira Relação de Cambefort – Procedimento Proposto (Estaca E53 – Jacarei)



A figura 78 ilustra o comportamento da ponta da estaca (Segunda Relação de Cambefort). Percebe-se que os resultados obtidos nas análises CAPWAP para cada golpe estão próximos do modelo elasto-plástico ideal.

Figura 78 – Comportamento da ponta da estaca – Segunda Relação de Cambefort – Procedimento Proposto (Estaca E53 – Jacarei)



Os resultados do CAPWAP apresentados somente foram possíveis graças a uma boa qualidade dos sinais de força e velocidade coletados. A aplicação de golpes excêntricos faz com que o sinal de força x tempo coletado apresente diferenças entre os dois transdutores de deformação. Conseqüentemente podem

haver diferenças no formato da curva “wave up” em golpes consecutivos, apresentando uma “falsa” aparência de que a distribuição do atrito lateral mudou nos diferentes golpes aplicados.

Nos primeiros golpes de menor energia a curva “Wave Up” apresenta uma “falsa” aparência de que há um aumento do atrito lateral nos primeiros metros. Analisando de forma isolada cada um desses golpes de menor energia chega-se a esse equívoco, entretanto ao analisar todos os golpes de forma global adotando as hipóteses listadas anteriormente, conclui-se que o aumento da curva “Wave Up” nos primeiros instantes é devido ao efeito de “damping”. De fato, conforme indicado nas figuras 13 e 14 o trecho inicial da curva “Wave Up” pode ser aumentado através do aumento JS ou SS (damping do fuste) e JT ou ST (damping da ponta), não se trata de um efeito exclusivo de RS (atrito lateral). Outro argumento de que o aumento da curva é devido ao aumento de JS e JT é que caso fosse feito o aumento de RS desses golpes de menor energia e fizessemos a soma dos máximos valores de atrito lateral para cada golpe e da carga máxima de ponta, o resultado obtido excederia o valor obtido pela prova de carga estática, piorando a correlação. Além disso a proporcionalidade entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca se manteve (figura 70). As figuras 79 e 80 indicam o aumento de SS e ST nos golpes de menor energia.

Figura 79 – Efeito de SS (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca E53 – Jacareí)

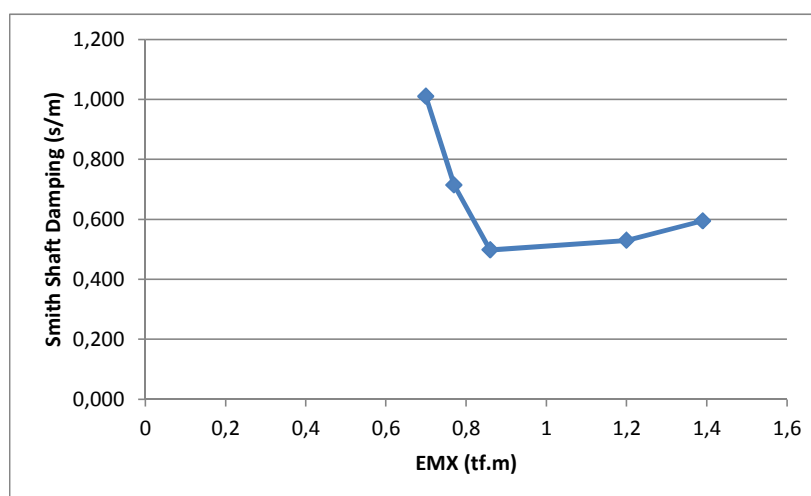
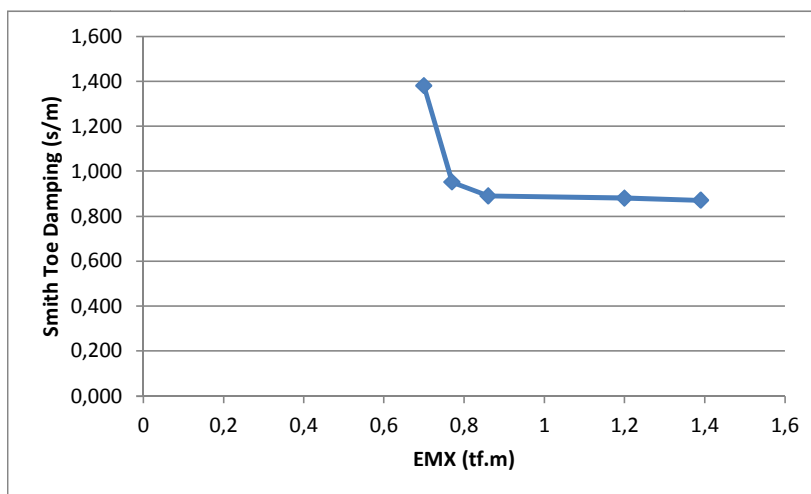
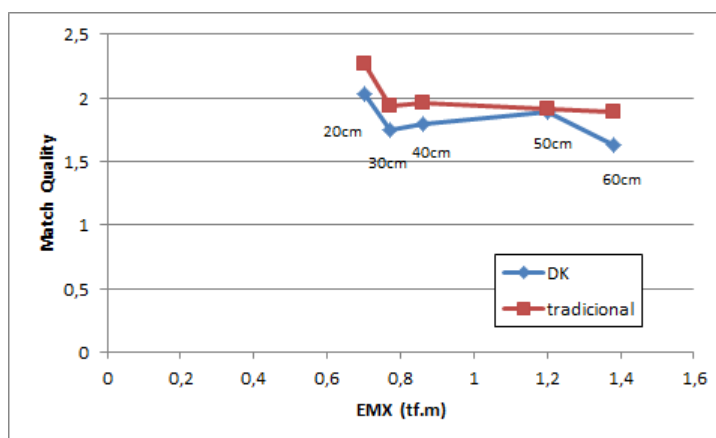


Figura 80 - Efeito de ST (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca E53 – Jacareí)



As figuras 81 a 83 apresentam os resultados obtidos através do procedimento tradicional baseado exclusivamente na redução do valor de ‘Match Quality” (MQ_{WU}). A figura 81 ilustra a comparação do procedimento proposto (DK) com o procedimento tradicional. Nota-se na figura 81 que o procedimento proposto (DK) apresentou redução dos valores de “Match Quality” (MQ_{WU}).

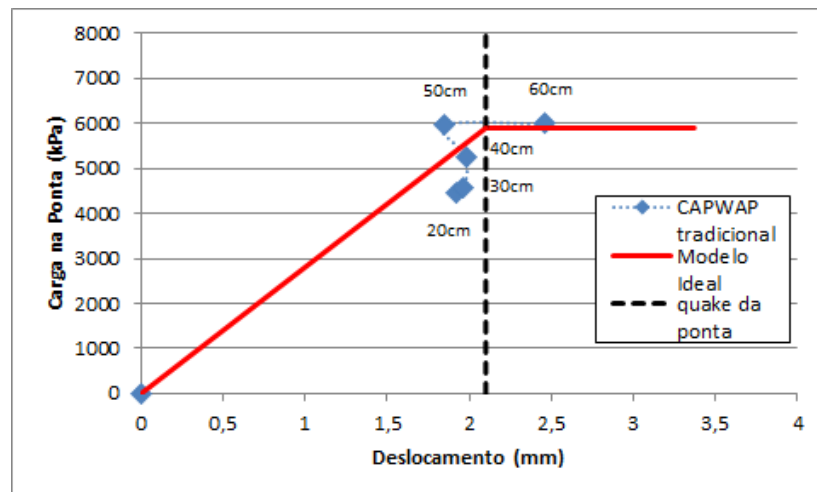
Figura 81 - Redução dos valores de "Match Quality" (MQ_{WU}) (Estaca E53 – Jacareí)



O procedimento proposto (figura 78) apresentou melhor definição do parâmetro R da Segunda Relação de Cambefort em relação ao procedimento tradicional (figura 82). Nota-se que no procedimento tradicional foi possível realizar análise CAPWAP no golpe de altura de queda de 50cm com menor valor de quake da ponta em relação aos golpes de menores alturas de queda. Isso demonstra que,

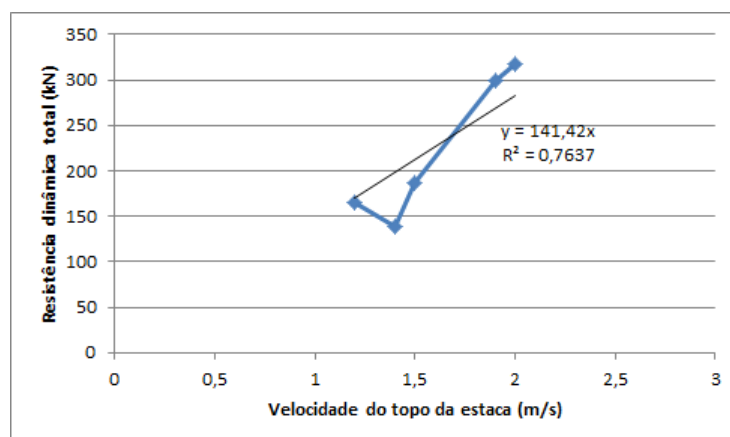
apesar de resolver a teoria da equação da onda através da avaliação do “Match Quality” da curva “Wave Up” (MQ_{WU}), o procedimento tradicional não contemplou “significado físico”. Além disso os valores de quake do fuste e distribuição do atrito lateral foram diferentes para cada golpe analisado com altura de queda crescente.

Figura 82 - Segunda Relação de Cambefort do procedimento tradicional (Estaca E53 – Jacareí)



O procedimento proposto (ver figura 73) também apresentou melhor coeficiente de correlação R^2 (0,8237) na relação entre resistência dinâmica total (atrito lateral médio e resistência de ponta) e velocidade máxima do topo em relação ao procedimento tradicional, que obteve coeficiente de correlação R^2 de 0,7637 (figura 83).

Figura 83 – Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total e a velocidade máxima do topo – procedimento tradicional (Estaca E53 – Jacareí)

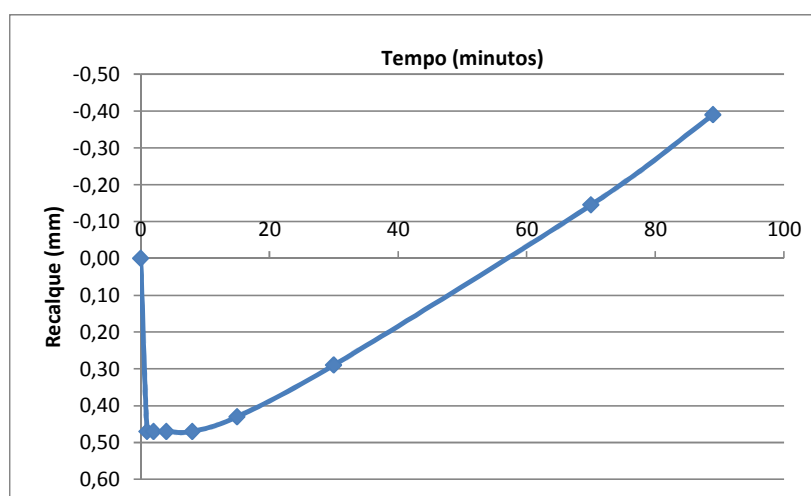


Na estaca E53 de seção $\phi 33\text{cm}$ foi realizado um CEPM de 40kN após a realização do ensaio dinâmico (recalque de 0,47mm). Foi verificado um recalque maior em relação à estaca E49 de seção 20x20cm (recalque de 0,40mm), em que o CEPM foi realizado antes do ensaio dinâmico. Na realização do CEPM na estaca E53 verificou-se que os recalques se estabilizaram aos 8 minutos. A partir dos 15 minutos a estaca começou a “subir”, apresentando recalques “negativos” a partir dos 70 minutos. A tabela 21 e a figura 78 indicam a evolução do recalque com o peso do martelo até 89 minutos.

Tabela 21 – Recalque para o peso do martelo de 40kN (Estaca E53 – Jacareí)

L1 (mm)	L2 (mm)	tempo	Δt (min)	Ym (mm)
6,82	6,70	11:43	0	0,00
6,42	6,16	11:44	1	0,47
6,42	6,16	11:45	2	0,47
6,42	6,16	11:47	4	0,47
6,42	6,16	11:51	8	0,47
6,42	6,24	11:58	15	0,43
6,52	6,42	12:13	30	0,29
6,93	6,88	12:53	70	-0,15
7,17	7,13	13:12	89	-0,39

Figura 84 – Recalque para o peso do martelo (Estaca E53 – Jacareí)



Uma explicação para a ocorrência de recalques “negativos” é que após a

realização do ensaio dinâmico surgiu uma carga aprisionada na ponta da estaca e o recalque no descarregamento não havia estabilizado. Mesmo com a aplicação de uma carga com o peso do martelo a resultante das forças é no sentido “negativo” do eixo dos recalques, indicando que a carga aprisionada na ponta é superior ao peso do martelo. Assim o peso do martelo pode ser definido como um limite inferior da carga residual aprisionada na ponta da estaca (40kN).

Há uma profundidade denominada linha neutra, separando o atrito negativo do positivo. Ao realizar a prova de carga, o atrito negativo é revertido para positivo e a capacidade de carga total (atrito lateral e carga de ponta) não é alterada. Os resultados dessas estacas que sofreram influência do fenômeno de atrito negativo comprovam a hipótese de Fellenius (1988) de que o fenômeno de atrito negativo não deve reduzir a capacidade de carga da estaca durante um ensaio (PCE ou ECD).

Para comprovação do limite inferior da tensão residual definido acima, foi realizada, na estaca E53, análise CAPWAP com a opção “Residual Stress Analysis” (RSA), que revelou um valor de carga aprisionada na ponta de 97,1kN, confirmando o limite inferior da carga residual de 40 kN obtido através do CEPMP.

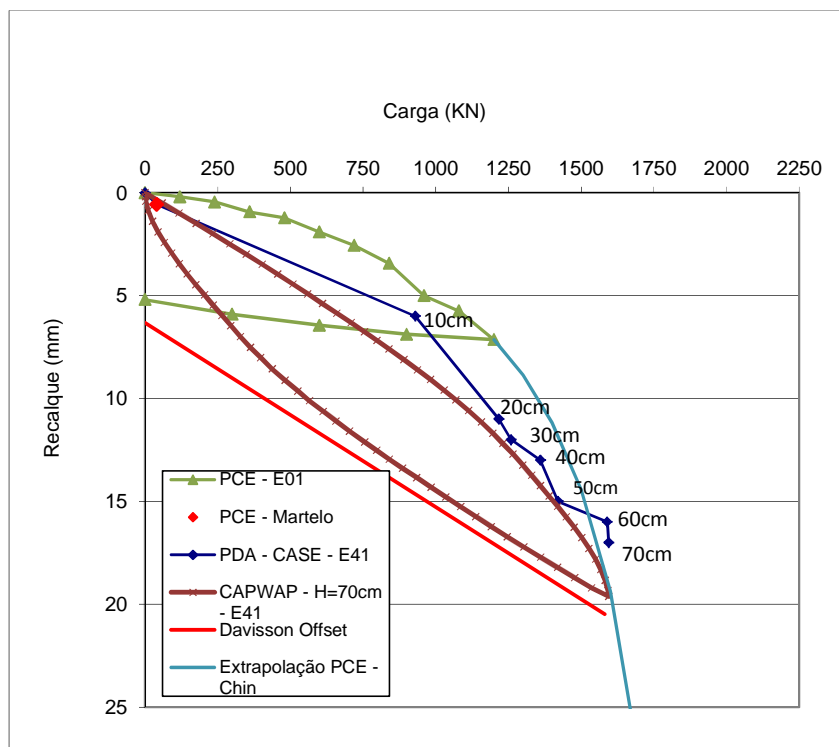
5.1.3 - Correlação entre as estacas E01 (PCE) e E41 (ECD) de seção ϕ 33cm

Na estaca E41 de seção ϕ 33cm (ver Tabela 11) foi realizado carregamento estático com o peso próprio do martelo (CEPM) de 40kN após a realização do ensaio dinâmico (recalque de 0,57mm). Foi verificado um recalque maior em relação à estaca E49 de seção 20x20cm (recalque de 0,40mm); nesta estaca o CEPMP foi realizado antes do ensaio dinâmico.

O ensaio dinâmico foi interrompido visando não causar danos estruturais à estaca ao aplicar golpes com maior energia. Os resultados dos Métodos CASE, CAPWAP e prova de carga estática estão indicados na figura 85. A prova de carga estática foi extrapolada segundo o Método de Chin.

Na estaca E01, de seção transversal ϕ 33cm (ver Tabelas 8 e 9), foi realizada prova de carga estática. As estacas E01 e E41 estão localizadas a cerca de 40m de distância entre elas.

Figura 85 – Correlação entre PCE x CAPWAP x Case (Estaca E41 - Jacareí)



5.1.3.1 – Análise para altura de queda de 70cm

A análise CAPWAP que apresentou melhor “match quality” (MQ_{WU}), assim como melhor “match quality de recalques” (MQ_R) foi realizada utilizando quake do fuste de 2,033mm. As figuras 86 e 87 ilustram a influência do quake do fuste nos recalques calculados pelo CAPWAP. A figura 86 é uma ampliação do trecho inicial da figura 87.

Figura 86 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E41 - Jacareí)

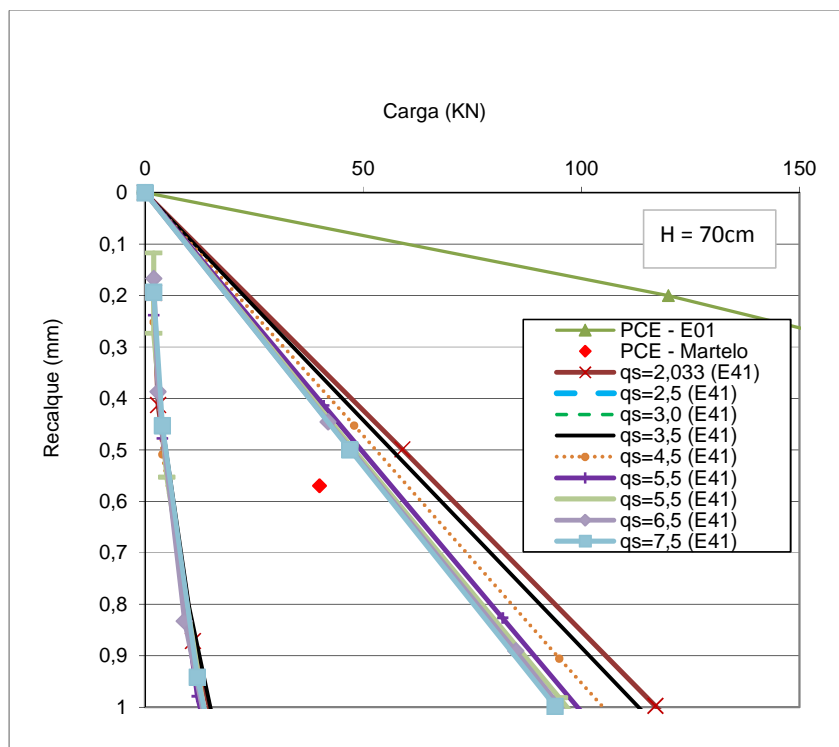
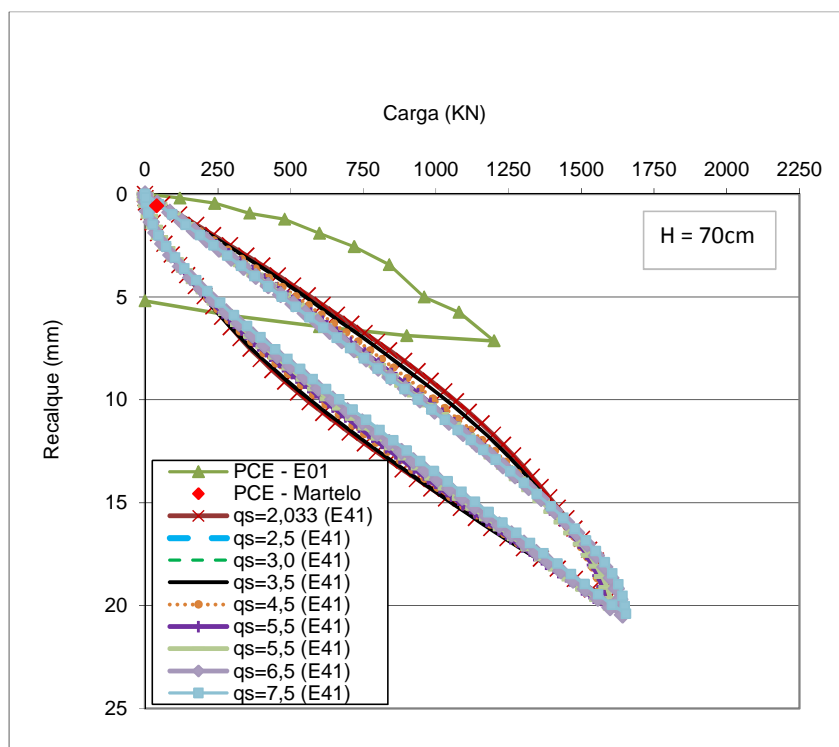


Figura 87 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E41 - Jacareí)



Nota-se que o recalque no trecho inicial da curva é diretamente proporcional

ao quake do fuste da estaca, conforme previsto pelo modelo de Smith e pelas Relações de Cambefort. A solução usando quake do fuste de 2,033mm foi a que mais se aproximou do recalque da prova de carga estática. A figura 88 ilustra a comparação dos resultados obtidos com melhor “match quality de recalques” ($q_s=2,033\text{mm}$) e pior “match quality de recalques” ($q_s=7,5\text{mm}$). Nota-se na tabela 22 que o “match quality” da curva “Wave Up” (MQ_{WU}) é satisfatório para os dois casos e a carga mobilizada foi praticamente a mesma.

Figura 88 – Influência do quake do fuste da curva carga-recalque considerando melhor MQR ($q_s=2,033\text{mm}$) e pior MQR ($q_s=7,5\text{mm}$) (Estaca E41 - Jacareí)

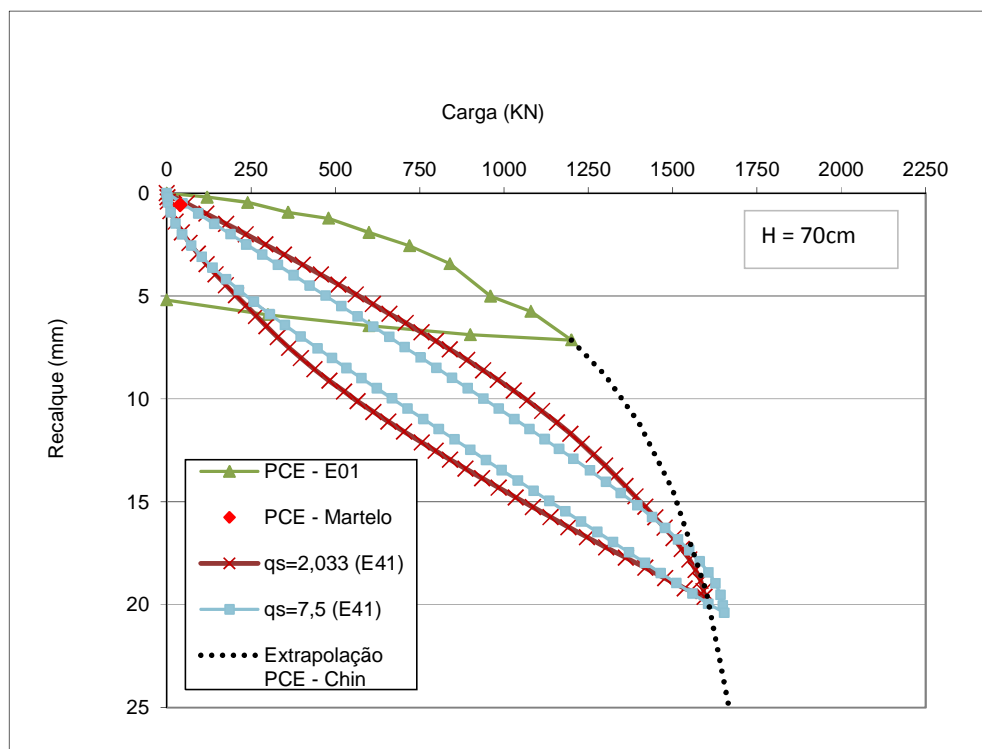


Tabela 22 – Resultados do CAPWAP com diferentes valores de q_s (Estaca E41 – Jacareí)

Análise	MQ_R	MQ_{wu}	J_c	RMX (kN)	Atrito (kN)	Ponta (kN)	SS (s/m)	ST (s/m)	qt (mm)
$q_s=2,033$	497	1,52	0,78	1595	944	651	0,690	0,576	4,871
$q_s=2,5$	529	1,79	0,81	1581	931	650	0,761	0,704	4,989
$q_s=3,0$	562	1,95	0,86	1554	894	660	0,769	0,783	5,044
$q_s=3,5$	577	2,01	0,83	1569	918	651	0,759	0,777	5,082
$q_s=4,5$	618	2,13	0,80	1585	921	664	0,777	0,778	5,341
$q_s=5,5$	638	2,13	0,76	1604	892	712	0,761	0,724	5,468
$q_s=6,5$	646	2,19	0,68	1642	949	692	0,774	0,721	5,627
$q_s=7,5$	652	2,24	0,66	1654	969	685	0,788	0,706	5,660

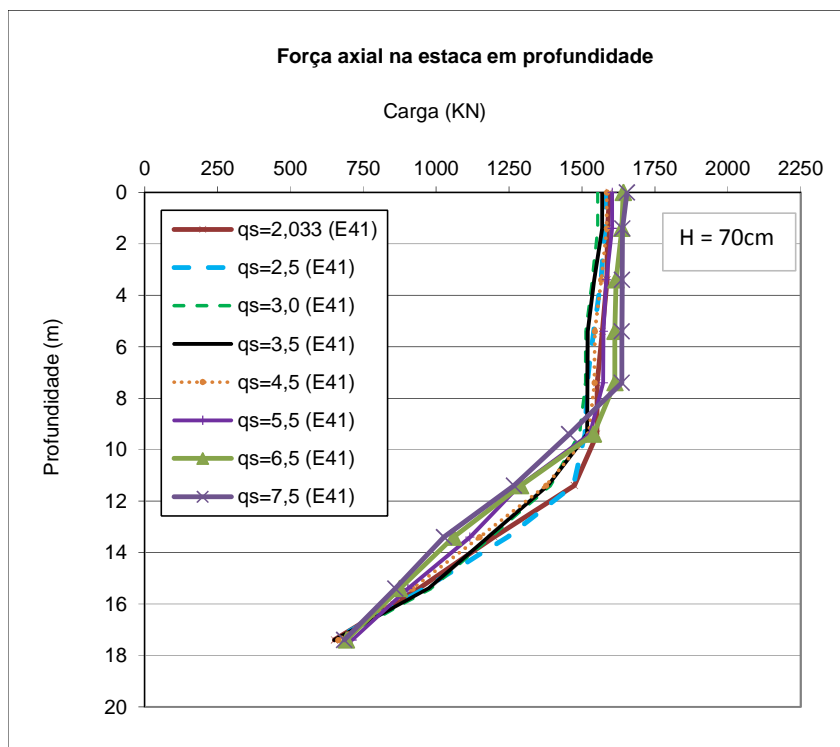
A tabela 22 permite comparar os resultados obtidos para diferentes valores de quake do fuste. Observa-se que a solução utilizando quake do fuste de 2,033mm foi a que apresentou menor “match quality” (MQ_{WU}) assim como menor “match quality de recalques” (MQ_R). As análises realizadas utilizando valores de q_s maiores (a partir de $q_s=4,5\text{mm}$) indicaram valores de quake do fuste decrescentes com a profundidade, indicando que o atrito lateral “não se esgotou”. A extrapolação do atrito lateral através do modelo elasto-plástico ideal indicaria valor de capacidade de carga superior à da prova de carga estática, mostrando que valores de q_s superiores à 4,5mm não apresentam significado físico, apesar de matematicamente resolverem a equação da onda.

A realização de um carregamento estático com o peso próprio do martelo (CEPM) após o ensaio dinâmico costuma apresentar um recalque “ligeiramente” maior do que se o mesmo fosse realizado antes do ensaio dinâmico. Na figura 86 nota-se que o recalque do peso próprio do martelo superou os recalques de todas as análises, inclusive a análise com $q_s=7,5\text{mm}$, indicando uma possível influência de tensões residuais, conforme será discutido adiante.

A utilização de quake do fuste menores que o valor utilizado (2,033mm) aproximaria a curva do CAPWAP da prova de carga estática, porém o “match quality” (MQ_{WU}) pioraria. Isso significa que o provável valor do quake é o valor utilizado (2,033mm).

A figura 89 ilustra variações da força axial em profundidade para os diversos valores de quake do fuste. Nota-se que qualitativamente há uma concordância na distribuição do atrito lateral indicando maiores valores de atrito unitário nos últimos elementos, consistente com as sondagens (Anexo A) porém, quantitativamente há pequenas variações na distribuição do atrito lateral para cada valor de quake do fuste adotado. As cargas de ponta da estaca para as diferentes análises com diferentes valores de quake do fuste estão muito próximas. Os valores de “match quality” (MQ_{WU}) são satisfatórios para todas as análises com diferentes valores de quake do fuste.

Figura 89 – Variações da força axial em profundidade para diversos valores de quake do fuste (Estaca E41 – Jacareí)



As diferentes análises CAPWAP revelaram capacidades de carga muito próximas, apresentando também valores de J_c próximos. Isso significa que a curva RMX-DMX do Método Case deve ser parecida para essas diferentes análises CAPWAP, sendo portanto independente do operador que executa a análise CAPWAP.

Através das figuras 86 e 87 é possível verificar a variabilidade dos resultados do CAPWAP, conforme apresentado por Fellenius (1988) e Edde (1991). Nota-se que os valores de capacidade de carga são muito próximos, assim como os valores de "match quality" da curva "wave up" (MQ_{WU}); entretanto os valores de MQ_R aumentam à medida que os valores de quake se distanciam do provável valor real ($qs=2,033mm$).

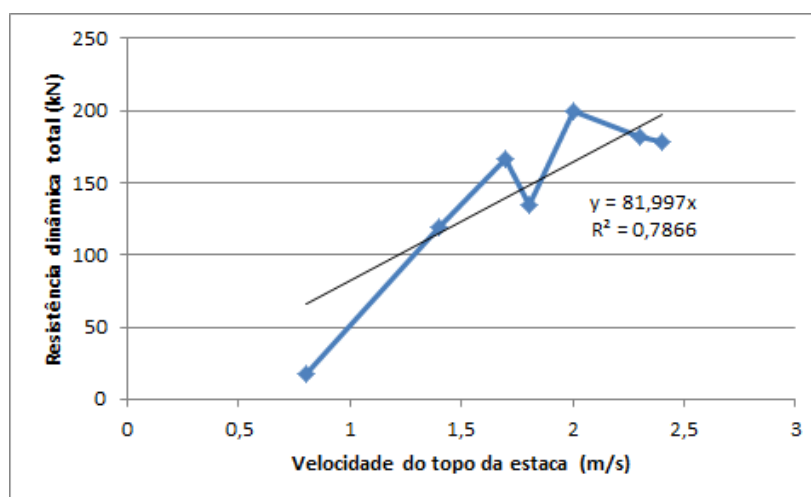
5.1.3.2 – Análise para altura de queda crescente

Todos os golpes aplicados no ensaio dinâmico foram submetidos às análises

CAPWAP, utilizando como referência os parâmetros obtidos pela análise do golpe com altura de queda de 70cm. Foram mantidas as seguintes hipóteses para a realização da análise dos demais golpes:

- O quake do fuste foi o mesmo para todas as análises, exceto nos golpes de menor energia onde não se mobilizou todo o atrito lateral nos últimos elementos de solo (trecho 3-4 das Relações de Cambefort). Neste caso o quake diminui proporcionalmente com a carga;
- A partir do golpe onde houve esgotamento do atrito lateral (50cm), ponto 4 das Relações de Cambefort, todo acréscimo de capacidade de carga é exclusivamente devido à carga de ponta; neste caso o acréscimo de carga de ponta é proporcional ao acréscimo do quake da ponta da estaca (segunda condição de contorno), segundo o modelo elasto-plástico ideal, até atingir a ruptura do sistema (ponto 5 das Relações de Cambefort);
- A resistência dinâmica é proporcional à velocidade do topo da estaca (primeira condição de contorno), como ilustra a figura 90, que por sua vez é proporcional à energia aplicada, assim como os valores de Jc (Case Damping Factor).

Figura 90 - Relação entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca (Estaca E41 – Jacareí)



A figura 91 ilustra a evolução das curvas carga-recalque com o golpe aplicado. No Anexo C estão os gráficos dessas curvas para cada golpe analisado. O

limite de Davisson não foi atingido no ensaio de carregamento dinâmico. Para a realização da comparação entre o ensaio dinâmico e a prova de carga estática foi utilizado o Método de Davisson Modificado de forma que a reta atingisse o recalque máximo da simulação de prova de carga do CAPWAP, revelando uma carga de 1595 kN, referente à altura de queda de 70cm. O Método de Davisson Modificado atingiu o mesmo valor na curva RMX-DMX. A curva da prova de carga estática foi extrapolada através do Método de Chin (método que melhor se ajustou à curva), tendo-se obtido o valor de 1614 kN através do Método de Davisson Modificado. A variação da capacidade de carga obtida em relação à prova de carga estática foi de -1,2% para o CAPWAP e para curva RMX-DMX. Como já foi mencionado, segundo Rausche (1994), os ensaios dinâmicos devem ser sempre comparados com provas de carga estáticas através do limite de Davisson.

A análise da curva RMX-DMX indica que o ensaio dinâmico não atingiu a ruptura. Caso o ensaio fosse prosseguido, aplicando maiores energias, provavelmente o quake da ponta da estaca seria maior. O resultado seria um recalque maior na curva de simulação de prova de carga do CAPWAP, possibilitando a comparação com limite de Davisson (sem modificação).

A estaca E01, submetida à PCE, sofreu maior influência do fenômeno de atrito negativo em função do tempo decorrido entre a cravação da estaca e sua realização (ver tabela 12). Entretanto a capacidade de carga da estaca E01, submetida à PCE, não sofreu redução em relação à estaca E41, em que foi realizado o ensaio dinâmico. Os resultados obtidos foram muito próximos (desvio de -1,2%). Uma explicação para o ocorrido é que fenômeno de atrito negativo gera uma tensão residual na estaca sem alterar a capacidade de carga (item 2.7).

A figura 92 ilustra a variação da força axial em profundidade para cada um dos golpes analisados. Nota-se que a partir do golpe de altura 50cm as curvas são paralelas indicando que houve esgotamento do atrito lateral. A partir deste ponto todo acréscimo de carga é devido exclusivamente à reação de ponta.

Figura 91 – Evolução das curvas carga-recalque com o golpe aplicado na estaca E41, comparando com a estaca E01 (PCE) - Jacareí

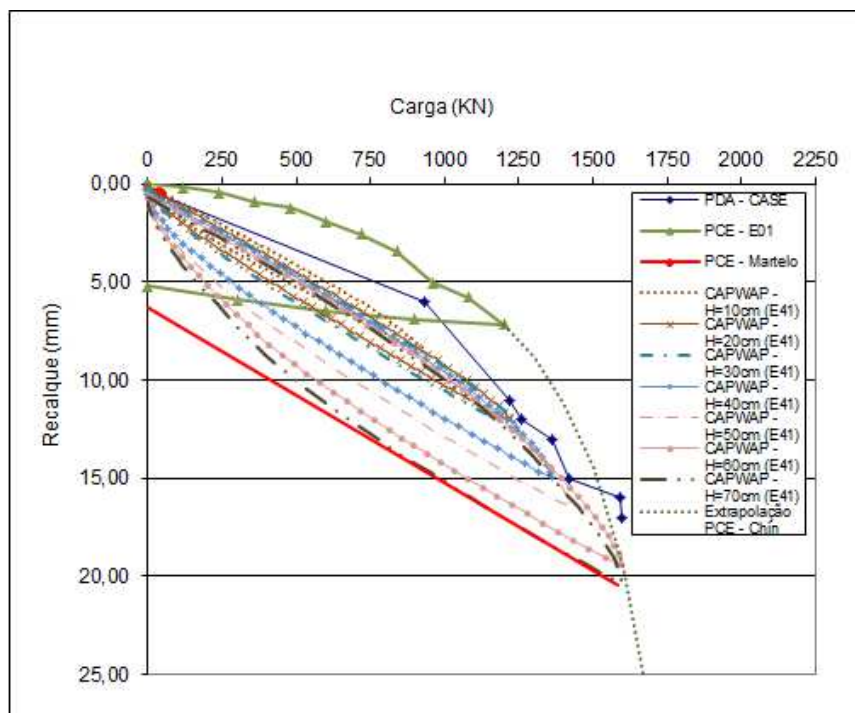
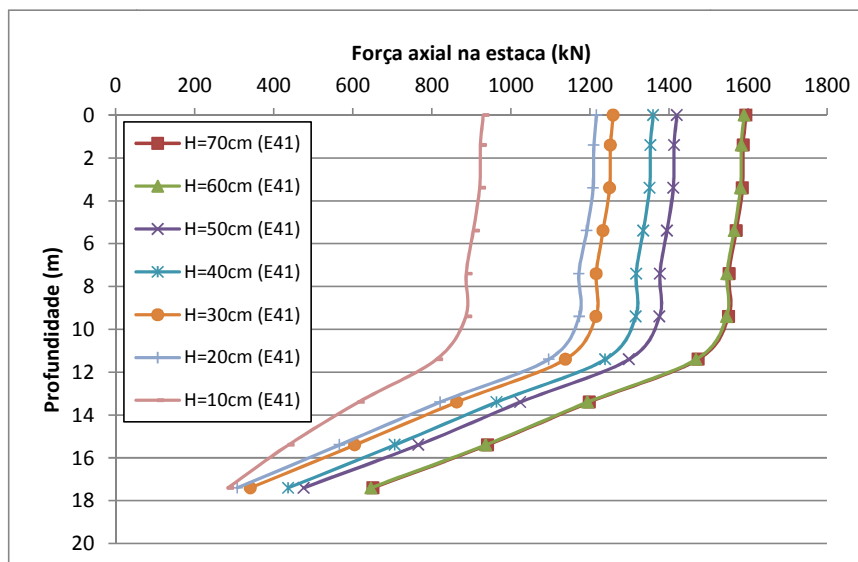
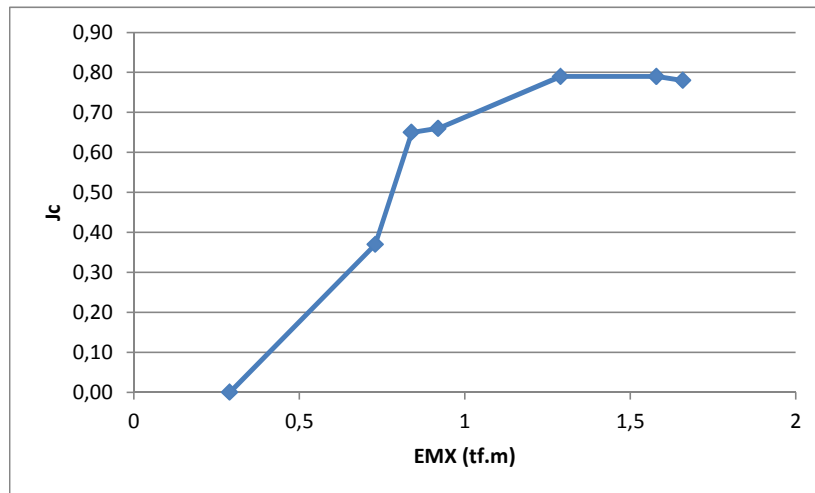


Figura 92 – Variação da força axial em profundidade (Estaca E41 – Jacareí)



A figura 93 ilustra a evolução do J_c (Case Damping Factor) em função da energia aplicada. Notam-se valores menores de J_c para os golpes de menor energia em função de menores resistências dinâmicas mobilizadas. A curva RMX-DMX do Método Case, indicada nas figuras anteriores, foi feita utilizando os valores de J_c indicados na figura 93.

Figura 93 – Evolução do J_c com a energia do golpe aplicado (Estaca E41 – Jacareí)



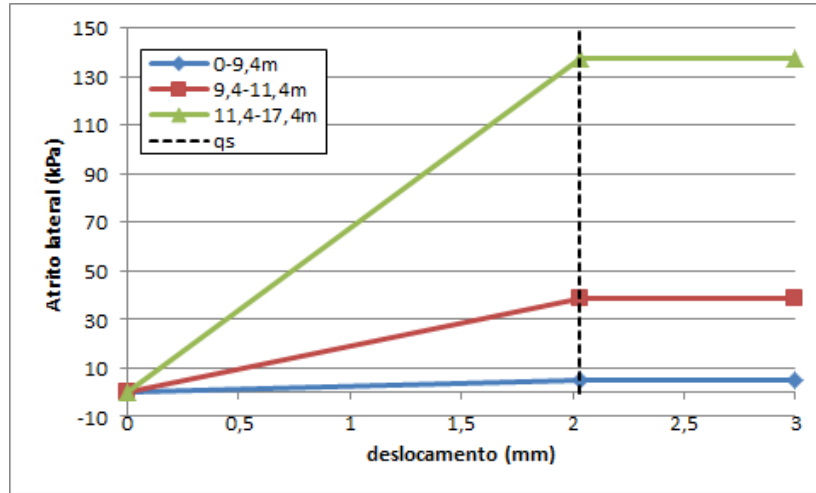
A tabela 23 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os golpes analisados na estaca E41 no ECD com energia crescente.

Tabela 23 – Resumo dos resultados obtidos no ECD com energia crescente (Estaca E41 – Jacareí)

H (cm)	RMX (kN)	MQ_{WU}	MQ_R	J_c	Atrito (kN)	Ponta (kN)	SS (s/m)	ST (s/m)	Q_s (mm)	Q_t (mm)
10	930	2,65	431	0,00	646	284	1,509	1,521	2,033	0,770
20	1217	1,74	476	0,37	909	308	1,193	1,284	2,033	1,503
30	1259	1,79	476	0,65	918	341	0,970	1,294	2,033	1,593
40	1360	2,36	487	0,66	923	437	0,856	1,313	2,033	2,608
50	1420	2,17	493	0,79	944	476	0,854	1,020	2,033	3,250
60	1590	1,80	492	0,79	944	646	0,840	0,702	2,033	4,270
70	1595	1,52	497	0,78	944	651	0,690	0,576	2,033	4,871

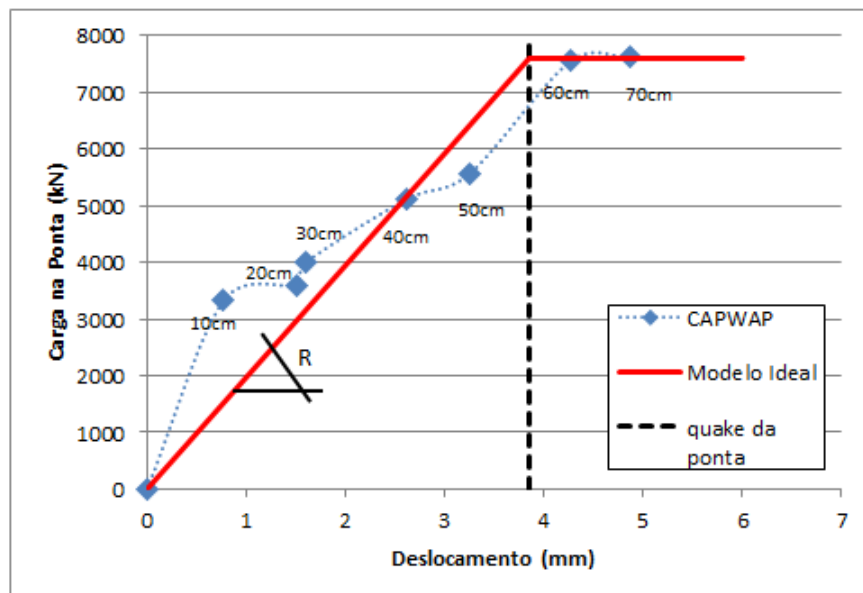
A figura 94 ilustra as variações do atrito lateral para cada profundidade (Primeira Relação de Cambefort). Percebe-se que para valores de deslocamento maiores que o quake do fuste ocorre o esgotamento do atrito lateral para cada profundidade.

Figura 94 – Variações do atrito lateral – Primeira Relação de Cambefort (Estaca E41 – Jacareí)



A figura 95 ilustra o comportamento da ponta da estaca (Segunda Relação de Cambefort). Percebe-se que os resultados obtidos nas análises CAPWAP para cada golpe estão próximos do modelo elasto-plástico ideal.

Figura 95 – Comportamento da ponta da estaca – Segunda Relação de Cambefort (Estaca E41 – Jacareí)



Os resultados do CAPWAP apresentados somente foram possíveis graças a uma boa qualidade dos sinais de força e velocidade coletados. A aplicação de

golpes excêntricos faz com que o sinal de força x tempo coletado apresente diferenças entre os dois transdutores de deformação. Consequentemente podem haver diferenças no formato da curva “wave up” em golpes consecutivos, apresentando uma “falsa” aparência de que a distribuição do atrito lateral mudou nos diferentes golpes aplicados.

Nos primeiros golpes de menor energia a curva “Wave Up” apresenta uma “falsa” aparência de que há um aumento do atrito lateral nos primeiros metros. Analisando de forma isolada cada um desses golpes de menor energia chega-se a esse equívoco, entretanto ao analisar todos os golpes de forma global adotando as hipóteses listadas anteriormente, conclui-se que o aumento da força na curva “Wave Up” nos primeiros instantes é devido ao efeito de “damping”. De fato, conforme indicado nas figuras 13 e 14 o trecho inicial da curva “Wave Up” pode ser aumentado através do aumento JS ou SS (damping do fuste) e JT ou ST (damping da ponta), não se trata de um efeito exclusivo de RS (atrito lateral). Outro argumento de que o aumento da curva é devido ao aumento de JS e JT é que caso fosse feito o aumento de RS desses golpes de menor energia e fizessemos a soma dos máximos valores de atrito lateral para cada golpe e da carga máxima de ponta, o resultado obtido excederia o valor obtido pela prova de carga estática, piorando a correlação, além disso a proporcionalidade entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca se manteve (figura 90). As figuras 96 e 97 indicam o aumento de SS e ST nos golpes de menor energia.

Figura 96 – Efeito de SS (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca E41 – Jacareí)

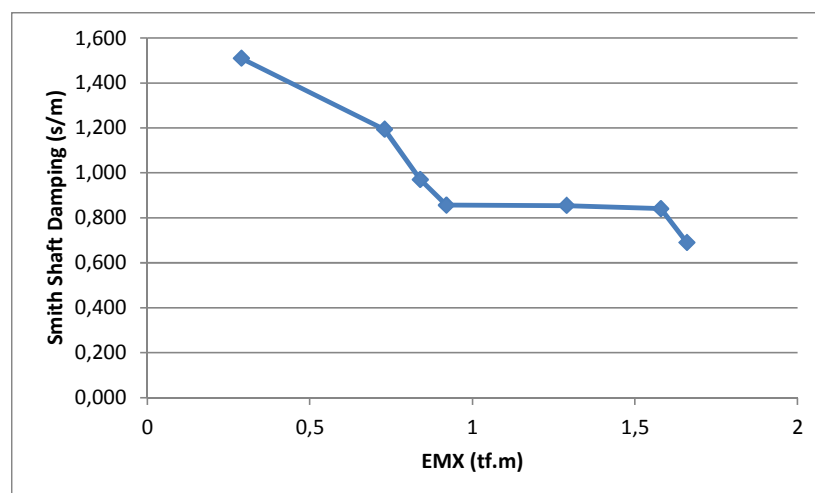
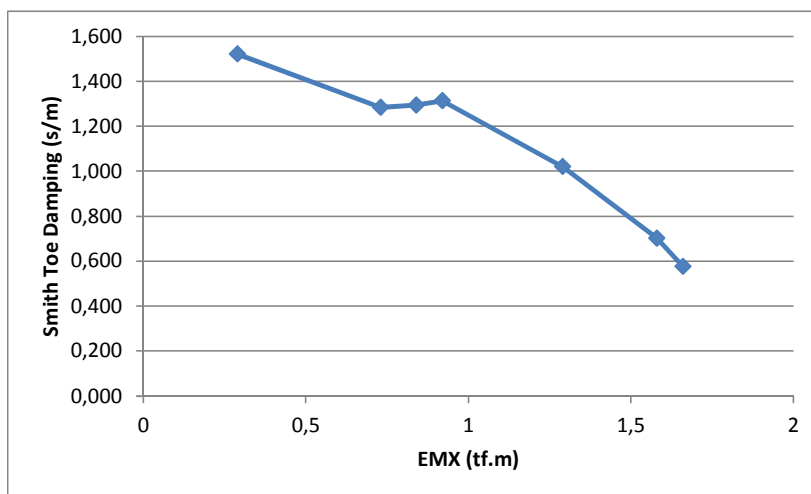
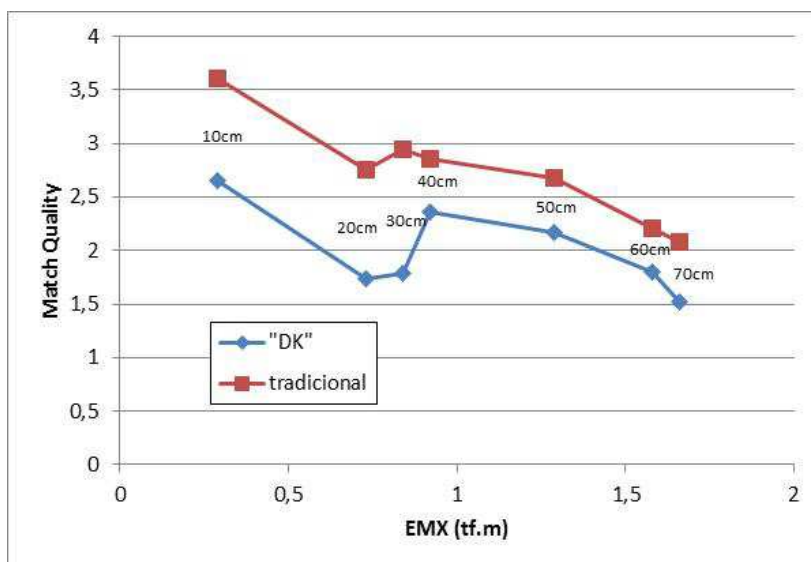


Figura 97 - Efeito de ST (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca E41 – Jacareí)



As figuras 98 a 100 apresentam os resultados obtidos através do procedimento tradicional baseado exclusivamente na redução do valor de “Match Quality” (MQ_{WU}). A figura 98 ilustra a comparação do procedimento proposto (DK) com o procedimento tradicional. Nota-se que o procedimento proposto (DK) apresentou redução dos valores de “Match Quality” (MQ_{WU}).

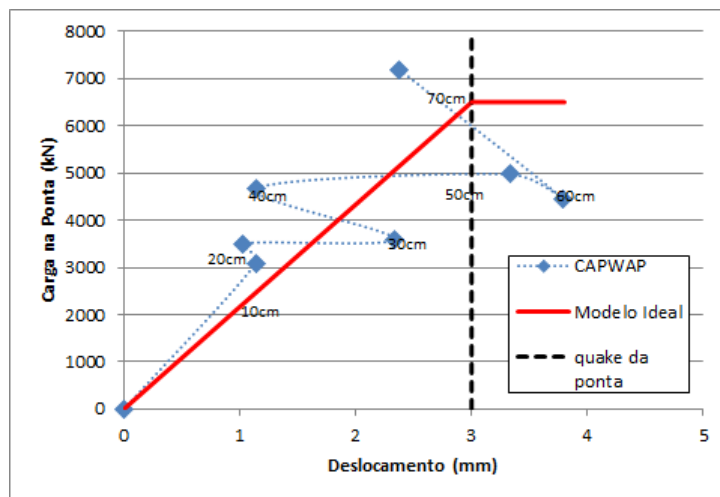
Figura 98 - Redução dos valores de "Match Quality" (MQ_{WU}) (Estaca E41 – Jacareí)



O procedimento proposto (ver figura 95) apresentou melhor definição do parâmetro R da Segunda Relação de Cambefort em relação ao procedimento tradicional (figura 99). Nota-se que no procedimento tradicional foi possível realizar

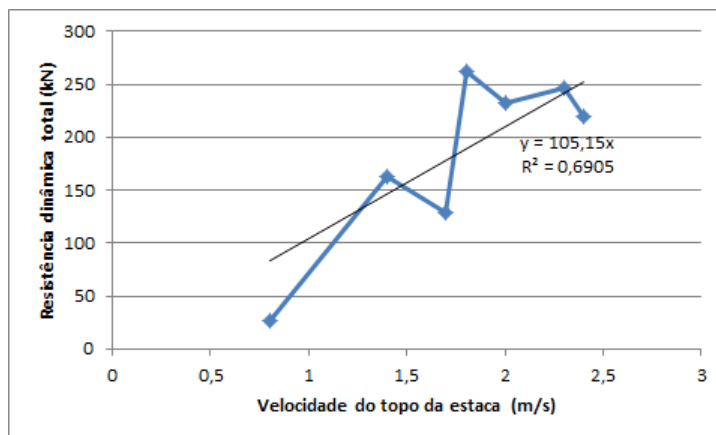
análises CAPWAP com maior resistência de ponta e menor quake da ponta em relação aos golpes anteriores de alturas de queda de 40cm e 70cm, indicando que no procedimento tradicional não se manteve constante o parâmetro R da Segunda Relação de Cambefort. Isso demonstra que, apesar de resolver a teoria da equação da onda através da avaliação do “Match Quality” da curva “Wave Up” (MQ_{WU}), o procedimento tradicional não contemplou “significado físico”. Além disso os valores de quake do fuste e a distribuição do atrito lateral foram diferentes para cada golpe analisado com altura de queda crescente.

Figura 99 - Segunda relação de Cambefort do procedimento tradicional (Estaca E41 – Jacareí)



O procedimento proposto (ver figura 90) também apresentou melhor coeficiente de correlação R^2 (0,7866) na relação entre resistência dinâmica total (atrito lateral médio e resistência de ponta) e velocidade máxima do topo em relação ao procedimento tradicional, que obteve coeficiente de correlação R^2 de 0,6905 (figura 100).

Figura 100 – Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total e a velocidade máxima do topo – procedimento tradicional (Estaca E41 – Jacareí)

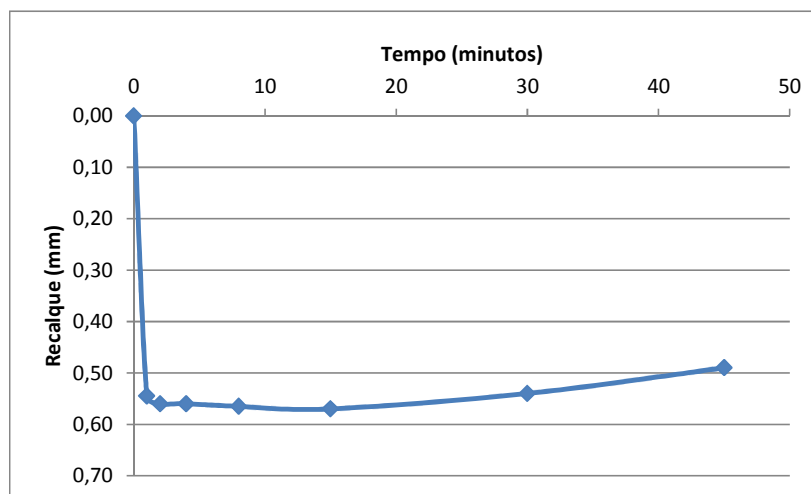


Na estaca E53 de seção $\phi 33\text{cm}$ foi feito um CEPM após a realização do ensaio dinâmico (recalque de 0,47mm). Foi verificado um recalque maior em relação à estaca E49 de seção 20x20cm (recalque de 0,40mm), em que o CEPM foi realizado antes do ensaio dinâmico. O resultado da realização do CEPM após o ensaio dinâmico indicou também que os recalques se estabilizaram aos 4 minutos. Mas a partir dos 30 minutos, a estaca começou a “subir”. A tabela 24 e a figura 101 indicam a evolução do recalque com o peso do martelo até 45 minutos.

Tabela 24 – Recalque para o peso do martelo de 40kN (Estaca E41 – Jacareí)

L1 (mm)	L2 (mm)	tempo	Δt (min)	Ym (mm)
8,25	7,12	17:01	0	0,00
7,75	6,53	17:02	1	0,55
7,73	6,52	17:03	2	0,56
7,73	6,52	17:05	4	0,56
7,73	6,51	17:09	8	0,57
7,72	6,51	17:16	15	0,57
7,74	6,55	17:31	30	0,54
7,79	6,6	17:46	45	0,49

Figura 101 – Recalque para o peso do martelo (Estaca E41 – Jacareí)



Esta estaca não chegou a apresentar recalques “negativos” conforme apresentado na estaca E51, porém apresentou o efeito de a estaca “subir” mesmo com a aplicação de um carregamento estático com o peso do martelo. Uma explicação para a ocorrência da estaca “subir” é que após a realização do ensaio dinâmico surgiu uma carga aprisionada na ponta da estaca e o recalque não havia estabilizado no descarregamento (após a aplicação do último golpe do ensaio dinâmico). Mesmo com a aplicação de uma carga com o peso do martelo a resultante das forças é no sentido “negativo” do eixo dos recalques. Tal constatação indica que a carga aprisionada na ponta é superior ao peso do martelo. Assim o peso do martelo pode ser considerado como um limite inferior da carga residual aprisionada na ponta da estaca (40kN).

Há uma profundidade denominada linha neutra, separando o atrito negativo do positivo. Ao realizar a prova de carga, o atrito negativo é revertido para positivo e a capacidade de carga total (atrito lateral e carga de ponta) não é alterada. Os resultados dessas estacas que sofreram influência do fenômeno de atrito negativo comprovam a hipótese de Fellenius (1988) de que o fenômeno de atrito negativo não deve reduzir a capacidade de carga da estaca durante um ensaios (PCE ou ECD).

Para comprovação do limite inferior da tensão residual definido acima, foi realizada, na estaca E41, análise CAPWAP com a opção “Residual Stress Analysis” (RSA). Obteve-se o valor de carga aprisionada na ponta de 79,6kN, confirmando o limite inferior da carga residual obtida com a prova de carga estática com o peso do

martelo. Nota-se que a velocidade de “subida” da estaca E53 foi menor que a da estaca E51, consistente com a menor carga residual aprisionada na ponta da estaca.

5.2. – Osasco

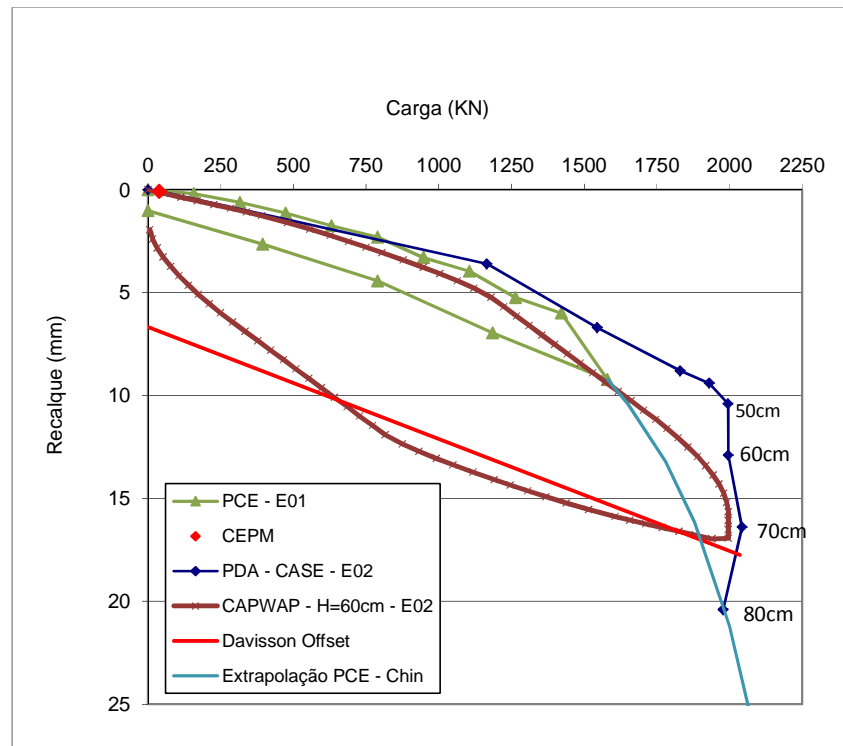
5.2.1 - Correlação entre estacas E01 (PCE) e E02 (ECD) de seção ϕ 38cm

A estaca estudada, E02 de seção transversal ϕ 38cm (ver Tabela 15) foi ensaiada utilizando as seguintes alturas de queda: 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 60cm, 70cm e 80cm. Antes da realização do ensaio dinâmico foi feito um carregamento estático como peso próprio do martelo (CEPM), obtendo um recalque de 0,08mm para uma carga de 40kN.

Na estaca E01, de seção transversal ϕ 38cm (ver Tabelas 12 e 13), foi realizada prova de carga estática. As estacas E01 e E02 estão localizadas a cerca de 10m de distância entre elas.

Segundo o Método Case a partir da altura de 60cm praticamente não houve acréscimos significativos de capacidade de carga, conforme indicado na figura 102. A prova de carga estática foi extrapolada segundo o Método de Chin.

Figura 102 – Correlação entre PCE x CAPWAP x Case (Estaca E02 - Osasco)



5.2.1.1 – Análise para altura de queda de 60cm

A análise CAPWAP que apresentou melhor “match quality” (MQ_{WU}), assim como melhor “match quality de recalques” (MQ_R) foi realizada utilizando o quake do fuste de 0,868mm. Observa-se que este valor é menor que os valores sugeridos no manual do CAPWAP (2006) que variam entre 1,0mm e 7,5mm. As figuras 103 e 104 ilustram a influência do quake do fuste nos recalques calculados pelo CAPWAP. A figura 103 é uma ampliação da figura 104.

Figura 103 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E02 - Osasco)

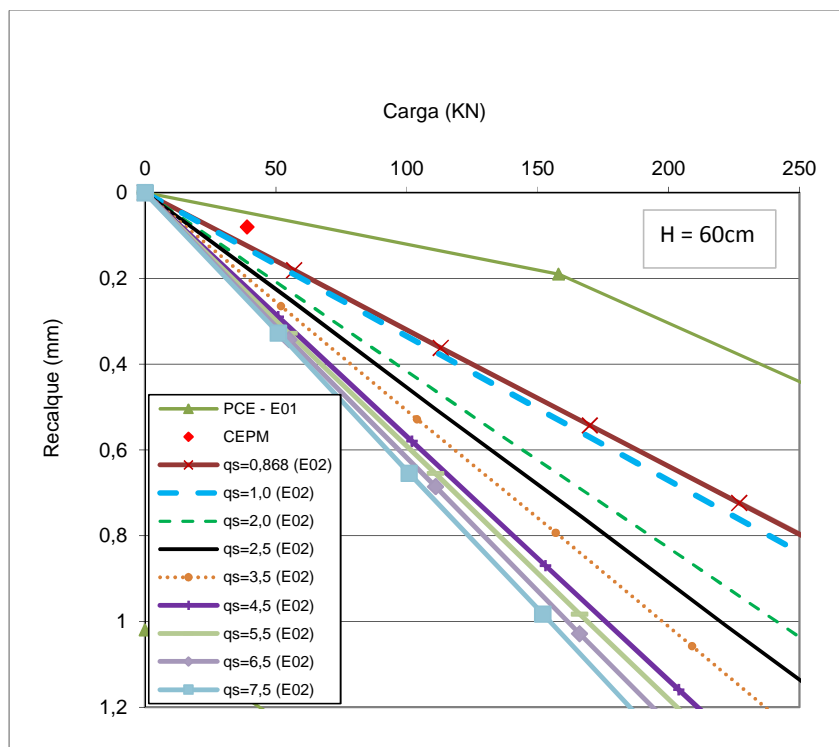
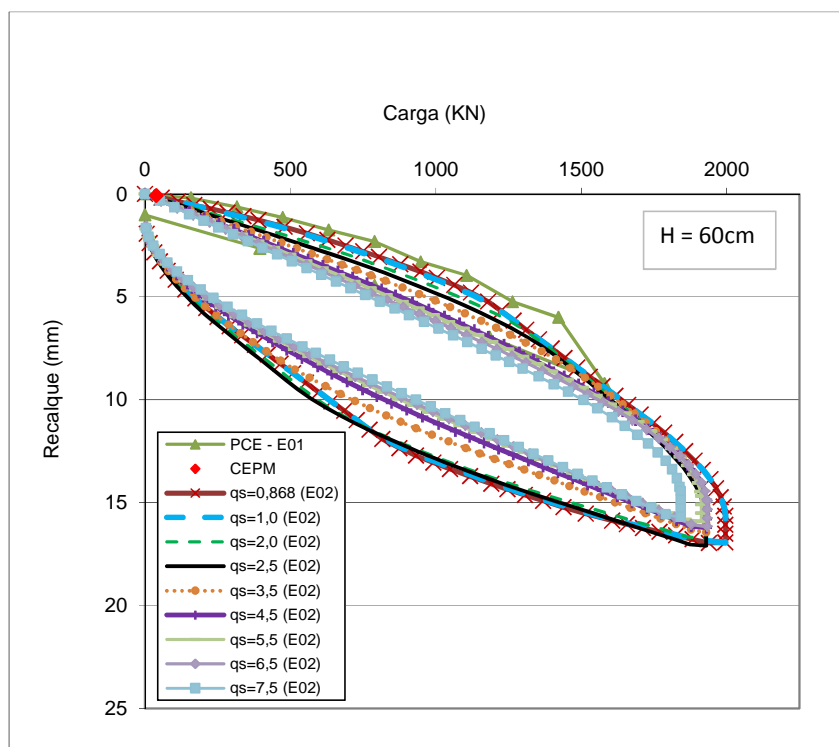


Figura 104 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E02 - Osasco)



Nota-se que o recalque no trecho inicial da curva é diretamente proporcional ao quake do fuste da estaca, conforme previsto pelo modelo de Smith e pelas

Relações de Cambefort. A solução usando quake do fuste de 0,868mm foi a que mais se aproximou do recalque do peso próprio do martelo assim como da curva da prova de carga estática. A figura 105 ilustra a comparação dos resultados obtidos com melhor “match quality de recalques” ($q_s=0,868\text{mm}$) e pior “match quality de recalques” ($q_s=6,5\text{mm}$). Nota-se na tabela 25 que o “match quality” da curva “Wave Up” (MQ_{WU}) são satisfatórios para os dois casos e a capacidade de carga obtida foi praticamente a mesma.

Figura 105 – Influência do quake do fuste da curva carga-recalque considerando melhor MQR ($q_s=0,868\text{mm}$) e pior MQR ($q_s=6,5\text{mm}$) (Jacareí)

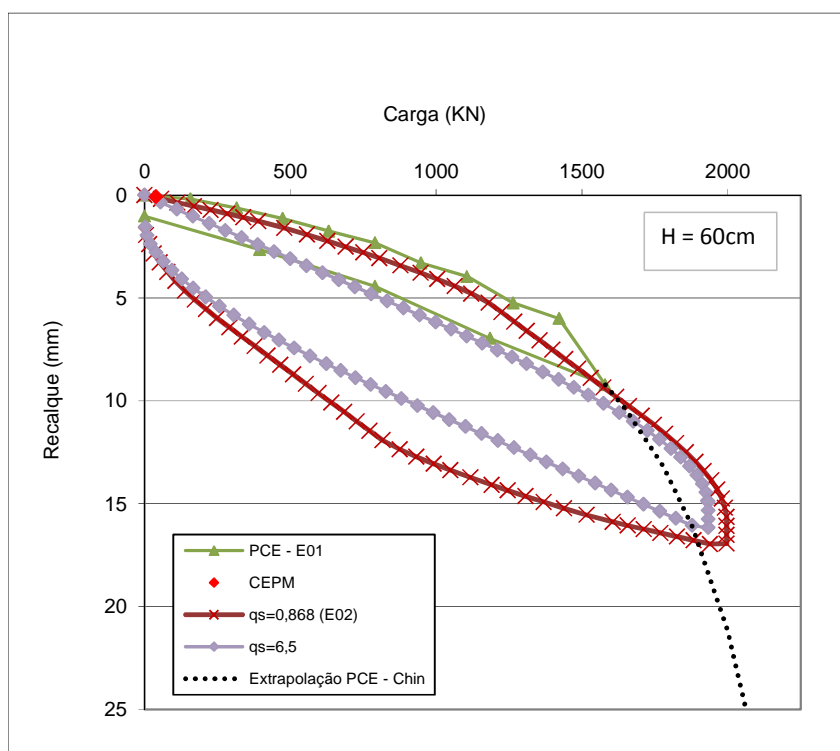


Tabela 25 – Comparação dos resultados com diferentes valores de q_s (Estaca E02 – Osasco)

Análise	MQ_R	MQ_{WU}	J_c	RMX (kN)	Atrito (kN)	Ponta (kN)	SS (s/m)	ST (s/m)	QT (mm)
$q_s=0,868$	107	1,34	0,63	1996	1001	995	0,547	0,550	6,349
$q_s=1,0$	115	1,50	0,63	1996	1001	995	0,522	0,573	6,326
$q_s=2,0$	158	1,64	0,69	1930	1000	930	0,428	0,738	6,527
$q_s=2,5$	183	1,83	0,69	1930	1000	930	0,467	0,789	6,796
$q_s=3,5$	231	1,87	0,69	1930	920	1010	0,541	0,921	6,379
$q_s=4,5$	300	1,89	0,69	1930	710	1220	0,760	0,907	6,162
$q_s=5,5$	319	1,93	0,70	1913	663	1250	0,690	0,918	6,066
$q_s=6,5$	347	2,05	0,68	1933	613	1320	0,764	0,927	6,172
$q_s=7,5$	386	2,01	0,88	1842	493	1348	1,149	0,963	5,932

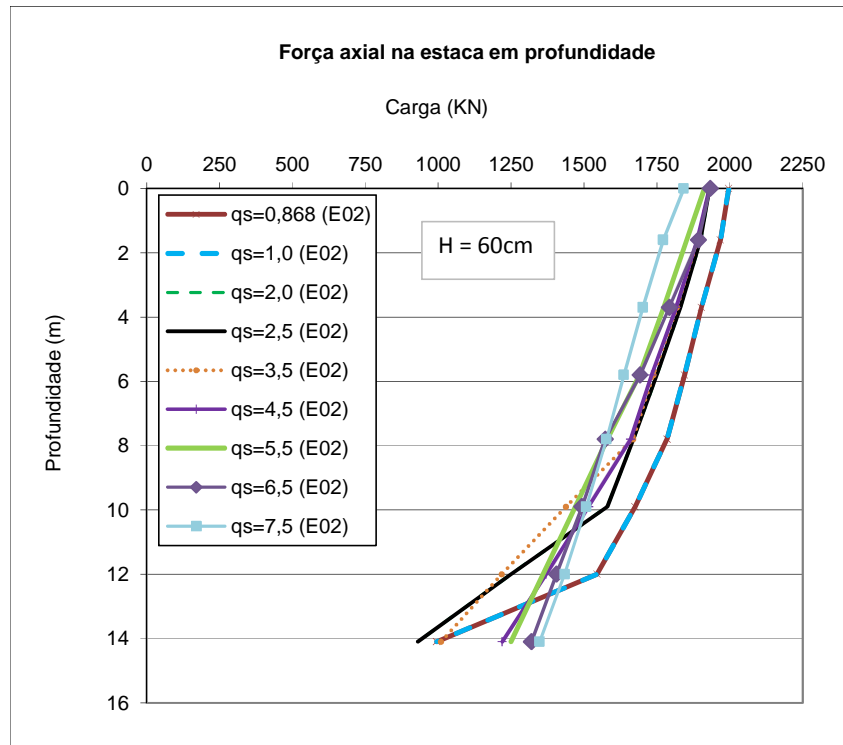
A tabela 25 permite comparar os resultados obtidos para diferentes valores de quake do fuste. Observa-se que a solução utilizando quake do fuste de 0,868mm foi a que apresentou menor “match quality” (MQ_{WU}) assim como menor “match quality de recalques” (MQ_R). As análises realizadas utilizando valores de q_s maiores (a partir de $q_s=5,5\text{mm}$) indicaram valores de quake do fuste decrescentes com a profundidade, indicando que o atrito lateral “não se esgotou”. A extrapolação do atrito lateral através do modelo elasto-plástico ideal levaria a valor de capacidade de carga superior à prova de carga estática, indicando que valores de q_s superiores à 5,5mm não apresentam significado físico, apesar de matematicamente resolverem a equação da onda.

A realização do carregamento estático com o peso próprio do martelo (CEPM) após o ensaio dinâmico costuma apresentar um recalque “ligeiramente” maior do que se o mesmo fosse realizado antes do ensaio dinâmico.

A utilização de quake do fuste menores que o valor utilizado (0,868mm) aproximaria a curva do CAPWAP do ponto medido do peso do martelo, porém o “match quality” (MQ_{WU}) pioraria. Isso significa que o provável valor do quake é o valor utilizado (0,868mm).

A figura 106 ilustra variações da força axial em profundidade para os diversos valores de quake do fuste. Nota-se que qualitativamente há uma pequena diferença na distribuição do atrito lateral indicando maiores valores de atrito unitário nos últimos elementos para valores de q_s até 3,5mm. Entretanto a carga de ponta apresenta maior variação à medida que o valor do quake do fuste se distancia do valor tomado como o mais provável ($q_s=0,868\text{mm}$). As soluções obtidas utilizando q_s entre 4,5mm e 7,5mm se distanciaram no formato da curva axial em profundidade, indicando maior variação na distribuição do atrito lateral em relação aos melhores resultados obtidos (utilizando q_s entre 0,868mm e 3,5mm).

Figura 106 – Variações da força axial em profundidade para diversos valores de quake do fuste (Estaca E02 – Osasco)



As diferentes análises CAPWAP apresentaram capacidades de carga muito próximas, apresentando também valores de J_c próximos. Isso significa que a curva RMX-DMX do Método Case deve ser parecida para essas diferentes análises CAPWAP, sendo portanto independente do operador que execulta a análise CAPWAP.

Através das figuras 103 e 104 é possível verificar a variabilidade dos resultados do CAPWAP, conforme apresentado por Fellenius (1988) e Edde (1991). Nota-se que os valores de capacidade de carga são muito próximos, assim como os valores de “match quality” da curva “wave up” (MQ_{WU}); entretanto os valores de MQ_R aumentam à medida que os valores de quake se distanciam do provável valor real ($qs=0868mm$).

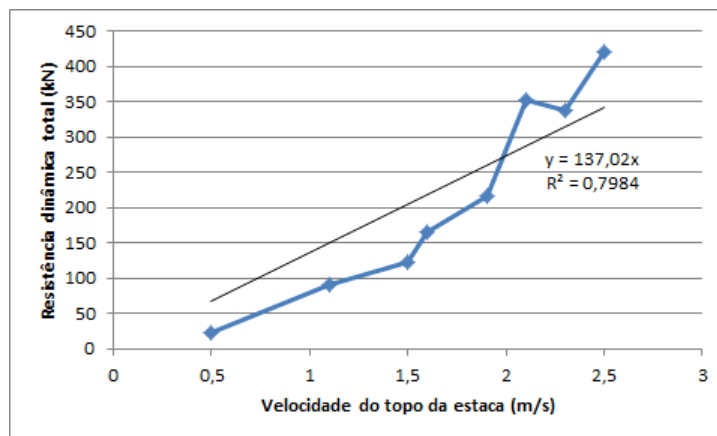
5.2.1.2 – Análise para altura de queda crescente

Todos os golpes aplicados no ensaio dinâmico foram submetidos à análise CAPWAP, utilizando como referência os parâmetros obtidos pela análise do golpe

com altura de queda de 60cm. Foram mantidas as seguintes hipóteses para a realização da análise dos demais golpes:

- O quake do fuste foi o mesmo para todas as análises, exceto nos golpes de menor energia onde não se mobilizou todo o atrito lateral nos últimos elementos de solo (trecho 3-4 das Relações de Cambefort). Neste caso o quake diminui proporcionalmente com a carga;
- A partir do golpe onde houve esgotamento do atrito lateral (30cm), ponto 4 das Relações de Cambefort, todo acréscimo de capacidade de carga é exclusivamente devido à carga de ponta; neste caso o acréscimo de carga de ponta é proporcional ao acréscimo do quake da ponta da estaca (segunda condição de contorno), segundo o modelo elasto-plástico ideal, até atingir a ruptura do sistema (ponto 5 das Relações de Cambefort);
- A resistência dinâmica é proporcional à velocidade do topo da estaca (primeira condição de contorno), ilustrada na figura 107, que por sua vez é proporcional à energia aplicada, assim como os valores de Jc (Case Damping Factor).

Figura 107 – Relação entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca (Estaca E02 – Osasco)



A figura 108 ilustra a evolução das curvas carga-recalque com o golpe aplicado. No Anexo C estão os gráficos da evolução da capacidade de carga para cada golpe analisado. O limite de Davisson foi atingido para a carga de 1990 kN, referente à altura de queda de 60cm, segundo a curva do CAPWAP, enquanto que na curva RMX-DMX o valor obtido foi de 2035kN. A curva da prova de carga estática

foi extrapolada através do Método de Chin (método que melhor se ajustou à curva), tendo-se obtido o valor de 1905 kN através do limite de Davisson. A variação da capacidade de carga obtida em relação à prova de carga estática foi de +4,5% para o CAPWAP, enquanto que pela curva RMX-DMX foi de +6,8%. Segundo Rausche, (1994), os ensaios dinâmicos devem ser sempre comparados com provas de carga estáticas através do limite de Davisson.

A figura 109 ilustra a variação da força axial em profundidade para cada um dos golpes analisados. Nota-se que a partir do golpe de altura 30cm as curvas são paralelas indicando que houve esgotamento do atrito lateral. A partir deste ponto todo acréscimo de carga é exclusivamente devido ao acréscimo da reação de ponta. No último golpe aplicado (80cm) houve perda do atrito lateral em função da aplicação dos golpes anteriores, indicando menor capacidade de carga em relação ao golpe anterior, mantendo a mesma carga de ponta. A perda do atrito lateral em função da aplicação de sucessivos golpes já foi observado por outros autores como, por exemplo, Edde (1991).

Figura 108 – Evolução da curva carga-recalque como golpe aplicado na estaca E02, comparando com a estaca E01 (PCE) – Osasco.

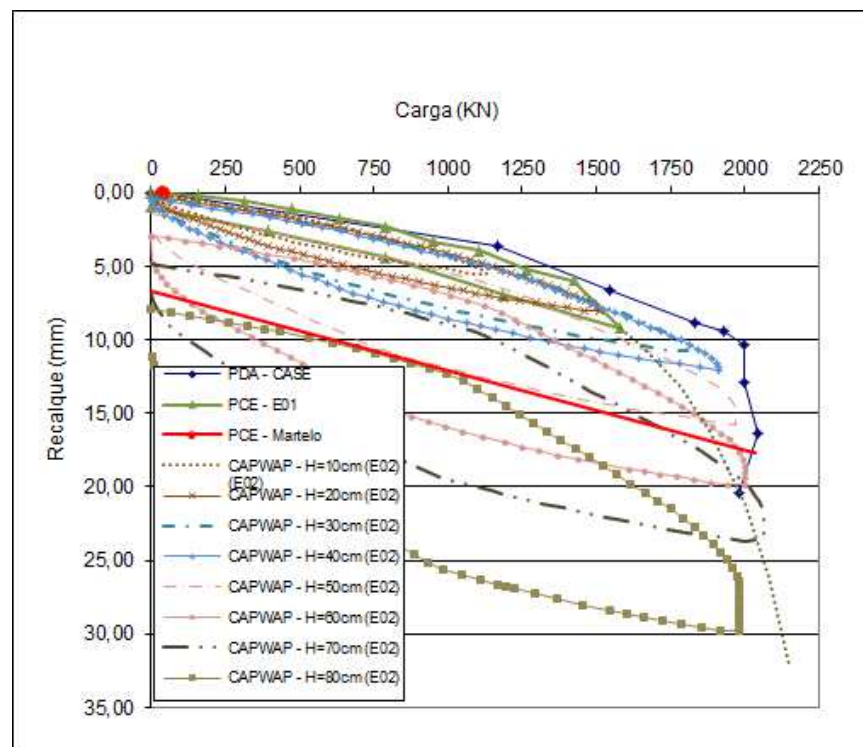
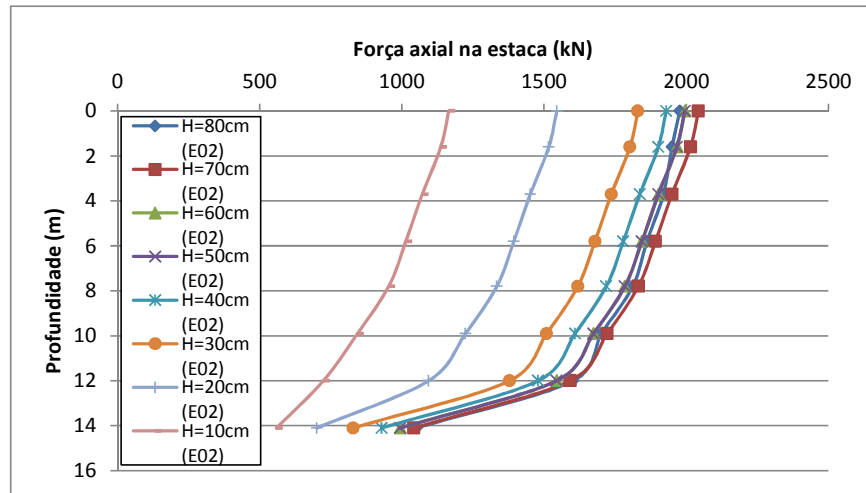
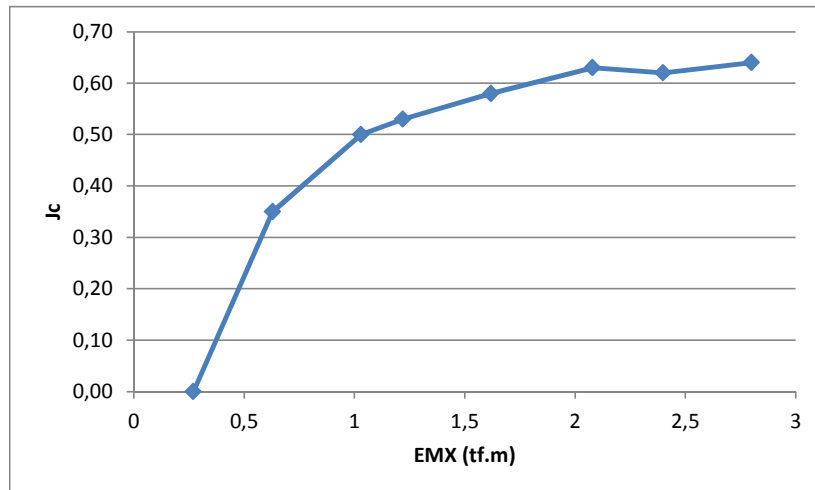


Figura 109 – Variação da força axial em profundidade (Estaca E02 – Osasco)



A figura 110 ilustra a evolução do J_c (Case Damping Factor) em função da energia aplicada. Notam-se valores menores de J_c para os golpes de menor energia em função de menores resistências dinâmicas mobilizadas. A curva RMX-DMX do Método Case indicada nas figuras anteriores foi obtida utilizando os valores de J_c indicados na figura 110.

Figura 110 – Evolução do J_c com o golpe aplicado (Estaca E02 – Osasco)



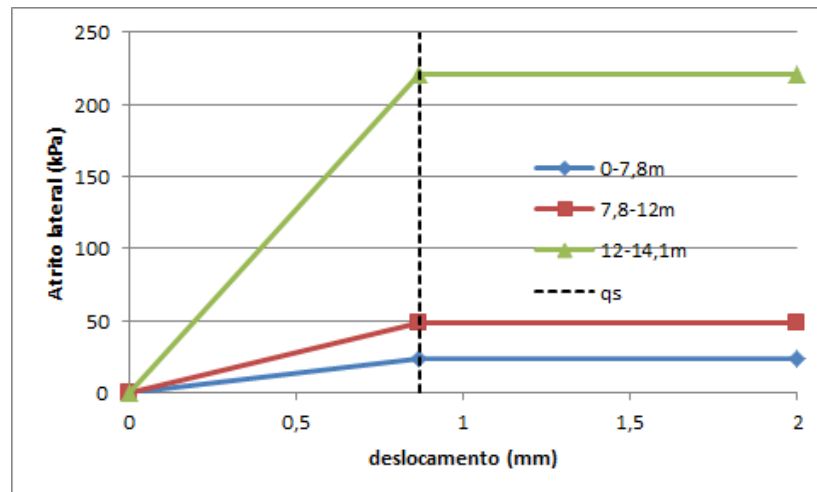
A tabela 26 indica os valores de “match quality” (MQ_{WU}) obtidos para os golpes analisados.

Tabela 26 – Resumo dos resultados obtidos no ECD com energia crescente (Estaca E02 – Osasco)

H (cm)	RMX (kN)	MQ _{WU}	MQ _R	Jc	Atrito (kN)	Ponta (kN)	SS (s/m)	ST (s/m)	Qs (mm)	Qt (mm)
10	1131	1,91	139	0,03	606	559	1,189	1,092	0,868	1,145
20	1510	2,04	102	0,45	844	701	1,162	1,124	0,868	1,915
30	1804	2,48	81	0,54	1001	829	1,000	0,729	0,868	2,888
40	1914	2,37	82	0,56	1001	929	0,720	0,579	0,868	3,432
50	1971	1,82	91	0,61	1001	994	0,710	0,514	0,868	4,677
60	1996	1,34	107	0,76	1001	995	0,547	0,550	0,868	6,349
70	2065	1,89	115	0,60	1001	1042	0,555	0,462	0,868	7,427
80	1983	1,64	211	0,64	926	1052	0,640	0,559	0,868	8,872

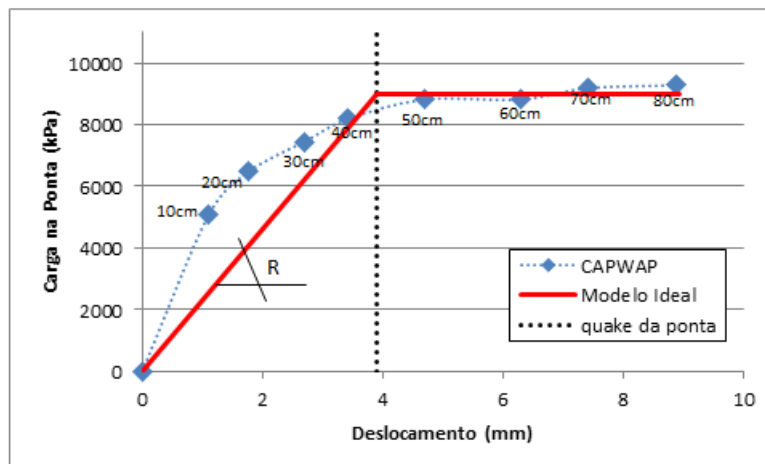
A figura 111 ilustra a variação do atrito lateral para cada profundidade (Primeira Relação de Cambefort). Percebe-se que para valores de deslocamento maiores que o quake do fuste ocorre o esgotamento do atrito lateral para cada profundidade.

Figura 111 – Variação do atrito lateral – Primeira Relação de Cambefort (Estaca E02 – Osasco)



A figura 112 ilustra o comportamento da ponta da estaca (Segunda Relação de Cambefort), percebe-se que os resultados obtidos nas análises CAPWAP para cada golpe estão próximos do modelo elasto-plástico ideal.

Figura 112 – Comportamento da ponta da estaca – Segunda Relação de Cambefort (Estaca E02 – Osasco)



Os resultados do CAPWAP apresentados somente foram possíveis graças a uma boa qualidade dos sinais de força e velocidade coletados. A aplicação de golpes excêntricos faz com que o sinal de força x tempo coletado apresente diferenças entre os dois transdutores de deformação. Consequentemente podem haver diferenças no formato da curva “wave up” em golpes consecutivos, apresentando uma “falsa” aparência de que a distribuição do atrito lateral mudou nos diferentes golpes aplicados.

Nos primeiros golpes de menor energia a curva “Wave Up” apresenta uma “falsa” aparência de que há um aumento do atrito lateral nos primeiros metros. Analisando de forma isolada cada um desses golpes de menor energia chega-se a esse equívoco, entretanto ao analisar todos os golpes de forma global adotando as hipóteses listadas anteriormente, conclui-se que o aumento da força na curva “Wave Up” nos primeiros instantes é devido ao efeito de “damping”. De fato, conforme indicado nas figuras 13 e 14 o trecho inicial da curva “Wave Up” pode ser aumentado através do aumento JS ou SS (damping do fuste) e JT ou ST (damping da ponta), não se trata de um efeito exclusivo de RS (atrito lateral). Outro argumento de que o aumento da curva é devido ao aumento de JS e JT é que caso fosse feito o aumento de RS desses golpes de menor energia e fizessemos a soma dos máximos valores de atrito lateral para cada golpe e da carga máxima de ponta, o resultado obtido excederia o valor obtido pela prova de carga estática, piorando a correlação, além disso a proporcionalidade entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca

se manteve (figura 98). As figuras 113 e 114 indicam o aumento de SS e ST nos golpes de menor energia.

Figura 113 - Efeito de SS (Damping do fuste) com a energia aplicada Estaca E02 – Osasco)

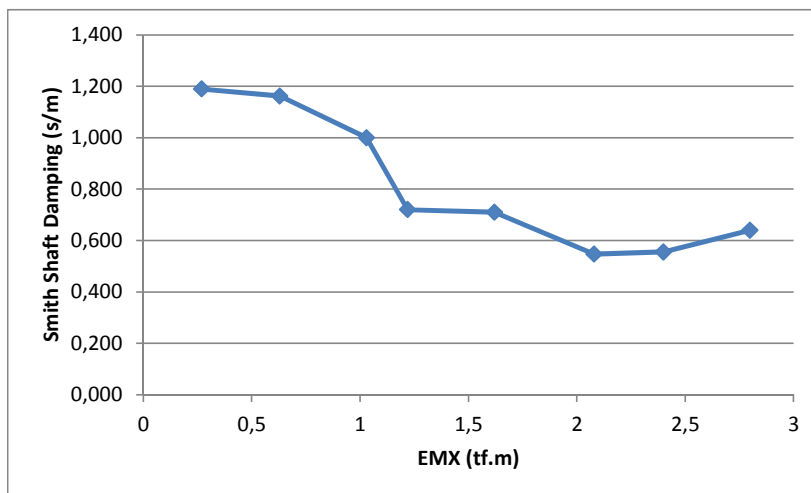
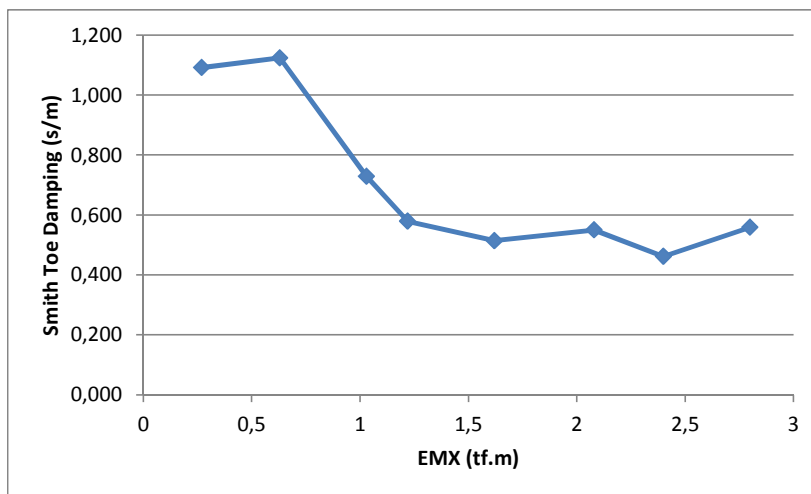
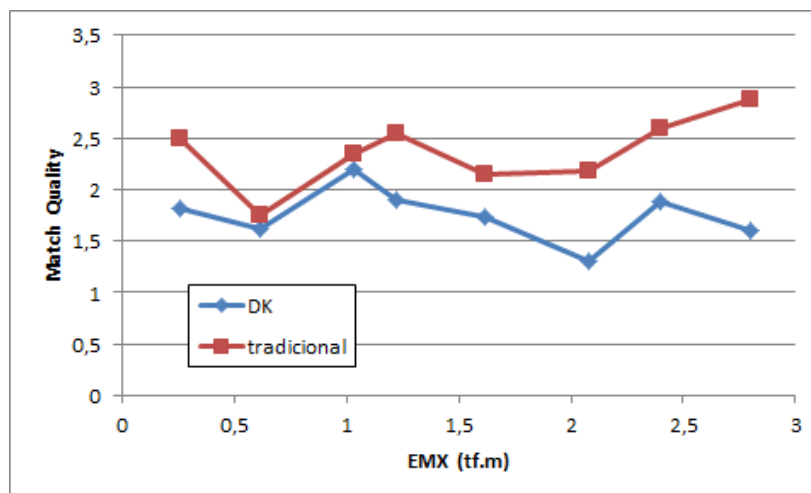


Figura 114 - Efeito de ST (Damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca E02 – Osasco)



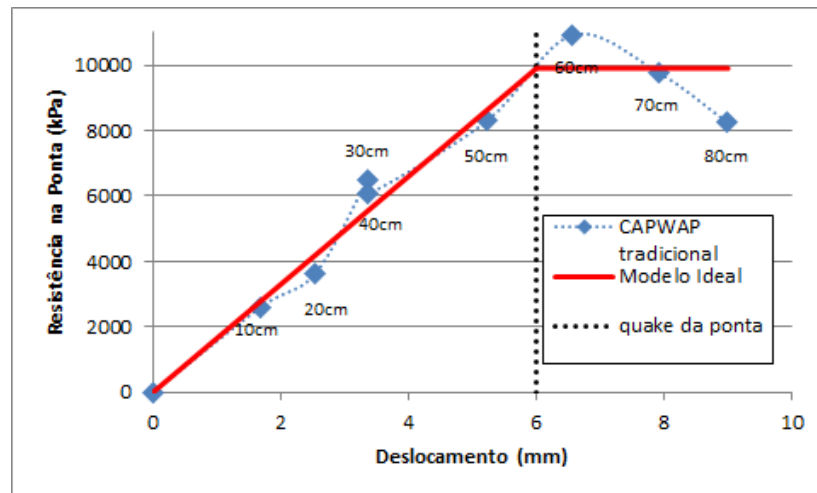
As figuras 115 a 117 apresentam os resultados obtidos através do procedimento tradicional baseado exclusivamente na redução do valor de “Match Quality” (MQ_{WU}). A figura 115 ilustra a comparação do procedimento proposto (DK) com o procedimento tradicional. Nota-se que o procedimento proposto (DK) apresentou redução dos valores de “Match Quality” (MQ_{WU}).

Figura 115 - Redução dos valores de "Match Quality" (MQ_{WU}) (Estaca E02 – Osasco)



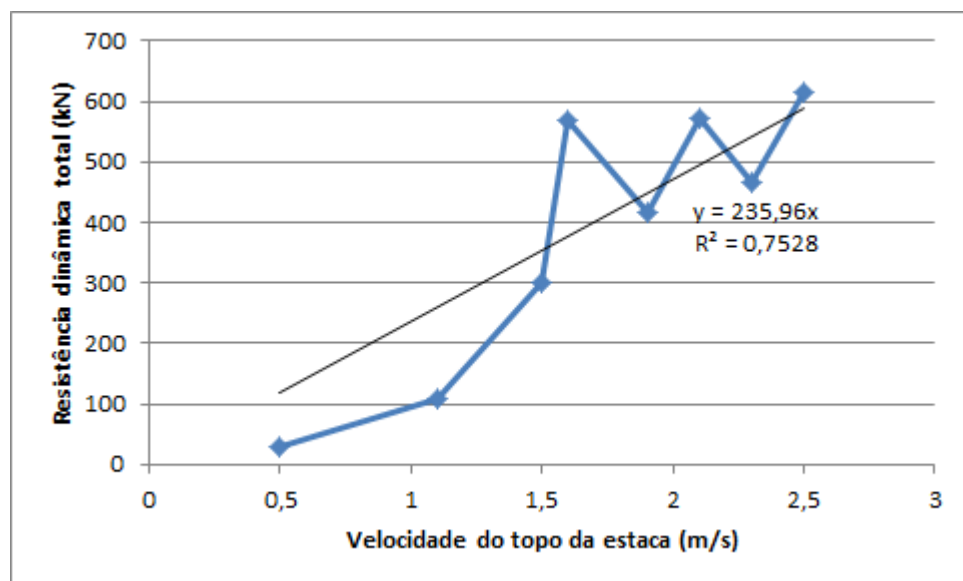
O procedimento proposto apresentou melhor definição do parâmetro R da Segunda Relação de Cambefort em relação ao procedimento tradicional (figura 116). Nota-se que no procedimento tradicional foi possível realizar análises CAPWAP com menor resistência de ponta e maior quake da ponta em relação aos golpes anteriores com alturas de queda entre 60cm a 80cm. Foi possível também fazer análise com menor altura de queda ($H=30\text{cm}$) e maior resistência de ponta em relação ao golpe com $H=40\text{cm}$, indicando que no procedimento tradicional não se manteve constante o parâmetro R da Segunda Relação de Cambefort. Isso demonstra que, apesar de resolver a teoria da equação da onda através da avaliação do "Match Quality" da curva "Wave Up" (MQ_{WU}), o procedimento tradicional não contemplou "significado físico". Além disso os valores de quake do fuste e distribuição do atrito lateral foram diferentes para cada golpe analisado com altura de queda crescente.

Figura 116 - Segunda Relação de Cambefort do procedimento tradicional (Estaca E02 – Osasco)



O procedimento proposto (ver figura 107) também apresentou melhor coeficiente de correlação R^2 (0,7984) na relação entre resistência dinâmica total (atrito lateral médio e resistência de ponta) e velocidade máxima do topo em relação ao procedimento tradicional, que obteve coeficiente de correlação R^2 de 0,7528 (figura 117).

Figura 117 - Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total e a velocidade máxima do topo no procedimento tradicional (Estaca E02 – Osasco)



5.3. – Resumo dos resultados obtidos – capacidade de carga

Nas tabelas 27 a 29 e nas figuras 118 a 127 estão apresentados os resultados, de diversas formas, das capacidades de carga dos ensaios dinâmicos e das provas de carga estática.

Nessas tabelas e figuras:

- a) AT corresponde a análises CAPWAP obtidas através do procedimento automático, realizado através de um pequeno ajuste na distribuição do atrito lateral e carga de ponta, em seguida clicando no botão “AC”;
- b) BM refere-se ao “best match quality” (MQ_{WU}), sem a utilização do modelo “Radiation Damping”); conforme Likins (1996);
- c) RD está associado ao “best match quality” (MQ_{WU}) utilizando o modelo de “Radiation Damping” no procedimento tradicional;
- d) RD2,5 corresponde à solução obtida com $q_s=2,5\text{mm}$; RD7,5 com $q_s=7,5\text{mm}$; e
- e) DK corresponde ao procedimento proposto;

A análise dessas tabelas e figuras permite concluir que:

- a) os resultados foram mais conservadores para os procedimentos AT e BM (tabelas 27 e 28 e Figuras 118 e 119; o mesmo ocorreu com o CASE (tabelas 27 e 28 e figura 124);
- b) as relações PDA/PCE (tabelas 28 e 29) ficaram próximas da unidade utilizando o RD, RD2,5, RD7,5 e DK; ademais, notam-se boas correlações entre as capacidades de carga CAPWAP (ECD) e PCE (figuras 120 a 123 e 125 a 127); tais constatações são consequência dos bons valores de MQ_{WU} obtidos nos CAPWAP; o procedimento proposto (DK) apresentou o melhor resultado entre os demais procedimentos, com relação PDA/PCE de 0,988 (erro de 1,2%); e
- c) a estaca E53 apresentou capacidade de carga inferior à da prova de carga estática (PCE), enquanto que na estaca E41 houve uma maior proximidade; essas duas estacas referem-se à obra Jacareí (ver a Tabela 27).

Apresentam-se a seguir algumas considerações metodológicas.

- a) Para correlacionar o Método Case com a prova de carga estática através do

limite de Davisson, foi necessário, em alguns casos, extrapolar a curva RMX-DMX pelo Método de Chin. Isso porque, próximas ao limite de Davisson, o valor de DMX é mais conservador que o da PCE; ou porque o ensaio dinâmico foi interrompido prematuramente visando não comprometer a integridade da estaca.

- b) A análise CAPWAP realizada exclusivamente através de procedimentos automáticos (AT) pode resultar em valores de “Match Quality” (MQ_{WU}) satisfatórios. Entretanto não substituem a análise de um operador experiente. Não é recomendável a utilização da função “AC” do CAPWAP (ajuste automático de todas as variáveis envolvidas na análise), exceto para uma rápida estimativa da capacidade de carga. Apesar de resolver a equação de onda e até apresentarem valores de “Match Quality” (MQ_{WU}) satisfatórios, o “Match Quality” de recalques (MQ_R) não é o melhor possível: podem apresentar soluções muito diferentes do esperado, como por exemplo divergência na distribuição do atrito lateral, na carga de ponta e no formato da curva carga-recalque. O operador de CAPWAP deve direcionar a solução para os valores esperados, sendo fundamental nas primeiras 50 a 100 tentativas o ajuste manual dos parâmetros envolvidos na análise, ou até que se obtenha uma redução significativa de MQ_{WU} , com valores entre 3,5 e 7,0. A melhoria de “Match Quality” (MQ_{WU}) através de procedimentos automáticos nos parâmetros do solo (opção “AQ”) deve ser realizada com cautela, restringindo os limites de cada variável de forma manual (e não através da “larga faixa de valores sugeridos pelo software”), direcionando a solução de forma a obter o melhor “Match Quality” de recalques (MQ_R), assim como atender às duas condições de contorno apresentadas neste trabalho.

Tabela 27 – Resumo dos resultados obtidos quanto à Capacidade de Carga

Local	Estaca	Seção	PCE (kN)	AT (kN)	BM (kN)	RD (kN)	RD2,5 (kN)	RD7,5 (kN)	DK (kN)	CASE (kN)
Osasco	E1	φ38	1905	1691	1725	1975	1895	1815	1990	2035
Jacareí	E56	20x20	835	825	826	810	821	817	825	900
Jacareí	E53	φ33	1511	1330	1320	1450	1450	1460	1463	1500
Jacareí	E41	φ33	1614	1494	1415	1581	1581	1654	1595	1870

Nota: Ver lista de símbolos (páginas 11 e 12)

Tabela 28 – Resumo dos resultados obtidos

Local	Seção	Relação PDA/PCE						
		AT	BM	RD	RD2,5	RD7,5	DK	CASE
Osasco	φ38	0,888	0,906	1,037	0,995	0,953	1,045	1,068
Jacareí	20x20	0,988	0,989	0,970	0,983	0,978	0,988	1,078
Jacareí	φ33	0,880	0,874	0,960	0,960	0,966	0,968	0,993
Jacareí	φ33	0,926	0,877	0,980	0,980	1,025	0,988	1,159

Nota: Ver lista de símbolos (páginas 11 e 12)

Tabela 29 – Resumo dos resultados obtidos

	Relação PDA/PCE						
	AT	BM	RD	RD2,5	RD7,5	DK	CASE
mínimo	0,880	0,874	0,960	0,960	0,953	0,968	0,993
máximo	0,988	0,989	1,037	0,995	1,025	1,045	1,159
média	0,907	0,891	0,975	0,981	0,972	0,988	1,073
desvio padrão	0,049	0,054	0,034	0,015	0,031	0,033	0,068
R ²	0,980	0,980	0,986	0,997	0,986	0,986	0,956

Nota: Ver lista de símbolos (páginas 11 e 12)

Figura 118 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento automático (AT) e pela prova de carga estática (PCE)

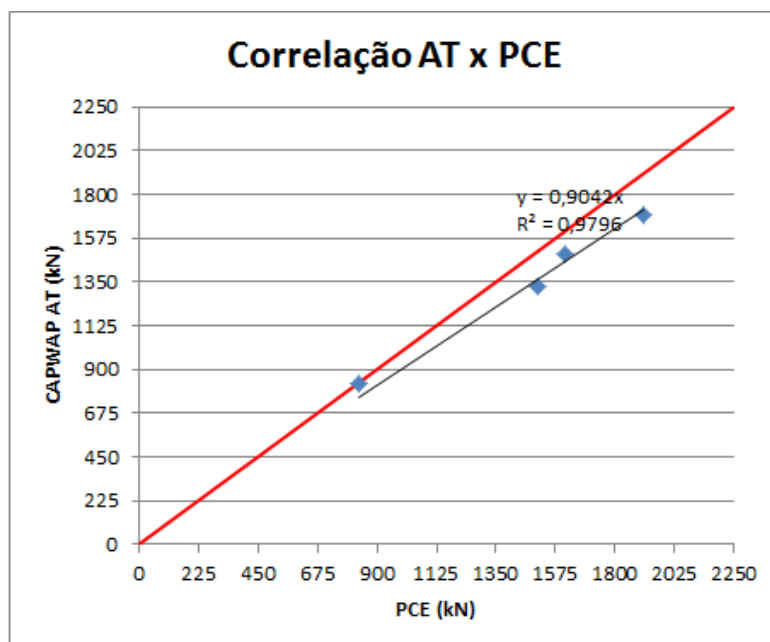


Figura 119 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento “best machth quality” (BM) e pela prova de carga estática (PCE)

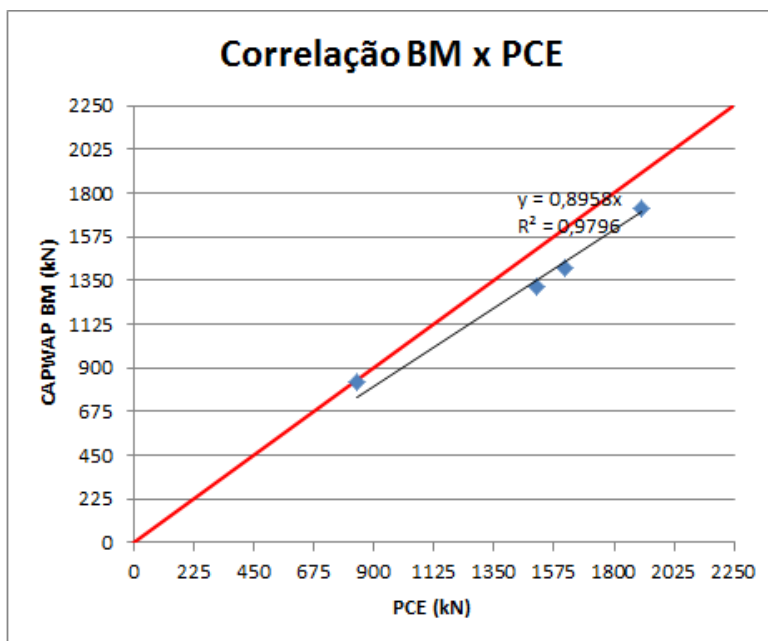


Figura 120 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento utilizando “Radiation Damping” (RD) e pela prova de carga estática (PCE)

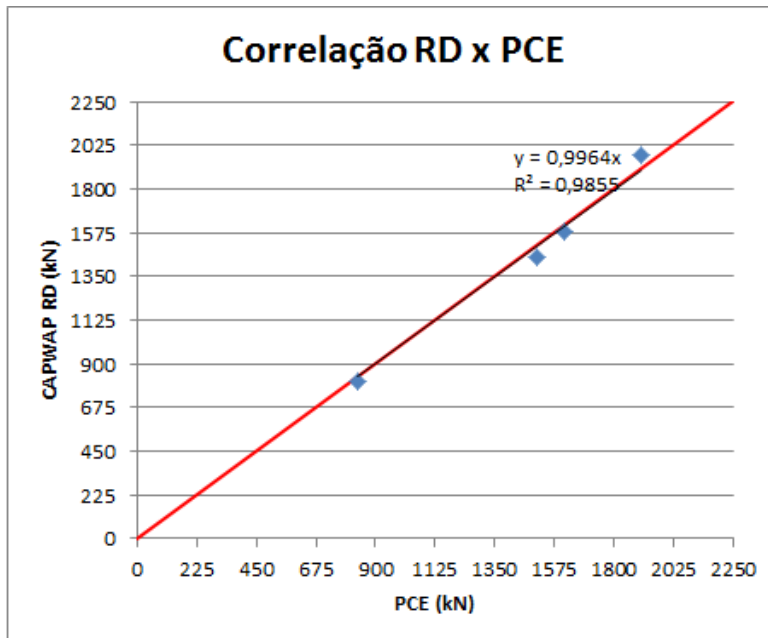


Figura 121 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento utilizando “Radiation Damping” com $q_s=2,5\text{mm}$ e pela prova de carga estática (PCE)

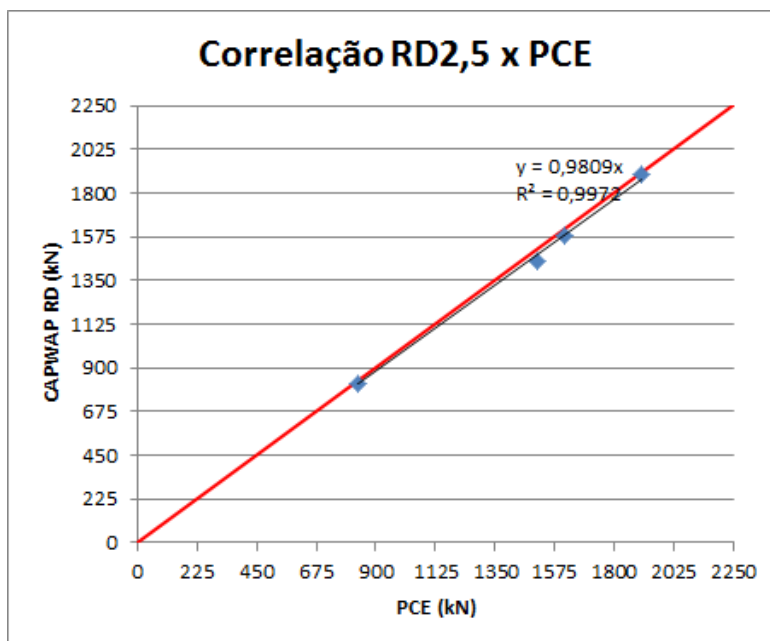


Figura 122 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento utilizando “Radiation Damping” com $q_s=7,5\text{mm}$ e pela prova de carga estática (PCE)

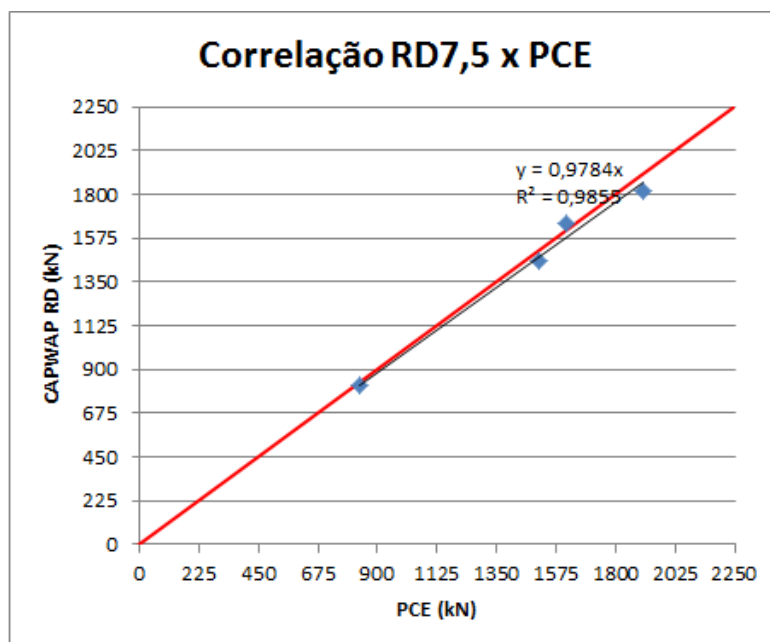


Figura 123 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo procedimento proposto (DK) e pela prova de carga estática (PCE)

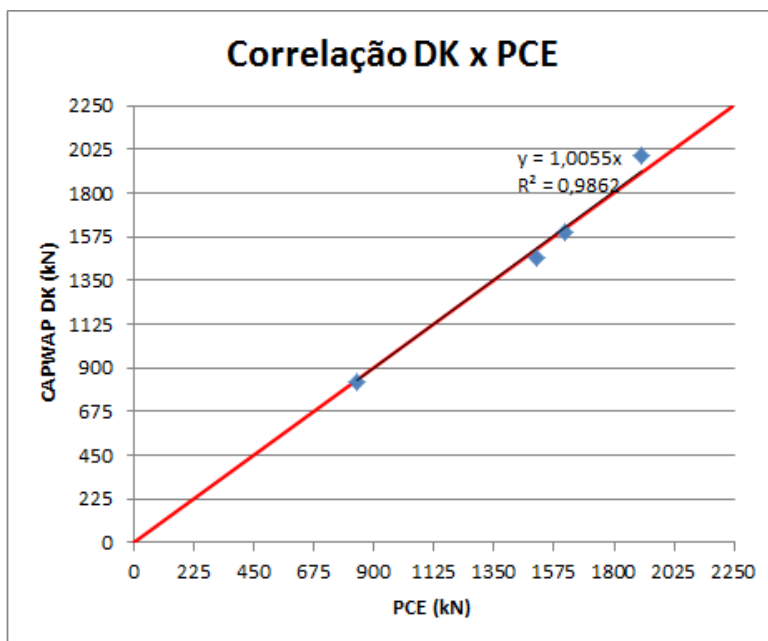


Figura 124 – Correlação entre as capacidades de carga determinadas pelo Método Case e pela prova de carga estática (PCE)

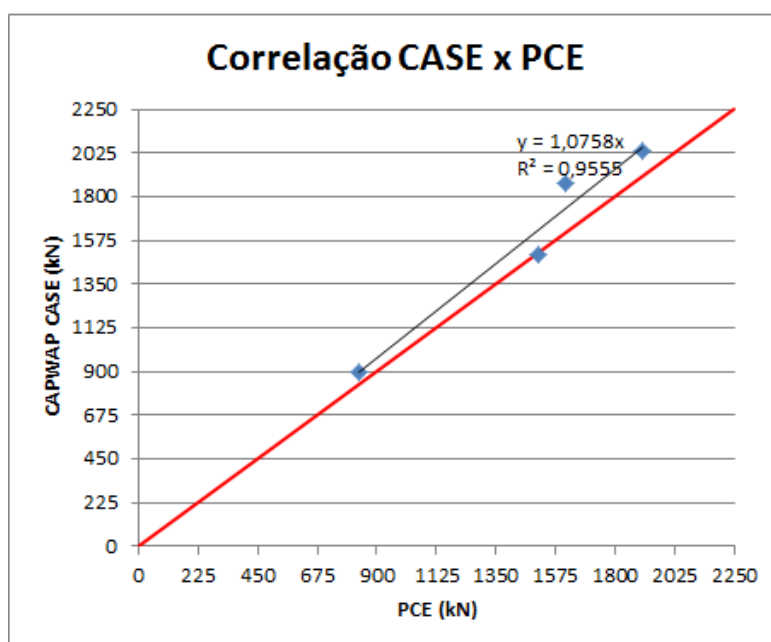


Figura 125 – Desvio padrão da relação PDA/PCE

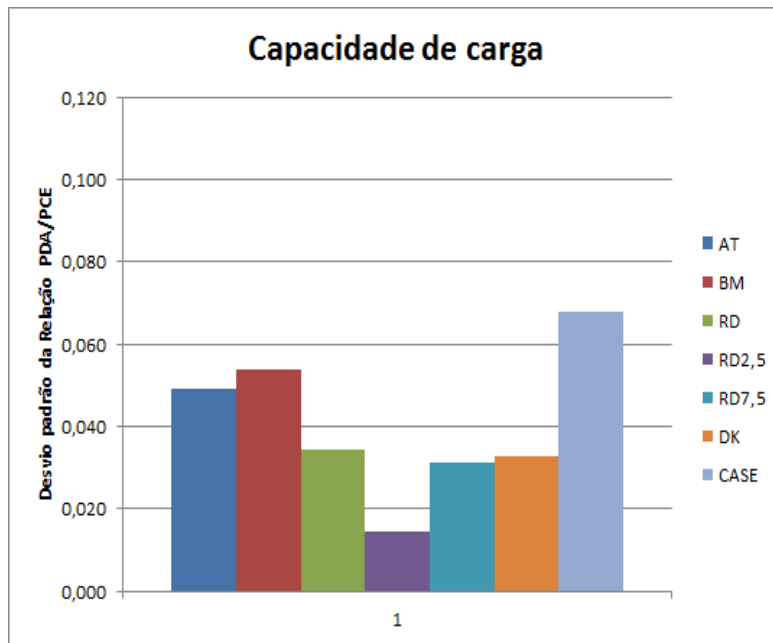


Figura 126 – Relação PDA/PCE

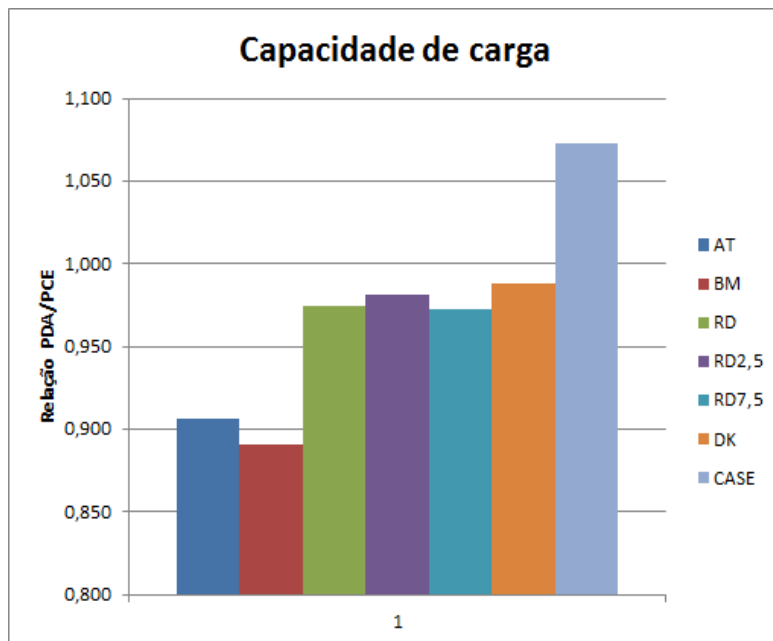
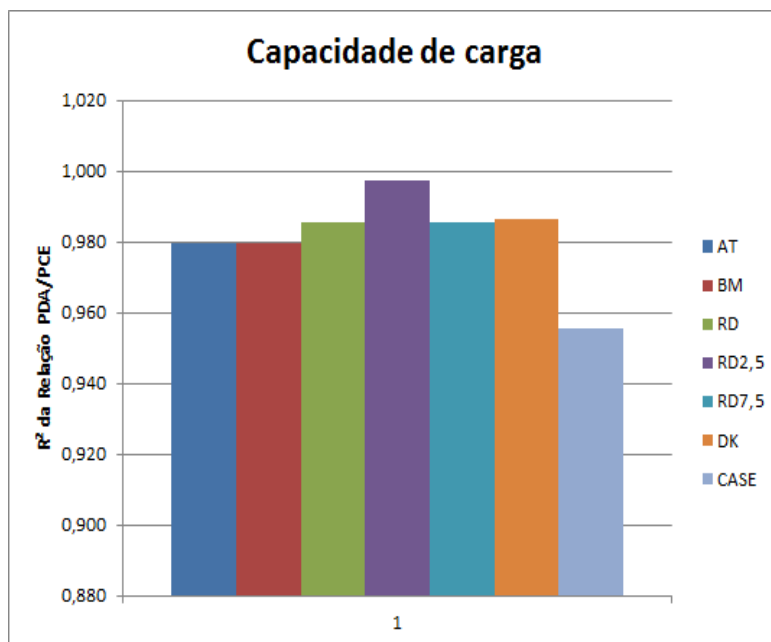


Figura 127 – R2 da relação PDA/PCE



5.4. – Resumo dos resultados obtidos – recalques

Nas tabelas e figuras que seguem:

- f) AT corresponde a análises CAPWAP obtidas através do procedimento automático, realizado através de um pequeno ajuste na distribuição do atrito lateral e carga de ponta, em seguida clicando no botão “AC”;
- g) BM refere-se ao “best match quality” (MQ_{WU}), sem a utilização do modelo “Radiation Damping”), conforme Likins (1996);
- h) RD está associado ao “best match quality” (MQ_{WU}) utilizando o modelo de “Radiation Damping” no procedimento tradicional;
- i) RD2,5 corresponde à solução obtida com $q_s=2,5\text{mm}$; RD7,5 com $q_s=7,5\text{mm}$; e
- j) DK corresponde ao procedimento proposto;

5.4.1 – Carregamento estático com o peso próprio do martelo (CEPM) realizado antes do Ensaio de carregamento dinâmico (ECD)

Nas tabelas 30 a 32 e nas figuras 128 a 137 estão apresentados, de diversas formas, valores de recalques dos ensaios dinâmicos e das provas de carga estática para as estacas E1 (obra de Osasco) e E56 (obra de Jacareí).

Nas tabelas 30 a 32:

- a) o ponto “Pm” corresponde ao recalque do peso próprio do martelo;
- b) “Padm” corresponde ao recalque para a carga admissível, dividindo-se a carga obtida pelo limite de Davisson por dois (fator de segurança da norma NBR 6122/2010); e
- c) “Pmax” corresponde ao recalque para a máxima carga obtida na prova de carga estática.

Os resultados obtidos através do procedimento proposto (DK) superaram os procedimentos tradicionais em todos os quesitos, apresentando menor relação PDA/PCE (erro de 21%), menor desvio padrão (0,190) e maior coeficiente de correlação R^2 (0,9868). Observa-se na figura 133 que o procedimento proposto apresentou resultados mais próximos à reta a 45° em (linha vermelha), no gráfico que correlaciona os recalque do PDA com o da prova de carga estática.

Nota-se que os procedimentos tradicionais apresentaram bons resultados quanto à capacidade de carga, porém em termos de recalques seu desempenho foi inferior ao procedimento proposto: apresentaram maiores valores de MQ_R .

Tabela 30 – Resumo dos resultados obtidos - Recalques

Ponto	Local	Estaca	Seção	PCE (mm)	AT (mm)	BM (mm)	RD (mm)	RD2,5 (mm)	RD7,5 (mm)	DK (mm)	CASE (mm)
Pm	Osasco	E1	φ38	0,080	0,191	0,258	0,131	0,176	0,251	0,124	0,121
Pm	Jacareí	E56	20x20	0,400	0,558	0,599	0,674	0,540	0,701	0,523	0,571
Padm	Osasco	E1	φ38	3,319	4,727	6,347	3,890	4,549	6,176	3,805	3,032
Padm	Jacareí	E56	20x20	4,474	6,308	6,330	7,008	5,784	7,252	5,655	5,964
Pmax	Osasco	E1	φ38	9,220	8,707	11,421	8,501	9,767	10,633	9,411	6,852
Pmax	Jacareí	E56	20x20	8,003	9,751	9,460	10,264	8,820	10,493	8,668	9,524

Nota: Ver lista de símbolos (páginas 11 e 12)

Tabela 31 – Resumo dos resultados obtidos

Ponto	Local	Seção	Relação PDA/PCE						
			AT	BM	RD	RD2,5	RD7,5	DK	CASE
Pm	Osasco	φ38	2,38	3,22	1,63	2,19	3,14	1,55	1,51
Pm	Jacareí	20x20	1,40	1,50	1,68	1,35	1,75	1,31	1,43
Padm	Osasco	φ38	1,42	1,91	1,17	1,37	1,86	1,15	0,91
Padm	Jacareí	20x20	1,41	1,41	1,57	1,29	1,62	1,26	1,33
Pmax	Osasco	φ38	0,94	1,24	0,92	1,06	1,15	1,02	0,74
Pmax	Jacareí	20x20	1,22	1,18	1,28	1,10	1,31	1,08	1,19

Nota: Ver lista de símbolos (páginas 11 e 12)

Tabela 32 – Resumo dos resultados obtidos

	Relação PDA/PCE						
	AT	BM	RD	RD2,5	RD7,5	DK	CASE
mínimo	0,94	1,18	0,92	1,06	1,15	1,02	0,74
máximo	2,38	3,22	1,68	2,19	3,14	1,55	1,51
média	1,40	1,46	1,42	1,32	1,69	1,21	1,26
desvio padrão	0,487	0,768	0,301	0,412	0,704	0,190	0,301
R ²	0,9263	0,9462	0,8958	0,9798	0,9289	0,9868	0,8537

Nota: Ver lista de símbolos (páginas 11 e 12)

Figura 128 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento automático (AT) e pela prova de carga estática (PCE)

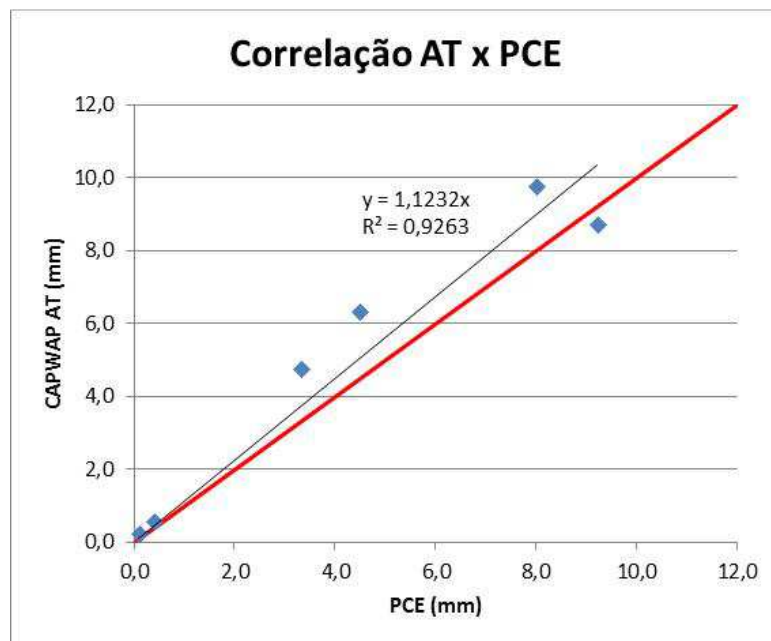


Figura 129 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento “best mach quality” (BM) e pela prova de carga estática (PCE)

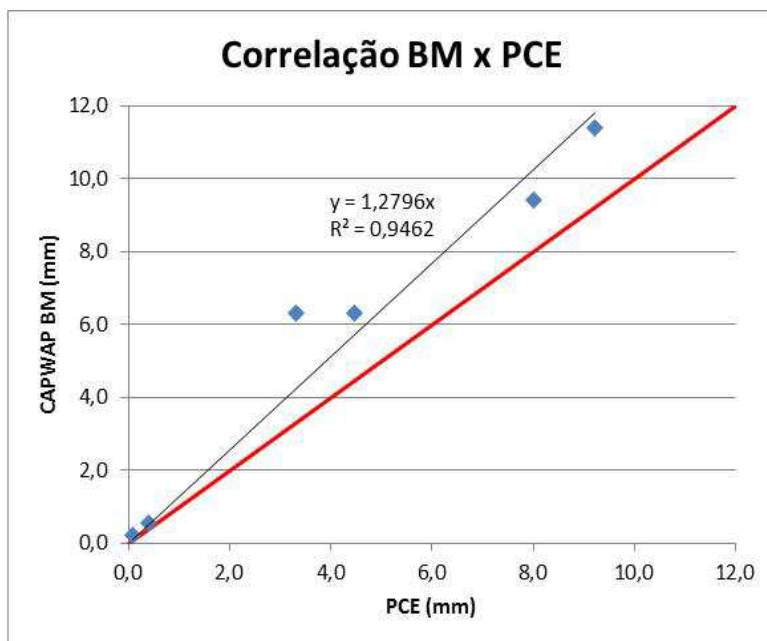


Figura 130 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento utilizando “Radiation Damping” (RD) e pela prova de carga estática (PCE)

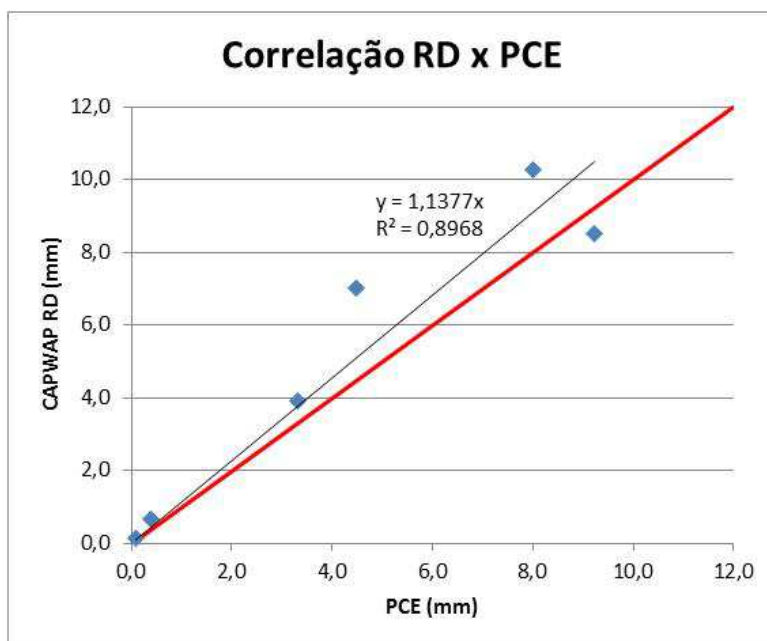


Figura 131 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento utilizando “Radiation Damping” com $q_s=2,5\text{mm}$ (RD2,5) e pela prova de carga estática (PCE)

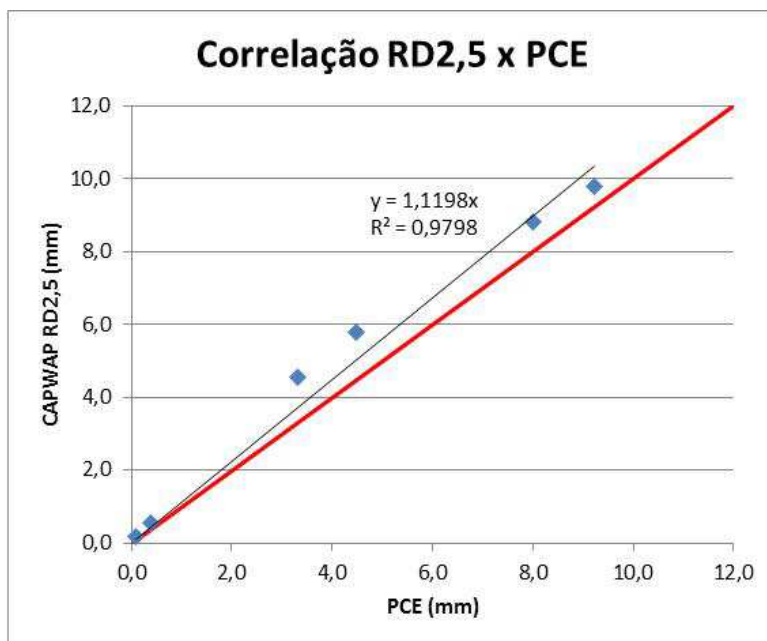


Figura 132 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento utilizando “Radiation Damping” com $q_s=7,5\text{mm}$ (RD7,5) e pela prova de carga estática (PCE)

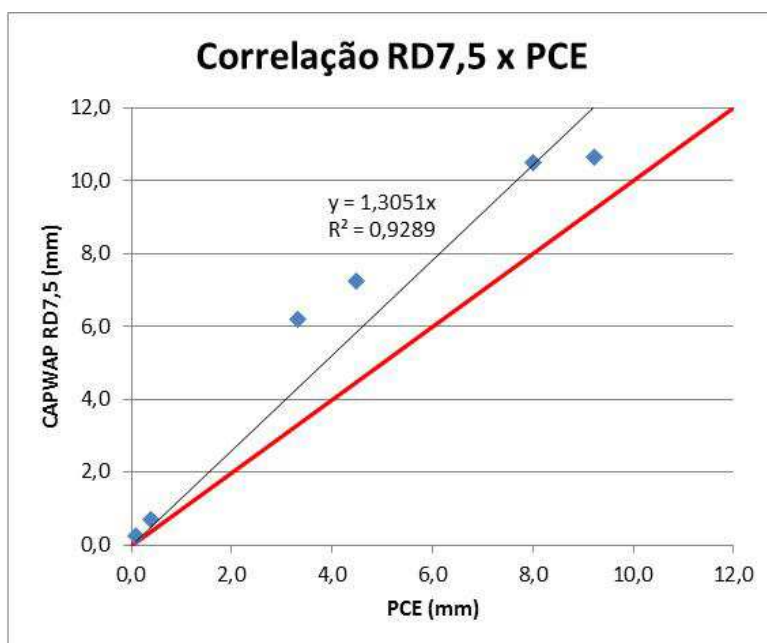


Figura 133 – Correlação entre os recalques determinados pelo procedimento proposto (DK) e pela prova de carga estática (PCE)

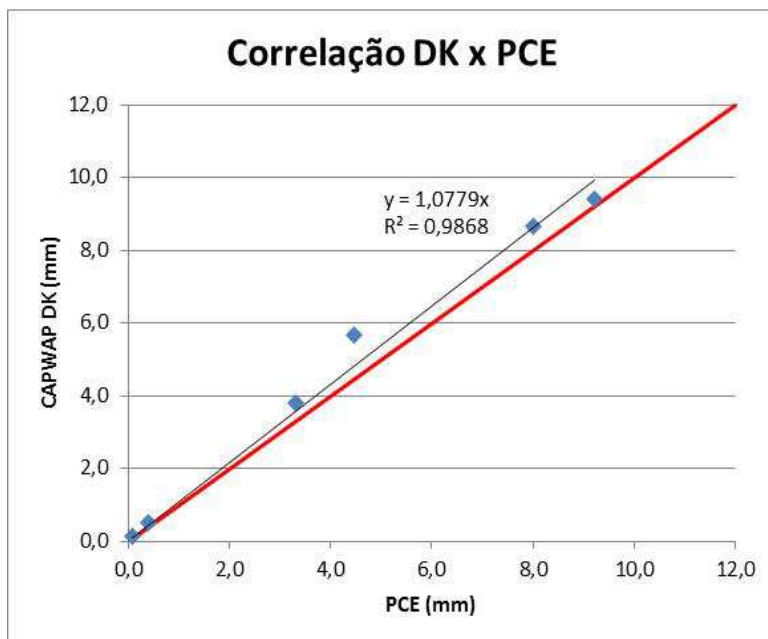


Figura 134 – Correlação entre os recalques determinados pelo Método Case e pela prova de carga estática (PCE)

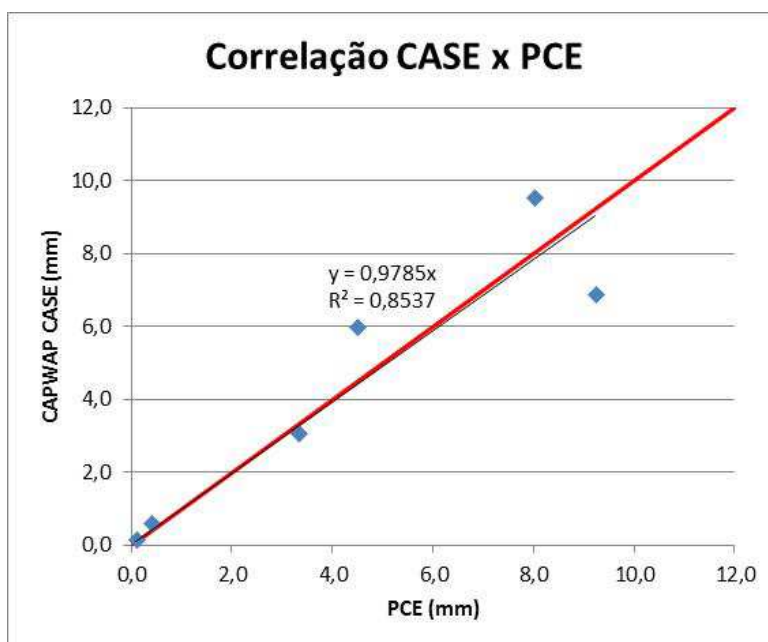


Figura 135 – Relação PDA/PCE para os recalques

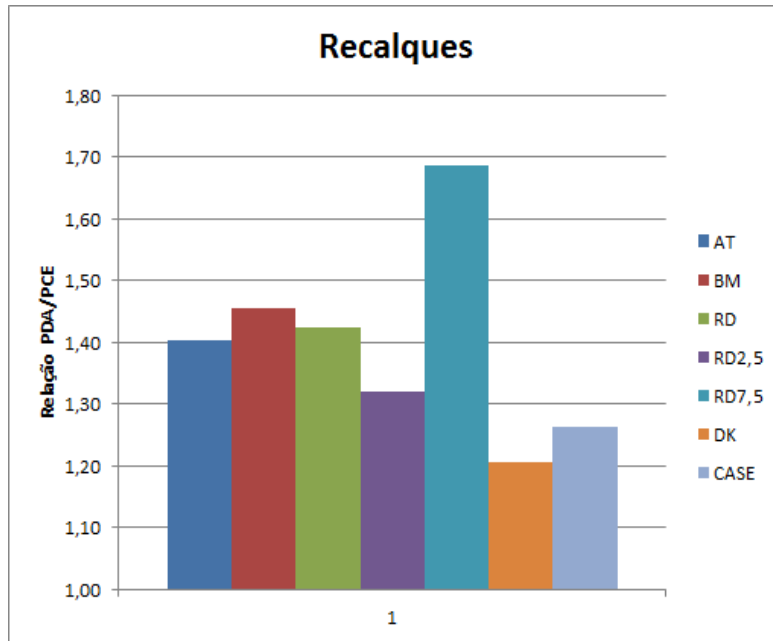


Figura 136 – Desvio padrão da relação PDA/PCE para os recalques

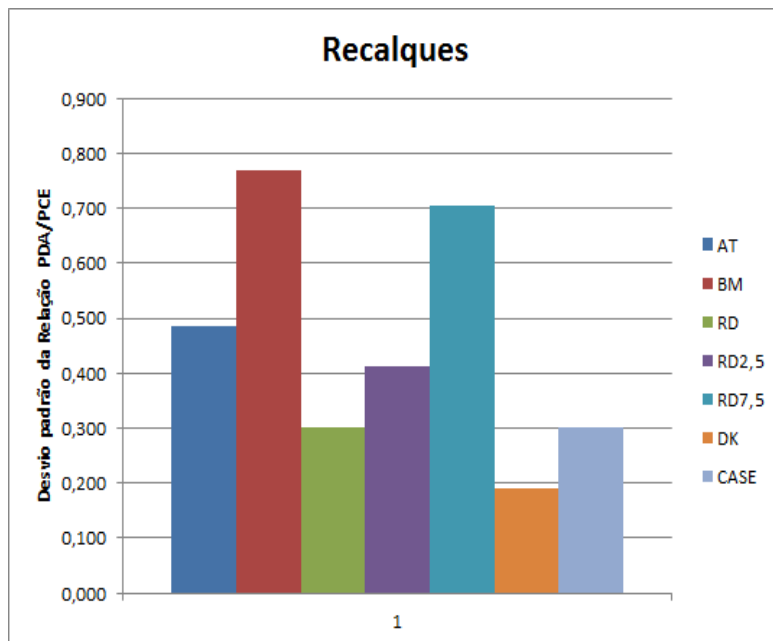
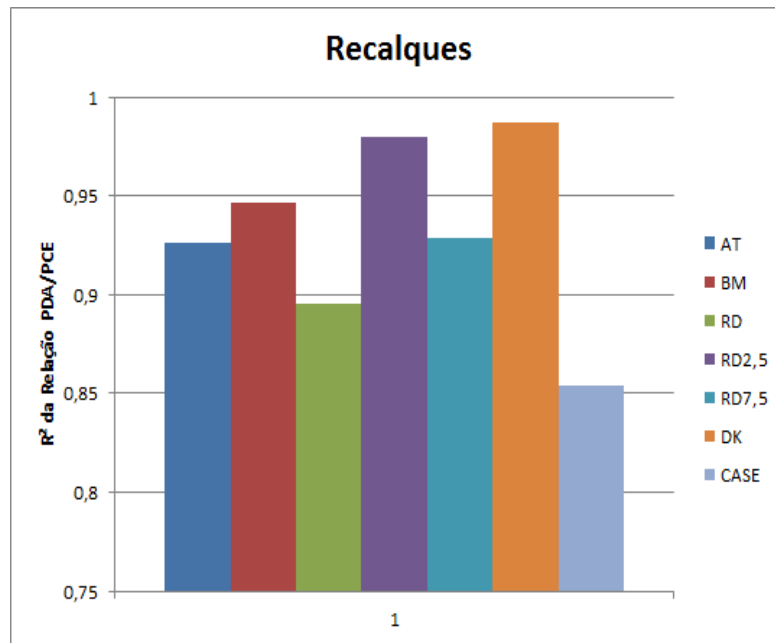


Figura 137 – R² da relação PDA/PCE para os recalques



5.4.2 – Carregamento estático com o peso próprio do martelo (CEPM) realizado após o Ensaio de carregamento dinâmico (ECD)

Nas tabelas 33 a 35 e figuras 138 a 147 estão apresentados, de diversas formas, valores de recalques dos ensaios dinâmicos e das provas de carga estática para as estacas E41 e E53 (obra de Jacareí). As análises destas estacas foram realizadas separadas das estacas E1 (Osasco) e E56 (Jacareí) por apresentarem maiores divergências de recalques do ensaio dinâmico em relação à prova de carga estática. Essa divergência entre os recalques é função de provável maior influência do atrito negativo no formato da curva carga-recalque, assim como maior distância da estaca da prova de carga com os ensaios dinâmicos (cerca de 40m).

Nas tabelas 33 a 35:

- o ponto “Pm” corresponde ao recalque do peso próprio do martelo;
- “Padm” corresponde ao recalque para a carga admissível, dividindo-se a carga obtida pelo limite de Davisson por dois (fator de segurança da norma NBR 6122/2010); e
- “Pmax” corresponde ao recalque para a máxima carga obtida na prova de carga estática.

Os resultados obtidos através do procedimento proposto superaram os procedimentos tradicionais em praticamente todos os quesitos, apresentando menor relação PDA/PCE (erro de 50%), menor desvio padrão (0,829) e entre os maiores coeficientes de correlação R^2 (0,9256).

Tabela 33 – Resumo dos resultados obtidos - Recalques

Ponto	Local	Estaca	Seção	PCE (mm)	AT (mm)	BM (mm)	RD (mm)	RD2,5 (mm)	RD7,5 (mm)	DK (mm)	CASE (mm)
Pm	Jacareí	E53	φ33	0,470	0,367	0,375	0,330	0,330	0,361	0,310	0,331
Pm	Jacareí	E41	φ33	0,570	0,410	0,422	0,354	0,354	0,426	0,338	0,258
Padm	Jacareí	E53	φ33	2,625	6,818	6,903	6,115	6,115	6,544	6,003	6,451
Padm	Jacareí	E41	φ33	3,191	8,365	8,609	7,569	7,569	8,567	7,440	8,722
Pmax	Jacareí	E53	φ33	7,140	12,494	12,562	10,840	10,840	10,927	10,758	9,934
Pmax	Jacareí	E41	φ33	7,140	12,960	13,530	12,056	12,056	12,849	11,737	10,846

Nota: Ver lista de símbolos (páginas 11 e 12)

Tabela 34 – Resumo dos resultados obtidos

Ponto	Local	Estaca	Seção	Relação PDA/PCE						
				AT	BM	RD	RD2,5	RD7,5	DK	CASE
Pm	Jacareí	E53	φ33	0,11	0,11	0,10	0,10	0,11	0,09	0,10
Pm	Jacareí	E41	φ33	0,09	0,09	0,08	0,08	0,10	0,08	0,06
Padm	Jacareí	E53	φ33	1,52	1,54	1,37	1,37	1,46	1,34	1,44
Padm	Jacareí	E41	φ33	1,87	1,92	1,69	1,69	1,91	1,66	1,95
Pmax	Jacareí	E53	φ33	2,79	2,81	2,42	2,42	2,44	2,40	2,22
Pmax	Jacareí	E41	φ33	2,90	3,02	2,69	2,69	2,87	2,62	2,42

Nota: Ver lista de símbolos (páginas 11 e 12)

Tabela 35 – Resumo dos resultados obtidos

	Relação PDA/PCE						
	AT	BM	RD	RD2,5	RD7,5	DK	CASE
Mínimo	0,09	0,09	0,08	0,08	0,10	0,08	0,06
Máximo	2,90	3,02	2,69	2,69	2,87	2,62	2,42
Média	1,70	1,73	1,53	1,53	1,69	1,50	1,70
desvio padrão	0,932	0,954	0,842	0,842	0,935	0,829	0,956
R ²	0,9297	0,9287	0,9239	0,9239	0,8877	0,9256	0,8094

Nota: Ver lista de símbolos (páginas 11 e 12)

Figura 138 – Correlação de recalques entre o procedimento automático e a prova de carga estática

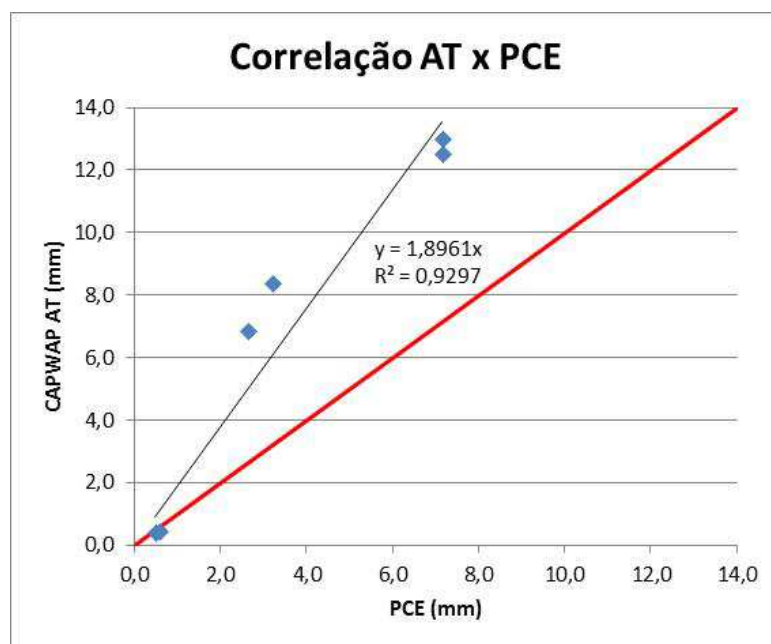


Figura 139 – Correlação de recalques entre o procedimento “best match quality” e a prova de carga estática

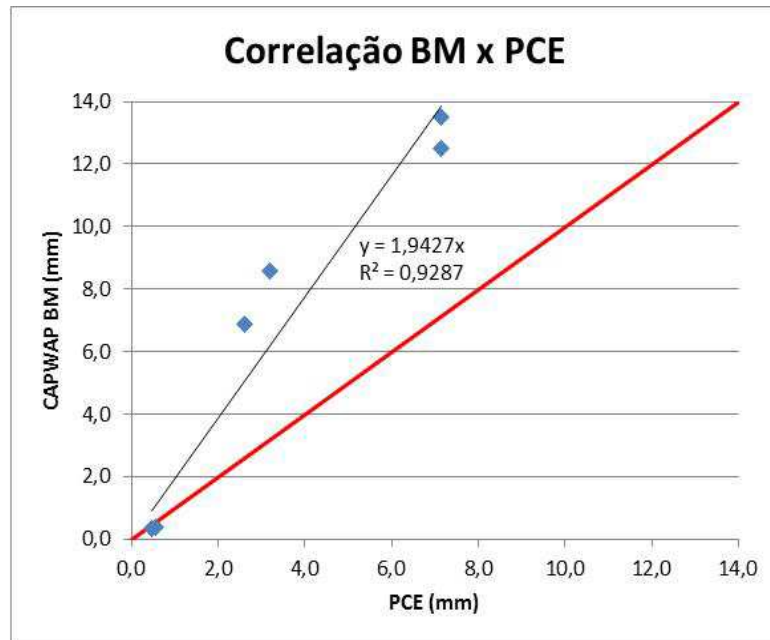


Figura 140 – Correlação de recalques entre o procedimento utilizando “Radiation Damping” e a prova de carga estática

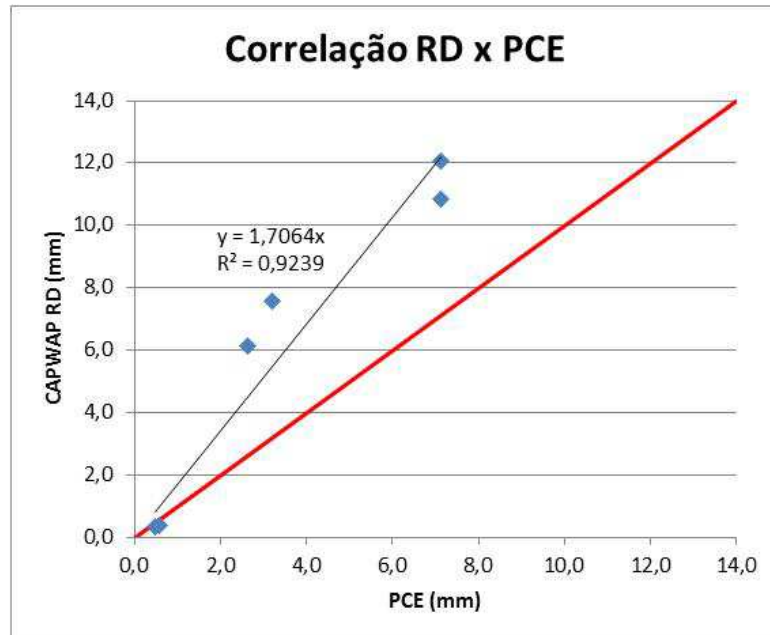


Figura 141 – Correlação de recalques entre o procedimento utilizando “Radiation Damping” com $q_s=2,5\text{mm}$ e a prova de carga estática

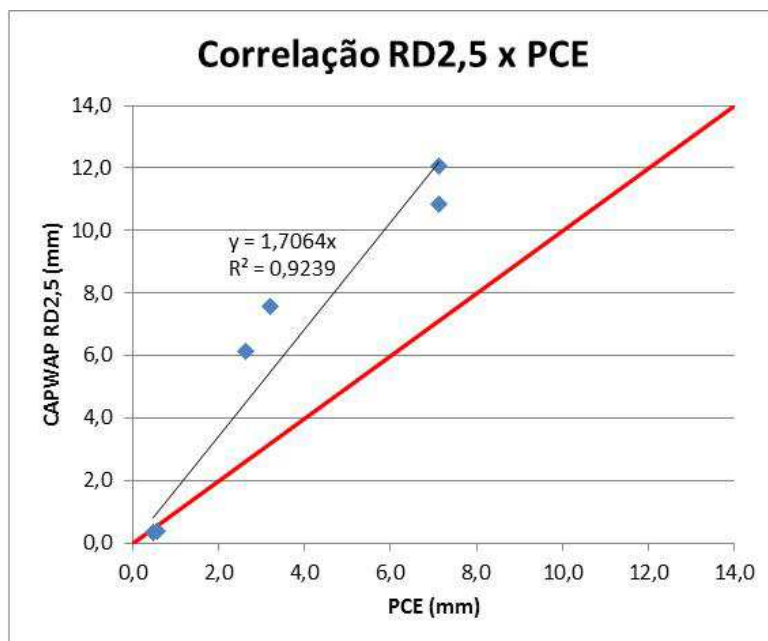


Figura 142 – Correlação de recalques entre o procedimento utilizando “Radiation Damping” com $q_s=7,5\text{mm}$ e a prova de carga estática

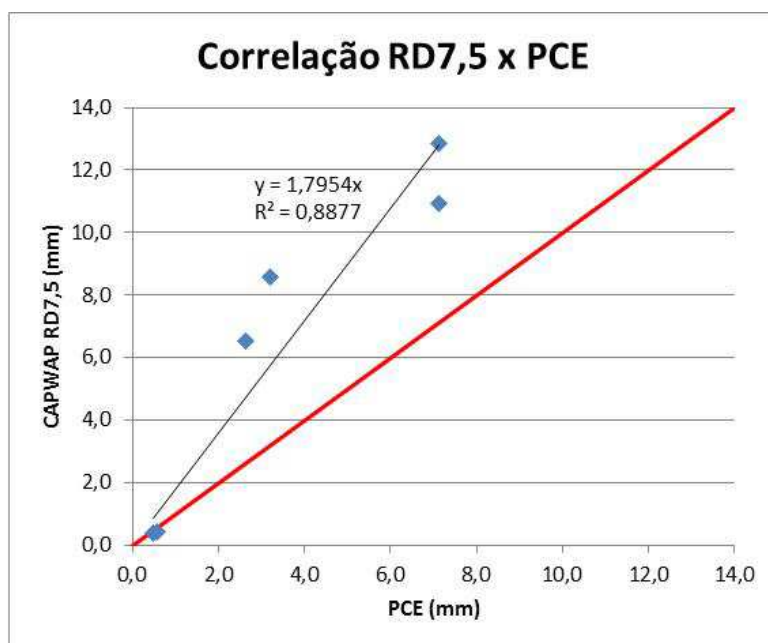


Figura 143 – Correlação de recalques entre o procedimento proposto e a prova de carga estática

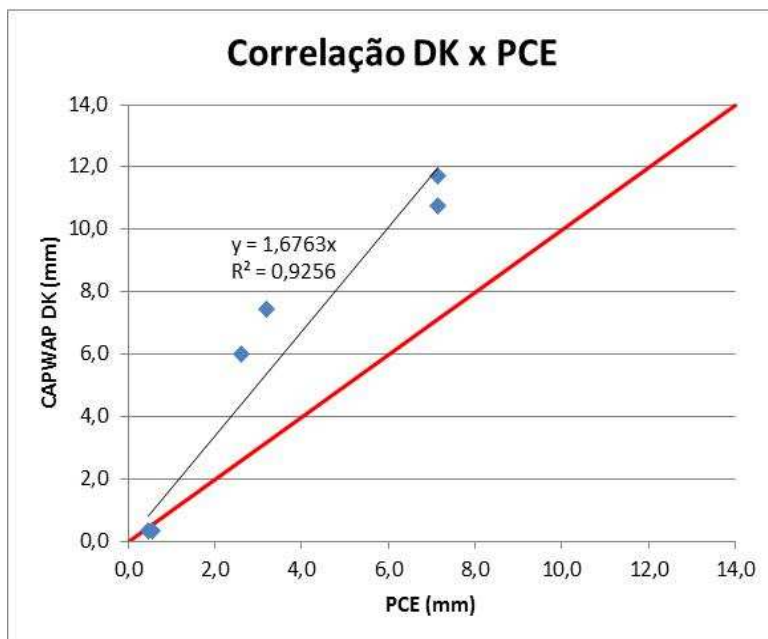


Figura 144 – Correlação de recalques entre o Método Case e a prova de carga estática

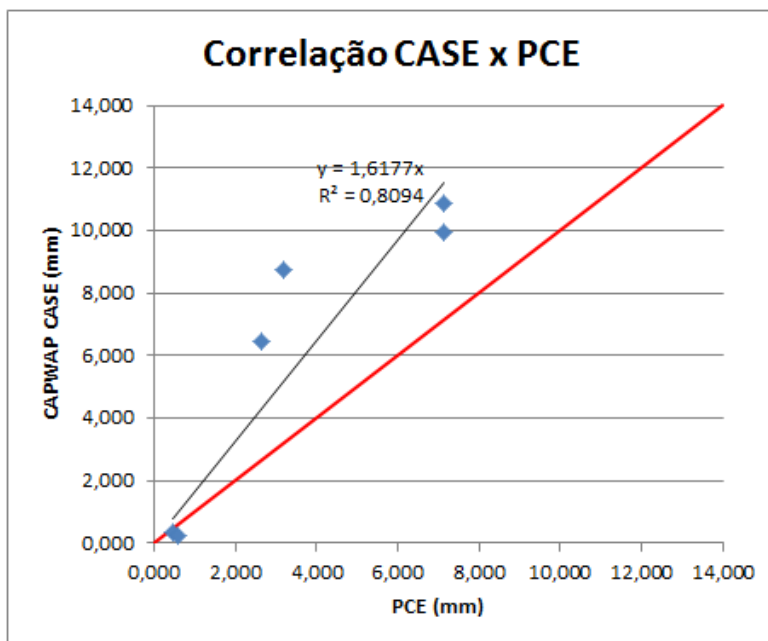


Figura 145 – Relação PDA/PCE para os recalques

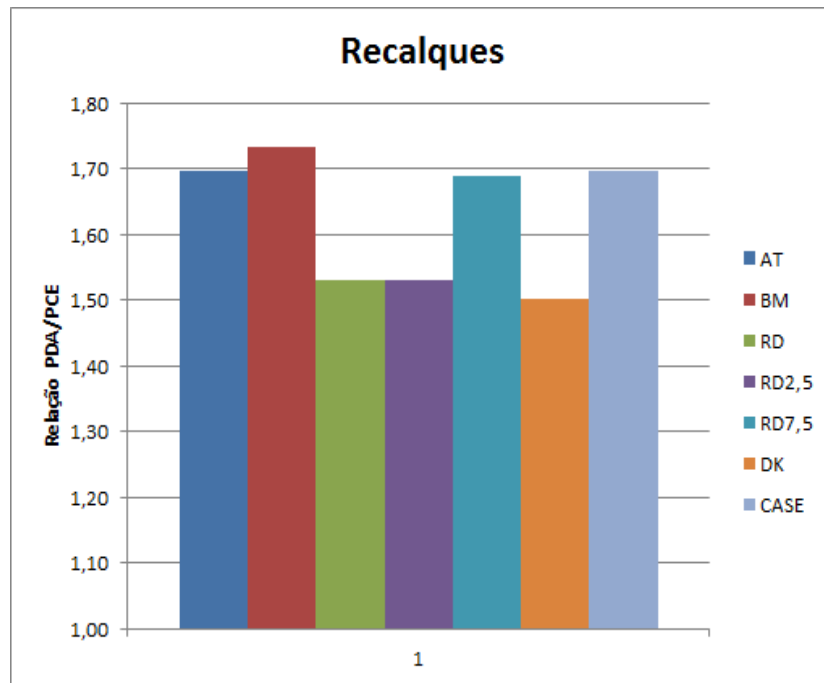


Figura 146 – Desvio padrão da relação PDA/PCE para os recalques

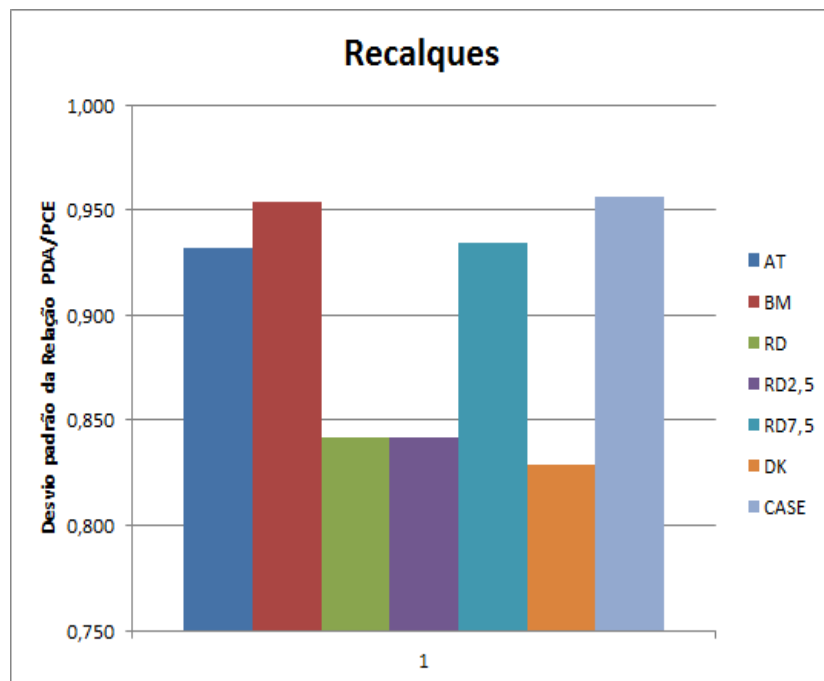
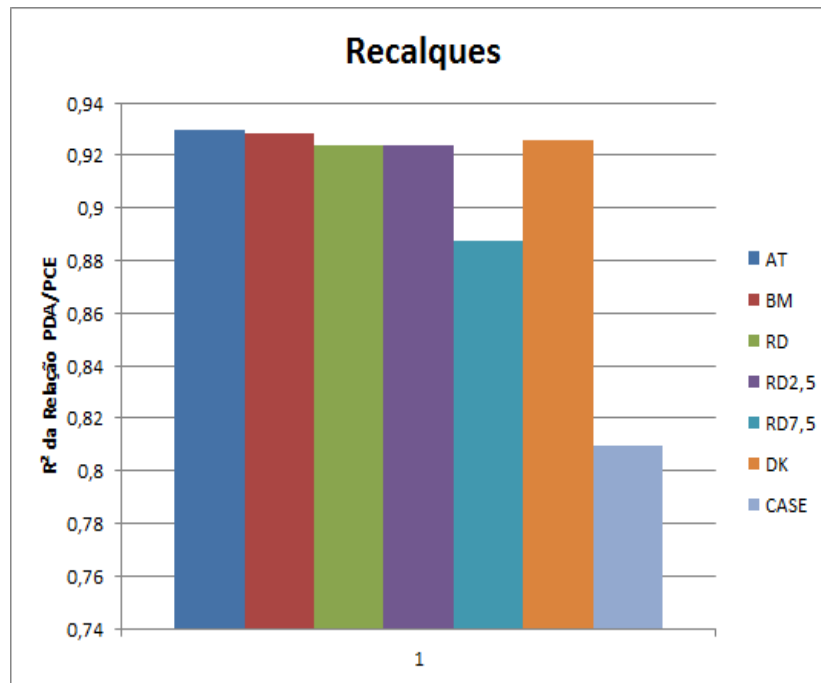


Figura 147 – R2 da relação PDA/PCE para os recalques



5.5. – Comparação entre os diferentes testes em estacas (PCE e PDA)

A tabela 36 mostra a comparação entre prova de carga estática comum, prova de carga estática instrumentada, PDA (procedimento tradicional) e o Procedimento Proposto (DK).

Tabela 36 – Comparação entre os diferentes métodos

Características	PCE Comum	PCE Instrumentada	PDA	Procedimento Proposto (DK)
1) Verificação da Capacidade de Carga na Cravação	-	-	+	+
2) Verificação da Capacidade de Carga na Recravação	+	+	+	+
3) Verificação das tensões durante a cravação	-	-	+	+
4) Verificação da eficiência do martelo durante a cravação	-	-	+	+
5) Custo	-	-	+	+
6) Prazo de Execução	-	-	+	+
7) Distribuição do Atrito Lateral	-	+	?	+
8) Carga de Ponta	-	+	?	+
9) Curva Carga x Recalque	+	+	?	+
10) Necessidade de sistema de reação	-	-	+	+
11) Aparelho de Instrumentação recuperado após o teste	N	-	+	+
12) Possibilidade de testar mais de uma estaca por dia	-	-	+	+

Legenda:

- Ponto Negativo; + Ponto Positivo; N Não se aplica; ? Os resultados podem variar

Nota-se que as provas de carga comuns e instrumentadas apresentam pontos negativos nos quesitos 1, 3, 4 por impossibilitar a sua realização durante a cravação das estacas. Além disso apresentam maior custo e maior prazo de execução em relação ao PDA (quesitos 5 e 6). Apresentam também necessidade de execução de um sistema de reação (quesito 10) e impossibilitam a execução de mais de um teste por dia (quesito 12).

O PDA (procedimento tradicional) apresenta mais pontos positivos em relação às PCEs (comum e instrumentada) por possibilitar a realização do teste durante a cravação (quesitos 1, 3, 4), além do custo e prazo de execução mais interessantes

(quesitos 5 e 6), não necessitando de um sistema de reação (quesito 9), possibilitando a recuperação dos sensores após a execução (quesito 11), possibilitando testar mais de uma estaca por dia (quesito 12). O “ponto de interrogação” nos quesitos distribuição do atrito lateral, carga de ponta e curva carga-recalque é justamente em função da variabilidade dos resultados citado por Fellenius (1988) e Edde (1991).

Observa-se que o Procedimento Proposto (DK) preenche as “lacunas” do PDA (procedimento tradicional), possibilitando a verificação da evolução tanto da capacidade de carga da estaca (atrito lateral e ponta), quanto da curva carga-recalque em função da energia aplicada. Os resultados obtidos através do Procedimento Proposto apresentaram melhores correlações tanto em capacidade de carga quanto em recalques quando comparados com provas de carga estática. Além disso melhorou a representação física do PDA (procedimento tradicional), conforme indicado anteriormente na figura 1, ganhando pontos positivos nos quesitos onde a PCE Comum e PCE Instrumentada tinham como negativo, atendendo a todos os quesitos indicados na tabela 36.

CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 – GENERALIDADES

Durante décadas o ensaio dinâmico tem sido utilizado para verificação de desempenho das fundações, apresentando inúmeras vantagens em relação à prova de carga estática, conforme relatado por Rausche (1994).

Este trabalho se propôs a apresentar uma forma de obter resultados de análises CAPWAP ainda melhores, tentando minimizar a sua variabilidade, conforme apresentado por Fellenius (1988) e Edde (1991).

6.2 – SOBRE O PROCEDIMENTO PROPOSTO

O procedimento consiste na determinação do quake do fuste da estaca através da comparação com resultados de provas de carga estática. Quando o ensaio de carregamento dinâmico é realizado com energia crescente há a possibilidade de correção dos valores de damping e quake da ponta da estaca através das duas condições de contorno apresentadas, a saber: a) proporcionalidade entre a resistência dinâmica total e a velocidade máxima do topo da estaca; b) relação elasto-plástica aproximada entre a resistência e o quake da ponta da estaca, para cada golpe aplicado (manter o parâmetro R da Segunda Relação de Cambefort). Neste contexto surge o novo conceito para avaliação de análise CAPWAP, “Match Quality de recalques” (MQ_R).

6.3 – SOBRE A DETERMINAÇÃO DE q_s E DO NOVO CONCEITO “ MQ_R ”

Como alternativa da prova de carga estática para a determinação de q_s , propõe-se a realização de um carregamento estático com o peso próprio do martelo do bate-estaca (CEPM) antes da realização do ECD, reduzindo tempo e custo de execução. Além disso há a vantagem de não sofrer influência tanto da redução dos valores de quake em função do tempo (Likins, 1996) quanto do fenômeno de “set up”. Apesar de ser um carregamento estático com um único ponto, o procedimento mostrou ser suficiente para uma melhor definição do trecho inicial da curva carga-

recalque do topo. Este trecho inicial da curva é fortemente influenciado pelo quake do fuste da estaca, conforme previsto pelo modelo proposto por Smith (1960) que é utilizado pelo CAPWAP, assim como por modelos matemáticos utilizados na interpretação de provas de carga estática (Massad, 1995). Os valores de quake do fuste (q_s) sugeridos pelo manual do CAPWAP (2006) variam entre 1,0mm e 7,5mm.

Este trabalho apresentou também uma nova forma de medir a “qualidade” das análises CAPWAP através do novo conceito, o “match quality de recalques” (MQ_R). Semelhante ao cálculo do “match quality” da curva “wave up” do CAPWAP (MQ_{WU}), este novo conceito permite medir o “erro” do recalque apresentado pela simulação de prova de carga estática do CAPWAP com o resultado da prova de carga estática. Quanto menor for o valor de MQ_R melhor é a solução do CAPWAP no sentido físico (relação carga-recalque).

Verificou-se que a análise com menor MQ_R apresentou também menor MQ_{WU} , indicando que a solução obtida é a melhor no sentido matemático (MQ_{WU}) assim como no sentido físico (MQ_R). Os melhores valores de MQ_R e MQ_{WU} foram obtidos utilizando o valor do quake do fuste determinado através do procedimento proposto.

A curva da simulação de prova de carga estática do CAPWAP, obtida através da determinação do valor de q_s , apresentou melhor aproximação com a curva carga-recalque da prova de carga estática. Apresentou também boa correlação com a carga de ruptura segundo o critério de Davisson.

O quake do fuste também apresenta forte influência na distribuição do atrito lateral. Quanto maior for o quake do fuste maior será o tempo necessário para mobilização do atrito lateral, de forma que na curva “Wave Up” o atrito lateral de cada elemento de solo vai ficando cada vez mais defasado quanto maior for o quake do fuste adotado na análise.

Valores de q_s elevados podem levar a análises CAPWAP com “match quality” (MQ_{WU}) satisfatórios. Entretanto não apresentam significado físico, pois a curva carga-recalque fica fora da realidade. Além disso, apresentam uma “falsa” conclusão de que o atrito lateral não se esgotou nos últimos elementos da estaca próximo à ponta: os valores de quake do fuste decrescem com a profundidade. Nessas condições não é recomendável extrapolar o atrito lateral através do modelo elasto-plástico ideal.

6.4 – SOBRE A PROPORCIONALIDADE ENTRE A RESISTÊNCIA DINÂMICA TOTAL (RD) E A VELOCIDADE MÁXIMA DO TOPO DA ESTACA

No ECD com energia crescente há a possibilidade da correção dos valores de damping do fuste e da ponta (JS e JT) através da proporcionalidade entre a resistência dinâmica total e a velocidade máxima do topo da estaca (primeira condição de contorno).

Os resultados obtidos através dessa forma de correção mostraram que os valores de Jc (Case Damping Factor), SS (Smith Shaft Damping), ST (Smith Toe Damping) variam em função da energia aplicada (EMX). Nos golpes de menor energia aplicada os valores de Jc são menores em relação aos golpes de maior energia aplicada, enquanto que os valores de SS e ST são maiores nos golpes de menor energia aplicada em relação aos golpes de maior energia aplicada. Admitir que o Jc é constante em todos os golpes aplicados com energia crescente significaria que nos golpes de menor energia aplicada a resistência dinâmica deveria ser aumentada para diminuir a resistência estática, necessitando aumentar excessivamente os valores de SS e ST, piorando os valores de “Match Quality” da curva “Wave Up” (MQ_{WU}). A conclusão é que Jc constante nos golpes de menor energia não faz sentido.

Nos primeiros golpes de menor energia a curva “Wave Up” apresenta uma “falsa” aparência de que há um aumento do atrito lateral nos primeiros metros. Analisando de forma isolada cada um desses golpes de menor energia chega-se a esse equívoco (critério baseado exclusivamente na avaliação de MQ_{wu}). Entretanto, ao analisar todos os golpes de forma global utilizando o Procedimento Proposto, isto é, através da determinação de q_s e correção de JS, JT e QT, conclui-se que o aumento da curva “Wave Up” nos primeiros instantes é devido ao efeito de “damping”. De fato, conforme indicado nas figuras 13 e 14 o trecho inicial da curva “Wave Up” pode ser aumentado através do aumento de JS (damping do fuste) e JT (damping da ponta), não se trata de um efeito exclusivo de RS (atrito lateral). Outro argumento de que o aumento da curva é devido ao aumento de JS e JT é que caso fosse feito o aumento de RS desses golpes de menor energia e fosse feita a soma dos máximos valores de atrito lateral para cada golpe e da carga máxima de ponta, o

resultado obtido excederia o valor obtido pela prova de carga estática, piorando a correlação.

6.5 – SOBRE AS RELAÇÕES DE CAMBEFORT

O presente estudo mostrou que nos ensaios dinâmicos com energia crescente é possível verificar os pontos notáveis das Relações de Cambefort, indicando que nos golpes de menor energia não há mobilização de todo o atrito lateral nos últimos elementos de solo (trecho 3-4 das Relações de Cambefort). Neste caso o quake do fuste diminui a partir de uma determinada profundidade, proporcionalmente com a carga, segundo o modelo elasto-plástico ideal. Há um ponto da curva RMX-DMX onde ocorre o esgotamento do atrito lateral, ponto 4 das Relações de Cambefort. A partir deste ponto todo acréscimo de carga é exclusivamente devido à resistência de ponta; neste caso o acréscimo de resistência de ponta é proporcional ao acréscimo do quake da ponta da estaca, segundo o modelo elasto-plástico ideal, até atingir a ruptura do sistema (ponto 5 das Relações de Cambefort). Define-se o parâmetro “R” da Segunda Relação de Cambefort (segunda condição de contorno).

O estudo mostrou também que no ECD com energia crescente as análises CAPWAP realizadas segundo o procedimento tradicional (critério baseado exclusivamente na avaliação de MQ_{wu}) podem levar a uma má definição do parâmetro “R” da Segunda Relação de Cambefort. Isso significa que golpes com maior energia podem apresentar menores valores de resistência e mesmo do quake da ponta da estaca em relação aos golpes de menor energia. Mesmo assim os valores de MQ_{wu} foram satisfatórios em todos os golpes nos casos das obras analisadas segundo o procedimento tradicional. Além disso, os valores de q_s , do atrito lateral e a sua distribuição em profundidade foram diferentes para cada golpe analisado no ECD com energia crescente segundo o procedimento tradicional.

6.6 – SOBRE AS TENSÕES RESIDUAIS E O FENÔMENO DE ATRITO NEGATIVO

A realização do carregamento estático com o peso próprio do martelo (CEPM), após a realização do ensaio dinâmico, costuma apresentar um recalque

“ligeiramente” maior do que se o mesmo fosse realizado antes do ensaio dinâmico, podendo até apresentar recalques “negativos” após um determinado intervalo de tempo da aplicação da carga estática, indicando uma influência de tensões residuais. Essa seria uma justificativa para a diferença entre os recalques do CAPWAP e do peso do martelo do bate-estaca (CEPM) em alguns dos casos de obra analisados.

Uma explicação para a ocorrência de recalques “negativos” é que após a realização do ensaio dinâmico surge uma carga aprisionada na ponta sem que o recalque no descarregamento tenha se estabilizado. Mesmo com a aplicação de uma carga com o peso do martelo a resultante das forças é no sentido “negativo” do eixo dos recalques, indicando que a carga aprisionada na ponta é superior ao peso do martelo, que define um limite inferior da carga residual.

Nas estacas onde se realizou o CEPM após o ECD foram feitas análises CAPWAP utilizando a opção RSA (Residual Stress Analysis). Os resultados obtidos indicaram valores de cargas residuais na ponta superiores ao peso próprio do martelo do bate estaca (limite inferior da tensão residual), indicando boa concordância entre o ensaio dinâmico e o estático.

Nas estacas analisadas da obra em Jacareí as provas de carga estática sofreram maior influência do fenômeno de atrito negativo em função do tempo decorrido entre a cravação das estacas e sua realização. Entretanto, as capacidades de carga das estacas não sofreram redução. Uma explicação para o ocorrido é que o fenômeno de atrito negativo gera uma tensão residual na estaca, apresentando um atrito negativo que se equilibra com atrito positivo e a carga aprisionada na ponta.

Há uma profundidade denominada de linha neutra, separando o atrito negativo do positivo. Ao realizar a prova de carga, o atrito negativo é revertido para positivo e a capacidade de carga (atrito lateral e carga de ponta) não é alterada. Os resultados dessas estacas que sofreram influência do fenômeno de atrito negativo comprovam a hipótese de Fellenius (1988) de que o fenômeno de atrito negativo não deve reduzir a capacidade de carga da estaca durante a realização de ensaios (ECD e PCE).

6.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos mostraram a importância da determinação do quake do fuste da estaca e do ajuste dos valores de damping (primeira condição de contorno) e quake da ponta da estaca (segunda condição de contorno).

A curva RMX-DMX obtida através do Método Case permite definir a carga de ruptura, conforme apresentado por Aoki (1997). Apesar de ser muito utilizada no Brasil, não foi o método que apresentou melhor correlação com as provas de carga estática segundo o critério de Davisson, seja em capacidade de carga ou na estimativa de recalques.

Os valores de “Radiation Damping” (SK) utilizados nas análises situaram-se próximos do limite superior sugeridos por Likins (1996), com Ω entre 6 e 8.

A análise CAPWAP realizada exclusivamente através de procedimentos automáticos (AT) pode resultar em valores de “Match Quality” (MQ_{WU}) satisfatórios. Entretanto não substituem a análise de um operador experiente. Não é recomendável a utilização da função “AC” do CAPWAP (ajuste automático de todas as variáveis envolvidas na análise), exceto para uma rápida estimativa da capacidade de carga. Apesar de resolver a equação de onda e até apresentarem valores de “Match Quality” (MQ_{WU}) satisfatórios, o “Match Quality” de recalques (MQ_R) não é o melhor possível, podendo apresentar soluções muito diferentes do esperado, como por exemplo divergência na distribuição do atrito lateral, na carga de ponta e no formato da curva carga-recalque. O operador de CAPWAP deve direcionar a solução para os valores esperados, sendo fundamental nas primeiras 50 a 100 tentativas o ajuste manual dos parâmetros envolvidos na análise, ou até que se obtenha uma redução significativa de MQ_{WU} , com valores entre 3,5 e 7,0. A melhoria de “Match Quality” (MQ_{WU}) através de procedimentos automáticos nos parâmetros do solo (opção “AQ”) deve ser realizada com cautela, restringindo os limites de cada variável de forma manual (e não através da “larga faixa de valores sugeridos pelo software”), direcionando a solução de forma a obter o melhor “Match Quality” de recalques (MQ_R), assim como atender às duas condições de contorno apresentadas.

Bons valores de MQ_{WU} garantiram boas correlações de capacidade de carga nas análises CAPWAP com o modelo de “Radiation Damping” (RD, RD2,5e RD7,5). O procedimento proposto (DK) apresentou menores valores de MQ_{WU} e MQ_R , melhorando a correlação de capacidade de carga e de recalques.

Observa-se que o Procedimento Proposto preenche as “lacunas” do PDA (procedimento tradicional), possibilitando a verificação da evolução tanto da capacidade de carga da estaca (atrito lateral e ponta), quanto da curva carga-recalque em função da energia aplicada. A curva carga-recalque obtida através do Procedimento Proposto apresentou melhores correlações tanto em capacidade de carga como na estimativa dos recalques. O PDA (procedimento tradicional) apresenta o “ponto de interrogação” nos quesitos distribuição do atrito lateral, carga de ponta e curva carga-recalque justamente em função da variabilidade dos resultados citada por Fellenius (1988) e Edde (1991). O Procedimento Proposto melhorou a representação física do PDA (procedimento tradicional), conforme indicado anteriormente na figura 1, ganhando pontos positivos nos quesitos onde a PCE Comum e PCE Instrumentada tinham pontos negativos, conforme indicado na tabela 36.

CAPÍTULO 7 – SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Verificar a possibilidade de extrapolação dos resultados do CAPWAP através do modelo elasto-plástico ideal para ensaios dinâmicos que foram interrompidos prematuramente.

Verificar a influência das tensões residuais nos valores do atrito lateral determinados através do CAPWAP.

Avaliar a variabilidade dos valores e da distribuição do atrito lateral através das análises CAPWAP, verificando a possibilidade de utilização dos mesmos para determinação de esforços de tração.

Comparar os resultados de provas de carga estática com ensaios dinâmicos utilizando o procedimento proposto em diversos tipos de estacas, tais como: estaca raiz, estaca hélice contínua, perfil metálico, estaca escavada, etc.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOKI, N. e VELLOSO, D. A.; *An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles.*; Proceedings of the 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, vol. 1, 1975.
- AOKI, N.; *A new dynamic load test concept.*; Drivability of piles (1): 1-4, Proc. Discussion Session 14, Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng. (12), Rio de Janeiro, 1989.
- AOKI, N.; *Determinação da capacidade de carga última de estaca cravada em ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente.*; Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, 1997.
- AUTHIER, J.; FELLENIUS, B. H. *Quake values determined from dynamic measurements*; Proceedings 1st International Conference on the Application of stress Wave Theory on Piles, Stockholm, pp. 197-216, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12131; *Estacas Prova de carga estática –Método de ensaio*, Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13208; *Estacas Ensaio de carregamento dinâmico*, Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122; *Projeto e Execução de Fundações*, Rio de Janeiro, 2010.
- BILFINGER, W.; *Crítérios de segurança de fundações em estacas cravadas com consideração de controles executivos.* Tese (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.
- BJERRUM, L., JOHANNESSEN, I. J., and EIDE, O.; *Reduction of negative skin*

friction on steel piles to rock. Proc. 7th ICSMFE, Mexico City, Vol. 2, pp. 27-34, 1969.

- CABETTE, J. F., MURAKAMI, D. K.; *Ajuste das fórmulas dinâmicas com base em ensaios de carregamento dinâmicos para a estimativa da capacidade de carga de estacas pré-fabricadas de concreto*, XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia, 2014.
- CINTRA, J. C. A. ET AL; *Fundações – ensaios estáticos e dinâmicos*. Oficina de textos, 2013.
- DA SILVA, A. B. ET AL.; *Provas de carga estática "versus" dinâmica: confrontação de alguns resultados*. VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e engenharia de Fundações, P. Alegre, 1986.
- DÉCOURT, L. e QUARESMA, A. R. *Capacidade de Carga de Estacas a partir de Valores de SPT*. *Anais do 6º COBRAMSEF, Rio de Janeiro, vol.1, p. 45-53, 1978*.
- DÉCOURT, L. e QUARESMA, A. R., *Como calcular (rapidamente) a capacidade de carga de uma estaca*. *Revista Construção São Paulo, n1800, Agosto, 1982, Separata*.
- DÉCOURT, L. *Ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez*. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE III, v.1, pp.215-224, 1996.
- DÉCOURT, L. *Provas de carga podem dizer muito mais .do que têm dito*. 6º Seminário de fundações especiais e geotecnia, São Paulo, 2008.
- EDDE, R. D. *CAPWAP – Evaluation of driven piles*. Msc Thesis, University of Ottawa, Canada, 1991.
- FELLENIUS , B.H.; *Test loading of piles — Methods, interpretation, and proof*

testing. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division 101 (GT9) pp. 855 – 869, 1975.

- FELLENIUS , B.H.; *The analysis of results from routine pile loading tests*. Ground Engineering, London, 13 (6) pp. 19 – 31, 1980.
- FELLENIUS, B.H., *Ignorance is bliss - and that's why we sleep so well*; Canadian Geotechnical society and United States National Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2, No. 4, pp.14-15, 1984.
- FELLENIUS, B.H., *Negative skin friction and settlement of piles*; Second International Seminar, Pile Foundations, Nanyang Technological Institute, Singapore, 1984.
- FELLENIUS, B.H., *Variation of CAPWAP results as a function of the operator*; Proceedings of the Third international conference on the application of stress-Theory to Piles, Ottawa, pp.814-825, 1988
- FELLENIUS, B. H.; RIKER, R. E.; O'BRIEN, A. J.; TRACY, G. R., *Dynamic and static testing in soil exhibiting set-up*; Journal of geotechnical Engineering, Vol. 115. No. 7, pp. 984-1001 – ASCE, 1989.
- FELLENIUS, B.H., *Is capacity fully mobilized?*; Geotechnical News Magazine, Vol. 10, No. 1, pp. 58-61. 1992.
- FELLENIUS, B.H., *Recent advances in the design of piles for axial loads, dragloads, downdrag, and settlement*; ASCE and port of NY & NJ seminar., 1998.
- FELLENIUS, B.H., *Determining the true distributions of Load in Instrumented Piles*; ASCE International Deep Foundations Congress “Down to Earth Technology”, Vol. 2, pp. 1455-1470, Orlando,Florida., 2002.
- FELLENIUS, B.H., *Unified design of piled foundations with emphasis on*

settlement analysis. Honoring George G. Goble — "Current Practice and Future Trends in Deep Foundations" Geo - Institute Geo - TRANS Conference, Los Angeles, July 27 - 30, Edited by J.A. DiMaggio and M.H. Hussein. ASCE Geotechnical Special Publication , GSP 125 , pp. 253 – 275, 2004.

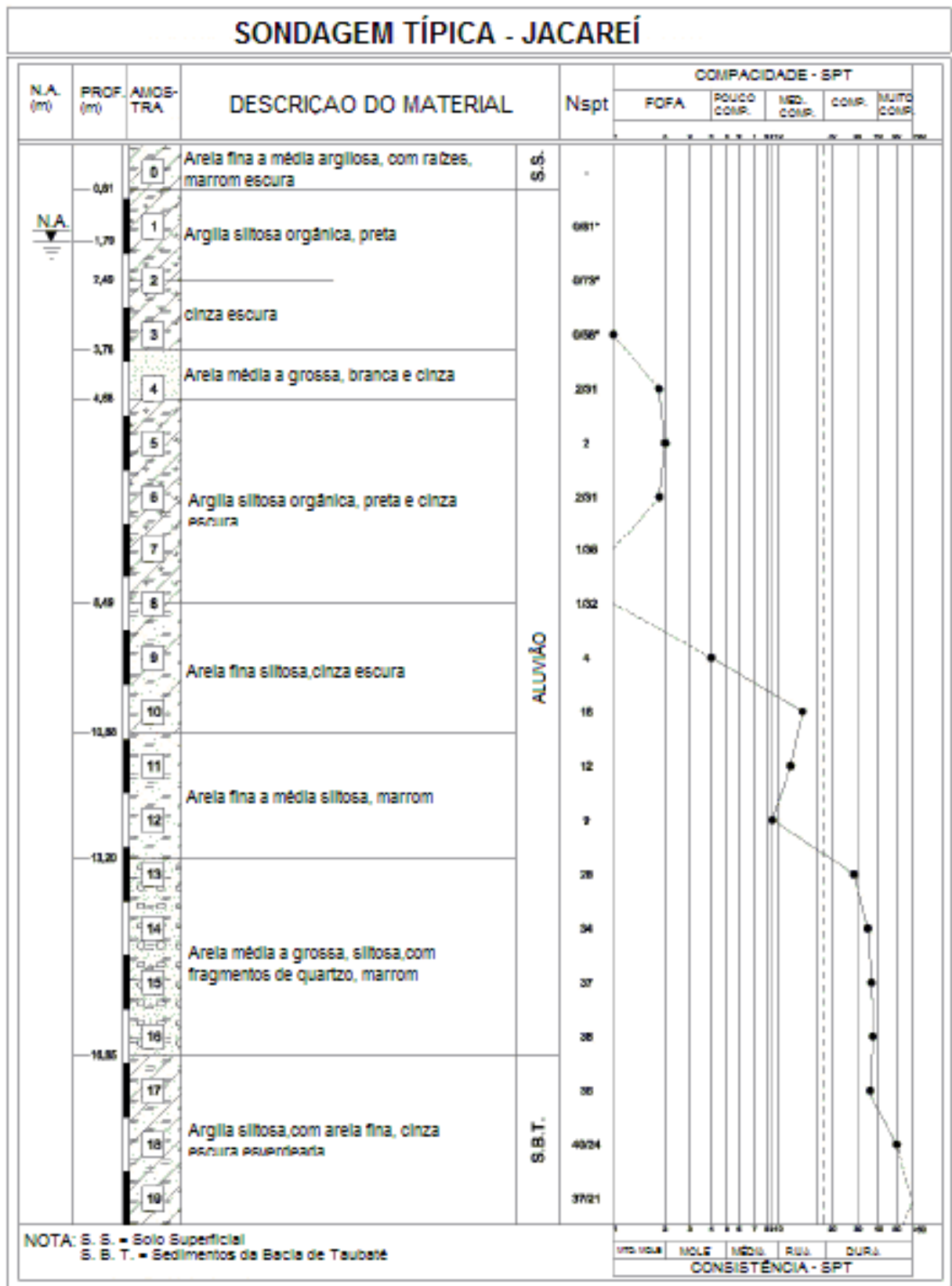
- FELLENIUS, B.H., *Basics of Foundation Design "The Red Book"*; Eletronic Edition, 2009. <http://www.fellenius.net/papers.html>
- GARTNER, *Gartner Magic Quadrant*, <http://www.gartner.com/technology/research/methodologies/magicQuadrants.jsp>, 2015;
- GOLOMBEK, M.; FLECHTMAN, J. S.; *Fundações da ponte sobre o mar pequeno: negas de recuperação*. Revista solos e rochas, VOL. 5, P. 27-31, 1981.
- GONÇALVES, C., BERNARDES, G. P., NEVES, L. F. S., *Cuidado com as provas de carga dinâmica (?)*; 6º Seminário de fundações especiais e geotecnia, São Paulo, 2008.
- LIKINS, G. E.; MAKREDES, H.S.; *Bearing Capacity of Piles From Dynamic Measurements*. Seventh Southeast Asian Geotechnical Conference: Hong Kong; pp. 375-389, 1982.
- LIKINS, G. E., *Pile installation difficulties in soils with large quakes*. Dynamic Measurement of Piles and Piers, American Society of Civil Engineers, Geotechnical Engineering Division: Philadelphia, PA, 1983.
- LIKINS, G. E., *Relaxation Of H Piles In Shale*, Napa users day, 1985.
- LIKINS, G. E., ET AL, *CAPWAP ccorrelation studies*. Proceedings of the fifth International Conference on the application of stress theory to piles, Orlando, Florida, pp. 447-464, 1996.

- LIKINS, G. E., FELLENIUS, B. H., HOLTZ, R. D., *Pile Driving Formulas: Past and Present*. Full-Scale Testing and Foundation Design: ASCE Geo-Institute Geotechnical Special Publication No. 227; 737-753., March 2012.
- MASSAD, F.; *Pile analysis taking into account soil rigity and residual stress*. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Guadalajara, México, Vol 2, pp. 1199-1210, 1995.
- MURAKAMI, D. K., CABETTE, J. F.; *Dificuldade de cravação em solos com quake elevados*; seminário apresentado em "Workshop - Ensaio de Carregamento Dinâmico e Monitoração de Cravação de Estacas (Pile Driving Analyzer e CAPWAP)", 2014.
- MURAKAMI, D. K., MASSAD, F.; *Determinação do quake do fuste de estacas pré-moldadas através de provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico*, XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia, 2014.
- NIYAMA, S., AOKI, N.; *Correlações entre prova de carga estática e dinâmica no campo experimental da EPUSP*, Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE II, São Paulo, pp 285-293, 1991.
- NIYAMA, S.; *Medições dinâmicas na cravação de estacas*, Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1983.
- PASCHOALIN FILHO, J. A. *Estudo Do Comportamento À Tração Axial De Diferentes Tipos De Estacas Em Solo De Diabásio Da Região De Campinas/Sp*; Tese de Doutorado, Unicamp, 2008
- PILE DYNAMICS, INC. *CAPWAP manual*, Cleveland, 2006.
- PILE DYNAMICS, INC. *Newsletter No. 74*, January, 2014.
- RAUSCHE, F., MOSES, F., GOBLE, G. G.; *Soil Resistance Predictions From Pile*

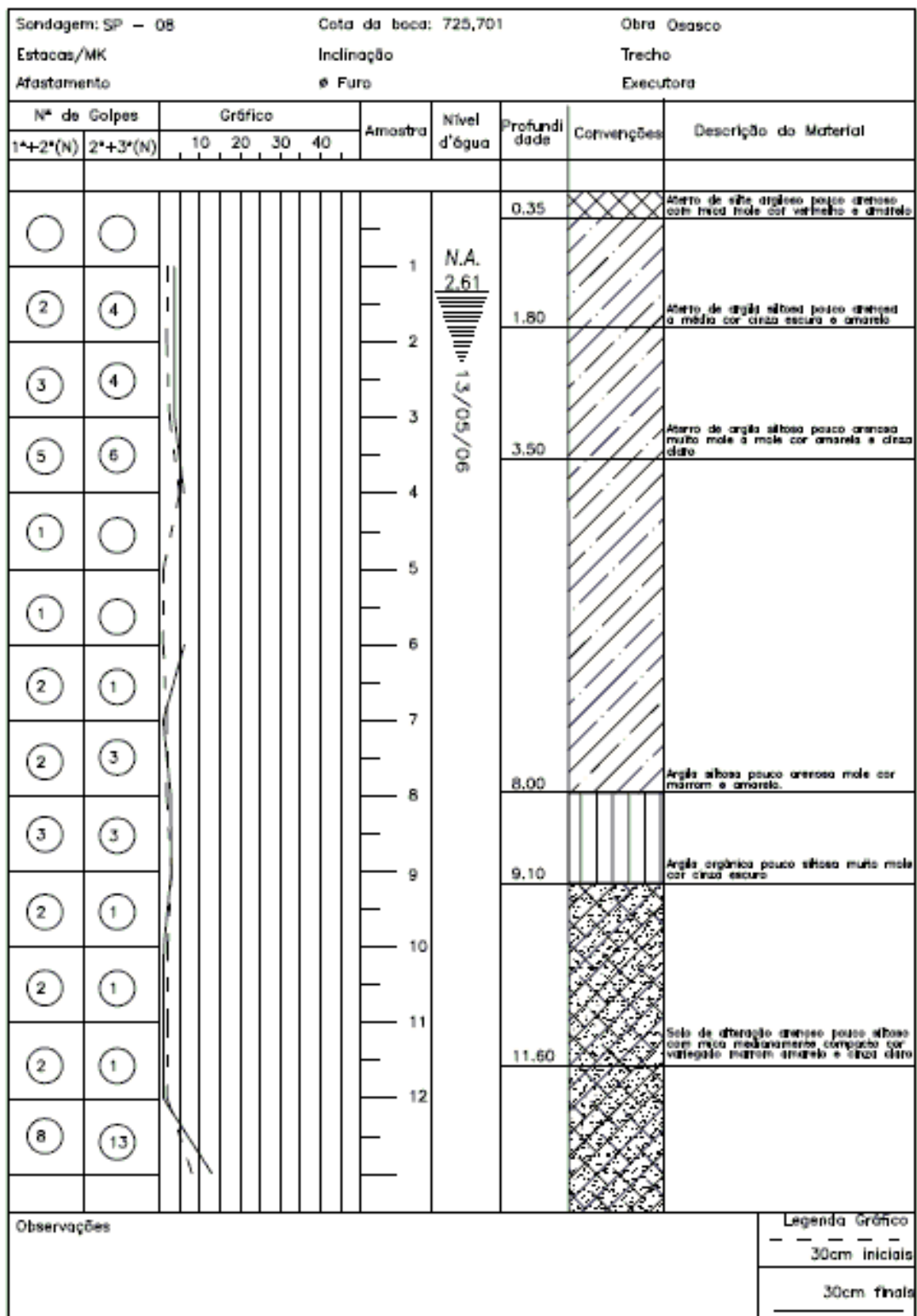
Dynamics. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers. Reprinted in Current Practices and Future Trends in Deep Foundations, Geotechnical Special Publication No. 125, DiMaggio, J. A., and Hussein, M. H., Eds, August, 2004. American Society of Civil Engineers: Reston, VA; 418-440, 1972.

- RAUSCHE, F. ET AL; *A rational and usable wave equation soil model based on field test correlation*. International conference on design and construction on deep foundations, Vol. 2, Orlando, Fl; pp.1118-1132, 1994.
- ROSA, R. L. *Proposição de modificação das fórmulas dinâmicas de cravação de Chellis e de Uto et al a partir de resultados do método CASE*. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- SMITH, E.A.L.; *Pile Driving Analysis by the Wave Equation*. Journal of the Mechanics and Foundations Division. Proc. of American Society Civil Engineering (ASCE), agosto, pp. 35-61, 1960.
- VELLOSO, D. A., LOPES, F.R.; *Fundações Vol. 2*. Editora COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

ANEXO A – SONDAGEM TÍPICA DE JACAREÍ – SEÇÃO GEOLÓGICA



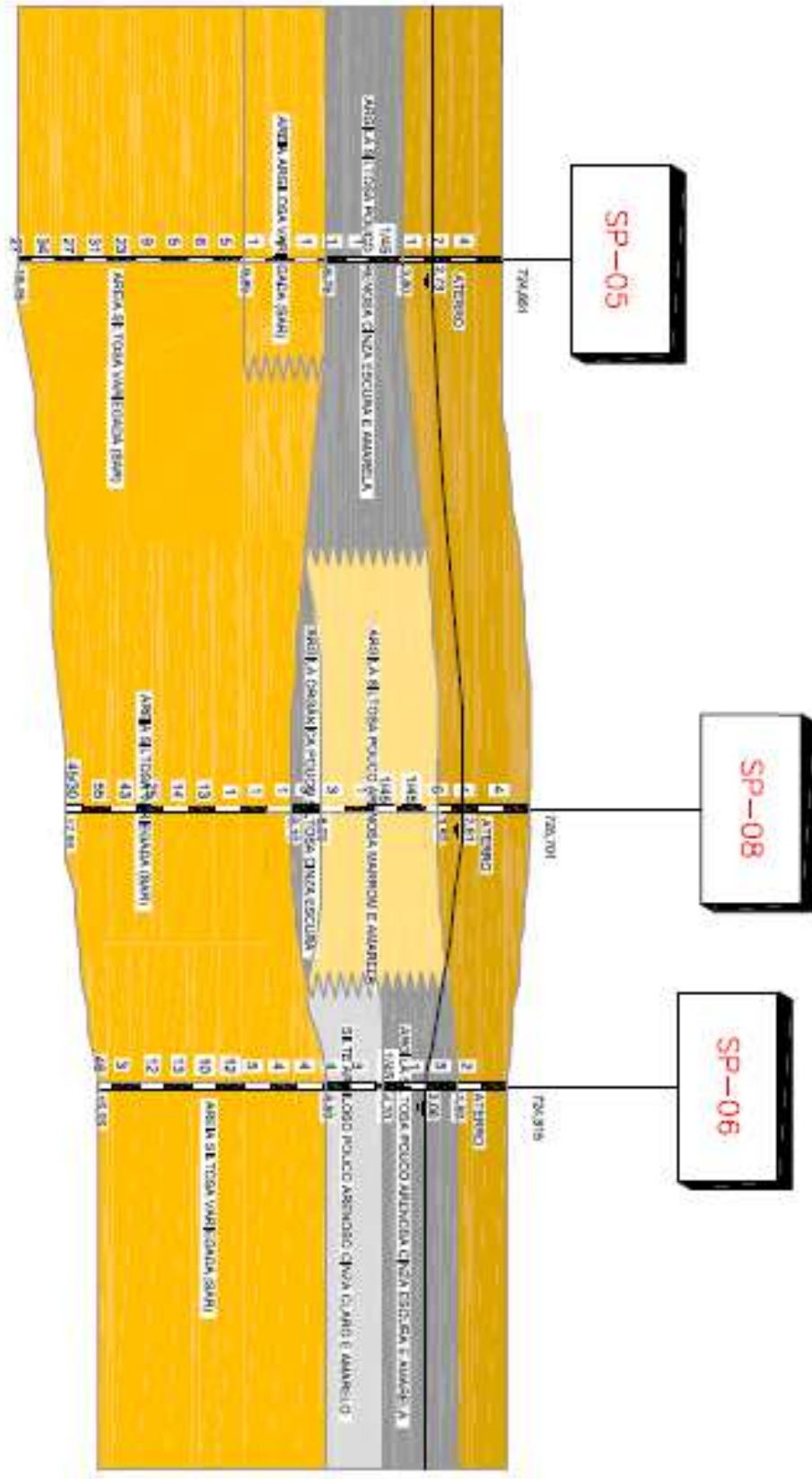
ANEXO B – SONDAGEM TÍPICA DE OSASCO – SEÇÃO GEOLÓGICA



ANEXO B – SONDAGEM TÍPICA DE OSASCO – SEÇÃO GEOLÓGICA

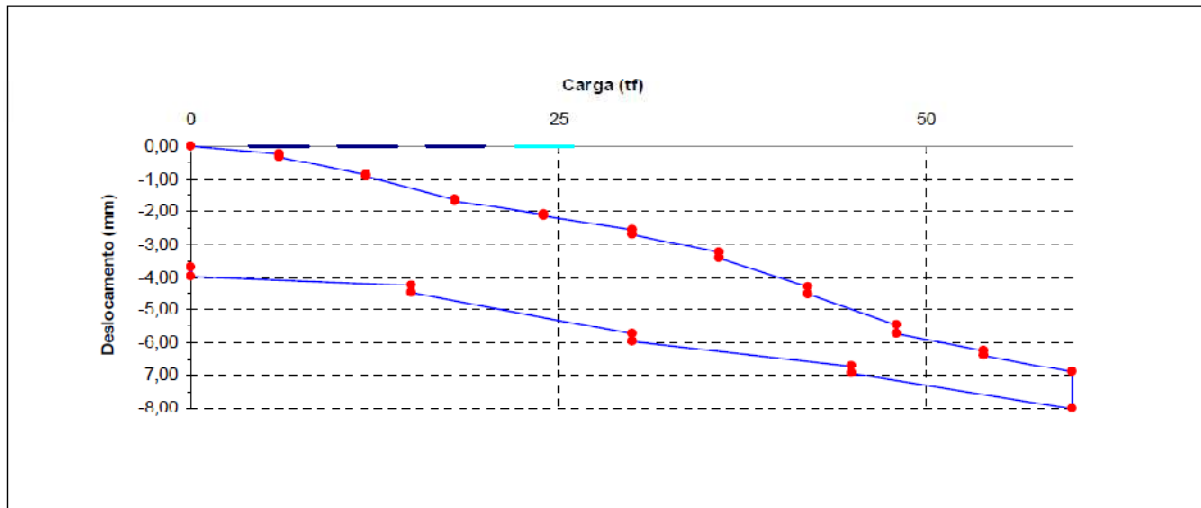
Sondagem: SP – 08		Cota da boca: 725,701		Obra Osasco										
Estacas/MK		Inclinação		Trecho										
Afastamento		Ø Furo		Executora										
Nº de Golpes		Gráfico				Amostra	Nível d'água	Profundidade	Convenções	Descrição do Material				
1ª+2ª(N)	2ª+3ª(N)	10	20	30	40									
○	○													
(10)	(14)					13		13.60		Solo de Alteração arenosa pouco silteosa com mica compacta a muito compacta cor variegada marrom, amarela e cinza escuro				
(24)	(25)					14								
(32)	(43)					15								
(35)	(55)					16								
(45)	○					17		17.65						
○	○					18					FINAL DA SONDAGEM = 17,65m			
○	○					19								
○	○					20								
○	○					21								
○	○					22								
○	○					23								
○	○					24								
Observações									Legenda Gráfico					
									- - - 30cm iniciais _____ 30cm finais					

ANEXO B – SONDAGEM TÍPICA DE OSASCO – SEÇÃO GEOLÓGICA

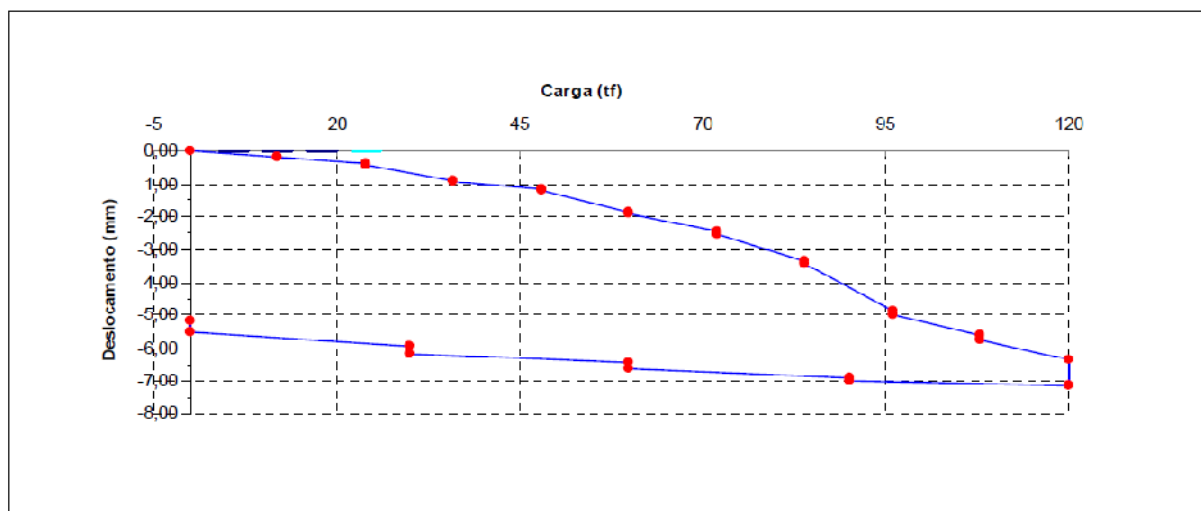


ANEXO C – PROVAS DE CARGA ESTÁTICA

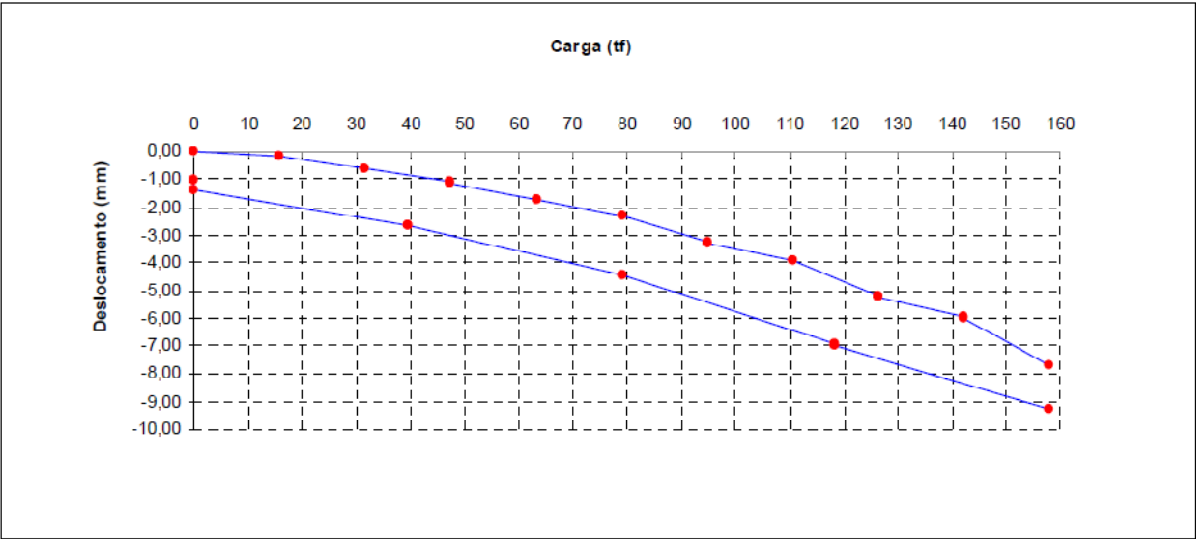
Jacareí – Estaca E49 de Seção 20x20cm



Jacareí – Estaca E01 de Seção ϕ 33cm



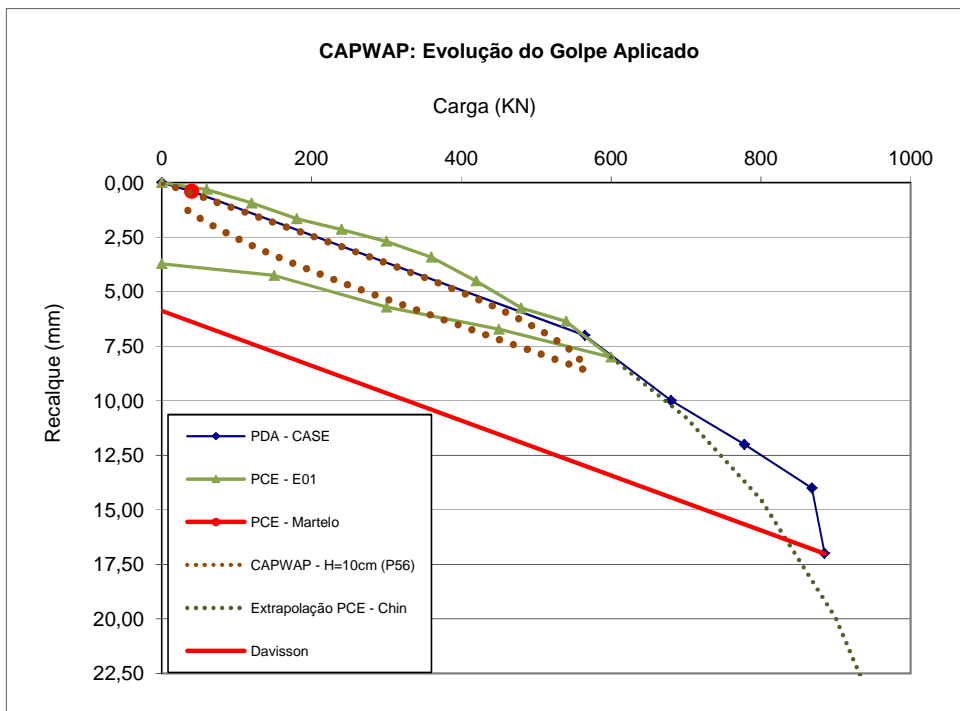
Osasco – Estaca E01 de Seção ϕ 38cm



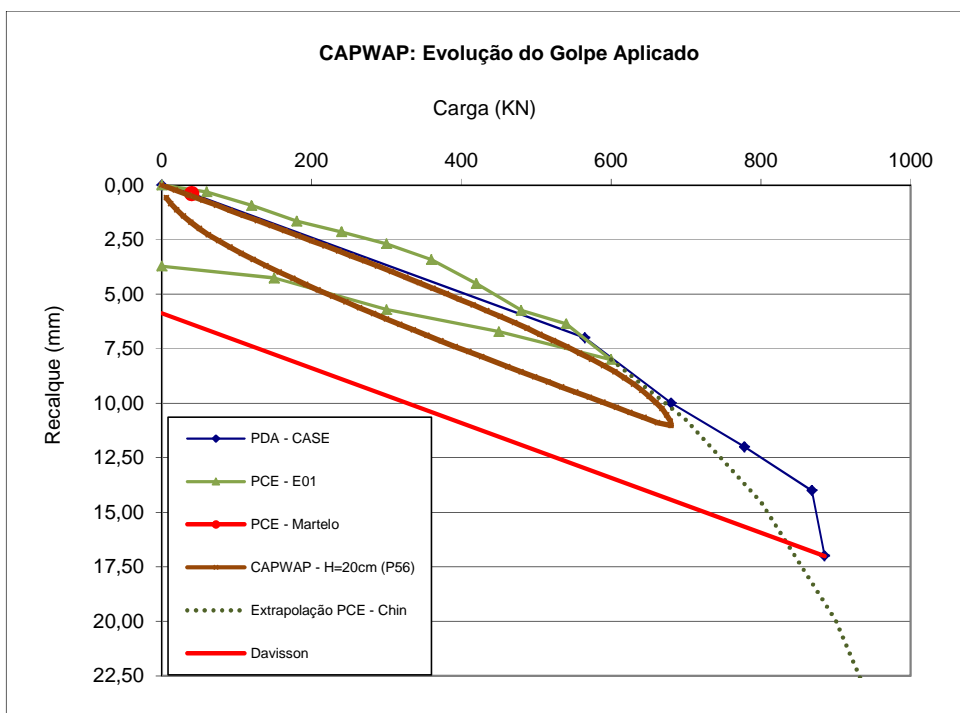
ANEXO C – EVOLUÇÃO DA CURVA CARGA-RECALQUE

Jacareí

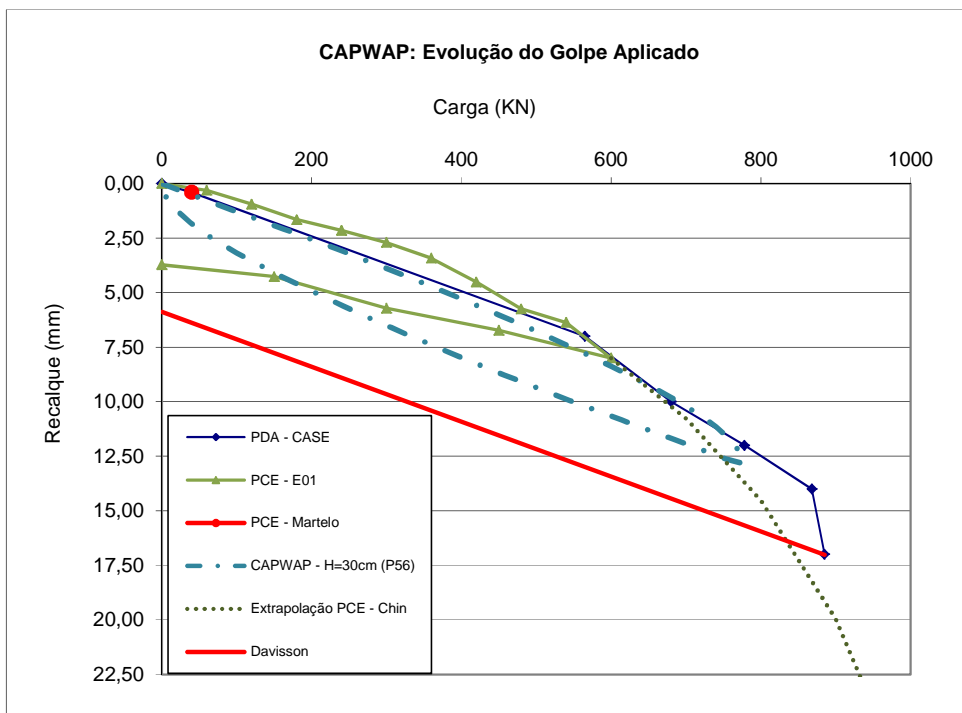
Estaca P56 de seção 20x20cm - Golpe com H=10cm



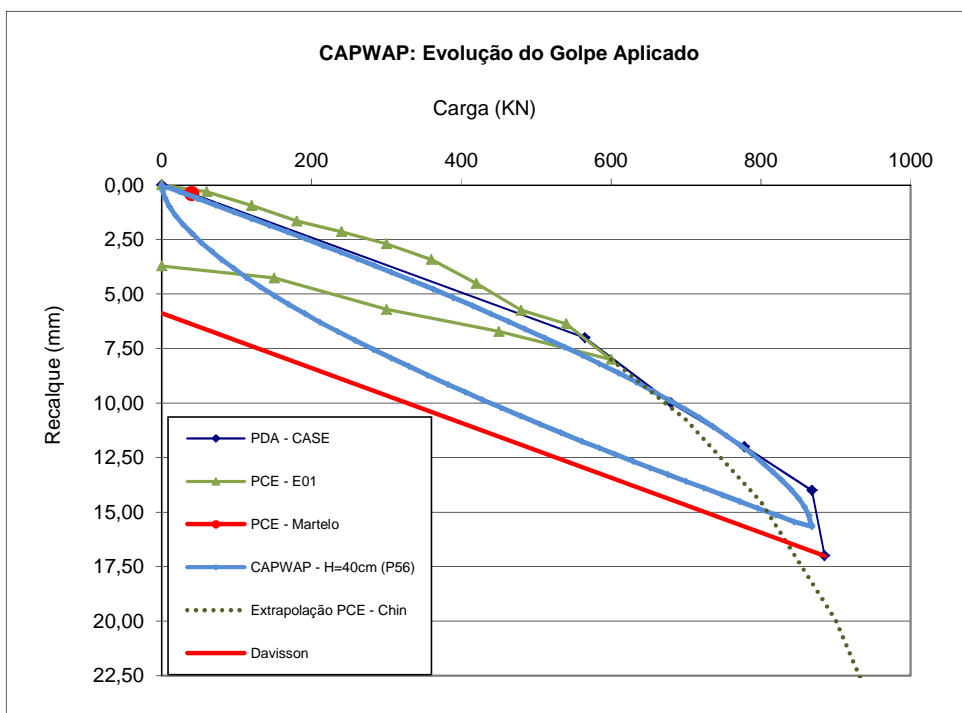
Estaca P56 de seção 20x20cm - Golpe com H=20cm



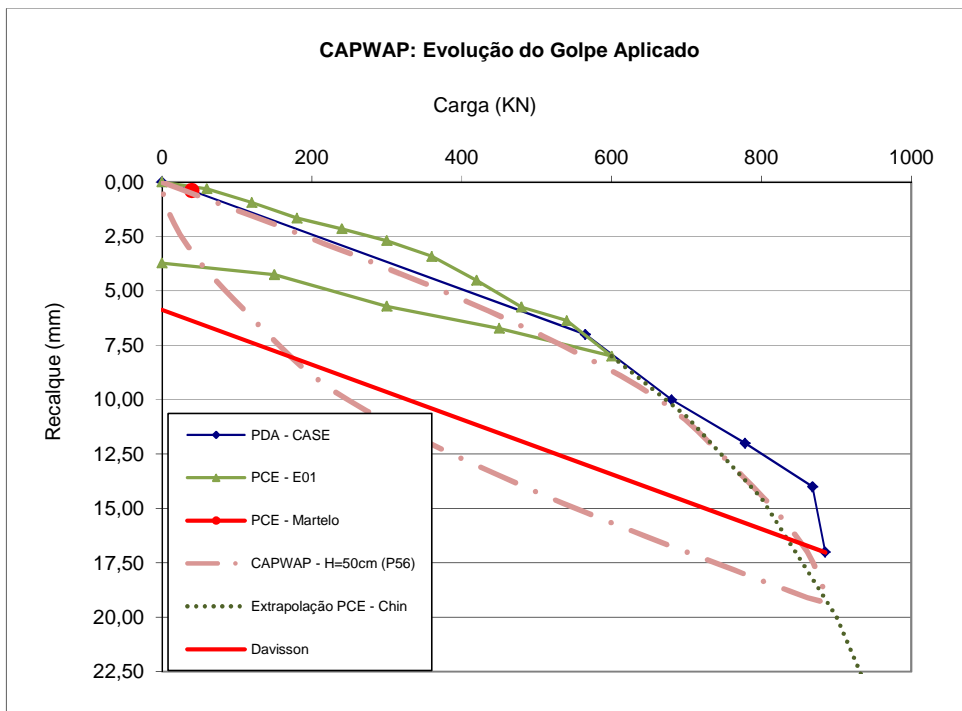
Estaca P56 de seção 20x20cm - Golpe com H=30cm



Estaca P56 de seção 20x20cm - Golpe com H=40cm

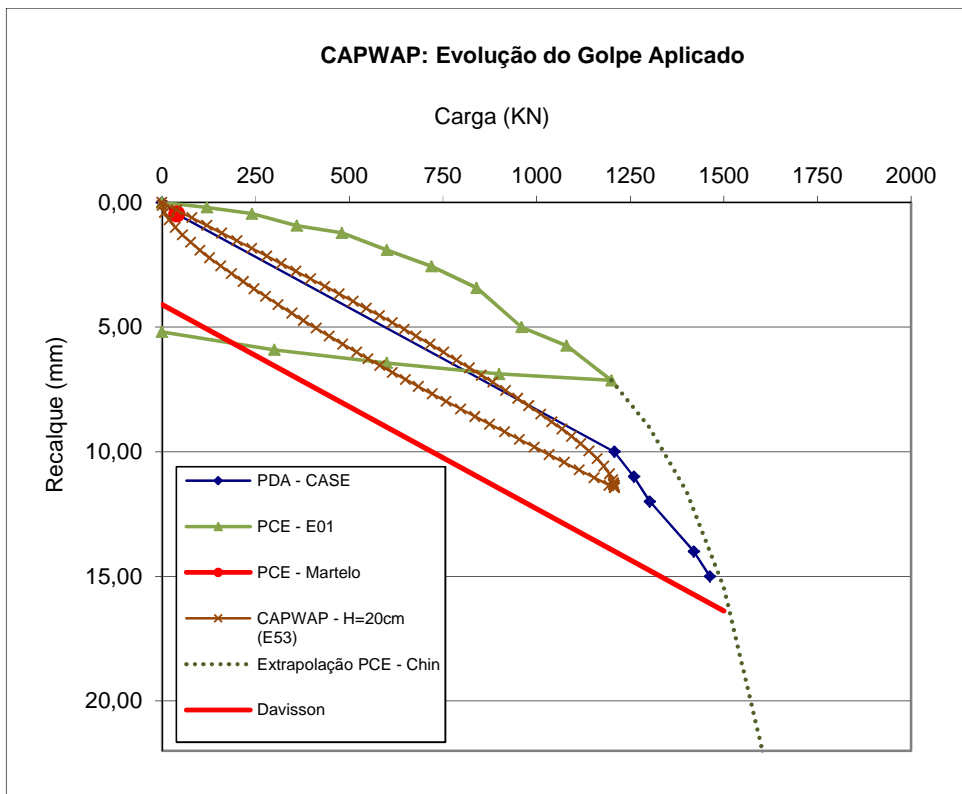


Estaca P56 de seção 20x20cm - Golpe com H=50cm

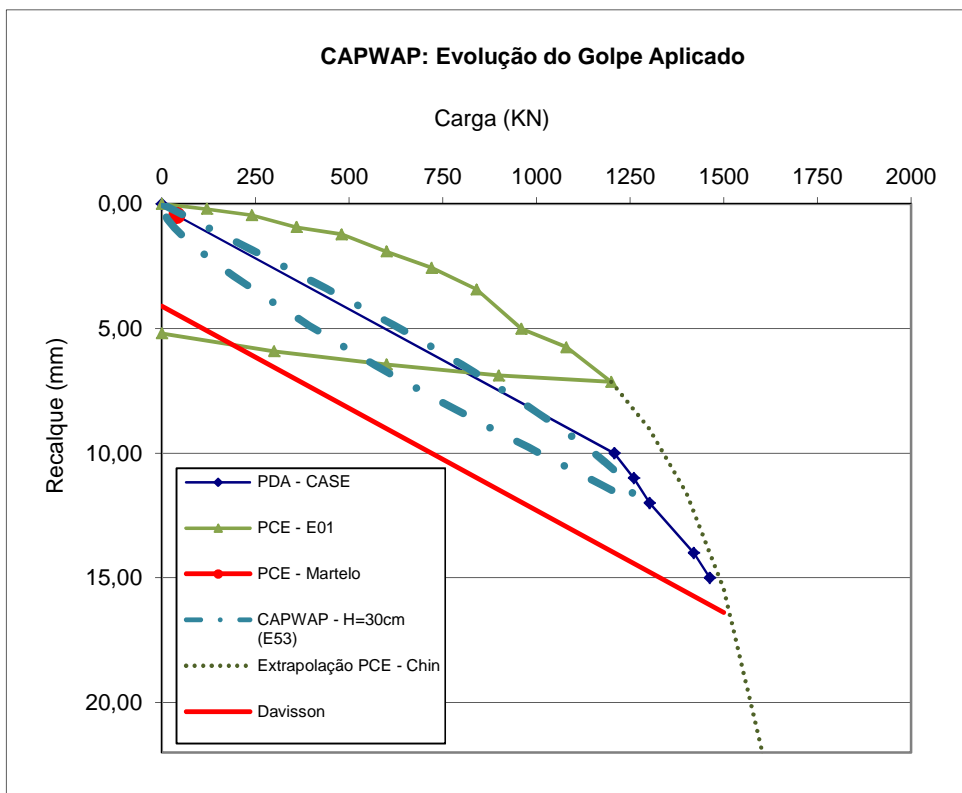


Jacareí

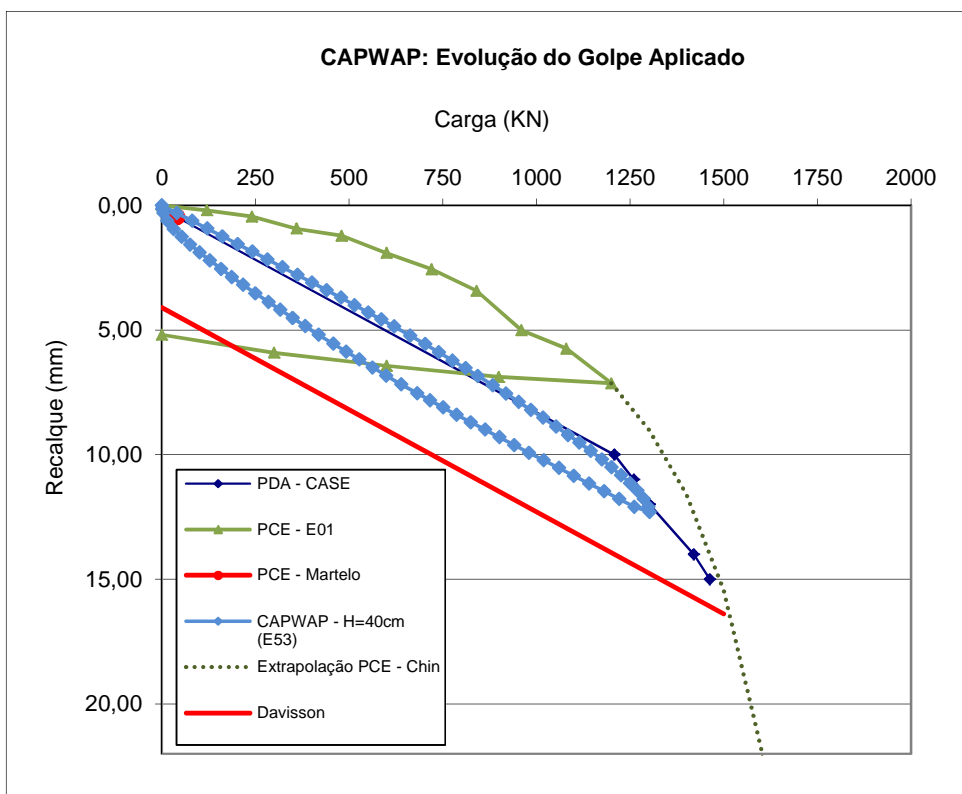
Estaca E53 de seção D=33cm - Golpe com H=20cm



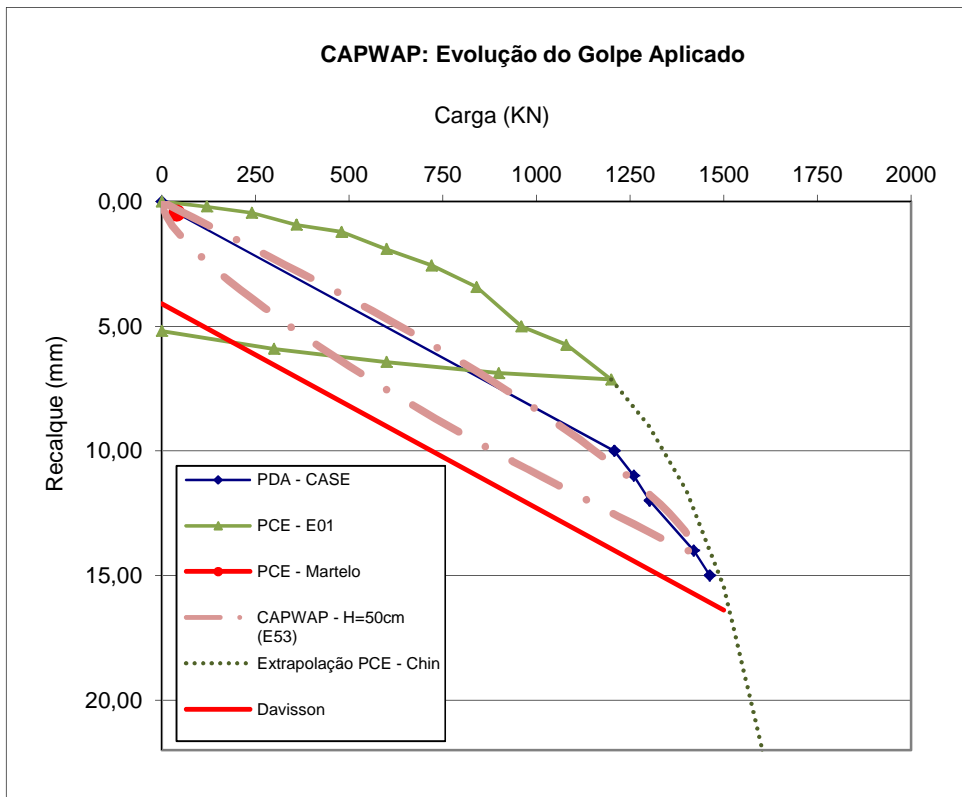
Estaca E53 de seção D=33cm - Golpe com H=30cm



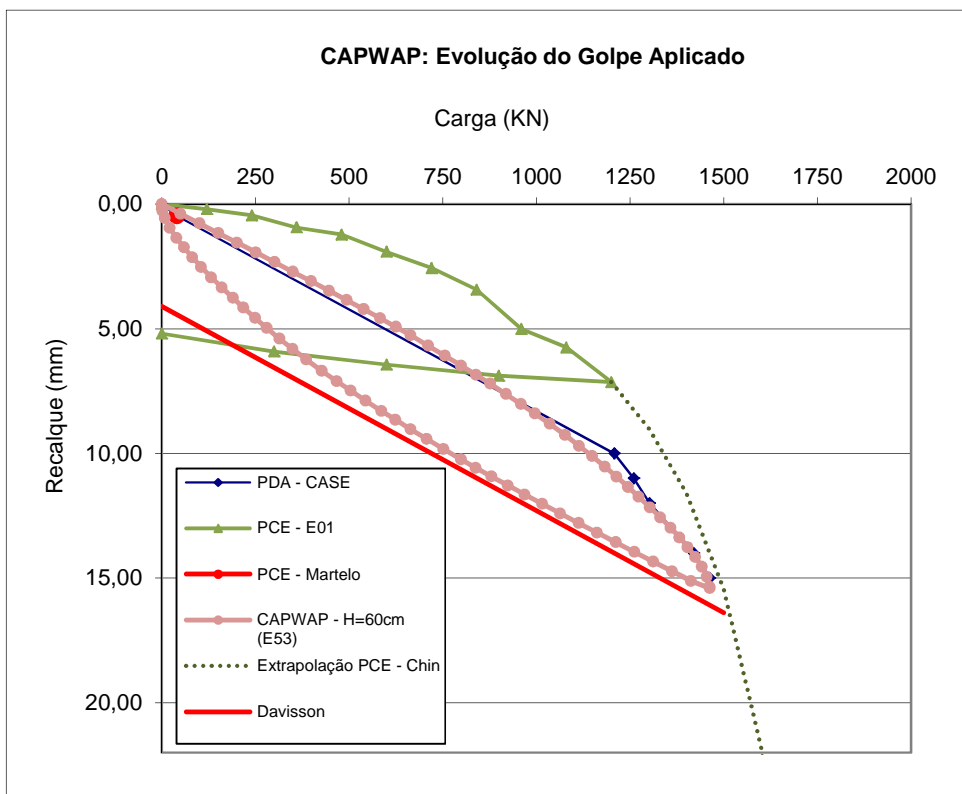
Estaca E53 de seção D=33cm - Golpe com H=40cm



Estaca E53 de seção D=33cm - Golpe com H=50cm

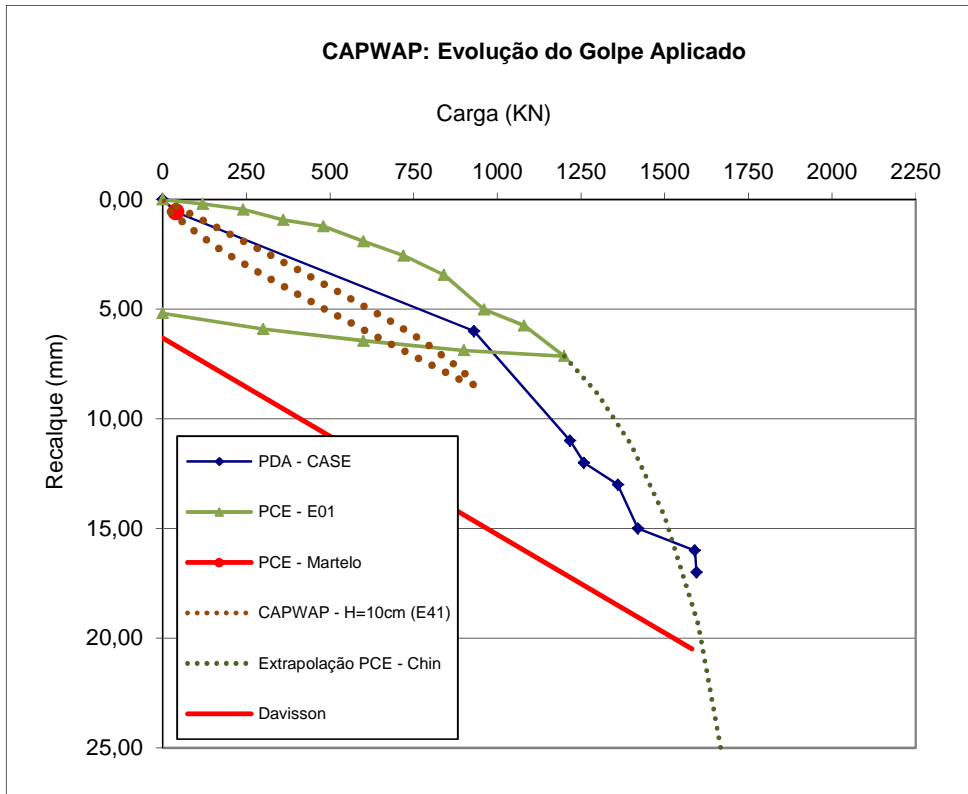


Estaca E53 de seção D=33cm - Golpe com H=60cm

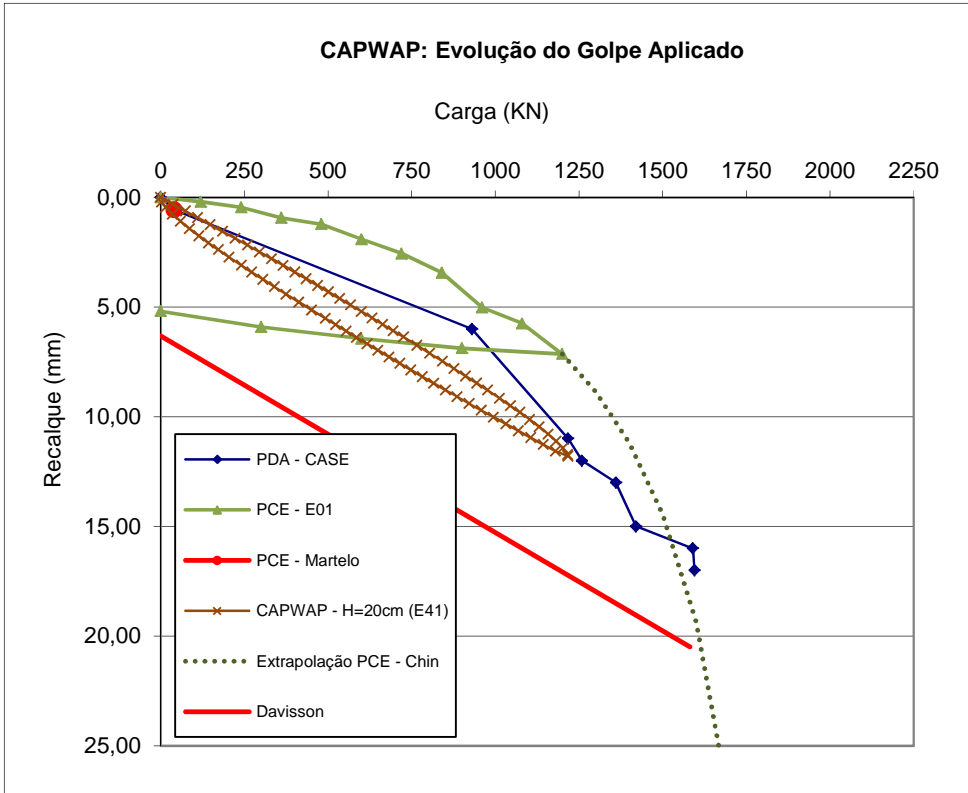


Jacareí

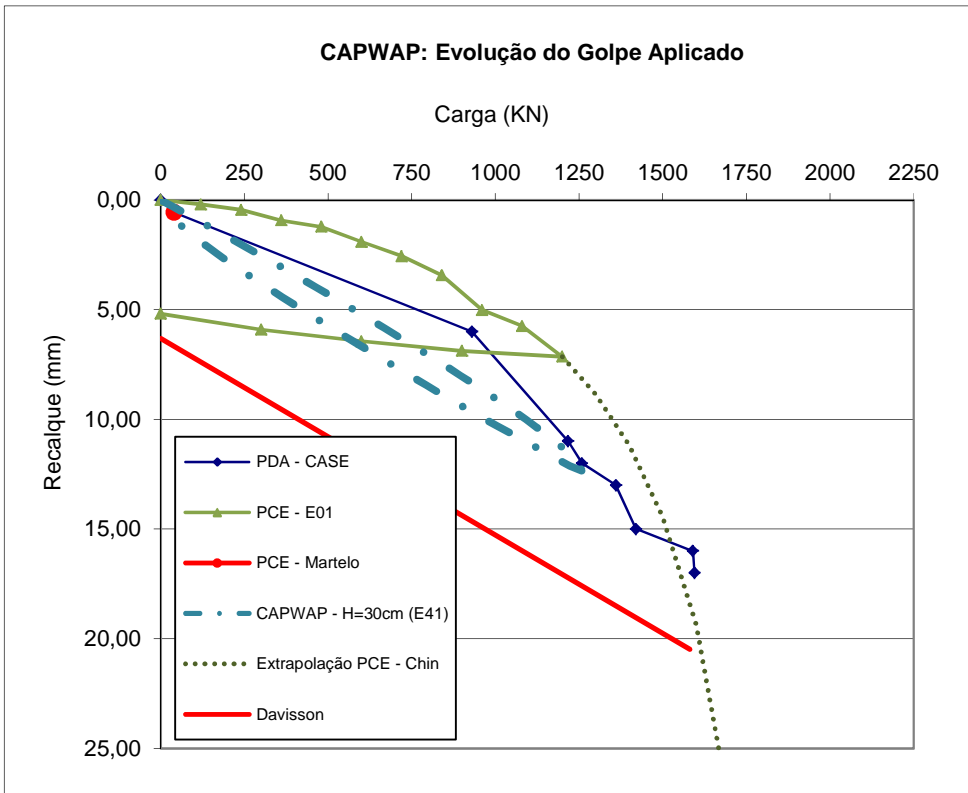
Estaca E41 de seção D=33cm - Golpe com H=10cm



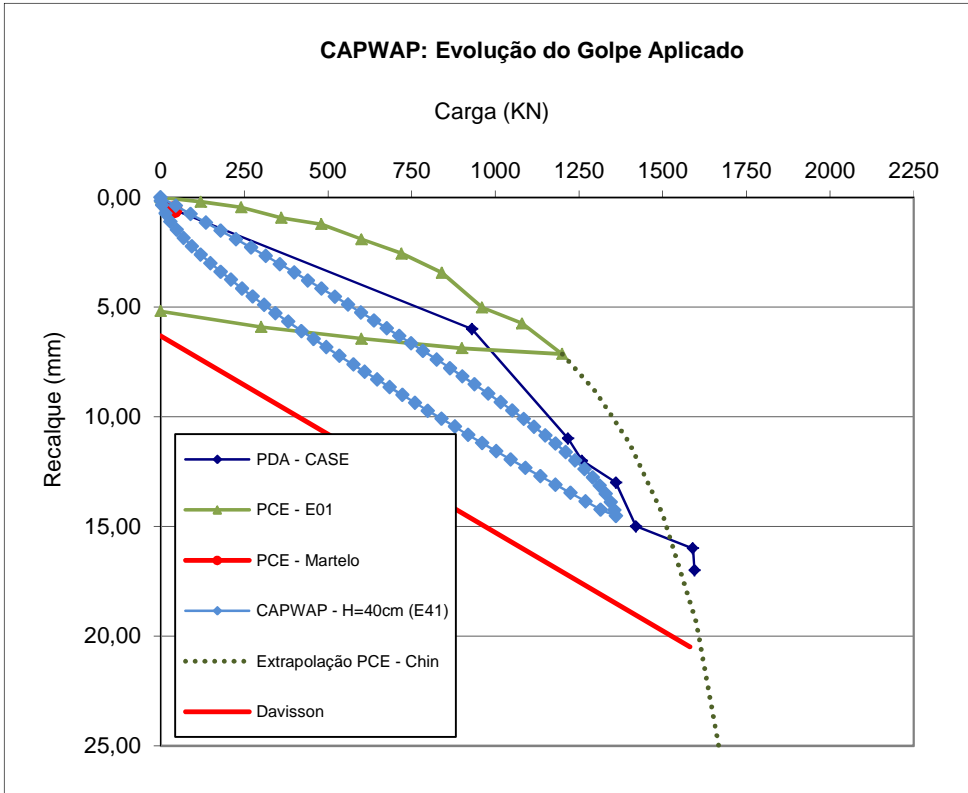
Estaca E41 de seção D=33cm - Golpe com H=20cm



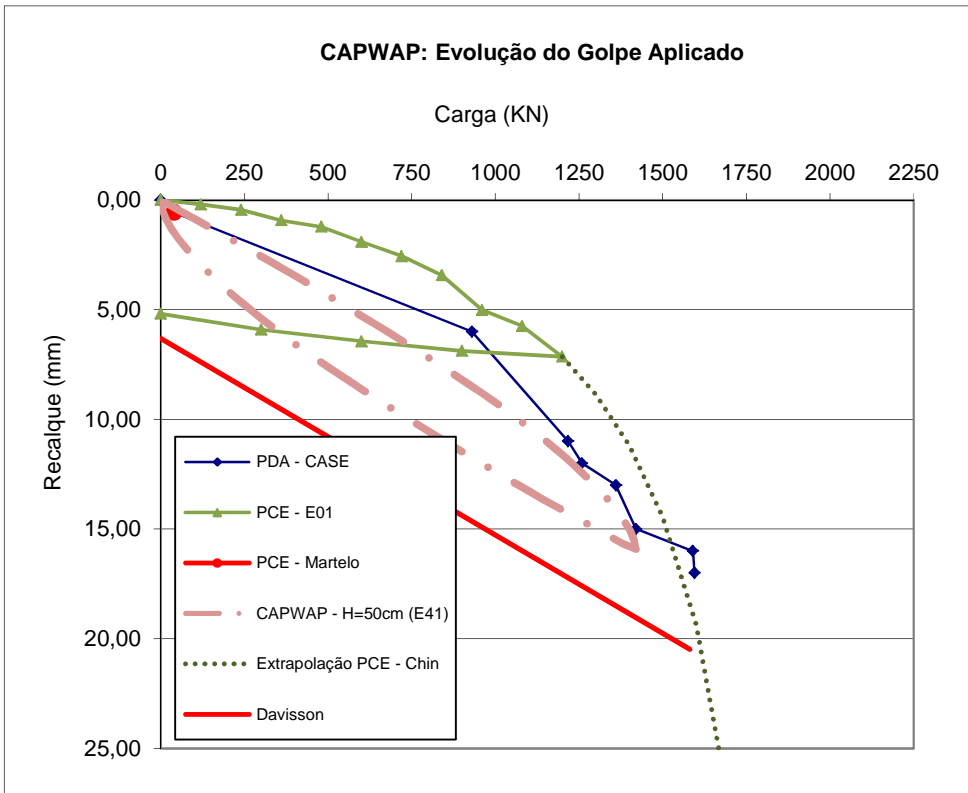
Estaca E41 de seção D=33cm - Golpe com H=30cm



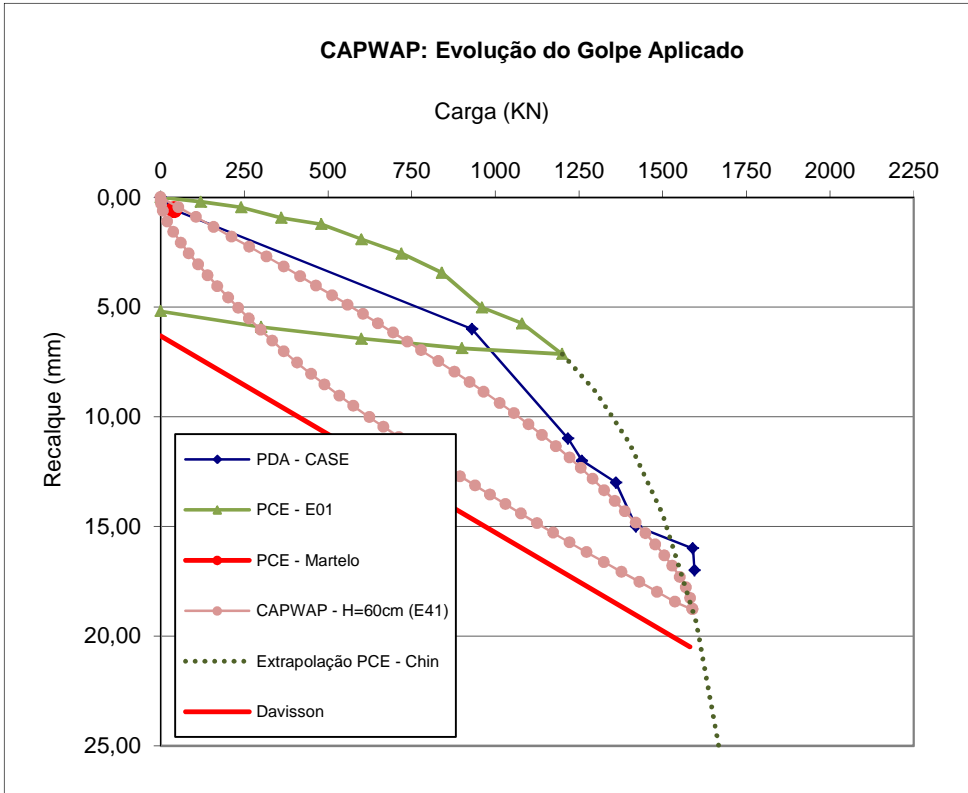
Estaca E41 de seção D=33cm - Golpe com H=40cm



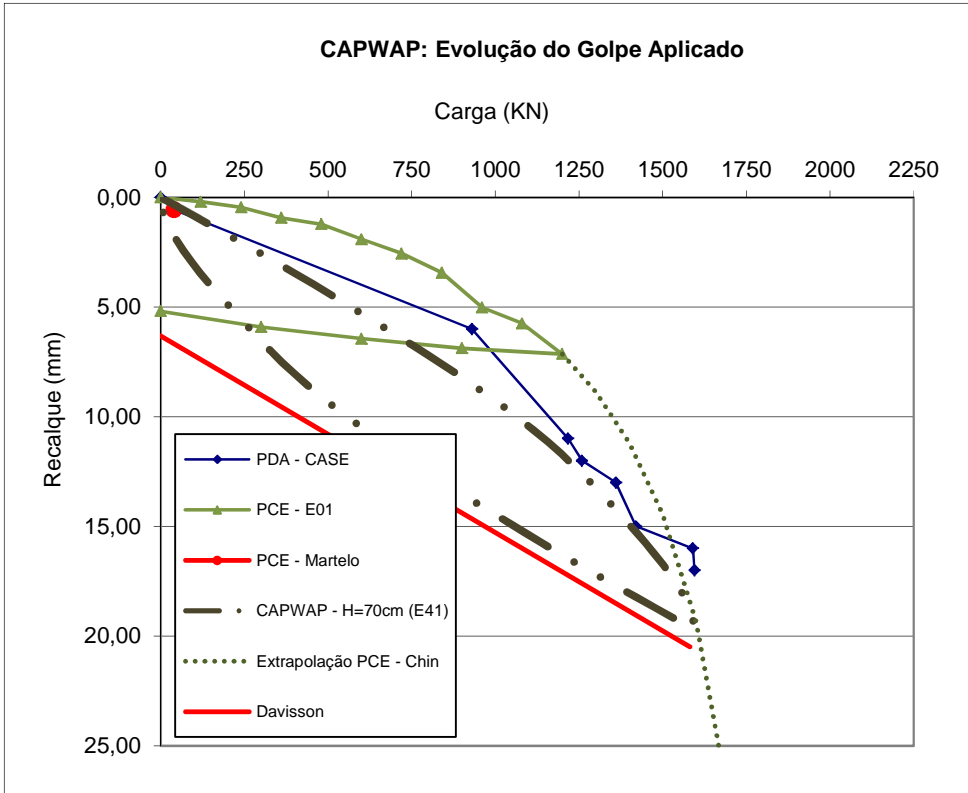
Estaca E41 de seção D=33cm - Golpe com H=50cm



Estaca E41 de seção D=33cm - Golpe com H=60cm

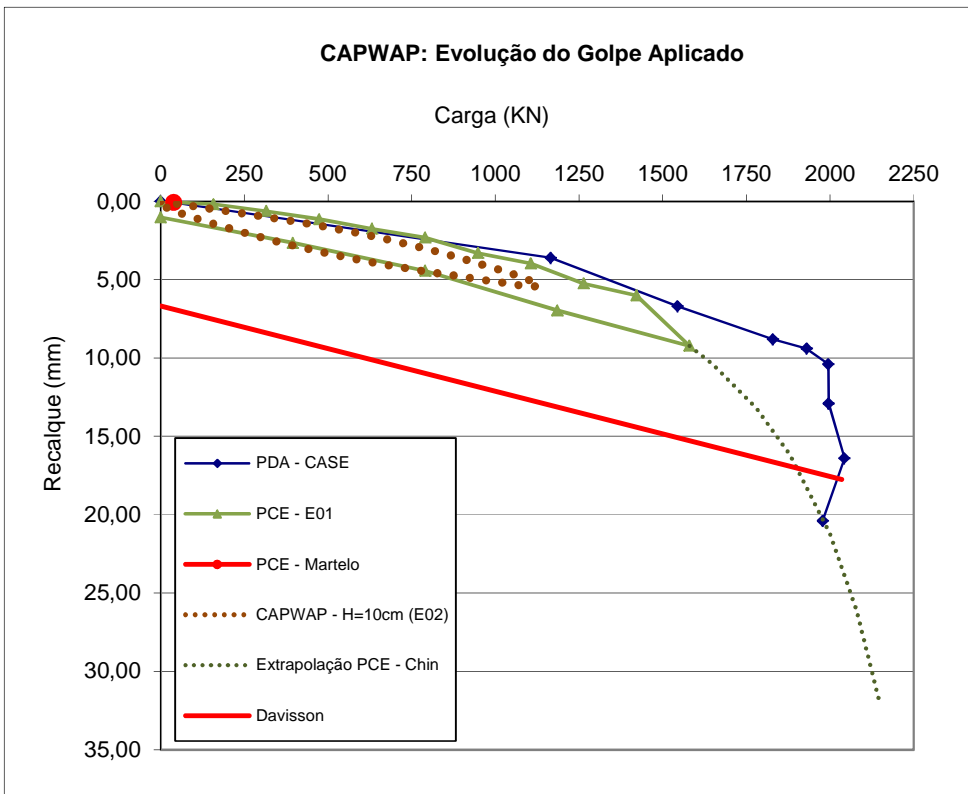


Estaca E41 de seção D=33cm - Golpe com H=70cm

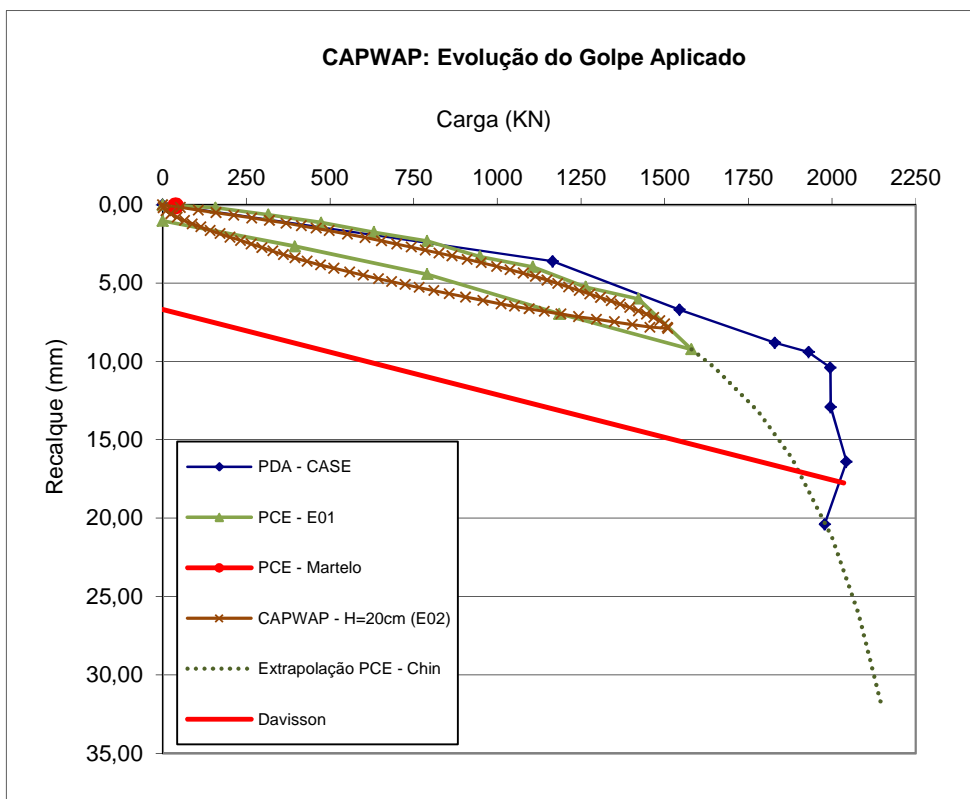


Osasco

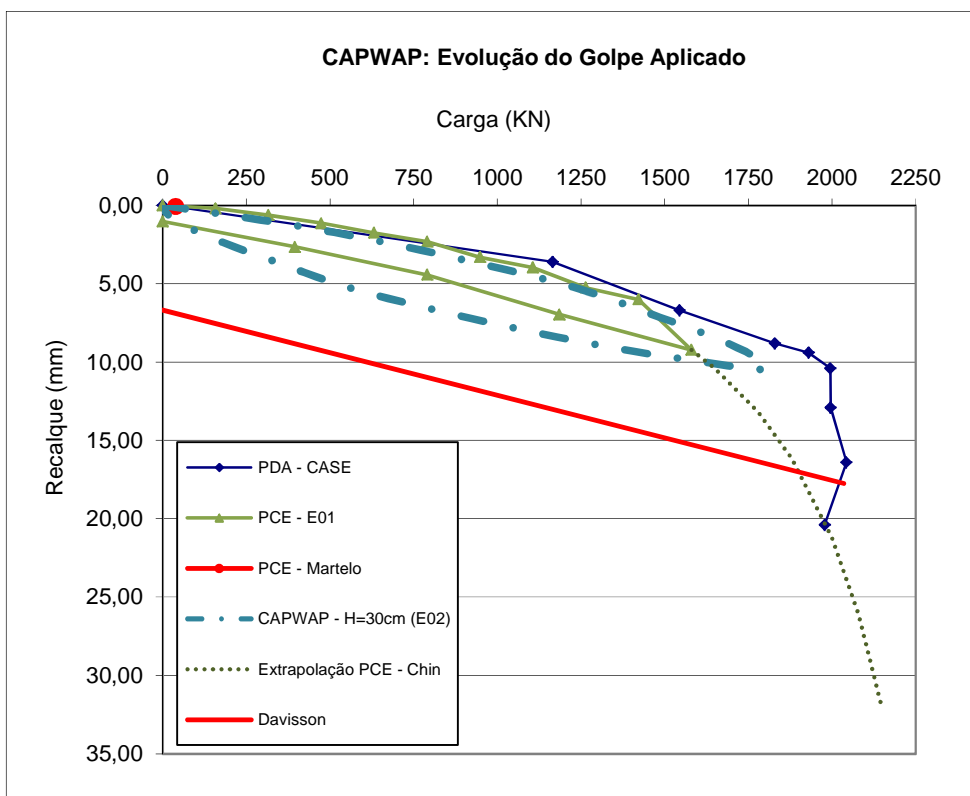
Estaca E02 de seção D=38cm - Golpe com H=10cm



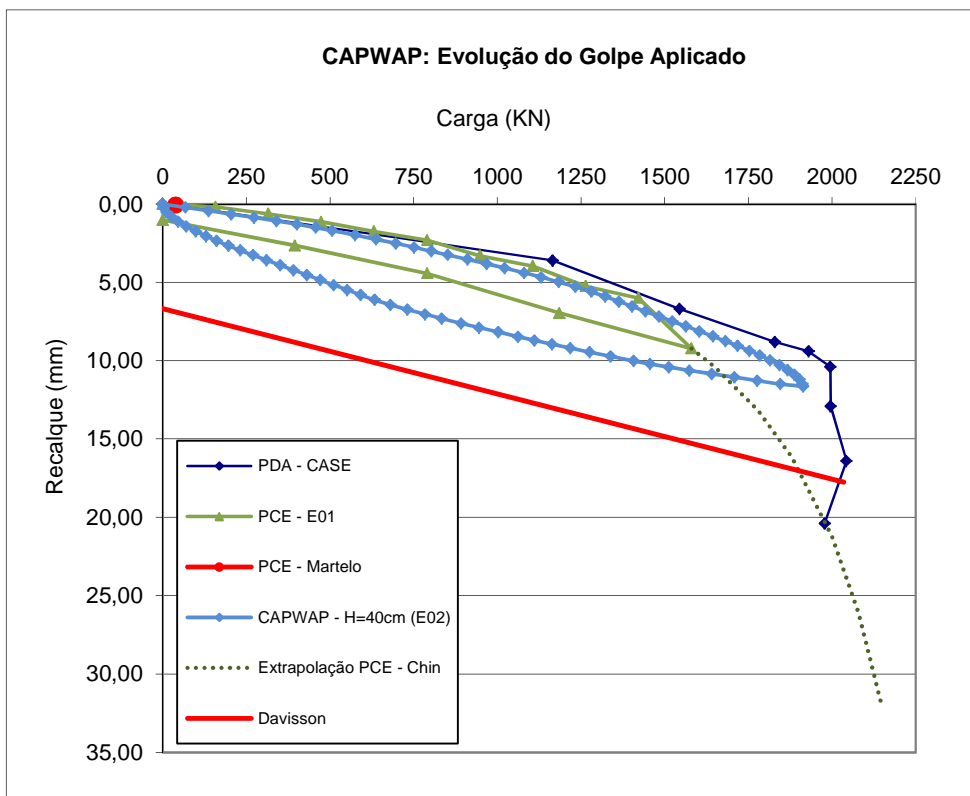
Estaca E02 de seção D=38cm - Golpe com H=20cm



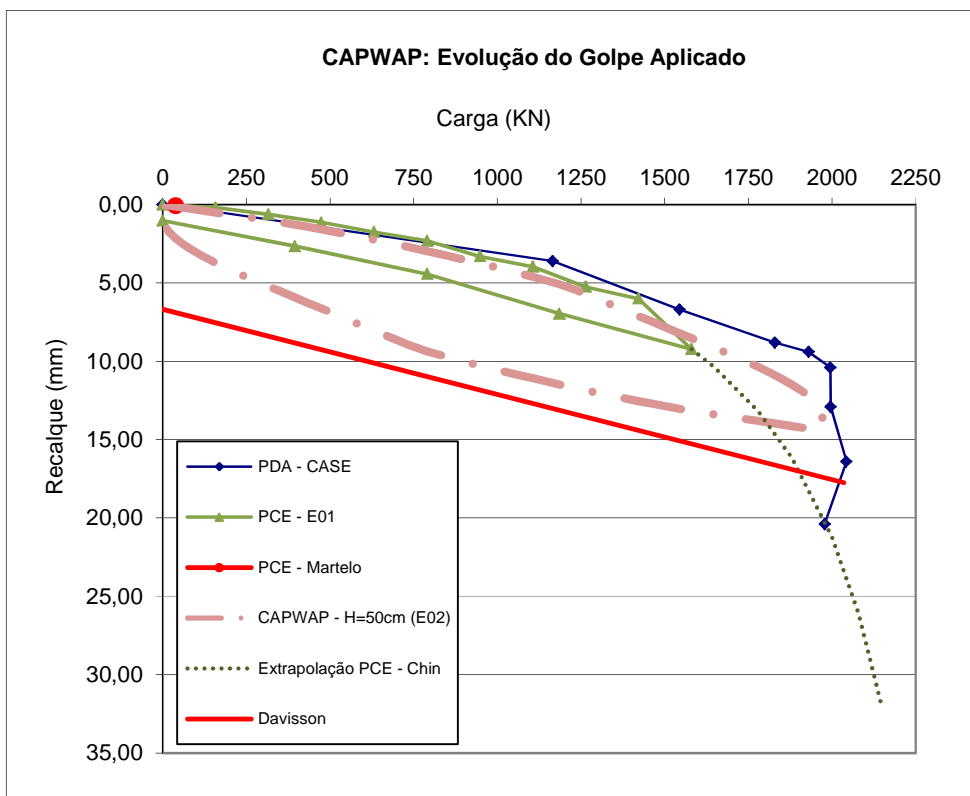
Estaca E02 de seção D=38cm - Golpe com H=30cm



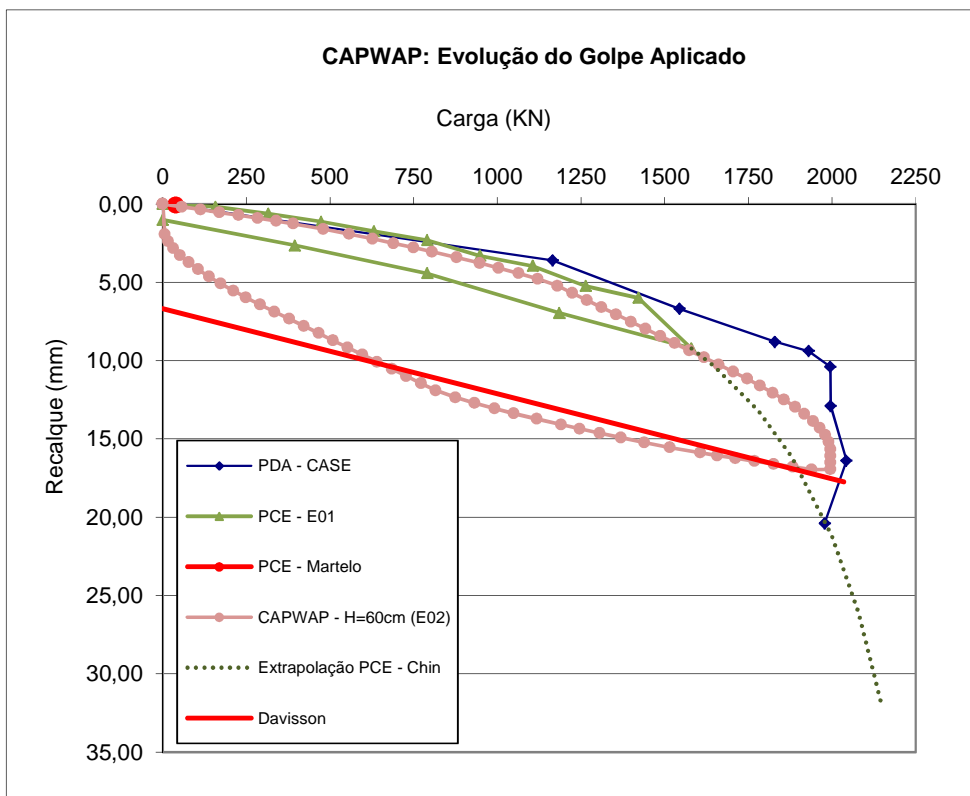
Estaca E02 de seção D=38cm - Golpe com H=40cm



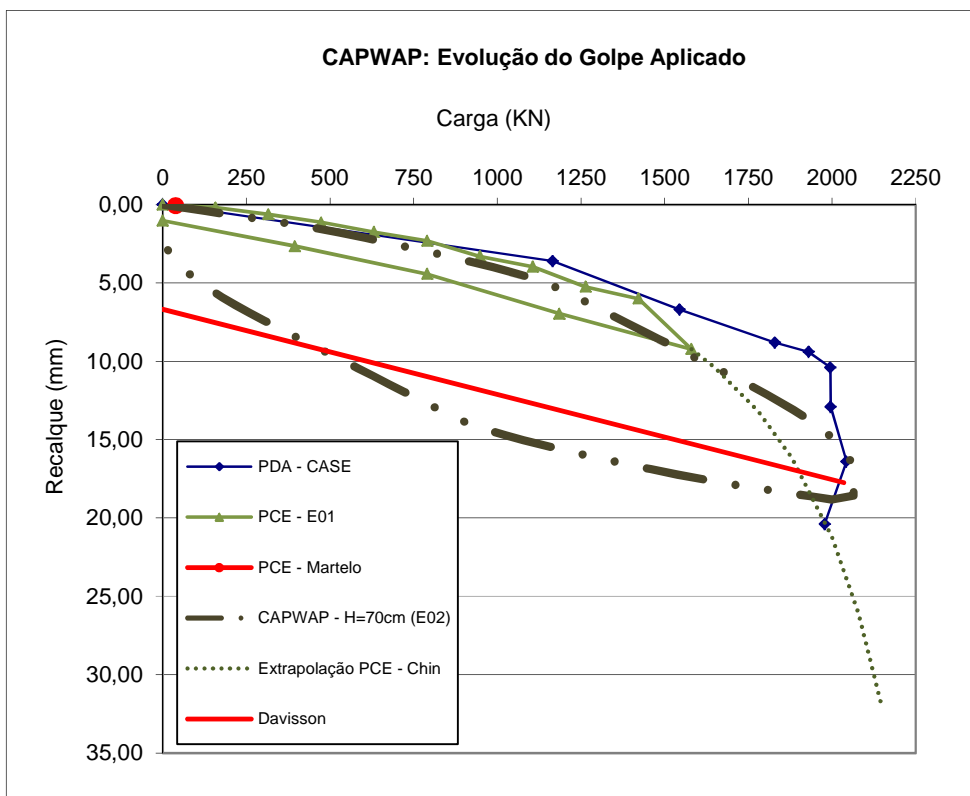
Estaca E02 de seção D=38cm - Golpe com H=50cm



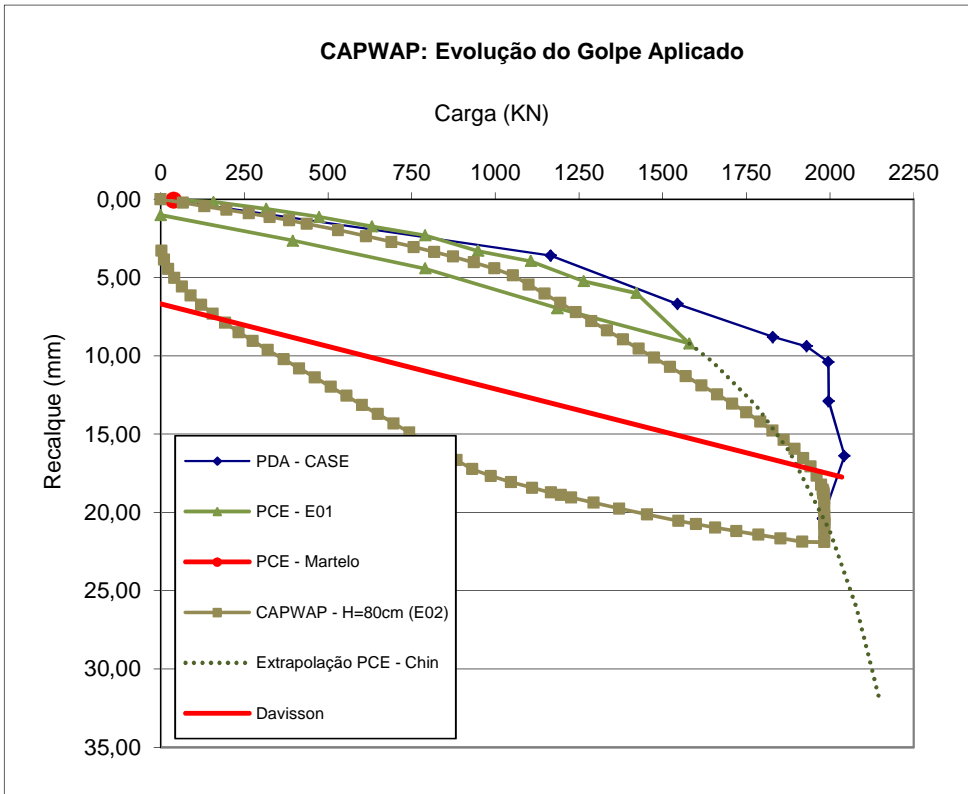
Estaca E02 de seção D=38cm - Golpe com H=60cm



Estaca E02 de seção D=38cm - Golpe com H=70cm



Estaca E02 de seção D=38cm - Golpe com H=80cm



ANEXO D – ANÁLISES CAPWAP – OBRA DE JACAREÍ

ANEXO E – ANÁLISES CAPWAP – OBRA DE OSASCO