

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências Faculdade de Engenharia

Bryan do Nascimento Martins

Interpretação de provas de carga em estacas pelo modelo matemático de Massad contemplando cargas residuais

Rio de Janeiro 2024 Bryan do Nascimento Martins

Interpretação de provas de carga em estacas pelo modelo matemático de Massad contemplando cargas residuais

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadores: Prof.^a DSc Bernadete Ragoni Danziger Prof. DSc Bruno Teixeira Lima

> Rio de Janeiro 2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M386 Martins, Bryan do Nascimento. Interpretação de provas de carga em estacas pelo modelo matemático de Massad contemplando cargas residuais / Bryan do Nascimento Martins. – 2024. 207 f.
Orientadores: Bernadete Ragoni Danziger, Bruno Teixeira Lima. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
1. Engenharia civil - Teses. 2. Estacaria (Engenharia civil) - Teses.
3. Tensões residuais - Teses. 4. Resistência de materiais - Teses. I. Danziger, Bernadete Ragoni. II. Lima, Bruno Teixeira. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Bryan do Nascimento Martins

Interpretação de provas de carga em estacas pelo modelo matemático de Massad contemplando cargas residuais

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em 27 de março de 2024. Banca Examinadora:

> Prof^a. Bernadete Ragoni Danziger (Orientadora) Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Bruno Teixeira Lima (Coorientador) Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Marcus Pacheco Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Faiçal Massad Faculdade de Engenharia - USP

> Rio de Janeiro 2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Flavio e Amanda, cujo amor e apoio foram fundamentais em minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que desde o princípio acreditaram no meu potencial e, muitas vezes, abriram mão de seus próprios desejos e conforto para garantir que eu tivesse as condições necessárias para crescer. Nos momentos de dificuldade ao longo da caminhada acadêmica, vocês foram meu porto seguro, oferecendo amor, palavras de encorajamento, apoio emocional e todo o suporte necessário. Sem vocês, este trabalho não seria possível.

Agradeço imensamente à minha orientadora, Bernadete Ragoni Danziger, cujas aulas de fundações durante a graduação foram fundamentais para minha decisão de me especializar em geotecnia. Sou profundamente grato pelo tempo dedicado à minha dissertação, pelo conhecimento generosamente compartilhado, pelas palavras de incentivo e pelos conselhos valiosos que levarei para toda a vida.

Ao meu coorientador, Bruno Teixeira Lima, por todo suporte e atenção ao longo da orientação. Gostaria de expressar minha gratidão, também, por suas aulas e pela experiência no laboratório de geotecnia da UERJ durante o período em que fui bolsista.

Aos professores Faiçal Massad e Marcus Pacheco, que gentilmente participaram da banca e ofereceram orientações para a revisão desta dissertação.

Aos professores do PGECIV pelas experiências e ensinamentos compartilhados.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

RESUMO

MARTINS, Bryan do Nascimento. **Interpretação de provas de carga em estacas pelo modelo matemático de Massad contemplando cargas residuais**. 2024. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

As cargas residuais surgem ao longo das estacas cravadas à percussão ou prensadas, bem como em quaisquer tipos de estacas após carregamento prévio, como por exemplo, após provas de carga convencional ou ensaios de carregamento dinâmico. Embora as cargas residuais não afetem a capacidade de carga das estacas (estado limite último), elas alteram a transferência de carga e, portanto, o recalque para o estado limite de serviço. Quando presentes, a não consideração destas cargas nos cálculos gera uma previsão de recalque maior do que a real. No caso de fundações mistas elas afetam a partição das cargas entre os diferentes elementos de fundação. Esta pesquisa tem por objetivo analisar um banco de dados de provas de carga estáticas incluindo estacas cravadas e escavadas, de comportamento rígido ou compressível, empregando o modelo matemático de Massad (1992, 1993, 1998, 2004). O modelo é capaz de separar, a partir da curva carga recalque no topo da estaca obtida em provas de carga, as parcelas da carga transferida por atrito lateral, ponta e a residual aprisionada na ponta. Boa parte do banco de dados inclui provas de carga instrumentadas, com medição da parcela de atrito lateral. A parcela medida é, então, comparada ao atrito lateral total obtido pelo modelo. Após o estudo detalhado da contribuição de Massad, foi desenvolvida uma planilha para automatizar os cálculos e, posteriormente, calibrada com a interpretação de casos documentados na literatura. Em seguida, o banco de dados, foi interpretado, separando as estacas em função da rigidez relativa solo estaca e método executivo. O método gráfico derivado do modelo original foi também aplicado nos casos de estacas rígidas. O emprego do modelo matemático foi também comparado ao método gráfico de Decourt (1991). A interpretação dos ensaios apresenta muita concordância com resultados anteriores de Massad e permite um novo olhar para aspectos relevantes do comportamento e desempenho das fundações.

Palavras-chave: Provas de carga; Transferência de carga; Cargas residuais.

ABSTRACT

MARTINS, Bryan do Nascimento. **Interpretation of load tests on piles using Massad's mathematical model considering residual loads**. 2024. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Residual loads arise along driven or jacked piles and on any pile type previously loaded, for example, after conventional load tests. Although the residual loads do not affect the ultimate pile capacity, they change the load transfer and, therefore, the settlement for the service loads. Miscounting of residual loads causes a settlement prediction greater than the actual settlement when residual loads are present after complete unloading. In the case of mixed foundation, the residual loads affect the load partition between the different foundation elements. This research aims to analyze a database of static load tests including driven and excavated, rigid and compressible piles, using the mathematical model of Massad (1992, 1993, 1998, 2004). The model can separate load transferred by lateral friction, tip mobilized resistance and the residual load at the tip based on load test results. Much of the database includes instrumented piles, with the direct measurement of the lateral friction. The total measured friction mobilized resistance is then compared to the total lateral friction obtained by the model. After a detailed study of Massad's contribution, a spreadsheet was developed to automate the calculations and later calibrated with the interpretation of cases documented in the literature. Then, the database was interpreted, separating the piles according to the pile soil relative stiffness and the installation method. The graphical method derived from the original model was also applied in the case of rigid piles. The use of the mathematical model was also compared to the graphic method from Decourt (1991). The tests interpretation is very much in agreement with Massad's previous results and allows a fresh look at relevant aspects of the behavior and performance of pile foundations.

Keywords: Load test; Load transfer; Residual loads.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estaca com presença de carga residual aprisionada em seu fuste e na
ponta (DANZIGER, 2023)25
Figura 2 – Transferência de carga em estacas com carga residual aprisionada
(DANZIGER, 2023)27
Figura 3 – Prova de carga numa estaca barrete rígida, primeiro e segundo
carregamento (MASSAD, 1992)29
Figura 4 – Relações de Cambefort modificadas para estacas escavadas (MASSAD,
1992)
Figura 5 – Relações de Cambefort modificadas para estacas cravadas (LAZO e
MASSAD, 1998)
Figura 6 – Curva carga recalque teórica modelada por Massad (1992)33
Figura 7 - Curva teórica carga-recalque no topo (LAZO e MASSAD, 1998)41
Figura 8 - Construção gráfica para determinação da parcela de atrito no
carregamento (μAlr) e atrito lateral na ruptura (A _{lr}) (LAZO e MASSAD, 1998)42
Figura 9 - Ábaco para determinação direta de k (LAZO e MASSAD, 1998)43
Figura 10 - Curva carga x recalque para estacas curtas (MASSAD et al., 2007)44
Figura 11 - Método gráfico de Decourt (1991)48
Figura 12 - Método de Fellenius (2007)50
Figura 13 - Método duas retas aplicado para a estaca HLC-2
Figura 14 - Método duas retas aplicado para a estaca PC-2560
Figura 15 - Método duas retas aplicado para a estaca PC-9061
Figura 16 - Relação Parabólica (Carregamento) – Estaca metálica da Penha63
Figura 17 - Determinação de Pr com Δ =2mm - Estaca metálica da Penha63
Figura 18 - Relação Exponencial (Carregamento) – Estaca metálica da Penha64
Figura 19 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca metálica da Penha64
Figura 20 - Relação Parabólica (Carregamento) – Estaca metálica do Casqueiro65
Figura 21 - Determinação de Pr com Δ =2mm - Estaca metálica do Casqueiro66
Figura 22 - Relação Exponencial (Carregamento) – Estaca metálica do Casqueiro.66
Figura 23 - Relação Parabólica (Carregamento) – Estaca 22567
Figura 24 - Determinação de Pr com Δ =1mm - Estaca 22568

Figura 25 - Relação Exponencial (Carregamento) – Estaca 2256	38
Figura 26 - Relação parabólica (descarregamento) – Estaca 2256	39
Figura 27 - Relação Parabólica (Carregamento)7	'4
Figura 28 - Determinação de Pr com Δ =5mm7	'5
Figura 29 - Relação Exponencial (Carregamento)7	'5
Figura 30 - Descarregamento (relação parabólica)7	7
Figura 31 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad7	'8
Figura 32 - Ensaio piezocone realizado próximo à estaca TP8	31
Figura 33 – Curvas carga recalque da estaca ST-1 (CHOW et al, 2016)9)3
Figura 34 - Método de Decourt (1991) para os ensaios das estacas Site 1(a	ı),
TE-3(b), BAR-1(c) e STR-1(d)10)1
Figura 35 - Método das duas retas ao 2° ciclo de ensaio da estaca Site1(a), TE-3(b)),
BAR-1(c) e STR-1(d)10)2
Figura 36 - Curva carga x recalque Estaca 225 (Raiz Engenharia, 1990 apu	bı
Massad, 1992)11	6
Figura 37 - Curva carga x recalque Estaca PC-90 (Lazo, 1996 apud Lazo e Massa	d,
1998)11	6
Figura 38 - Curva carga x recalque Estaca Met. Casqueiro (Rin et al., 1983 apu	bı
Massad, 1992)11	7
Figura 39 - Curva carga x recalque Estaca Met. Penha (Nápoles Neto, 1958 apu	JD
Massad, 1992)11	7
Figura 40 - Curva carga x recalque Estaca PC-25 (Penna, 1993 apud Lazo	е
Massad, 1998)11	8
Figura 41 - Curva carga x recalque Estaca HLC-2 (Geofix, 1998 apud Lazo	е
Massad, 1998)11	8
Figura 42 - Curva carga x recalque Amendola et al., 2018 (PEREZ E FALCONI, 200)7
apud AMENDOLA 2018)11	9
Figura 43 - Curva carga x recalque estaca CFA1 (KORMANN et al., 2000)11	9
Figura 44 - Curva carga x recalque estaca CFA2 (KORMANN et al., 2000)12	20
Figura 45 - Curva carga x recalque estaca D-2 (COSTA, 1994)12	20
Figura 46 - Curva carga x recalque Estaca 4 (DECOURT, 1991)12	21
Figura 47 - Curva carga x recalque estaca RJ PI-4 (CHOW et al., 2016)12	21
Figura 48 - Curva carga x recalque estaca HRV P1 (CHOW et al., 2016)12	22

Figura 49 - Curva carga x recalque estaca TP4 (CHOW et al., 2016)	122
Figura 50 - Curva carga x recalque estaca ST-1 (CHOW et al., 2016)	123
Figura 51 - Curva carga x recalque estaca H-2 (CHOW et al., 2016)	123
Figura 52 - Curva carga x recalque estaca RJ PI-3 (CHOW et al., 2016)	124
Figura 53 - Curva carga x recalque estaca ST-2 (CHOW et al., 2016)	124
Figura 54 - Curva carga x recalque estaca P2-C (CHOW et al., 2016)	125
Figura 55 - Curva carga x recalque estaca TP (CHOW et al., 2016)	125
Figura 56 - Curva carga x recalque estaca FRUTUOSO et al., 2016 (FRUTUO	SO et
al., 2016)	126
Figura 57 - Curva carga x recalque estaca FALCONI et al., 2015 (FALCONI	et al.,
2015)	126
Figura 58 - Curva carga x recalque estaca EPM5 (POLIDO et al., 219)	127
Figura 59 - Curva carga x recalque estaca EPM4 (POLIDO et al., 2019)	127
Figura 60 - Curva carga x recalque estaca 61 (DANZIGER, 1980)	128
Figura 61 - Curva carga x recalque estaca 164 (DANZIGER, 1980)	128
Figura 62 - Curva carga x recalque estaca E104 (VELLOSO et al., 1978)	129
Figura 63 - Curva carga x recalque estaca E413 (VELLOSO et al., 1978)	129
Figura 64 - Curva carga x recalque estaca PCE-01 (PALUDETO, 2022)	130
Figura 65 - Curva carga x recalque estaca IX.1 (CARVALHO et al., 2023)	130
Figura 66 - Curva carga x recalque estaca PCR3 (CARVALHO et al., 2023)	131
Figura 67 - Curva carga x recalque estaca EH1 (ALLEDI, 2013)	131
Figura 68 - Curva carga x recalque estaca EH2 (ALLEDI, 2013)	132
Figura 69 - Curva carga x recalque estaca EH3 (ALLEDI, 2013)	132
Figura 70 - Curva carga x recalque estaca EH4 (ALLEDI, 2013)	133
Figura 71 - Curva carga x recalque estaca EH5 (ALLEDI, 2013)	133
Figura 72 - Curva carga x recalque estaca EH6 (ALLEDI, 2013)	134
Figura 73 - Curva carga x Recalque estaca HLC-2	134
Figura 74 - Relação Parabólica (Carregamento) – Estaca RJ PI-3	135
Figura 75 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) - Estaca RJ PI-3	5135
Figura 76 - Relação Exponencial (Carregamento) – Estaca RJ PI-3	136
Figura 77 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca RJ PI-3	136
Figura 78 - Relação Parabólica (Carregamento) – Estaca RJ PI-4	137
Figura 79 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) - Estaca RJ PI-4	137

Figura 80 - Relação Exponencial (Carregamento) – Estaca RJ PI-4138 Figura 81 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca RJ PI-4......138 Figura 82 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca H-2......139 Figura 83 - Determinação de Pr com Δ = 10mm (Carregamento) - Estaca H-2139 Figura 84 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca H-2140 Figura 85 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca H-2......140 Figura 86 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca P2-C......141 Figura 87 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) - Estaca P2-C.....141 Figura 90 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca TP143 Figura 91 - Determinação de Pr com Δ = 10mm (Carregamento) - Estaca TP143 Figura 92 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca TP......144 Figura 93 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca TP144 Figura 94 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca ST-2......145 Figura 95 - Determinação de Pr com Δ = 5mm (Carregamento) - Estaca ST-2 145 Figura 97 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca ST-2......146 Figura 99 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) – Estaca D-2 147 Figura 100 - Relação Exponencial (Carregamento) – Estaca D-2......148 Figura 101 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca ST-1/1° carregamento. 148 Figura 102 - Determinação de Pr com Δ = 5mm (Carregamento) - Estaca ST-1/1° carregamento149 Figura 103 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca ST-1/1° carregamento Figura 104 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca ST-1/1° carregamento Figura 105 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca ST-1/2° carregamento. 150 Figura 106 - Determinação de Pr com Δ = 5mm (Carregamento) - Estaca ST-1/2° carregamento151 Figura 107 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca ST-1/2° carregamento

Figura 108 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca ST-1/2° carregamento Figura 109 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca ST-1/3° carregamento 152 Figura 110 - Determinação de Pr com Δ = 5mm (Carregamento) - Estaca ST-1/3° carregamento153 Figura 111 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca ST-1/3° carregamento Figura 112 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca ST-1/3° carregamento Figura 113 - Relação Parabólica (Carregamento) - ESTACA E104154 Figura 114 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - Estaca E104.155 Figura 115 - Relação Exponencial (Carregamento) - ESTACA E104155 Figura 116 - Relação parabólica (Descarregamento) - ESTACA E104......156 Figura 117 - Relação Parabólica (Carregamento) - ESTACA E413156 Figura 118 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - ESTACA E413 Figura 119 - Relação Exponencial (Carregamento) - ESTACA E413157 Figura 120 - Relação parabólica (Descarregamento) - ESTACA E413......158 Figura 121 - Relação Parabólica (Carregamento) - ESTACA PCR3......158 Figura 122 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - ESTACA PCR3 Figura 124 - Relação parabólica (Descarregamento) - ESTACA PCR3......160 Figura 125 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca EH3......160 Figura 126 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - Estaca EH3..161 Figura 127 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca EH3161 Figura 128 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca EH3......162 Figura 129 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca EH4......162 Figura 130 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - Estaca EH4..163 Figura 132 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca EH4......164 Figura 133 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca EH6......164 Figura 134 - Determinação de Pr com ∆ = 2mm (Carregamento) - Estaca EH6165

Figura 135 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca EH6165
Figura 136 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca EH6166
Figura 137 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca CFA1166
Figura 138 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - Estaca CFA1 167
Figura 139 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca CFA1167
Figura 140 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca CFA1168
Figura 141 - Relação Parabólica (Carregamento) - Amendola et al., 2018168
Figura 142 - Determinação de Pr com Δ = 5mm (Carregamento) - Amendola et al.,
2018
Figura 143 - Relação Exponencial (Carregamento) - Amendola et al., 2018169
Figura 144 - Relação parabólica (Descarregamento) - Amendola et al., 2018170
Figura 145 - Relação Parabólica (Carregamento) - FRUTUOSO et al., 2016170
Figura 146 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) - FRUTUOSO et al.,
2016
Figura 147 - Relação Exponencial (Carregamento) - FRUTUOSO et al., 2016171
Figura 148 - Relação parabólica (Descarregamento) - FRUTUOSO et al., 2016172
Figura 149 - Relação Parabólica (Carregamento) – FALCONI et al., 2015172
Figura 150 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) – FALCONI et al.,
2015
Figura 151 - Relação Exponencial (Carregamento) – FALCONI et al., 2015173
Figura 152 - Relação parabólica (Descarregamento) – FALCONI et al., 2015174
Figura 153 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca 61174
Figura 154 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) - Estaca 61175
Figura 155 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca 61175
Figura 156 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca 61176
Figura 157 - Relação Parabólica (Carregamento) – Estaca 164176
Figura 158 - Determinação de Pr com Δ = 1mm (Carregamento) – Estaca 164177
Figura 159 - Relação Exponencial (Carregamento) – Estaca 164177
Figura 160 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca 164178
Figura 161 - Método das duas retas aplicado à estaca D-2179
Figura 162 - Método das duas retas aplicado à estaca EPM4179
Figura 163 - Método das duas retas aplicado à estaca EPM5180
Figura 164 - Método das duas retas aplicado à estaca TP4180

Figura 165 - Método das duas retas aplicado à estaca TP181 Figura 167 - Método das duas retas aplicado à estaca H-2......182 Figura 169 - Método das duas retas aplicado à estaca CFA2......183 Figura 172 - Método das duas retas aplicado à estaca EH1......184 Figura 174 - Método das duas retas aplicado à estaca EH5......185 Figura 175 - Método das duas retas aplicado à estaca EH6......186 Figura 180 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e Figura 181 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio - Estaca ST-2189 Figura 182 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e Figura 183 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca TP.....190 Figura 184 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca D-2.....191 Figura 185 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca RJ PI-4.....191 Figura 186 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca RJ PI-3.....192 Figura 187 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca P2-C192 Figura 188 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca 61193

Figura 189 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca 164193 Figura 190 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca CFA1194 Figura 191 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca PCR3.....194 Figura 192 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH3195 Figura 193 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH4195 Figura 194 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH6196 Figura 195 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca E104196 Figura 196 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca E413197 Figura 197 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e Figura 198 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e Figura 199 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca D-2.....199 Figura 200 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EPM4.....199 Figura 201 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EPM5......200 Figura 202 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca TP4......200 Figura 203 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca TP......201 Figura 204 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca HRV P1......201

Figura 205 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca H-2......202 Figura 206 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca P2-C202 Figura 207 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e Figura 208 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e Figura 209 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e Figura 210 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH1204 Figura 211 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH2205 Figura 212 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH5205 Figura 213 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH6206

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado do método de Decourt aplicado à curva carga recalque48
Tabela 2 – Casos analisados58
Tabela 3 – Calibração estaca HLC-259
Tabela 4 – Calibração estaca PC-2560
Tabela 5 – Calibração estaca PC-9061
Tabela 6 – Casos analisados62
Tabela 7 – Comparação entre os resultados obtidos pelo Autor e Massad (1992)65
Tabela 8 – Comparação entre os resultados obtidos pelo Autor e Massad (1992)66
Tabela 9 – Comparação entre os resultados obtidos pelo Autor e Massad (1992)69
Tabela 10 – Resultados obtidos pela relação parabólica no descarregamento70
Tabela 11 – Apresentação do banco de dados de estacas71
Tabela 12 – Comparação entre as relações parabólica e exponencial (carregamento)
Tabela 13 – Resultados obtidos pelo descarregamento parabólico
Tabela 14 – Equação estimada para reproduzir a curva carga recalque78
Tabela 15 – Resultados estacas metálicas, comportamento compressível79
Tabela 16 – Resultados estacas metálicas, comportamento compressível80
Tabela 17 – Resultados estacas pré-moldadas de concreto (compressíveis)82
Tabela 18 – Resultados estacas pré-moldadas de concreto (compressíveis)83
Tabela 19 – Resultados das estacas tubadas, comportamento compressível84
Tabela 20 – Resultados estacas tubadas, comportamento compressível84
Tabela 21 – Resultados estacas hélice contínua, comportamento compressível85
Tabela 22 - Resultados das estacas hélice contínua, comportamento compressível
Tabela 23 – Resultados estacas escavadas de grande diâmetro, comportamento
compressível87
Tabela 24 - Resultados estacas escavadas de grande diâmetro, comportamento
compressível
Tabela 25 – perfil de transferência de carga das estacas analisadas

Tabela 26 – comparação entre os resultados das relações parabólico e exponenc	ial
	91
Tabela 27 – Coeficientes das retas consideradas para o método das duas retas9	94
Tabela 28 – Desenvolvimento do método das duas retas	94
Tabela 29 – Resultados do método das duas retas	94
Tabela 30 – Coeficientes das retas consideradas para o método das duas retas9	96
Tabela 31 – Desenvolvimento do método das duas retas	96
Tabela 32 – Resultados do método das duas retas	96
Tabela 33 – Coeficientes das retas consideradas para o método das duas retas9	97
Tabela 34 – Desenvolvimento do método das duas retas	98
Tabela 35 – Resultados do método das duas retas	98
Tabela 36 – Perfil de transferência de carga das estacas analisadas10	00
Tabela 37 – Características das estacas10	02
Tabela 38 – Resultados obtidos pelo método das duas retas de Massad et al. (199	98)
1(03
Tabela 39 – Resultados pelo método de Decourt (1991)10	03

SUMÁRIO

INTO	DUÇÃO	21
1.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
1.1	A questão das cargas residuais	25
1.2	Método de Massad (1992, 1993)	28
1.2.1	Roteiro de cálculo para solos homogêneos	38
1.2.2	Extensão a casos de estacas embutidas no trecho final em solo resistente	40
1.3	Método das duas retas para estacas curtas ou rígidas (Lazo e Massad, 1998	3)40
1.4	Método das duas retas modificado (Marques & Massad, 2004 apud Massad	et
	al., 2007) para estacas curtas ou rígidas	44
1.5	Método de Decourt (1991)	46
1.6	Método de Fellenius	49
2	METODOLOGIA EMPREGADA	51
2.1	Roteiro de cálculo para aplicação da planilha	51
2.1.1	Calcular a rigidez da estaca como peça estrutural (K _r)	51
2.1.2	Calcular o coeficiente de rigidez relativa solo-estaca (k) considerando	а
	hipótese de estaca longa	51
2.1.2	1 Relação parabólica	52
2.1.2	2 Relação exponencial	53
2.1.3	Descarregamento pela relação parabólica	54
2.1.4	Calcular o valor de μ	55
2.1.5	Método das duas retas de Lazo e Massad, 1998	55
2.1.5	.1 Carregamento pelo método das duas retas	56
2.1.5	2 Descarregamento pelo método das duas retas	57
3	CALIBRAÇÃO DO ROTEIRO A CASOS DOCUMENTADOS	58
3.1	Calibração para o método das duas retas	58
3.1.1	Calibração estaca HLC-2	59
3.1.2	Calibração estaca PC-25	60
3.1.3	Calibração estaca PC-90	61
3.2	Calibração para as relações parabólica e exponencial	62
3.2.1	Calibração estaca metálica da Penha	62

3.2.2	Calibração estaca metálica do Casqueiro	65	
3.2.3	Calibração estaca 225	67	
4	INTERPRETAÇÃO DO BANCO DE DADOS	71	
4.1	Estacas que apresentaram comportamento compressível	73	
4.1.1	Análise da estaca de Amendola, et al. (2018)	73	
4.1.2	Estacas metálicas (cravadas)	79	
4.1.3	Estacas pré-moldadas de concreto (cravadas)	82	
4.1.4	Estacas tubadas (cravadas)	83	
4.1.5	Estacas hélice contínua (escavadas)	84	
4.1.6	Estacas escavadas de grande diâmetro	87	
4.1.7	Avaliação do perfil de transferência de carga dos casos de estac	as	
	compressíveis estudados	89	
4.2	Estacas que apresentaram comportamento rígido	93	
4.2.1	Estacas metálicas (cravadas)	93	
4.2.2	Estacas pré-moldadas de concreto (cravadas)	95	
4.2.3	Estacas hélice continua (escavadas)	97	
4.2.4	Avaliação do perfil de transferência de carga dos casos de estacas rígida	as	
	estudados	99	
5	COMPARAÇAO ENTRE OS METODOS DE DECOURT (1991) E MASSA	١D	
_	(1992, 1998) ATRAVES DE UM ESTUDO DE CASO	01	
6		05	
6.1	Em relação à calibração da planilha desenvolvida1	05	
6.2	Em relação à interpretação do banco de dados de estacas compressíveis		
	estudadas1	07	
6.3	Em relação à interpretação do banco de dados de estacas rígidas estudadas	\$109	
6.4	Quanto à comparação entre os métodos de Decourt e Massad1	10	
7 3	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS1	12	
REFE	RÊNCIAS1	13	
ANEXO116			
APÊN	NDICE A - DESENVOLVIMENTO PARA ESTACAS COMPRESSÍVE	IS	
	(RELAÇÕES PARABÓLICA E EXPONENCIAL)1	35	
APÊN	NDICE B - DESENVOLVIMENTO GRÁFICO PARA ESTACAS CURTA	١S	
	(MÉTODO DAS DUAS RETAS)1	79	

INTRODUÇÃO

As cargas residuais ocorrem em estacas cravadas à percussão ou por prensagem e em estacas escavadas após uma prova de carga estática convencional ou após um ensaio de carregamento dinâmico. Essas cargas residuais não afetam a carga de ruptura, estado limite último (ELU), mas sim a transferência de carga e, portanto, o ELS (estado limite de serviço).

Sendo assim, as cargas residuais terão influência na estimativa de recalques de modo que ao levar em conta a sua presença, o recalque resultante será menor do que aquele previsto caso sua a existência fosse ignorada. Por outro lado, o efeito das cargas residuais no comportamento de serviço é um aspecto que não costuma ser analisado nos projetos. É mais simples se desprezar este efeito do que estimar seu valor de forma acurada.

Seja em estacas cravadas, que podem conter cargas residuais provenientes de sua instalação, ou em estacas escavadas submetidas a um carregamento prévio, é muito provável que existam cargas residuais aprisionadas ao longo do fuste e na ponta das estacas. Estas cargas residuais já foram medidas por diversos autores e outros já propuseram metodologias para sua previsão. Alguns autores, como Decourt (1991), Massad (1992) e Fellenius (2000), entre outros, apresentam métodos de interpretação de resultados de ensaios que comprovam a presença destas cargas residuais. Estes métodos procuram além de isolar a parcela da carga residual, separar as parcelas da carga mobilizada por atrito lateral e pela ponta.

A presente dissertação tem por finalidade inicial discutir este assunto e apresentar uma pesquisa bibliográfica dos métodos de interpretação de provas de carga com vistas à determinação das cargas residuais aprisionadas no elemento de fundação. Em seguida, a partir de um banco de dados da literatura, o autor procura comparar o método matemático de Massad (1992,1998) com os resultados dos ensaios instrumentados, corrigindo estes resultados para a curva verdadeira, que é diferente da curva medida. Finalmente, se comparam os resultados dos dois métodos desenvolvidos no Brasil para a obtenção da carga residual através de um ensaio.

Enquanto o método de Decourt (1991) é um método gráfico, o método de Massad (1992) envolve um modelo matemático compatível com o mecanismo da transferência de carga presente nas várias etapas do carregamento. O autor apresenta a sua interpretação e uma discussão das dificuldades e incertezas que observou durante a pesquisa, deixando sugestões para pesquisas futuras.

Motivação

Em uma prova de carga usual são conhecidos apenas os valores de carga e recalque no topo da estaca e interpretado o valor da carga de ruptura global. De grande interesse para a previsão dos recalques é a obtenção das parcelas de carga mobilizadas durante o carregamento na ponta e por atrito. É sabido que o cálculo do recalque é dado pelo somatório de três parcelas: o recalque da ponta da estaca sob efeito das cargas transmitidas pela ponta, o recalque ao nível da ponta causado pela parcela de atrito lateral e o deslocamento elástico do fuste.

Quando ocorre a carga residual, o recalque para a carga de serviço não é tão simples de ser estimado, uma vez que a estaca já está parcialmente comprimida. Uma estimativa mais acurada, considerando a possiblidade de carga residual, permite chegar a valores menores de recalque.

Uma possibilidade de se avaliar a parcela da carga residual aprisionada na ponta e sua quantificação é através da interpretação das provas de carga considerando a presença destas cargas pré-existentes, anteriores à aplicação do carregamento. Se o recalque para a carga de serviço é menor quando da ocorrência de cargas residuais, é possível se otimizar o custo da obra pela adoção de um número reduzido de estacas, quando o emprego de estacas está condicionado aos recalques toleráveis pela estrutura. A ideia é que, com um menor valor de recalque previsto, é possível reduzir o número de estacas por bloco, reduzindo o custo das fundações, desde que o estado limite último também seja verificado.

Massad (1992) apresentou um modelo matemático geral, para interpretação de provas de carga que incorpora as cargas residuais, inicialmente para solos relativamente homogêneos. Em prosseguimento à contribuição inicial, em Massad (1993) o autor estendeu o método para o caso de estacas com embutimento em

camada mais resistente. Posteriormente, Lazo e Massad (1998) apresentaram o método das duas retas para interpretar provas de carga em estacas de comportamento rígido.

Decourt (1991) também propôs um método simples, gráfico, para avaliar as cargas residuais em provas de carga com pelo menos dois ciclos de carregamento.

Primeiramente foi feito um estudo dos principais artigos dos autores citados. Em seguida o autor procurou reproduzir casos documentados por Massad (1992) e Massad et al. (1998), para confirmar o entendimento do método e calibrar a planilha desenvolvida. Posteriormente, foi coletado um banco de dados com provas de carga, preferencialmente instrumentadas, com dados completos de carregamento e descarregamento para serem analisadas a fim de comparar as estimativas dos métodos com os resultados experimentais das instrumentações. Por último, foi feita uma comparação entre resultados obtidos pelos métodos propostos por Decourt (1991) e Massad et al. (1998).

A motivação do autor no estudo deste tema se deve à sua importância no caso de fundações mistas, em que as estacas trabalham em conjunto com o radier, num tipo de fundação conhecido também como radier estaqueado, ou no caso de reforço de fundações, onde é comum se utilizar um reforço com estacas do tipo raiz ou metálica, a uma situação de fundação profunda original com mau comportamento.

Estrutura da dissertação

Após esta parte introdutória, o capítulo 1 apresenta um resumo da pesquisa bibliográfica elaborada, onde se foca nos métodos de estimativa das cargas residuais a partir da interpretação das provas de carga.

O capítulo 2 mostra a metodologia empregada para a análise do banco de dados estudado. Esta foi elaborada em forma de roteiro para facilitar o entendimento e acompanhamento dos passos que serão aplicados nos próximos capítulos e serviu como base para a elaboração de uma planilha de cálculo para o método desenvolvido por Massad.

O capítulo 3 objetiva reproduzir alguns casos de interpretação de provas de carga documentados por Massad (1992) e Lazo e Massad (1998) com a finalidade

de confirmar o entendimento do método e verificar se a planilha de cálculo desenvolvida está calibrada com os resultados obtidos pelos autores.

O capítulo 4 apresenta o banco de dados, caracterizando e reunindo as estacas em diferentes grupos. Além disso, é apresentada a interpretação dos resultados buscando a separação das parcelas de carga de ponta, de atrito e as residuais. Nos casos em os ensaios foram instrumentados, é procedida uma discussão sobre os valores medidos (supostamente os falsos) em comparação com os valores estimados pelo modelo a partir dos registros da curva carga recalque obtidos no topo das estacas.

No capítulo 5 é feita uma comparação dos dois métodos desenvolvidos no Brasil, um método gráfico simples, mas que requer pelo menos dois ciclos de carregamento numa prova de carga e o outro, o que apresenta o modelo matemático racional, que pode ser estendido tanto a estacas cravadas como escavadas.

Em seguida, o capítulo 6 explicita as principais conclusões do autor e as sugestões para pesquisas futuras no tema. Por último, os anexos e apêndices trazem o material complementar utilizado na elaboração desta dissertação.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será incialmente tratada a questão da carga residual aprisionada na estaca e seu efeito no comportamento da curva carga x recalque. Em seguida serão tratados os métodos de obtenção das cargas residuais e transferência carga a partir da curva carga recalque medida no topo da estaca durante uma prova de carga.

1.1 A questão das cargas residuais

Quando a estaca é descarregada após sofrer uma carga de compressão, o fuste tende a retornar ao seu comprimento original. O solo, ao restringir o descarregamento da estaca, mobiliza uma reação contrária ao sentido da tendência ao deslocamento, gerando uma resistência por atrito negativo que é equilibrado pelo atrito positivo abaixo do plano neutro e pela carga residual aprisionada na ponta da estaca. Neste caso, a estaca encontra-se pré-comprimida, Figura 1(a).





Legenda: (a) - geração da carga residual como reação à tendência de descarregamento; (b) - carga adicional que produz deslocamentos apenas elásticos do fuste, decorrentes da reversão do atrito lateral negativo.

Cabe destacar que o ponto neutro corresponde à profundidade em que a tensão cisalhante é nula. Acima do ponto neutro ocorre a tensão cisalhante negativa e abaixo o valor da tensão cisalhante é positiva. Um diagrama similar ocorre por ação do atrito negativo. Embora o deslocamento relativo entre a estaca e o solo seja similar, no caso do atrito negativo o movimento do solo é descendente, comprimindo a estaca acima do ponto neutro, enquanto no fenômeno da geração da carga residual a estaca se movimenta para cima, num movimento ascendente, descomprimindo o solo.

Até que a carga externa transferida pela estrutura ao topo da estaca se iguale à carga residual máxima, o atrito negativo é revertido sem que o solo abaixo do plano neutro seja carregado de forma significativa, Figura 1(b). Para este nível de carregamento no topo, o deslocamento provocado pela carga normal adicional até o plano neutro provocará, em termos gerais, apenas uma parcela de recalque elástico do material da estaca. Para cargas maiores, o atrito positivo disponível será mobilizado até o plano neutro bem como aquele atrito positivo ainda não mobilizado no trecho abaixo do plano neutro. Pode-se observar que os recalques serão praticamente elásticos, e de pequeno valor, até que a carga atuante no topo supere à carga residual na ponta somada ao atrito lateral total disponível. Vale destacar que o comportamento assim descrito é característico de estacas compressíveis, se diferenciando um pouco das estacas rígidas, nas quais o atrito lateral se esgota quase instantaneamente, como será visto com mais detalhes no item 1.2.

Para melhor ilustrar o que ocorre numa prova de carga instrumentada, Danziger (2023) destaca na Figura 2(a) a transferência de carga verdadeira na ruptura obtida quando a instrumentação é procedida com a zeragem dos instrumentos anteriormente à instalação da estaca. Neste caso, os instrumentos registram as cargas residuais geradas durante a cravação, ou num carregamento anterior de uma estaca escavada, além do registro da transferência verdadeira. Na Figura 2(b), que representa os registros obtidos de instrumentos zerados antes do ensaio, a transferência de carga medida é falsa, não registrando as cargas residuais anteriores ao ensaio. A transferência falsa somada às cargas residuais é igual à transferência verdadeira. Porém, a menos que o projetista disponha de um procedimento para a previsão acurada das cargas residuais, não se tem conhecimento de seu valor, a menos que sejam zerados os instrumentos antes da instalação.



Figura 2 – Transferência de carga em estacas com carga residual aprisionada (DANZIGER, 2023)

Legenda: (a) - transferência verdadeira (instrumentos zerados antes da instalação); (b) - transferência falsa (instrumentos zerados antes do ensaio)

Segundo relata Danziger (2023), além dos procedimentos de previsão das cargas residuais, como os casos ilustrados por Holloway et al. (1975, 1978), Darrag e Lovel (1989), Briaud e Tucker (1984), Poulos (1987), as cargas residuais podem ser obtidas de instrumentações zeradas antes da instalação como indicam Gregersen et al. (1973), Cooke (1979), Rieke e Crowser (1987), Briaud et al. (1989), entre outros, bem como da interpretação de provas de carga, Decourt (1991), Massad (1992, 1993) e Fellenius (1995, 2003).

O modelo de Massad (1992, 1993, 1998), entre outros trabalhos, é muito interessante, uma vez que o autor desenvolveu um modelo bem geral, aplicável tanto a estacas cravadas, prensadas ou escavadas, embutidas em solo relativamente homogêneo ou em solos heterogêneos, com embutimento final em camada de solo muito mais resistente. Os trabalhos de Decourt (1991) e de Fellenius (2005) são de natureza gráfica, não sendo aqui analisados com o mesmo

detalhe. No método de Decourt (1991) é necessário se ter um segundo carregamento no ensaio, o que dificilmente é realizado na prática, e o método de Fellenius (2005) é aplicável apenas a provas de carga instrumentadas.

1.2 Método de Massad (1992, 1993)

Massad (1992) apresentou um modelo matemático geral baseado nas leis de Cambefort para interpretação de prova de carga estática de estacas escavadas e cravadas, que incorpora as cargas residuais na ponta, quando ocorrem. O modelo foi inicialmente desenvolvido para solos relativamente homogêneos. Em Massad (1993), o autor estendeu o método para o caso de estacas com embutimento em camada mais resistente.

O fato de ocorrer uma carga residual na ponta explica a mudança de forma da curva carga x recalque no segundo carregamento em estacas escavadas, como ilustra a Figura 3, adaptada de Massad (1992). O ponto 4 do primeiro carregamento determina o fim da plena mobilização do atrito lateral ao longo do fuste da estaca. Este mesmo ponto se desloca para a direita, ponto 4', no segundo carregamento, caracterizando a presença da carga residual que Massad (1992) designa por (Ph). Tendo em vista que não há um aumento do atrito lateral total (Alr) entre os dois carregamentos estudados, o que explica o distanciamento do ponto 4' é o fato de que parte da carga anteriormente aplicada permanece parcialmente presente na estaca mesmo após o descarregamento.

Para melhor compreensão do texto original, será mantida neste capítulo e nos seguintes, a mesma designação de Massad (1992,1993) para as variáveis. Massad (1992) definiu o coeficiente µ para quantificar a ação da carga residual.

$$\mu = 1 + \frac{P_h}{A_{lr}} = 1 + \frac{f_{res}}{f_{max}} \tag{1}$$



Figura 3 – Prova de carga numa estaca barrete rígida, primeiro e segundo carregamento (MASSAD, 1992)

Caso não se tenha cargas residuais aprisionadas na estaca, $P_h = 0$, como ocorre no primeiro carregamento de estacas escavadas mostrado na Figura 3. Logo, o valor de μ será unitário e a interpretação segue com as demais equações do modelo que serão apresentadas a seguir. Para estacas cravadas, de ponta, a carga residual será, no máximo, igual à carga disponível à ruptura por atrito lateral, $P_h = A_{lr}$, e μ será, no máximo, igual a 2.

Caso o atrito lateral seja a parcela mais relevante, μ será um valor compreendido entre 1 e 2. Massad (1992) comenta ainda que para o segundo carregamento em estacas escavadas, como ilustrado na Figura 3, não se deve descartar a possibilidade de μ > 2, se é que se deseja manter a simplicidade da segunda lei de Cambefort. O autor da presente pesquisa, num primeiro momento, estranhou um valor de μ superior a 2. Porém, por ocasião da interpretação do banco de dados, este aspecto será observado em alguns casos e discutido nesta pesquisa.

Na generalização do modelo matemático, além de introduzir o coeficiente μ , Massad propõe modificação nas Leis de Cambefort (funções de transferência de carga para a resistência de atrito e de ponta) para considerar a reversão do atrito lateral. A Figura 4, ilustra as Leis de Cambefort modificadas por Massad (1992).



Figura 4 – Relações de Cambefort modificadas para estacas escavadas (MASSAD, 1992)

Na Figura 4(a), a primeira Lei de Cambefort está relacionada à transferência de carga por atrito lateral unitário, considerado uniforme para toda a camada de solo homogêneo. O valor f_{max} corresponde ao máximo atrito disponível que é mobilizado para um deslocamento y₁, enquanto f_{min} é o atrito lateral unitário negativo (f_{res}). A segunda Lei de Cambefort está relacionada à transferência de carga pela ponta. O valor de R_p corresponde à tensão de ruptura unitária na ponta, que é atingida, num modelo rígido plástico, para um deslocamento y₂. As Leis de Cambefort indicam, num primeiro carregamento de uma prova de carga em estacas escavadas, a não ocorrência da carga residual. Por esta razão ambas as curvas partem da origem e o valor de μ é igual a 1, já que o valor de P_h, carga residual na ponta, é nula.

Na Figura 4(b), as Leis de Cambefort foram adaptadas ao segundo carregamento, situação em que as cargas residuais estão, em geral, presentes. Observe que na primeira Lei de Cambefort o atrito lateral unitário parte de um valor inicial negativo, em consonância com a Figura 2. O mesmo acontece na segunda Lei de Cambefort, em que parte da resistência unitária disponível, de valor igual a Ph/S, resistência residual unitária na ponta, já se encontra mobilizada para um

deslocamento nulo da ponta no segundo carregamento, em conformidade com a Figura 1.

De forma análoga a Figura 4(b), Massad reescreve as relações de Cambefort para estacas cravadas, Figura 5.



Figura 5 – Relações de Cambefort modificadas para estacas cravadas (LAZO e MASSAD, 1998)

Como P_h é uma carga, e não tensão, Massad (1992) dividiu-a pela área S da ponta da estaca na segunda Lei de Cambefort por ele adaptada. Neste caso, como P_h é maior que zero, o valor de μ é superior à unidade.

Ao coeficiente angular da primeira Lei de Cambefort, cuja unidade no Sistema Internacional (SI) é em kN/m³, Massad (1992) designou por B. Ao coeficiente angular da segunda Lei de Cambefort, cuja unidade no SI é também em kN/m³, Massad (1992) designou por R.

A rigidez da estaca, como elemento estrutural (pilar sem considerar a contenção lateral do solo) é designada por K_r, sendo:

$$K_r = \frac{ES}{h}$$
(2)

Onde E é o módulo de elasticidade do material da estaca, S a área de sua seção transversal, suposta constante, e h a profundidade do embutimento. O valor de K_r, no SI é dado em kN/m.

Massad (1992) introduz dois coeficientes adimensionais que serão utilizados nas equações de seu modelo, que controlam o comportamento de estacas em compressão axial: O primeiro coeficiente adimensional, denominado rigidez relativa solo x estaca (k), é dado por:

$$k = \frac{A_{lr}}{K_r y_1} = 4 \left(\frac{h}{D}\right)^2 x \left(\frac{B D}{E}\right)$$
(3)

Sendo B, a inclinação da primeira Lei de Cambefort, como já ilustrado nas Figuras 4 e 5, e D o diâmetro da estaca.

$$B = \frac{f_{max}}{y_1} \tag{3.b}$$

Veja que k é um valor adimensional e está relacionado à rigidez estrutural da estaca e ao coeficiente angular da função de transferência por atrito, expressa pela primeira Lei de Cambefort.

Chega-se à expressão (3), rigidez relativa, pela relação entre a rigidez do solo ao longo da primeira Lei de Cambefort, A_{lr}/y_1 , e a rigidez estrutural da estaca, ES/h, fazendo A_{lr} , atrito lateral disponível na ruptura, igual à tensão lateral na ruptura do solo, suposta constante ao longo de todo o embutimento, multiplicada pelo perímetro da estaca, π D, multiplicada ainda pela profundidade de embutimento h.

No caso de estacas infinitamente rígidas, ou seja, incompressíveis, k = 0, o atrito lateral atinge seu valor máximo instantaneamente. Por outro lado, para estacas infinitamente compressíveis, k = ∞ , a deformabilidade estrutural da estaca é essencial no comportamento, sendo necessário um acréscimo de carga para plena mobilização do atrito lateral.

O segundo coeficiente adimensional, definido por Baguelin et al. (1971), é calculado por:

$$m = \frac{R \cdot S \cdot y_1}{A_{l,r}} \tag{4}$$

Ele relaciona a reação na ponta e o atrito lateral total (A_{lr}), quando todo o atrito foi mobilizado no fuste. R, já definido anteriormente, é o coeficiente angular da reta de mobilização da ponta, segunda lei de Cambefort, S é a área da ponta da estaca e y₁ o deslocamento necessário para mobilizar o atrito lateral total. Observase, assim, que existe uma carga transmitida à ponta antes que toda a resistência do fuste seja mobilizada, carga esta que em algumas simplificações adotadas na prática, não se considera.

Massad (1992), mostra através de seu modelo, que a curva carga x recalque apresenta 3 trechos, no carregamento, e 3 no descarregamento, delimitados pelos

pontos da Figura 6. Além disso, pode existir um trecho inicial adicional no carregamento (0-2) devido à parcela de adesão.



Figura 6 – Curva carga recalque teórica modelada por Massad (1992)

Trecho 0-2, relativo à parcela de adesão na primeira Lei de Cambefort original, foi considerada nula (assim os pontos 0 e 2 coincidem com a origem dos eixos).

Trecho 0-3, retilíneo, fase pseudo-elástica de mobilização do atrito lateral.

Trecho 3-4, de forma parabólica, avanço da mobilização do atrito ao longo do fuste, do topo (3) à ponta (4), para estacas compressíveis. Não existe este trecho da curva na estaca curta, como se observa na Figura 3.

Trecho 4-5, de forma linear, mobilização da resistência de ponta ao longo do trecho pseudo-elástico da segunda lei de Cambefort.

Trecho 5-6, representa o que ocorre na ruptura da ponta. Em estacas de atrito, os pontos 4 e 5 coincidem.

O descarregamento, *rebound* ou repique, ocorre de forma inversa ao carregamento. Admitindo-se que o carregamento ultrapasse o ponto 4, ou seja, todo o atrito lateral disponível foi mobilizado no carregamento, ocorrem 3 trechos:

Trecho 6-7, pseudo-elástico, representa a volta na lei de Cambefort (redução do atrito lateral positivo).

Trecho 7-8, trecho curvo, parabólico, da plena mobilização do atrito no sentido reverso.

Trecho 8-9, trecho retilíneo associado ao rebound pleno.

Vale ressaltar que a Figura 6 completa, com todos os trechos, é válida quando a estaca é dita longa ou compressível ($k \ge 8$), isto é, ela precisa se deformar muito para que o atrito lateral se esgote em toda a sua profundidade. Neste caso, o trecho curvo (3-4) pode ser aproximado por uma parábola (Massad, 1992).

Por outro lado, quando a estaca é dita curta ou rígida ($\mathbf{k} \leq 2$), o atrito lateral se esgota subitamente do topo à base da estaca. Assim, o ponto 4 se aproxima do ponto 3 de modo que o trecho curvo praticamente não se desenvolve, ou é inexistente. Portanto para estacas rígidas, o formato do gráfico carga-recalque se assemelha a duas retas. Para o caso de valores de rigidez intermediários, deve-se ter cautela ao aplicar as relações (Lazo e Massad 1998).

Trecho 0-3

Trecho retilíneo inicial caracterizado pela fase pseudo-elástica da mobilização do atrito lateral. Massad (1992) sugere que o trecho retilíneo inicial seja representado pela expressão abaixo:

$$P_0 = \mu A_{lr} \cdot \frac{\beta'_3}{z} \cdot \frac{y_0}{\mu y_1}$$
(5)

$$z = \sqrt{k} \tag{6}$$

$$\beta'_{3} = \frac{\tanh(z) + \lambda}{1 + \lambda \tanh(z)}$$
(7.a)

$$\lambda = m.z = \frac{\frac{K_p}{K_r}}{z}$$
(7.b)

Observe a presença de m (na parcela de λ , veja a equação (4)), o que mostra que mesmo neste trecho pseudo-elástico da mobilização do atrito lateral, alguma carga já foi mobilizada pela ponta, sendo no ponto 3, o valor máximo de atrito lateral na cabeça da estaca deste trecho.
Trecho 3-4

Neste segundo trecho, verifica-se o avanço da mobilização do atrito em estacas longas do topo em direção a ponta. Se k ≥ 8, o trecho se apresenta na forma de uma curva que se aproxima de uma parábola. Esta função pode ser expressa por uma parábola do tipo:

$$\frac{y_0}{\mu \cdot y_1} = \frac{1}{2} + \frac{k}{2} \left[\frac{P_0}{\mu A_{lr}} \right]^2$$
(8.*a*)

A parábola pode ser reescrita como:

$$y_0 = c_1 + c_2 [P_0]^2$$
(8.b)

Onde c₁ e c₂ são:

*(***1**

$$c_1 = \frac{\mu y_1}{2}$$
 e $c_2 = \frac{1}{2K_r \, \mu \, A_{lr}}$ (8.c)

Pode-se aplicar, com cautela, esta relação para valores de k menores até o mínimo de k \geq 5. Se a estaca for curta ou rígida, com k \leq 0,5, os pontos 3 e 4 coincidem e não existe este trecho parabólico.

Massad (1992) acrescenta que o trecho 3-4, parabólico, pode ser também ajustado a uma curva exponencial, do tipo já bem conhecido pelos geotécnicos, proposto por Van der Veen (1953) e estendido por Aoki (1976).

$$P_0 = P_r \left[1 - e^{(b+ay_0)} \right]$$
(9)

onde a, b e P_r são constantes que dependem de características do sistema solo – estaca.

Massad (1992) esclarece que as expressões que fornecem os valores de a, b e Pr são correspondentes ao trecho 3-4 (não é o Pr global, como usualmente aplicado à toda a curva), e podem ser obtidas das expressões abaixo, que se pode demonstrar com simplicidade:

$$P_r = 1,45.\,\mu.\,A_{lr} \tag{10}$$

$$b = \frac{1}{k} - 0,18$$
 (11)

$$a = -\frac{2.K_r}{\mu.A_{lr}} \tag{12}$$

Massad (1992) esclarece um aspecto de grande interesse prático. O ajuste do trecho 3-4 por uma curva exponencial traz uma possibilidade adicional para a determinação do K_r através da curva carga recalque. Embora pareça redundante, quando se trabalha com estacas de concreto, e particularmente as moldadas in situ, o módulo de elasticidade do concreto nem sempre é conhecido com a devida acurácia, e seu valor no primeiro carregamento não é necessariamente igual ao da recarga. Caso a estaca atravesse um solo mais fraco e fique embutida num solo mais resistente, os valores de A_{Ir}, K_r e k refletem as características da camada mais fraca. Estes aspectos podem ser vistos nos exemplos de aplicação fornecidos por Massad (1993), aplicável ao caso de camada de embutimento mais resistente, que é o caso, por exemplo, de estacas parcialmente embutidas em rocha.

Vale destacar que Massad (1992) afirma que Pr não é necessariamente a carga de ruptura extrapolada, apesar da semelhança com a expressão de Van der Veen (1953) modificada por Aoki (1976). Além disso, na relação exponencial, a parcela de atrito (μA_{lr}) é proporcional ao valor de Pr. Portanto, para provas de carga que não se aproximam da ruptura, este método resulta em valores de parcela de atrito fora da realidade, pois em alguns destes casos pode acontecer do modelo estimar parcelas de atrito mais altas do que a carga máxima de ensaio.

Trecho 4-5

Neste trecho a curva volta a ser linear, correspondente à mobilização da resistência de ponta ao longo do trecho pseudo-elástico da segunda lei de Cambefort.

$$\frac{P_0 - \mu A_{lr}}{y_0 - \frac{\mu}{2} \frac{A_{lr}}{K_r}} = \frac{1}{\frac{1}{K_r} + \frac{1}{RS}}$$
(13)

Trecho 5-6

Este trecho corresponde à ruptura da ponta, quando a resistência de ponta, R_PS, atinge seu valor máximo disponível. No caso de estaca flutuante, com carga apenas por atrito, os pontos 4 e 5 coincidem, ou seja, a estaca rompe bruscamente, pois a carga residual já havia mobilizado toda a reação de ponta.

Descarregamento

No descarregamento o caminho é inverso e os parâmetros das Leis de Cambefort podem não ser os mesmos, pois os solos não são materiais elásticos (o descarregamento costuma ser mais rígido). Admitindo-se que no carregamento ocorra a mobilização total do atrito lateral, pode-se mostrar que o descarregamento inclui 3 trechos.

Trecho 6-7

Este primeiro trecho é retilíneo e corresponde ao trecho pseudo-elástico do retorno na lei de Cambefort.

Trecho 7-8

Este trecho corresponde à plena mobilização do atrito, no sentido reverso, contrário à subida da estaca. Seu formato curvo pode ser aproximado por uma parábola:

$$y_o^{max} - y_o = y_{1R} + \frac{1}{4K_r A_{lr}} \left(P_o^{max} - P_0 \right)^2$$
(14)

Onde y_{1R} se refere a um dos parâmetros de Cambefort do *rebound* (Figura 5). No descarregamento, a rigidez relativa é maior, sendo obtida com a mesma equação do carregamento, mas substituindo y_1 por y_{1R} , que é menor. Cabe destacar, novamente, que esta expressão só pode ser aplicada se o carregamento máximo, $P_{0máx}$ for suficiente para mobilizar todo o atrito lateral disponível.

$$k_{rebound} = \frac{A_{lr}}{K_r \, y_{1r}} \tag{15}$$

Trecho 8-9

Este trecho corresponde ao descarregamento franco da ponta.

Após indicação dos vários trechos, Massad (1992) apresenta um roteiro de cálculo para a interpretação da curva e obtenção dos parâmetros apresentados anteriormente. A aplicação do modelo, em cada um dos trechos do ensaio possibilita ao leitor uma melhor compreensão dos fatores que controlam a forma da curva carga x recalque, a partição das cargas resistidas por atrito e ponta, bem como a importância do trecho do descarregamento na obtenção da carga residual.

1.2.1 Roteiro de cálculo para solos homogêneos

Iniciar por meio de um ajuste parabólico entre a carga (P₀) e o recalque (y₀) no topo. Este ajuste é bem representado pela equação 8.c que indica uma relação ente (y₀) e (P₀)². Reescrevendo os valores c₁ e c₂ da equação (8.c), obtêm-se: $\mu y_1 = 2c_1$ (16)

$$\mu A_{lr} = \frac{1}{2K_r c_2} \tag{17}$$

Multiplicando a equação (3) por µ no numerador e no denominador, obtém-se:

$$k = \frac{\mu A_{lr}}{\mu y_1 K_r} \tag{18}$$

Se o valor **de k ≥ 8**, caracteriza-se a estaca como longa e pode-se passar direto para o próximo passo com os valores de μy_1 , μA_{lr} e k determinados.

Se o valor de $\mathbf{k} \leq \mathbf{2}$, o ponto 4 se aproxima do 3 (Figura 7) e a estaca tende a ter o comportamento de uma estaca rígida ou curta, e a parábola inexiste. Neste caso, deve-se usar o método das duas retas que será apresentado mais adiante.

Se o valor de **k** é intermediário, há que se ter cautela, como pode ser visto nas aplicações. Para $k \ge 5$, ainda é possível o uso da parábola e da exponencial.

Uma vez que o critério da rigidez foi satisfeito, ajusta-se, em seguida, uma exponencial ao trecho 3-4, em duas etapas:

 a) Determinar Pr pelo método de Massad (1986), que consiste em obter diversas cargas Pn associadas a uma série de recalques equi-espaçados de um valor
 Δ arbitrário, obtendo-se os pares ordenados (Pn, Pn+1), obtendo-se a correlação entre eles:

$$P_{n+1} = a' + b' P_n \tag{19}$$

O que resulta em:

$$P_r = \frac{a}{1-b}$$
(20)

Além de uma primeira aproximação do parâmetro <u>a</u> da equação 9 (exponencial):

$$a = \frac{\ln(b')}{\Delta} \tag{21}$$

 b) Determinar os valores de a e b da equação 9 (exponencial) através da correlação linear da curva logaritmizada:

$$\ln\left(1 - \frac{P_0}{P_r}\right) = b + ay_o \tag{22}$$

O valor de **a** obtido da correlação acima deve coincidir com aquele obtido da primeira aproximação, expressão (21)). Usando as equações 8, chega-se a:

$$\mu A_{lr} = \frac{P_r}{1,45} = -\frac{P_r^2 a}{4,2K_r}$$
(23)

$$K_r = -\frac{\mu A_{rl}a}{2} \tag{24}$$

$$k = \frac{1}{b + 0.18}$$
(25)

$$\mu y_1 = -\frac{2}{ak} \tag{26}$$

Cabe destacar que se o valor de K_r obtido pela equação (24) gerar um resultado incoerente com o valor teórico (calculado pela equação 2), há duas possibilidades para explicar essa divergência: ou o valor de k é baixo (estaca rígida ou curta) ou então existe uma camada de embutimento mais resistente, o que será visto a seguir. Se a estaca for curta, o trecho deve ser inexistente, como já se explicou anteriormente, devendo-se ajustar o comportamento.

Quando houver pontos suficientes para a definição adequada da curva de descarregamento, é possível se obter os parâmetros y_{1R} e A_{Ir} da equação (14) mediante um ajuste parabólico.

Massad (1992) ilustra a aplicação a vários casos de obra, que consistem em exemplos interessantes para o leitor acompanhar e melhor compreender de forma a poder fixar o roteiro e utilizar o modelo em outros casos. A interpretação permite a separação entre as parcelas de atrito e ponta, numa prova de carga não instrumentada, além de se avaliar a carga residual aprisionada na ponta da estaca.

1.2.2 Extensão a casos de estacas embutidas no trecho final em solo resistente

Massad (1993) estendeu o modelo de 1992 para o caso de estacas embutidas em solo mais resistente, após atravessar uma camada mais fraca. O efeito do embutimento em solo mais resistente tem como consequência, segundo o autor, o aumento da compressibilidade da estaca, o que permitirá interpretar a forma da curva carga-recalque do topo usando a parábola ou a exponencial, mesmo para estacas tidas como rígidas ou curtas. Sendo assim, compreende-se que o embutimento em camada mais resistente resulta no aumento da deformação elástica no trecho em solo mais fraco, não por conta do aumento da compressibilidade, mas sim devido ao aumento da carga normal atuante neste trecho, por conta do menor atrito lateral transferido ao solo na camada pouco resistente em relação à camada resistente.

1.3 Método das duas retas para estacas curtas ou rígidas (Lazo e Massad, 1998)

Como foi visto, quando $k \le 2$, o trecho curvo (3-4) praticamente não se desenvolve. Sendo assim, as relações parabólica e exponencial não se aplicam. Neste caso, a estaca é chamada de curta e apresenta comportamento rígido de modo que os pontos 3 e 4 da curva carga recalque se aproximam. Portanto, o gráfico apresenta uma figura formada por duas retas, uma para o trecho 0-3 (pseudo-elástico, de mobilização progressiva do atrito lateral do topo para a base) e outra para o trecho 4-5 (de desenvolvimento franco da resistência de ponta) (Lazo e Massad, 1998), como na Figura 7.



Figura 7 - Curva teórica carga-recalque no topo (LAZO e MASSAD, 1998)

Em virtude do exposto, Lazo e Massad (1998) propuseram um método gráfico de simples aplicação para estacas de comportamento rígido. A Figura 8 mostra a construção gráfica para determinação da parcela de atrito no carregamento (μA_{lr}) e atrito lateral na ruptura (A_{lr}).

Seja a equação da reta do trecho (4-5): $P_0 = d_1 + d_2 y_0$ (27)

Obtém-se por meio da expressão (13):

$$\frac{1}{d_2} = \frac{1}{RS_p} + \frac{1}{K_r} \qquad ou \qquad RS_p = \frac{1}{\frac{1}{d_2} - \frac{1}{K_r}}$$
(28)
$$\mu A_{lr} = \frac{d_1}{1 - \frac{d_2}{2K_r}}$$
(29)



Figura 8 - Construção gráfica para determinação da parcela de atrito no carregamento (μA_{lr}) e atrito lateral na ruptura (A_{lr}) (LAZO e MASSAD, 1998)

Do mesmo modo, se a reta do trecho (0-3) for escrita pela seguinte equação: $P_0 = b_2 y_0$ (30)

Combinando-se esta equação com as equações (5) e (6), obtém-se:

$$z = \frac{b_2}{\beta'_3 \cdot K_r} \tag{31}$$

Os valores de λ , k, μf_{max} e μy_1 , são calculados iterativamente. Para facilitar esta etapa de cálculos iterativos, Lazo e Massad (1998) desenvolveram o ábaco da Figura 9 para de terminar o valor de k.



Figura 9 - Ábaco para determinação direta de k (LAZO e MASSAD, 1998)

Com o valor de k, e as equações apresentadas é possível calcular os parâmetros restantes. Assim, resta apenas o valor de μ para ser estimado.

A curva do descarregamento ocorre de forma similar à do carregamento, seguindo um caminho inverso das relações de Cambefort. Massad (1992) mostrou que as expressões continuam válidas, substituindo P₀ por Δ P₀, y₀ por Δ y₀, y₁ por y_{1R}, R por R_{reb} e μ por μ_{reb} =2. Em relação ao descarregamento, Massad destaca que se o ponto 4 do carregamento (Figuras 6 e 7) for ultrapassado (mobilização de todo o atrito lateral disponível), o valor de μ_{reb} no descarregamento será igual a 2.

Isso ocorre, pois de acordo com Lazo e Massad (1998), quando o carregamento ultrapassa o ponto 4, o atrito lateral se desenvolve completamente em toda a profundidade até atingir o valor f_{max} (atrito lateral unitário na ruptura), atuando de baixo para cima (positivo). Dessa forma, a estaca está sob compressão, em um novo estado inicial para o descarregamento. Conforme a estaca é descarregada, há uma reversão gradativa do sentido do atrito lateral (desenvolve um atrito lateral negativo, atuando de cima para baixo). Portanto, no início do descarregamento (*rebound*):

$$f_{res}^{reb} = -f_{max} \tag{32}$$

Substituindo na equação (1)

$$\mu_{reb} = 1 - \frac{f_{res}^{reb}}{f_{max}} = 1 - \frac{(-f_{max})}{f_{max}} = 2$$
(33)

Seja a equação da reta do trecho (8-9): $\Delta P_0 = j_1 + j_2 \cdot \Delta y_0 2$ (34)

Obtém-se, da equação (13) relativa ao rebound:

$$\mu_{reb}.A_{lr} = 2.A_{lr} = \frac{j_1}{1 - \frac{j_2}{2K_r}}$$
(35)

1.4 Método das duas retas modificado (Marques & Massad, 2004 apud Massad et al., 2007) para estacas curtas ou rígidas

Como visto no item anterior, estacas curtas ou rígidas são aquelas com k \leq 2. Para este caso, não há trecho parabólico (3-4) como na Figura 7, pois o atrito lateral se esgota quase que instantaneamente, do topo à base da estaca. Desse modo, o ponto 4 se aproxima do 3 e a curva carga recalque pode ser descrita por duas retas, Figura 10.



Figura 10 - Curva carga x recalque para estacas curtas (MASSAD et al., 2007)

No método das duas retas modificado, foi inserido o trecho 0-2 que surge quando há presença do efeito de adesão (A). As equações das retas 2-3 (fase pseudo-elástica da mobilização do atrito lateral) e 4-5 (livre mobilização da resistência de ponta) são:

Reta 2-3:

$$P_0 = \frac{\mu A_{lr} \cdot \beta'_3 \cdot y_0}{z \cdot \mu y_1} + A \cdot S \cdot w_2$$
(36)

Onde a segunda parcela surge quando $A \neq 0$, fazendo com que a reta 2-3 não passe pela origem. Vale destacar que AS é nulo para o caso em que o primeiro trecho se desenvolve do ponto 0-3, onde não há adesão. Dessa forma, a equação (36) equivale à equação (5) para o trecho 0-3 acrescida de uma parcela quando $A \neq 0$, caso contrário essa parcela é nula e a equação fica igual à vista anteriormente para o trecho 0-3. Ressalta-se que AS só será diferente de zero nos casos em que surgir o ponto intermediário (2) de modo que o primeiro trecho será formato 0-2-3, como na Figura 10. Neste caso, o coeficiente linear da equação da reta 0-3 será diferente de zero. Onde:

$$w_2 = \frac{1}{\cosh(z) + \lambda . senh(z)}$$
(37)

É possível obter a partir da equação (36) a seguinte relação: $P_0 = c_2 \cdot y_0 + c_1$ (38)

Que é a equação (30) acrescida de um coeficiente linear em decorrência do efeito da adesão.

Por meio de uma regressão linear das equações (36), obtém-se:

$$A.S = \frac{c_1}{w_2} \tag{39}$$

$$\mu y_1 = \frac{\mu A_{lr}.\beta_3'}{c_2.z} \tag{40}$$

Substituindo a equação 3 na 40, tem-se:

$$c_2 = K_r . z. \beta_3' \tag{41}$$

Reta 4-5:

Equações do trecho 4-5 reescritas com a influência da adesão:

$$\frac{P_0 - (\mu A_{lr} + A.S)}{y_0 - \frac{\mu}{2} \frac{A_{lr} + 2.A.S}{K_r}} = \frac{1}{\frac{1}{K_r} + \frac{1}{RS}}$$
(42)

Aplicando uma regressão linear no trecho 4-5, obtém-se a equação: $P_0 = d_2 \cdot y_0 + d_1$

Combinando as equações 42 e 43, tem-se:

$$\frac{1}{d_2} = \frac{1}{K_r} + \frac{1}{RS}$$
(44)

$$\mu A_{lr} + A.S = \frac{d_1 + A.S.\frac{d_2}{2K_r}}{1 - \frac{d_2}{2K_r}}$$
(45.*a*)

Como $A.S.d_2/(2K_r)$ é praticamente desprezível, a equação 45(a) pode ser simplificada por:

$$\mu A_{lr} + A.S \cong \frac{d_1}{1 - \frac{d_2}{2K_r}}$$
(45.b)

1.5 Método de Decourt (1991)

Decourt (1991) observou a partir de ensaios sucessivos em várias provas de carga certa similaridade de comportamento, que ele atribuiu às cargas residuais. Estas suas observações o levaram a propor o método gráfico do *rebound*, que é capaz de separar as parcelas de atrito e ponta na ruptura, além de prever também uma estimativa da parcela da carga residual.

Ele partiu de uma simplificação de que as cargas disponíveis de atrito seriam iguais tanto num carregamento à tração como à compressão. Em relação à carga de ruptura verdadeira, conforme ilustrado na Figura 2, ele escreveu:

$Q_{I,rupt}$ Verdadeira = $Q_{I,medida}$ - $Q_{p,residual}$	(46.a)
$Q_{p, residual} \leq Q_{I, rupt}$ Verdadeira	(46.b)
Q_p Verdadeira = Q_p medida + Q_p , residual	(46.c)

(43)

Decourt (1991) verificou então que o segundo carregamento de um ensaio (Q_{t,2}) deveria ser levado a uma carga superior a:

$$Q_{t,2} \ge 2 Q_{l,rupt} \tag{47}$$

Assim, com a finalidade a obter a curva verdadeira por atrito, propôs 3 alternativas para calcular a parcela de atrito lateral verdadeira, Q_{l,rupt (V)}:

1) A carga correspondente a um recalque de 10mm, Q10mm.

2) A carga correspondente a um recalque de 15mm, Q15mm.

3) A terceira alternativa seria a carga correspondente à metade do *rebound* obtido no descarregamento, $Q_{rebound}/2$.

A carga correspondente ao *rebound* foi proposta de acordo com o método gráfico ilustrado na Figura 11, sendo obtida no segundo carregamento do ensaio. Portanto, a carga correspondente ao *rebound* está relacionada ao trecho de comportamento elástico do segundo carregamento, $Q_{reb} \sim \delta_{re} 2^{o} car$, que corresponderia à $Q_{I, medida}$, ou seja, à carga medida falsa, pois inclui o atrito positivo e o negativo residual. Isso ocorre no trecho elástico do segundo carregamento (pequenos deslocamentos, mobilização do atrito positivo).

Se a este deslocamento elástico corresponde à curva falsa, e supondo a parcela de ponta da estaca preponderante, se pode afirmar que:

$$Q_{rebound} \le 2Q_{l,rupt}(V) \tag{48.a}$$

O que é o mesmo que dizer:

$$Q_{l,rupt}(V) \ge \frac{Q_{rebound}}{2} \tag{48.b}$$



Figura 11 - Método gráfico de Decourt (1991)

Para Decourt (1991) uma estimativa da carga residual seria a metade do valor da carga relativa ao *rebound,* já que a carga residual seria no máximo igual à parcela de atrito verdadeira.

Para exemplificar a aplicação do método gráfico de Decourt, este foi aplicado à curva da Figura 11. Os resultados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado do método de Decourt aplicado à curva carga recalque O_{10} (MN) O_{15} (MN) O_{17} (MN)

	Q ₁₀ (MN)	Q ₁₅ (MN)	Q _{re} /2 (MN)
-	1,3	1,5	1,2

Embora os autores denominem as variáveis de forma distinta, os valores de Q₁₀, Q₁₅, Q_{re/2}, são formas alternativas de Decourt para o atrito lateral, sendo Q_{re⁰} /2, mesmo que P_h, para Massad, que é a carga aprisionada na ponta.

Apesar do método de Decourt ser um método gráfico e, por isso, bastante rápido, ele fornece valores muito próximos ao de Massad, que é muito mais refinado e elegante, do ponto de vista conceitual, nos casos de estacas curtas, em que ambos os métodos podem ser aplicados. Os dois métodos serão comparados pelo autor em outro capítulo.

No entanto, para a aplicação do método de Decourt é necessário se ter 2 carregamentos, enquanto no método de Massad apenas um carregamento é necessário, seguido do descarregamento.

O mais interessante é que a partir de valores de carga e recalque medidos apenas no nível do topo, o modelo de Massad permite a obtenção de uma informação muito rica ao projetista em termos de carga e recalque em diversos níveis da estaca.

O autor da presente pesquisa considera que Decourt (1991) analisou apenas casos de estacas curtas com parcela preponderante de resistência ponta, onde a carga residual máxima ocorre na ponta, ou seja, o atrito é revertido em todo o trecho do fuste. No caso de estacas longas, com atrito lateral preponderante, a carga residual máxima ocorre ao longo do fuste, e não na ponta. Desta forma, há que se ter cautela no emprego do método de Decourt para estacas longas.

1.6 Método de Fellenius

Quando se suspeita de que uma prova de carga instrumentada esteja afetada por tensões residuais (curva de transferência na forma de um S), Fellenius propõe um método gráfico para, a partir da curva falsa, ou seja, aquela medida com os sensores zerados antes do ensaio, e posteriores à cravação, se obtenha a curva das forças residuais e a curva de transferência de carga verdadeira.

A Figura 12 mostra o resultado da prova de carga e a distribuição da carga medida na ruptura de uma estaca pré-moldada de concreto, instrumentada, com 15m de comprimento cravado em uma areia uniforme compacta.

Considerando inicialmente o solo homogêneo, como o da Figura 12, Fellenius (2007) assume que haja mobilização completa do atrito negativo do trecho superior da estaca. Assim, a curva falsa, no trecho superior, contempla a reversão do atrito lateral negativo e a mobilização do atrito lateral positivo, que é, assim, o dobro do atrito real. Ele inicia o traçado da curva verdadeira incluindo a mobilização de metade do atrito da curva falsa e a outra metade, que seria a reversão do atrito negativo, é incluído no diagrama da carga residual.



Figura 12 - Método de Fellenius (2007)

Abaixo dos 8 m de profundidade (metade do comprimento da estaca do exemplo), a taxa de aumento da curva medida de transferência de carga se reduz, pois nesta região se localiza o plano neutro, transição do atrito negativo para positivo. A curva verdadeira é a curva contínua lilás, soma da carga residual com a curva medida (falsa).

Como o perfil geotécnico do solo abaixo do plano neutro apresenta características similares ao do trecho acima, Fellenius (2007) propõe a extrapolação da curva de transferência verdadeira (pontilhado lilás) pelo ajuste do valor do beta do atrito positivo do trecho acima.

$$\tau_{rup} = \beta . \sigma_{\nu}^{`} \tag{49}$$

Por último, Fellenius (2007) completa a distribuição da carga residual abaixo do plano neutro pela subtração da transferência de carga verdadeira daquela medida.

Fellenius (2007) ainda destaca que em perfis de solo não uniformes, com poro pressão não hidrostática, estacas adjacentes ou escavações próximas, é necessário usar um software especial, Unipile. O procedimento gráfico proposto só deve ser utilizado com conhecimento do solo (CPTu e amostragem do solo).

2 METODOLOGIA EMPREGADA

A partir da pesquisa bibliográfica do capítulo 1, o autor desta dissertação apresenta a seguir o procedimento por ele adotado, em um roteiro de cálculo a exemplo do apresentado por Massad (1992, 1993), contendo as expressões empregadas no desenvolvimento de uma planilha no software Microsoft Excel, a qual foi utilizada para a interpretação de diversas provas de carga. Alguns destes casos contemplam apenas dados obtidos em prova de carga convencional, outros com resultados de ensaios instrumentados.

2.1 Roteiro de cálculo para aplicação da planilha

Este roteiro o é muito similar ao de Massad já explicitado anteriormente. Por outro lado, é apresentado neste capítulo de modo que permita ao leitor o melhor acompanhamento e entendimento das adaptações das planilhas disponibilizadas para os diferentes casos.

2.1.1 Calcular a rigidez da estaca como peça estrutural (K_r) De acordo com a equação (2) do capítulo 1, reproduzida abaixo: $K_r = \frac{ES}{h}$ (2)

2.1.2 Calcular o coeficiente de rigidez relativa solo-estaca (k) considerando a hipótese de estaca longa

No primeiro momento se partirá do caso mais geral, ou seja, da hipótese de que a estaca apresenta comportamento compressível, ou seja, estaca longa, que será confirmado ou não ao final dos cálculos por meio do resultado de k. A partir da curva carga x recalque, deve-se escolher, pelo aspecto visual da curva, os pontos 3, 4, 5 e 6 para definir os trechos como na Figura 6.

2.1.2.1 Relação parabólica

Proceder a um ajuste parabólico entre carga (P_0) e recalque no topo (y_0) por meio do gráfico onde o eixo y representará os recalques (y_0), enquanto o eixo x será escrito como $\left[\frac{P_0}{1000}\right]^2$ para os pontos do **trecho 3-4**. Dessa forma, a parábola será reescrita como a equação (8.b).

Se k \ge 8, o trecho se apresenta na forma de uma curva que se aproxima de uma parábola. Esta função pode ser expressa por uma parábola do tipo, de acordo com as equações (8a,b,c) do capítulo 1:

$$\frac{y_0}{\mu \cdot y_1} = \frac{1}{2} + \frac{k}{2} \left[\frac{P_0}{\mu A_{lr}} \right]^2$$
(8.*a*)

A parábola pode ser reescrita como:

$$y_0 = c_1 + c_2 [P_0]^2$$
(8.b)

onde c₁ e c₂ são:

$$c_1 = \frac{\mu y_1}{2}$$
 e $c_2 = \frac{1}{2K_r \ \mu A_{lr}}$ (8.c)

Deve-se, em seguida, realizar uma regressão linear com os pontos do gráfico $\left[\frac{P_0}{1000}\right]^2 \ge y_0$ com a finalidade de obter o melhor ajuste para os coeficientes angular (C₂) e linear (C₁) da equação. Estes serão substituídos nas equações 8.c, lembrando que K_r também já foi calculado. Assim, obtêm-se os valores de μy_1 e μ A_{ir}.

Por fim, deve-se calcular k, a partir da equação (3) do capítulo 1:

$$k = \frac{\mu A_{lr}}{\mu y_1 K_r} \tag{3}$$

Se $k \ge 8$, a hipótese inicial está confirmada, trata-se de uma estaca longa ou compressível. Portanto, o trecho se apresenta na forma de uma curva que se aproxima de uma parábola. Seguir para o item 2.1.2.2 para calcular pela relação exponencial.

Em contrapartida, Se **k** ≤ **2**, o ponto 4 se aproxima do 3 (Figura 7) e a estaca tende a ter o **comportamento como estaca rígida ou curta**, e a parábola inexiste. Seguir para o **item 2.1.5 (método das duas retas).**

Se o valor de **k é intermediário**, é preciso ter cautela, como será visto nas aplicações nos próximos capítulos. Para **k ≥ 5**, ainda é possível o uso da parábola e da exponencial.

2.1.2.2 Relação exponencial

Uma vez que foi determinada pela relação parabólica que a estaca tem comportamento mais compressível, estaca longa, pode-se aplicar também a relação exponencial.

Determinar Pr pelo método de Massad (1986). Esta etapa consiste em calcular diversas cargas Pn associadas a uma série de recalques equi-espaçados de um valor Δ arbitrário, obtendo-se os pares ordenados (Pn, Pn+1), de modo que a correlação entre eles seja de acordo com a equação (19) do capítulo 1, reproduzida abaixo:

$$P_{n+1} = a' + b' P_n \tag{19}$$

Pr será o valor no qual Pn e Pn+1 se igualam. Dessa forma, Pr pode ser calculado pela equação (20) do capítulo 1, reproduzida abaixo:

$$P_r = \frac{a'}{1 - b'} \tag{20}$$

Em seguida, deve-se determinar os valores de **a** e **b** da equação 9 (exponencial) através da correlação linear da curva logaritmizada, de acordo com a equação (22) do capítulo 1, reproduzida abaixo:

$$\ln\left(1 - \frac{P_0}{P_r}\right) = b + ay_0 \tag{22}$$

Neste passo, deve-se construir um gráfico com a equação 22. Com o valor de P_r previamente determinado, obtém-se o gráfico a partir dos valores de y₀ e P₀. Em seguida, deve-se fazer uma regressão linear com os pontos para obter os coeficientes a e b da equação 22.

Uma vez que os valores de Pr, a e b, já foram obtidos, deve-se calcular μA_{lr} , μy_1 , $K_r e k$ por meio das equações (23), (24), (25) e (26) apresentadas anteriormente e reproduzidas a seguir:

$$\mu A_{lr} = \frac{P_r}{1,45} = -\frac{P_r^2 a}{4,2K_r}$$
(23)

$$K_r = -\frac{\mu A_{rl} a}{2} \tag{24}$$

$$k = \frac{1}{b + 0.18} \tag{25}$$

$$\mu y_1 = -\frac{2}{ak} \tag{26}$$

Novamente, deve-se verificar o valor de k para confirmar a hipótese adotada inicialmente de comportamento compressível, ou seja, presença do trecho 3-4 no carregamento.

2.1.3 Descarregamento pela relação parabólica.

Este ocorre de forma similar ao carregamento pela relação parabólica, como descreve a equação (14) do capítulo 1, reproduzida a seguir. Onde y_{1R} se refere a um dos parâmetros de Cambefort do *rebound* (Figuras 4 e 5).

$$y_o^{max} - y_o = y_{1R} + \frac{1}{4K_r A_{lr}} \left(P_o^{max} - P_0 \right)^2$$
(14)

A parábola pode ser reescrita como:

$$\Delta y_0 = c_1 + c_2 \, [\Delta P_0]^2 \tag{50}$$

Onde c_1 e c_2 são dados pela equação (8. *c*) já apresentada e reproduzida a seguir:

$$c_1 = y_{1R}$$
 e $c_2 = \frac{1}{4K_r \cdot A_{lr}}$ (8.c)

Após a determinação de c₁ e c₂ através de regressão linear com o gráfico no formato da equação apresentada, é possível calcular y_{1R} e A_{lr} . Em seguida, pode-se calcular a rigidez relativa no descarregamento (k_{rebound}) através da equação (15),

reproduzida a seguir. Vale destacar que esta é obtida com a mesma equação do carregamento, mas substituindo y₁ por y_{1R}, que é menor. Logo, a rigidez relativa é maior no descarregamento. Cabe destacar que esta expressão só pode ser aplicada caso o carregamento máximo, P_{0máx}, seja suficiente para mobilizar todo o atrito lateral disponível.

$$k_{rebound} = \frac{A_{lr}}{K_r \, y_{1r}} \tag{15}$$

2.1.4 Calcular o valor de µ

Uma vez que todos os parâmetros do carregamento e descarregamento foram calculados, agora é possível calcular o valor de µ.

$$\mu = \frac{\mu A_{lr}(\text{médio entre as relações parabólica e exponencial})}{A_{lr}}$$
(51)

 $\mu = 1$ para estacas escavadas que ainda não foram carregadas.

 $1 \le \mu \le 2$ para estacas cravadas ou escavadas que já sofreram carregamento prévio.

Para o segundo carregamento em estacas escavadas, não se deve descartar a possibilidade de μ > 2.

2.1.5 Método das duas retas de Lazo e Massad, 1998

Como foi visto, quando k \leq 2, o trecho curvo (3-4) praticamente não se desenvolve. Sendo assim, as relações parabólica e exponencial não se aplicam. Neste caso, a estaca é chamada de curta e apresenta comportamento rígido de modo que os pontos 3 e 4 da curva carga recalque se aproximam. Portanto, o gráfico apresenta uma figura formada por duas retas, uma para o trecho 0-3 (pseudo-elástico, de mobilização progressiva do atrito lateral do topo para a base) e outra para o trecho 4-5 (de desenvolvimento franco da resistência de ponta) (Lazo e Massad, 1998), como nas Figuras 7 e 8.

2.1.5.1 Carregamento pelo método das duas retas

Seja a reta do trecho (4-5) descrita pela equação (27) apresentada no capítulo 1 e reproduzida abaixo:

$$P_0 = d_1 + d_2 y_0 \tag{27}$$

Obtém-se por meio da expressão (13), as equações (28) e (29) do capítulo 1, reproduzidas a seguir:

$$\frac{1}{d_2} = \frac{1}{RS_p} + \frac{1}{K_r} \qquad ou \qquad RS_p = \frac{1}{\frac{1}{d_2} - \frac{1}{K_r}}$$
(28)
$$\mu A_{lr} = \frac{d_1}{1 - \frac{d_2}{2K_r}}$$
(29)

Do mesmo modo, se a reta do trecho (0-3) for escrita pela equação (30) apresentada no capítulo 1 e reproduzida a seguir:

$$P_0 = b_2 y_0 (30)$$

Destaca-se que caso haja a presença do efeito da adesão, surgimento do trecho 0-2, deve-se incluir o coeficiente linear na equação (30), de modo que ela seja apresentada como a equação (38).

Combinando-se esta equação com as equações (5) e (6), obtém-se a equação (31) do capítulo 1, reproduzida abaixo:

$$z = \frac{b_2}{\beta'_3 \cdot K_r} \tag{31}$$

Onde:

$$\beta_3' = \frac{\tanh(z) + \lambda}{1 + \lambda \tanh(z)} = \frac{b_2}{z \cdot K_r}$$
(7.*a*)

Combinando as equações (7. b) e (28):

$$\lambda = \frac{\frac{1}{K_r} \cdot \left(\frac{1}{\frac{1}{d_2} - \frac{1}{K_r}}\right)}{Z}$$
(52)

Substituindo a equação (52) na (7.a):

$$\frac{b_2}{z.K_r} = \frac{\tanh(z) + \frac{\frac{1}{K_r} \cdot \left(\frac{1}{\frac{1}{d_2} - \frac{1}{K_r}}\right)}{z}}{1 + \frac{\frac{1}{K_r} \cdot \left(\frac{1}{\frac{1}{d_2} - \frac{1}{K_r}}\right)}{z} \cdot \tanh(z)}$$
(53)

Uma vez que os valores de b_2 , d_2 e K_r já foram determinados anteriormente, z é a única incógnita da equação. Esta será calculada iterativamente pela equação acima. Para determinar o valor de z, o autor desta pesquisa utilizou um recurso do Microsoft Excel, enquanto Lazo e Massad (1998) desenvolveram o ábaco da Figura 9. Com o valor de z e as equações apresentadas é possível calcular os parâmetros restantes, com exceção do valor de μ . Este será determinado após o descarregamento.

2.1.5.2 Descarregamento pelo método das duas retas

Seja a equação da reta do trecho (8-9):

$$P_0 = j_1 + j_2 y_0$$
(54)

J₁ e j₂ podem ser determinados pelo gráfico da Figura 7. Em seguida, desejase encontrar a posição do ponto N do gráfico da Figura 8, cujas coordenadas são:

$$y_{0N} = \frac{P_{0max} - 2k_r \cdot y_{0max} - j_1}{j_2 - 2k_r}$$
(55)

$$P_{0N} = j_2 \cdot y_{0N} + j_1 \tag{56}$$

Logo, Alr será obtido pela equação:

$$\mu_{reb} A_{lr} = 2A_{lr} = P_{0max} - P_{0N} \tag{57}$$

A partir da equação acima é possível calcular o valor de A_{lr}. Uma vez que a parcela de atrito do carregamento, μA_{lr} , já havia sido calculada anteriormente, podese determinar o valor de μ e a carga residual que atua no carregamento.

3 CALIBRAÇÃO DO ROTEIRO A CASOS DOCUMENTADOS

Neste capítulo três casos de estacas de comportamento rígido abordadas por Lazo e Massad (1998) e três estacas de comportamento compressível de Massad (1992) serão interpretados pela planilha do autor, a fim de confirmar o entendimento do método e verificar se a planilha de cálculo desenvolvida está calibrada com a interpretação publicada por Massad (1992) e Lazo e Massad (1998).

Vale ressaltar que os resultados apresentados nas publicações e os obtidos pelo autor desta pesquisa não serão exatamente iguais. Uma vez que a curva carga x recalque foi reproduzida pelo autor a partir da leitura dos gráficos impressos nos artigos, há variações nos valores lidos em relação aos relatórios originais das provas de carga, aos quais o autor desta pesquisa não teve acesso. Além disso, Lazo e Massad (1998) utilizam um ábaco para obter o valor do parâmetro k, enquanto o autor desta pesquisa utiliza um recurso do software Excel para realizar cálculos iterativos, a fim de testar valores para k até que a condição numérica apresentada na equação (53) seja satisfeita.

3.1 Calibração para o método das duas retas

Para realizar a calibração do método das duas retas, foram selecionadas duas estacas cravadas e uma escavada de comportamento rígido, previamente calculadas por Lazo e Massad (1998). O objetivo deste capítulo é interpretar as estacas apresentadas na Tabela 2 a fim de comparar os resultados obtidos por Lazo e Massad (1998) com os do autor e, assim, verificar a acurácia da planilha.

Tipo	Estaca	Dimensões (cm)	h (m)	E (MN/m²)	K _r (kN/mm)	Fonte
Hélice continua	HLC-2	D = 60	16,0	25	441	Geofix (1998) apud Lazo e Massad (1998)
Pré- moldada	PC-25	D _e = 33 D _i = 19	11,6	36	177	Penna (1993) apud Lazo e Massad (1998)
de concreto	PC-90	D = 40	11,3	36	400	Lazo (1996) apud Lazo e Massad (1998)

Tabela 2 – Casos analisados

3.1.1 Calibração estaca HLC-2

Caso de estaca escavada de comportamento rígido. A Figura 13 apresenta a curva carga x recalque da estaca HLC-2 (em preto) com o método das duas retas aplicado (linhas tracejadas em azul) e os resultados estão resumidos na Tabela 3, juntamente com os valores obtidos por Lazo e Massad (1998).



Figura 13 - Método duas retas aplicado para a estaca HLC-2

Гabela 3 –	Calibração	estaca	HLC-2
------------	------------	--------	-------

		Carregamento						
	k	µA⊧ (kN)	µy₁ (mm)	A _{lr} (kN)	μ			
Autor	1,23	1800	3,6	1800	1			
Lazo e Massad (1998)	1,50	1750	2,6	1750	1			

Pode-se observar que a parcela de atrito com influência da carga residual (μA_{lr}) teve menos de 3% de variação entre o valor calculado por Lazo e Massad (1998) e o autor. Por outro lado, a diferença mais alta observada nos parâmetros k e μy_1 são consequência de aproximações de cálculo. Enquanto Massad utiliza ábacos para estimar o valor de k, o autor desta pesquisa utilizou um recurso do software

Excel para realizar cálculos iterativos a fim de testar valores para k até que a condição numérica apresentada na equação (53) fosse satisfeita.

Por se tratar do primeiro carregamento de uma estaca escavada, de acordo com Massad (1992), não há carga residual, logo μ é igual a 1. Dessa forma, o atrito (A_{lr}) pode ser obtido diretamente do carregamento, sem que seja necessário calcular o descarregamento. A partir dos resultados apresentados na Tabela 3, pode-se concluir que a planilha está calibrada de forma satisfatória para este caso.

3.1.2 Calibração estaca PC-25

Esta é uma estaca cravada de comportamento rígido. A Figura 14 mostra o método das duas retas (em azul) aplicado à curva carga x recalque (em preto) e a Tabela 4 o resumo dos resultados.



Figura 14 - Método duas retas aplicado para a estaca PC-25

	Carregamento			Descarregamento	
	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)	A _{lr} (kN)	μ
Autor	1,69	410	2,01	243	1,15
Lazo e Massad (1998)	1,66	415	1,43	250	1,10

Tabela 4 – Calibração estaca P	°C-25
--------------------------------	-------

Neste caso, os valores calculados pelos dois autores foram bem próximos para todos os parâmetros, inclusive para o descarregamento que não fora calculado no caso anterior por se tratar de uma estaca escavada. Tendo em vista a acurácia dos resultados, pode-se concluir que a planilha está calibrada de forma satisfatória e fornece valores coerentes.

3.1.3 Calibração estaca PC-90

A Figura 15 apresenta o método das duas retas aplicado à curva carga x recalque da estaca PC-90 e a Tabela 5 o resumo dos resultados. Destaca-se que esta é uma estaca pré-moldada cravada.



Figura 15 - Método duas retas aplicado para a estaca PC-90

	Carregamento			Descarregamento	
k μA _{ir} (kN) μy ₁ (mm) A				Aır (kN)	μ
Autor	0,33	469	3,58	328	1,43
Lazo e Massad (1998)	0,35	450	3,34	324	1,39

Tabela 5 – Calibração es	staca PC-90
--------------------------	-------------

Através da Tabela 5, é possível verificar que a planilha apresentou resultados muito próximos ao esperado. Tendo em vista a limitação da leitura de valores diretamente no gráfico e número de casas decimais utilizadas na planilha de cálculo, pequenas diferenças já eram esperadas. Portanto, pode-se concluir que os resultados reproduziram de forma satisfatória os obtidos e publicados por Lazo e Massad (1998), evidenciando o entendimento deste método.

3.2 Calibração para as relações parabólica e exponencial

Para realizar a calibração das relações parabólica e exponencial, foram selecionadas duas estacas cravadas e uma escavada de comportamento compressível, previamente calculadas por Massad (1992), apresentadas na Tabela 6.

Tipo	Estaca	Área (m²)	h (m)	K _r (kN/mm)	Fonte
Crovedo	Met. Casqueiro	0,01	31,8	63	Rin et al. (1983) apud Massad (1992)
Cravada	Met. Penha	0,01	20,6	107	Nápoles Neto (1958) apud Massad (1992)
Escavada	Estaca 225	2,01	53,5	1130	Raiz Engenharia (1990) apud Massad (1992)

Tabela 6 – Casos analisados

3.2.1 Calibração estaca metálica da Penha

Este é um caso de estaca cravada de comportamento compressível avaliado, desde o carregamento ao descarregamento. Da Figura 16 a Figura 19 são apresentados os gráficos e equações de regressão linear utilizados para calcular as relações parabólica e exponencial no carregamento e descarregamento. Enquanto os resultados estão expostos na Tabela 7.



Figura 16 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca metálica da Penha



Figura 17 - Determinação de Pr com ∆=2mm - Estaca metálica da Penha



Figura 18 - Relação Exponencial (Carregamento) – Estaca metálica da Penha



Figura 19 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca metálica da Penha

Estaca	Relação exponencial						ição Pai	abólica	Descarrega- mento		
Penha	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)	K _r (kN/mm)	Pr (kN)	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)	Alr (kN)	K _{reb}	- µ
Autor	5,3	3003	6,16	92,4	4355	3,8	2772	6,76	1511	12,3	1,91
Massad (1992)	4,3	2711	6,35	100	3931	4,3	2771	6,44	1496	13,0	1,83

Tabela 7 – Comparação entre os resultados obtidos pelo Autor e Massad (1992)

A partir dos resultados da Tabela 7, pode-se observar que todos os valores calculados pelo autor estão coerentes com os de Massad (1992). Vale ressaltar que era de se esperar que os resultados não fossem exatamente iguais, devido à falta de acurácia na obtenção dos pontos da curva carga recalque a partir das figuras dos artigos e diferenças de aproximação de cálculo.

3.2.2 Calibração estaca metálica do Casqueiro

Este é outro caso de estaca cravada de comportamento compressível. Por outro lado, para calcular o valor de μ neste caso não foi necessário estimar o A_{lr} pelo descarregamento, pois este foi inferido através da prova de arrancamento da estaca, onde A_{lr}=1180kN.

Os gráficos utilizados nas relações parabólica e exponencial são apresentados na Figura 20, Figura 21 e Figura 22 e a comparação dos resultados na Tabela 8.



Figura 20 - Relação Parabólica (Carregamento) – Estaca metálica do Casqueiro



Figura 21 - Determinação de Pr com ∆=2mm - Estaca metálica do Casqueiro



Figura 22 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca metálica do Casqueiro

Tabela 8 – Comparação entre os resultados obtidos pelo Autor e Massad (1992)

Estaca		Re	lação ex	kponencial		Rela			
Met.	k	μA _{lr}	µy₁	Kr	Pr	k	μA _{lr}	µy₁	μ
Casqueiro	ĸ	(kN)	(mm)	(kN/mm)	(kN)	ĸ	(kN)	(mm)	
Autor	4,7	1400	4,37	68	2030	5,6	1571	4,40	1,26
Massad (1992)	5,3	1484	4,47	63	2152	5,4	1527	4,46	1,28

A partir da Tabela 8, pode-se observar que os valores calculados pelo autor foram muito próximos aos calculados por Massad (1992). Portanto, considerou-se um ótimo resultado para a calibração.

3.2.3 Calibração estaca 225

Por se tratar de uma estaca escavada em que não houve carregamento prévio, não há presença de cargas residuais. Dessa forma, tem-se pelo procedimento de Massad que μ =1. Os gráficos utilizados nas relações parabólica e exponencial são apresentados na Figura 23, Figura 24 e Figura 25 e a comparação dos resultados na Tabela 9.



Figura 23 - Relação Parabólica (Carregamento) – Estaca 225



Figura 24 - Determinação de Pr com Δ =1mm - Estaca 225



Figura 25 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca 225

Estaca 225	Relação exponencial				Relação Parabólica				٨	1.	
	k	μA _{lr} (kN)	μy ₁ (mm)	K _r (kN/ mm)	Pr (kN)	k	μA _{lr} (kN)	μy ₁ (mm)	Alr (kN)	K médio	μ
Autor	18,0	12224	0,52	1306	17725	11,3 ⁽¹⁾	12825	0,02	12525	14,7	1
Massad (1992)	16,7	12312	0,57	1287	17650	23,8	14086	0,46	13200	19,8	1

Tabela 9 – Comparação entre os resultados obtidos pelo Autor e Massad (1992)

(1) Tendo em vista que o valor de µy₁ próximo de zero resultaria em um valor extremamente alto de k, foi considerado µy₁≈1mm para calcular k.

Massad justifica que o valor de µy₁ muito baixo neste caso pode advir de precisão na leitura dos extensômetros. Por este motivo, é adotado o valor de 1mm para este parâmetro. Pode-se concluir por meio das tabelas, que as calibrações estão ótimas para todos os métodos utilizados.

Por outro lado, nesta pesquisa a parcela de atrito (A_{Ir}) será calculada também a partir do descarregamento, como se o projetista não soubesse que se trata do primeiro carregamento da estaca escavada. Desse modo, o valor de μ será calculado de forma análoga às estacas cravadas para verificar se o modelo reproduzirá a condição de ausência de tensões residuais, μ = 1.



Figura 26 - Relação parabólica (descarregamento) – Estaca 225

k reb	A _{lr} (kN)	y _{1R} (mm)
12,39	9577	0,68

Tabela 10 - Resultados obtidos pela relação parabólica no descarregamento

A partir da razão entre o valor médio de μ A_{lr}, calculado na Tabela 9, e A_{lr}, obtido na Tabela 10, é possível chegar a μ igual a 1,31. Observa-se que o valor de μ encontrado foi 31% superior ao esperado, dentro de uma faixa de incerteza razoável.
4 INTERPRETAÇÃO DO BANCO DE DADOS

Foi elaborada uma pesquisa de casos documentados de provas de carga em estacas da literatura, preferencialmente instrumentadas, buscando casos que apresentassem dados de carregamento e descarregamento. No caso de estacas instrumentadas é possível estimar o valor da parcela de atrito e ponta a partir dos registros de carga e recalque obtidos apenas no topo, pelo modelo de Massad, e dos ensaios instrumentados, permitindo a comparação entre os resultados obtidos, bem como a carga residual.

O banco de dados foi selecionado de publicações brasileiras e do banco de dados apresentado por Chow et al. (2016). Os ensaios selecionados incluem dados de estacas cravadas (metálica, pré-moldada de concreto e tubada) e escavadas (hélice contínua, escavada de grande diâmetro e diafragma de concreto) de diversos comprimentos e áreas como mostra a Tabela 11.

Tendo em vista a variedade de estacas e natureza dos solos de diferentes perfis estratigráficos, foram observados diferentes comportamentos, uns com todos os trechos bem definidos da curva carga recalque, correspondentes a estacas compressíveis, outros sem o trecho 3-4, caracterizando um comportamento mais rígido. Os dados originais de cada um destes casos podem ser obtidos em anexo e de forma mais completa nas referências dos artigos.

Estaca	Тіро	Execução	Área (cm²)	h (m)	E (GPa)	Kr teórico (kN/mm)	Fonte
Amendola et al., 2018	Metálica	Cravada	110	49,00	205	46,02	(PEREZ E FALCONI, 2007 apud AMENDOLA
							et al 2018)
D-2	Metálica	Cravada	90	23,86	210	79,21	(COSTA, 1994)
EPM4	Metálica	Cravada	630	22,60	207	577,04	(POLIDO et al.,
EPM5	Metálica	Cravada	630	15,70	207	830,64	2019)
ТР	Metálica	Cravada	2100	30,60	210	1441,15	
ST-2	Metálica	Cravada	562	79,10	210	149,13	(CHOW et al.,
TP4	Metálica	Cravada	2913	34,30	210	1783,40	2016)
ST-1	Metálica	Cravada	562	79,00	210	149,32	

Tabela 11 – Apresentação do banco de dados de estacas

H-2	Pré-moldada de concreto	Cravada	1648	15,20	24	260,27	
RJ PI-4	Pré-moldada de concreto	Cravada	2500	26,50	24	226,42	
RJ PI-3	Pré-moldada de concreto	Cravada	4900	35,60	24	330,34	(CHOW et al. <i>,</i> 2016)
P2-C	Pré-moldada de concreto	Cravada	640	15,00	24	102,41	
HRV P1	Pré-moldada de concreto	Cravada	3721	16,80	24	531,57	
61	Tubada	Cravada	990	40,00	37	90,99	(DANZIGER,
164	Tubada	Cravada	990	40,00	37	90,99	1980)
E104	Diafragma de concreto	Escavada	19854	42,00	21	992,70	(VELLOSO et al.,
E413	Diafragma de concreto	Escavada	19854	40,00	21	1042,34	1978)
FRUTUOSO et al., 2016	Escavada de grande diâmetro	Escavada	7854	58,00	24	324,99	(FRUTUOSO et al., 2016)
FALCONI et al., 2015	Escavada de grande diâmetro	Escavada	7854	54,10	24	348,42	(FALCONI et al., 2015)
PCE-01	Hélice continua	Escavada	707	9,00	21	164,93	(PALUDETO, 2022)
CFA 1	Hélice continua	Escavada	962	6,00	24	384,85	(KORMANN et
CFA 2	Hélice continua	Escavada	962	7,00	24	329,87	al., 2000)
IX.1	Hélice continua	Escavada	1257	10,00	25	314,16	(CARVALHO et
PCR3	Hélice continua	Escavada	1257	15,50	32	259,44	al., 2023)
EH1	Hélice continua	Escavada	1257	7,70	27	442,27	
EH2	Hélice continua	Escavada	1257	11,85	24	254,51	
EH3	Hélice continua	Escavada	1257	14,95	35	294,20	
EH4	Hélice continua	Escavada	1257	23,65	27	141,34	
EH5	Hélice continua	Escavada	1257	15,80	21	170,20	
EH6	Hélice continua	Escavada	1257	16,80	22	160,82	

Ao todo foram interpretados 30 ensaios, sendo 29 com carregamento e descarregamento, dos quais 26 contemplaram instrumentação. A variedade do banco de dados obtido permitiu aplicar o método desenvolvido por Massad a diversos casos bem diferentes entre si.

Para avaliar os resultados obtidos, as estacas serão divididas de acordo com o comportamento apresentado. As estacas compressíveis estarão no item 4.1, enquanto as de comportamento rígido estarão no item 4.2. Além disso, elas serão divididas em subgrupos de acordo com o tipo de execução, cravadas ou escavadas.

No caso da instrumentação, foi considerado que os instrumentos tenham sido zerados após a cravação, como é de ocorrência mais comum, e não anteriormente à instalação da estaca. Neste caso, a curva instrumentada medida revela o atrito falso, e não o real, exceto nas estacas escavadas. O atrito falso seria aquele correspondente ao verdadeiro multiplicado pelo valor de µ definido por Massad (1992), isto é, µAır. Sendo assim, a acurácia do modelo será verificada pela comparação entre µAır de Massad e a instrumentação.

4.1 Estacas que apresentaram comportamento compressível

Neste item serão apresentadas: i) as planilhas resumo das relações parabólica e exponencial aplicadas ao banco de dados; ii) a comparação dos resultados obtidos com os dados da instrumentação; e iii) comentários sobre os resultados obtidos. Os gráficos para determinação de P_r e regressão linear para as relações parabólica e exponencial estão disponíveis no Apêndice A. Além disso, no Apêndice C, são apresentados gráficos com a curva carga recalque do ensaio sobreposta pela curva estimada pelo modelo para cada estaca analisada.

4.1.1 Análise da estaca de Amendola, et al. (2018)

O primeiro caso analisado pelo autor foi recentemente publicado por Amendola et al. (2018). Este será avaliado de forma completa pelo método de Massad de modo a obter as parcelas de atrito, ponta e residual. Além disso, será feita uma comparação entre a curva carga recalque instrumentada e a estimada pelo modelo. Este caso consiste numa estaca cravada de perfil metálico, de seção decrescente, que foi instrumentada, tornando possível a verificação das parcelas de atrito e ponta.

Primeiramente, foi calculada a relação parabólica do trecho (3-4), Figura 27. Por meio desta, pode-se observar que o ajuste da regressão linear foi quase perfeito, apresentando coeficiente de determinação (R²) de 0,9985. Isto indica que o trecho analisado é muito bem representado pela equação da parábola.



Figura 27 - Relação Parabólica (Carregamento)

Em seguida, foi realizada a análise pela relação exponencial, Figura 29. Através desta, é possível notar que a curva carga recalque se encaixa perfeitamente como uma exponencial, cujo coeficiente de determinação é igual a 1. Vale destacar que antes foi preciso determinar o valor de Pr, Figura 28.



Figura 28 - Determinação de Pr com ∆=5mm



Figura 29 - Relação Exponencial (Carregamento)

A Tabela 12 mostra uma comparação entre os parâmetros calculados por ambas as relações. Observa-se que as duas resultaram em valores de rigidez relativa solo-estaca (k) maiores que 5, confirmando a hipótese de comportamento compressível.

Apesar de a curva carga recalque ter apresentado um encaixe perfeito com a exponencial, a parcela de atrito estimada não foi tão boa quanto à da relação

parabólica. Vale destacar que a instrumentação registou 3.200 kN para o atrito total (valor este que pode ser considerado como falso, pois os instrumentos não foram zerados antes da cravação). Sendo assim, apenas o resultado da relação parabólica será considerado para calcular a valor de µ e para ser comparado ao gráfico do ensaio.

Outra observação interessante é a estimativa da rigidez da estaca como elemento estrutural (Kr), obtida pela relação exponencial. Esta apresentou uma diferença de 17% em relação ao valor teórico. Por se tratar de uma estaca metálica, o módulo de elasticidade é facilmente verificado através do catálogo do fabricante. Esta estimativa proposta pela relação exponencial, tem maior relevância quando se trata de estacas de concreto, principalmente as moldadas in situ, cujo módulo de elasticidade apresenta uma incerteza maior.

Tabela 12 – Comparação entre as relações parabólica e exponencial (carregamento)

Relação	k	Pr (kN)	Kr ⁽¹⁾ (kN/mm)	µy1 (mm)	µAlr (kN)
parabólica	9,80	-	46,02*	6,78	3059
exponencial	6,20	3906	53,88	8,06	2694

(1) Kr da relação parabólica é o teórico, enquanto da relação exponencial é o calculado pelo modelo

A Figura 30 mostra a relação parabólica no descarregamento para o trecho (7-8), onde o R² evidencia que se obteve um ótimo ajuste para este trecho.



Figura 30 - Descarregamento (relação parabólica)

Os resultados do descarregamento são apresentados na Tabela 13. k_{reb} foi maior que o k do carregamento, como esperado pela teoria de Massad. O coeficiente μ está dentro do intervalo esperado para estacas cravadas, entre 1 e 2, confirmando a presença de carga residual (P_h) igual a 538 kN.

Tabela 13 – Resultados obtidos pelo descarregamento parabólico

Rela	ição parab			
k reb	A _{lr} (kN)	y₁ _R (mm)	μ	
45,45	2337	1,12	1,23	538

Por fim, foi feita a reprodução da curva carga recalque pelas equações das parábolas de carregamento e descarregamento obtidas pelo método de Massad e regressão linear direta para os pontos dos trechos retilíneos. As equações do modelo estimado são apresentadas na Tabela 14.

	Trecho	Equação	R²
	Retilíneo (0-3)	y = 0,0071x - 0,3116	0,9889
Carregamento	Parabólico (3-4)	y = 3,5518(x/1000) ² + 3,3914	0,9985
	Retilíneo (4-5)	y = 0,0385x - 80,228	0,9918
	Retilíneo (6-7)	y = 54,3	1,0000
Descarregamento	Parabólico (7-8)	y = 55,4173 - 2,3245((3438-x)/1000) ²	0,9991
	Retilíneo (8-9)	y = 0,0161x + 23,424	0,9928

Tabela 14 – Equação estimada para reproduzir a curva carga recalque

A Figura 31 mostra, em preto, a curva do ensaio, sobreposta pela curva estimada pelo modelo de Massad, em laranja. Lembrando que os números de 0 a 9 representam as mudanças dos trechos definidos por Massad.



Figura 31 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad

A partir da Figura 31, pode-se concluir que o modelo de Massad (1992) reproduziu quase que perfeitamente o caso estudado por Amendola et al. (2018). Sendo assim, é um excelente exemplo de aplicação da relação parabólica, no qual todos os trechos foram bem reproduzidos, com R² muito próximo de 1, como mostrado na Tabela 14.

4.1.2 Estacas metálicas (cravadas)

A Tabela 15 apresenta os resultados do carregamento para a relação exponencial e parabólica, enquanto a Tabela 16 mostra a média obtida no carregamento para os dois métodos, o descarregamento e a comparação entre a média e a instrumentação.

			Carregamento								
	Kr		Rela	ção expo	Rela	Relação parabólica					
Estaca	teórico (kN/mm)	Pr (kN)	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)	K _r (kN/mm)	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)		
Amendola et al., 2018	46,02	3902	6,16	2690	8,10	53,93	9,80	3059	6,78		
ST-2	149,13	18866	3,39	13011	20,00	191,91	6,91	14875	14,44		
ST-1/1°	149,32	15047	6,45	10377	10,00	160,85	8,28	11121	9,00		
ST-1/2°	149,32	15368	8,05	10599	8,31	158,45	21,87	11040	3,38		
ST-1/3°	149,32	17267	4,33	11908	17,43	157,78	5,30	12110	15,29		
TP	1441,15	33711	1,09	23249	13,45	1585,58	1,29	22240	11,97		
D-2	79,21	1719	4,30	1186	3,13	88,20	5,07	1354	3,37		

Tabela 15 – Resultados estacas metálicas, comportamento compressível

Cabe destacar, em alguns casos, diferenças significativas entre a interpretação exponencial e a parabólica, principalmente em relação aos valores de k, rigidez relativa solo x estaca, embora a diferença entre o valor de atrito mobilizado no carregamento seja semelhante, nas duas interpretações. Primeiramente, deve-se observar a condição em que a estaca se apresenta no solo, observando a sua estratigrafia e resistência dos materiais que o compõem, pois estes podem influenciar bastante o cálculo. Uma vez verificado que as premissas de cálculo foram atendidas, sugere-se que seja observada qual das duas funções, exponencial ou parabólica, melhor se aproxima da curva do ensaio, plotando-se as duas alternativas, conforme apresentado anteriormente para o caso publicado por Amêndola et al. (2023).

Verificou-se que o K_r obtido do método exponencial para estes casos não foi muito discrepante, mas foi sempre superior àquele obtido teoricamente. Observa-se que no capítulo de revisão bibliográfica, item 1.2.1, Massad (1992) destaca que no emprego do método exponencial, se o valor de K_r da equação (24) gerar um

resultado incoerente com o valor teórico, calculado pela equação (2), há duas possibilidades para explicar a divergência: ou o valor de k é baixo, estaca rígida ou curta, ou então existe uma camada de embutimento mais resistente.

		Carreg	amento)		Descar	regame	nto	
	Ŀ	μA _{lr}	μy ₁		Relaç	ão para	bólica	μA _{lr}	
Estaca	к médio	médio (kN)	médio (mm)	μ	k reb	A _{lr} (kN)	y _{1R} (mm)	teórico (kN)	Erro
Amendola et al., 2018	7,98	2874	7,44	1,23	45,45	2337	1,12	3200	10%
ST-2	5,15	13943	17,22	1,60	942,95	8690	0,06	14570	4%
ST-1/1°	7,36	10749	9,50	1,76	151,51	6090	0,27	-	-
ST-1/2°	14,96	10820	5,845	1,59	15,57	6814	2,93	-	-
ST-1/3°	4,82	12009	16,36	1,73	4,73	6950	9,84	11460	5%
ТР	1,19	22745	12,71	1,94	5,23	1172 1	1,56	25938	12%
D-2	4,69	1270	3,25	-	-	-	-	-	-

Tabela 16 – Resultados estacas metálicas, comportamento compressível

Este tipo de estaca apresentou uma excelente estimativa da parcela de atrito pelo modelo de Massad, observando uma diferença em relação à instrumentação na faixa entre 4% e 14%. Cabe destacar que o valor da instrumentação foi considerado como correspondente ao atrito falso, que é o valor μ Alr, uma vez que na grande maioria dos casos a instrumentação é zerada após a cravação. Além disso, μ variou entre 1 e 2 em todos os casos, confirmando o esperado pelo modelo, para estacas compressíveis, indicando a presença de cargas residuais diferentes de zero, que resultaram de carregamento prévio, originado da cravação. Vale ressaltar que o Kr calculado pela relação exponencial, mostrado na Tabela 15, apresentou uma boa estimativa, com um erro menor que 10% na maioria dos casos quando comparado ao Kr teórico, com exceção das estacas **ST-2** e o caso de **Amendola et al., 2018** que apresentaram 17% e 29% de diferença, respectivamente.

No caso de **ST-1**, observa-se que houve um aumento dos valores da parcela de atrito a cada novo ciclo de carregamento, sendo 10.749,15kN no primeiro ciclo, seguido por 10.819,61kN no segundo e 12.009,18kN no terceiro. Isto caracteriza a presença da carga residual (P_h) e certa superposição em função dos vários ciclos de carregamento, o que mostra que parte da carga anteriormente aplicada fica, de fato, aprisionada após o descarregamento completo.

A estaca **D-2** não foi instrumentada e não se tem dados de descarregamento. Apesar de não ter instrumentação, é possível verificar que o valor de K_r calculado pela relação exponencial foi bem próximo ao valor teórico, Tabela 15. Tendo em vista que k apresentou um valor intermediário, entre 2 e 8, esta estaca também foi calculada pelo método das duas retas, para verificar o seu comportamento, como será mostrado posteriormente. Vale ressaltar que o resultado do método das duas retas apresentou uma diferença de 2% apenas em relação ao valor médio entre as relações parabólica e exponencial neste caso específico.

No caso da estaca designada como **TP**, apesar de o valor de k menor que 2 indicar um comportamento rígido, a aplicação das relações parabólica e exponencial, neste caso, podem ser justificadas pela estratigrafia do solo não homogêneo, apresentando um aumento de resistência à medida que se aproxima da ponta da estaca. Como mostra a Figura 32, o solo é composto por uma camada superficial de 4m de areia fofa de origem aluvionar, sobre uma camada predominantemente arenosa de alta compacidade, com camadas de argila arenosa até a profundidade de 30,6m onde está a ponta da estaca.



Figura 32 - Ensaio piezocone realizado próximo à estaca TP

4.1.3 Estacas pré-moldadas de concreto (cravadas)

A Tabela 17 apresenta os resultados do carregamento para a relação exponencial e parabólica, enquanto a Tabela 18 mostra a média obtida no carregamento para os dois métodos, o descarregamento e a comparação entre a média e a instrumentação.

					Carre	gamento			
	Kr		Rela	ação expo	Relaç	Relação parabólica			
Estaca	teórico (kN/mm)	Pr (kN)	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)	Kr (kN/mm)	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)
RJ PI-4	226,42	4684	5,78	3230	2,69	207,56	12,36	2406	0,86
RJ PI-3	330,34	11601	7,71	8000 ⁽¹⁾	7,09	146,41	2,65	3051	3,48
P2-C	102,41	1617	1,33	1115	6,23	134,51	3,17	1012	3,12

Tabela 17 – Resultados estacas pré-moldadas de concreto (compressíveis)

(1) Valor desconsiderado, pois o resultado foi maior que a carga máxima da prova de carga

O Valor de k da estaca **P2-C** indicou comportamentos distintos, sendo menor que 2 na relação exponencial, comportamento rígido, e intermediário na parabólica. Portanto, foi adotado apenas o resultado da relação parabólica para o comportamento compressível e será verificada a hipótese de comportamento rígido (o cálculo pelo método das duas retas será apresentado em capítulos posteriores).

Uma vez que a prova de carga **RJ PI-3** parou muito antes da ruptura, o valor da parcela de atrito calculada pela relação exponencial não gerou um resultado satisfatório, sendo um valor maior do que a carga máxima do ensaio. Na publicação onde foram obtidos os dados da estaca RJ PI-3 há informação de que foi mobilizado todo o atrito lateral durante o ensaio. Dessa forma, a relação exponencial será desconsiderada, mas será considerada a relação parabólica para interpretação.

Cabe destacar que na pesquisa bibliográfica, capítulo 1, Massad (1992) já destacava este aspecto, qual seja, para provas de carga que não se aproximam da ruptura, o modelo matemático resulta em valores de atrito fora da realidade, pois em alguns destes casos pode ocorrer do modelo estimar parcelas de atrito mais altas do que a carga máxima de ensaio. Foi exatamente o ocorrido neste caso. Veja que houve uma diferença muito grande nos valores de k estimados com a relação exponencial e parabólica neste caso.

		Desc	arregame	Instrumentação					
	Ŀ	μAır	µy₁	μ	Relaç	ão parabć	olica	μA _{lr}	
Estaca	к médio	médio (kN)	médio (mm)		k reb	Alr (kN)	y _{1R} (mm)	teórico (kN)	Erro
RJ PI-4	9,07	2818	1,775	1,61	64,47	1747	0,12	2732	3%
RJ PI-3	2,65	3051	3,48	1,95	4,15	1566	1,14	3680	17%
P2-C	3,17	1012	3,12	1,49	379,64	680	0,02	1251	19%

Tabela 18 – Resultados estacas pré-moldadas de concreto (compressíveis)

O erro entre a parcela de atrito falso, μA_{lr} , estimada pelo modelo de Massad e medida pela instrumentação foi um pouco maior para as estacas pré-moldadas de concreto em relação às estacas metálicas, ficando entre 3% e 19% e os valores de μ ficaram dentro do intervalo previsto.

A estaca **RJ PI-4** apresenta um trecho bem curvo no gráfico carga x recalque, indicando que teria um comportamento compressível, sendo confirmado com o valor de k maior que 8. Por fim, obteve-se a parcela de atrito com 3% de diferença em relação à instrumentação.

A estimativa de K_r, Tabela 17, também não foi tão acurada quanto no caso das estacas metálicas. Isto ocorre, muito provavelmente, por haver mais incerteza na determinação do módulo de elasticidade do concreto do que do aço. Durante a cravação de estacas pré-moldadas de concreto, golpes sucessivos podem afetar muito o concreto e gerar fissuras, além de ocorrer possíveis excentricidades na cravação, gerando flexão nas estacas. Embora as estacas de aço também sofram estes mesmos esforços, o material é muito mais resistente e menos vulnerável a mau comportamento.

4.1.4 Estacas tubadas (cravadas)

As estacas tubadas são estacas de aço de ponta fechada preenchidas por concreto, por ocasião da cravação, de forma a aumentar sua impedância e permitir seções de aço mais esbeltas. Embora Danziger (2023) dispusesse de um banco de dados com 13 estacas tubadas de uma mesma obra em Santos, apenas duas destas estacas puderam ser incluídas neste banco de dados. Recentemente este banco de dados completo foi encontrado, mas não a tempo de ser analisado nesta

pesquisa e apenas os dados das duas estacas com as curvas publicadas em Danziger (1980) puderam ser analisadas.

		Carregamento								
Estaca	Kr		Re	lação expo	Rela	Relação parabólica				
	(kN/mm)	Pr (kN)	k	µA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)	K _r (kN/mm)	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)	
61	90,99	3118	5,16	2150 ⁽¹⁾	7,61	54,72	2,80	1210	4,75	
164	90,99	3762	4,78	2594 ⁽¹⁾	7,61	71,35	5,44	1801	3,64	
Valor	laconcid	orodo i	noie o	rocultada	foi moi	ior quo o d	ordo	mávima	da prov	

Tabela 19 – Resultados das estacas tubadas, comportamento compressível

(1) Valor desconsiderado, pois o resultado foi maior que a carga máxima da prova de carga

Uma vez que as provas de carga destes dois casos não chegaram próximo à ruptura, a relação exponencial não apresentou bons resultados. Em ambas as estacas, a estimativa de parcela de atrito pela relação exponencial foi maior do que a carga máxima de ensaio. Entretanto, a relação parabólica será considerada.

		Carregan	Descarregamento					
= /			uv1		Relação parabólica			
Estaca	K	μA _{lr} (kN)	(mm)	μ	k reb	Aır (kN)	y _{1R} (mm)	
61	2,80	1210	4,75	1,30	8,38	934	1,22	
164	5,44	1801	3,64	2,05	13,93	877	0,69	

Tabela 20 – Resultados estacas tubadas, comportamento compressível

Como estas provas de carga não foram instrumentadas, não foi possível verificar a acurácia da estimativa de Massad. No entanto, os valores de µ estão dentro do intervalo esperado.

4.1.5 Estacas hélice contínua (escavadas)

Massad (1992) afirma que não é necessário calcular a parcela de atrito (A_{lr}) pelo descarregamento para estacas escavadas, que nunca receberam carregamento prévio, pois não há carga residual aprisionada num primeiro carregamento. Portanto, μ =1 para o primeiro carregamento destas estacas. Por outro lado, nesta pesquisa o

parâmetro μ será também calculado através do Alr pelo descarregamento, para comparar o valor encontrado com a premissa de μ=1.

		Carregamento								
	Kr	Relação exponencial Relação para								
Estaca	teórico (kN/mm)	Pr (kN)	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)	Kr (kN/mm)	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)	
CFA1	384,85	955	18,98	659	0,23	151,94	16,11	248	0,04	
PCR3	259,44	1582	7,16	1091	0,97	156,69	2,86	653	0,88	
EH3	294,2	3115	7,89	2148 ⁽¹⁾	1,77	153,55	14,41	593	0,14	
EH4	141,34	1928	4,43	1330	2,77	108,26	2,70	1024	2,68	
EH6	160,82	2766	3,67	1908	3,91	133,05	2,60	1605	3,84	

Tabela 21 – Resultados estacas hélice contínua, comportamento compressível

(1) Valor desconsiderado, pois o resultado foi maior que a carga máxima da prova de carga.

Novamente, pode-se observar que o K_r teórico foi bem diferente da estimativa de K_r pela relação exponencial para o caso de estacas de concreto. Entretanto, este não é um bom validador do modelo uma vez que há muitas incertezas na determinação do módulo de elasticidade do concreto, principalmente quando se trata de estacas moldadas in situ. Além disso, os resultados da relação exponencial e da parabólica foram muito diferentes para as três estacas iniciais, aspecto este que precisa ser melhor investigado pela plotagem da curva do ensaio como a de cada um dos modelos, de forma a se verificar qual dos modelos apresenta melhor ajuste com a curva ensaio.

		Carrega	mento		Desc	arregame	nto	Instrumentação		
	Ŀ	μA _{lr}	µy₁		Relaç	ão parabć	olica	μA _{lr}		
Estaca	к médio	médio (kN)	médio (mm)	μ	k _{reb}	Alr (kN)	y _{1R} (mm)	teórico (kN)	Erro	
CFA1	17,54	453	0,14	1,15	23,26	394	0,04	694*	35%*	
PCR3	5,01	872	0,93	1,55	9,73	562	0,22	-	-	
EH3	14,41	593	0,14	0,98	2,19	605	0,94	1252,1*	53%*	
EH4	3,57	1177	2,73	1,29	21,83	912	0,30	1171,5	0%	
EH6	3,13	1756	3,88	1,03	99,85	1704	0,11	1843,2	5%	

Tabela 22 - Resultados das estacas hélice contínua, comportamento compressível

 * Parcela de atrito estimada por outros métodos de cálculo, por falta de instrumentação Na Tabela 22, a coluna "µAlr" corresponde ao valor do atrito no carregamento para a hipótese de estaca escavada com µ=1. A coluna "A_{lr}" corresponde à interpretação usual de Massad para uma estaca cravada calculado através da curva do descarregamento. Vale ressaltar, novamente, que estacas escavadas que não sofreram carregamento prévio não possuem cargas residuais aprisionadas na ponta, ou seja, µ=1. Por outro lado, este parâmetro foi calculado apenas para verificar a reprodução deste resultado por meio do método. Como visto, foram encontrados valores ligeiramente superiores a 1, o que pode ser justificado pelas incertezas na obtenção de dados, pouco rigor na execução do descarregamento de provas de carga ou pelo efeito da viscosidade nos solos provocado pela velocidade do ensaio.

Apesar de a estaca **CFA1** não ter sido instrumentada, a parcela de atrito foi estimada por análise CAPWAP, resultando em uma diferença de 35% em comparação com a média do método proposto por Massad. No entanto, observa-se que as relações exponencial e parabólica chegaram a valores bem diferentes, sendo a exponencial mais próxima à estimativa do CAPWAP. Cabe destacar que o CAPWAP é realizado em uma estaca submetida a um carregamento dinâmico executado com energia transferida por um martelo, semelhante a uma instalação por cravação. Por esse motivo, durante o ensaio podem ser incorporadas à estaca cargas residuais que vão afetar a sua interpretação. Espera-se, portanto, uma maior incerteza nos casos cujo atrito medido tenha sido obtido através do CAPWAP.

Para a estaca **PCR3** não foi possível avaliar a acurácia da parcela de atrito estimada, pois não houve instrumentação durante a prova de carga.

Devido a um problema durante a instrumentação, não foi possível recuperar os dados da estaca **EH3**. Tendo em vista o ocorrido, o valor apresentado para a parcela de atito foi obtido por outros métodos de previsão de capacidade de carga. Logo, o erro calculado neste caso não é um bom indicativo da acurácia do modelo. Uma vez que esta prova de carga ficou muito longe da ruptura, o valor da parcela de atrito pela relação exponencial não gerou um resultado satisfatório, sendo maior do que a carga máxima aplicada durante a prova de carga. Dessa forma, foi considerado apenas o valor calculado pela relação parabólica, resultando em μ =0,98.

A estimativa da parcela de atrito da estaca **EH4** teve como resultado um valor exatamente igual à instrumentação. Enquanto foi observada uma diferença de 24% entre o K_r teórico e o estimado.

Como o valor de k para o caso **EH6** foi um valor intermediário, ela também foi calculada pelo método das duas retas, como será apresentado no próximo capítulo.

De modo geral, estes casos de estaca escavada apresentaram uma estimativa para a parcela de atrito razoável, variando de 0% a 35% em relação à instrumentação. Além disso, os resultados de µ ficaram ligeiramente superiores a 1. Dessa forma, foram próximos ao esperado para a inexistência de cargas residuais, considerando as incertezas da obtenção das curvas de ensaio.

4.1.6 Estacas escavadas de grande diâmetro

As estacas escavadas de grande diâmetro foram analisadas neste item e os resultados são apresentados a seguir. Sabe-se que não há cargas residuais nas estacas escavadas que nunca foram carregadas, logo μ é igual a 1. Por outro lado, nesta pesquisa, o parâmetro μ será calculado da mesma forma que em estacas cravadas para verificar se esta premissa será observada.

		Carregamento									
Estaca	Kr toórico		Rela	ição expoi	nencial		Relação parabólica				
EStaca	(kN/mm)	Pr (kN)	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)	Kr (kN/mm)	k	μA _{lr} (kN)	µy₁ (mm)		
E104	992,70	12673	6,70	8740	1,20	1089,02	10,01	9242	0,93		
E413	1042,34	13812	5,78	9525 ⁽¹⁾	1,49	1103,49	9,22	9034	0,94		
FRUTUOSO et al., 2016	324,99	15933	11,19	10988 ⁽¹⁾	4,41	222,51	26,75	6519	0,75		
FALCONI et al., 2015	348,42	12043	8,54	8306	2,20	442,70	23,92	10000	1,20		

Tabela 23 – Resultados estacas escavadas de grande diâmetro, comportamento compressível

(1) Valor desconsiderado, pois o resultado foi maior que a carga máxima da prova de carga

Pode-se observar que em ambos os casos o valor de K_r estimado pela relação exponencial apresentou um valor bem coerente para **E104** e **E413**, representando uma diferença menor que 10%.

	1	Carrega	mento		Desca	rregan	nento	Instrumentação		
	k	μA _{lr}	µy₁		Relaçã	io paral	bólica	uA toórioo		
Estaca	к médio	médio (kN)	médio (mm)	μ	k reb	A _{lr} (kN)	y _{1R} (mm)	μΑ _{lr} teonco (kN)	Erro	
E104	8,36	8991	1,06	1,59	17,74	5647	0,32	6940	30%	
E413	9,22	9034	0,94	1,63	10,51	5514	0,50	6340	42%	
FRUTUOSO et al., 2016	26,70	6519	0,75	0,89	50,52	7312	0,45	7793	16%	
FALCONI et al., 2015	16,23	9153	1,70	1,13	407,12	8071	0,06	10000	8%	

Tabela 24 - Resultados estacas escavadas de grande diâmetro, comportamento compressível

As estacas diafragma E104 e E413 são estacas escavadas embutidas em solo residual. A instrumentação foi realizada com emprego de *tell tale*, cuja acurácia não costuma ser satisfatória. Portanto, as diferenças entre os resultados do modelo matemático de Massad da instrumentação não foi, de todo, ruim.

As demais estacas escavadas, de comprimento maior, por terem sido instrumentadas mais recentemente, devem ter sido contempladas com instrumentos mais confiáveis, com erro reduzido entre o atrito lateral instrumentado e o obtido pelo modelo. Cabe observar também que o atrito lateral foi muito superior ao das estacas **E104** e **E413**, mais curtas.

Na estaca de **FRUTUOSO et al., 2016**, destaca-se que a instrumentação foi realizada até a profundidade máxima de 31,5m, faltando 26,5m restantes da estaca (possui 58,0m de comprimento total). Sendo assim, o atrito lateral do último trecho foi estimado considerando que esta camada de solo tem um comportamento igual ao do último trecho instrumentado. Esta estaca apresentou ótima estimativa para a parcela de atrito (μ Alr) em comparação a instrumentada (16% de erro), bem como valor de μ próximo a 1. Isso indica que a premissa do modelo de considerar o atrito igual ao do último trecho instrumentado parece ter sido acertada.

Para a estaca de **FALCONI et al., 2015,** a instrumentação não foi realizada nos 6 metros finais da estaca. Sendo assim, o atrito lateral do último trecho também

foi estimado considerando que esta camada de solo tem um comportamento igual ao anterior. Esta estaca apresentou ótima estimativa para a parcela de atrito (μAlr) em comparação a instrumentada (8% de erro), bem como valor de μ próximo ao teórico de inexistência de cargas residuais. Vale ressaltar que a parcela de atrito estimada pela relação parabólica foi exatamente igual à instrumentação.

4.1.7 Avaliação do perfil de transferência de carga dos casos de estacas compressíveis estudados

A Tabela 25 apresenta um comparativo entre as parcelas de atrito e ponta instrumentadas e as obtidas pelo modelo de Massad. Além disso, ela mostra a carga residual estimada pelo modelo. No caso da instrumentação, foi considerado que os instrumentos tenham sido zerados após a cravação, como é de ocorrência mais comum, e não anteriormente à instalação da estaca. Dessa forma, a curva instrumentada medida revela o atrito falso, e não o real, exceto nas estacas escavadas. O atrito falso seria aquele com influência da carga residual, correspondente ao verdadeiro multiplicado pelo valor de μ definido por Massad (1992), isto é, $\mu A_{\rm lr}$. Sendo assim, a acurácia do modelo será verificada pela comparação entre $\mu A_{\rm lr}$ de Massad e a instrumentação.

Тіро	Estaca	Carga máxima do ensaio (kN)	Atrito lateral instrumen- tado (kN)	Parcela ponta instrumen- tada (kN)	Atrito lateral Massad µAlr (kN)	Ponta Massad (kN)	μ	Residual Massad (kN)
	Amendola et al., 2018	3483	3201	282	2874	609	1,23	537
Motálica	ST-2	18073	14570	3503	13943	4130	1,60	5229
IVIELAIICA	ST-1/3°	15630	11460	4170	12009	3621	1,73	5067
	TP	34680	25938	8742	22745	11935	1,94	11021
	D-2	1560	-	-	1270	290	-	-
Pré-	RJ PI-4	4532	2732	1800	2818	1714	1,61	1068
moldada	RJ PI-3	6008	3680	2328	3051	2957	1,95	1486
de concreto	P2-C	1603	1251	352	1012	591	1,49	333
Tubada	61	1930	-	-	1210	720	1,30	279
TUDdud	164	1948	-	-	1801	147	2,05	923

Tabela 25 – perfil de transferência de carga das estacas analisadas

Тіро	Estaca	Carga máxima do ensaio (kN)	Atrito lateral instrumen- tado (kN)	Parcela ponta instrumen- tada (kN)	Atrito lateral Massad µAlr (kN)	Ponta Massad (kN)	μ	Residual Massad (kN)
	CFA 1	990	694	296	453	537	1,15 ⁽²⁾	59 ⁽¹⁾
1141:00	PCR3	1245	-	-	872	373	1,55 ⁽²⁾	309 ⁽¹⁾
Helice	EH3	1900	1252	648	593	1307	0,98 ⁽²⁾	-12 ⁽¹⁾
continua	EH4	1500	1172	329	1177	323	1,29 ⁽²⁾	265 ⁽¹⁾
	EH6	2400	1843	557	1756	644	1,03(2)	51 ⁽¹⁾
	E104	9080	6940	2140	8991	89	1,59 ⁽²⁾	3336 ⁽¹⁾
Escavada	E413	9080	6340	2740	9034	46	1,63 ⁽²⁾	3812 ⁽¹⁾
de grande	FRUTUOSO et al., 2016	8120	7793	327	6519	1601	0,89 ⁽²⁾	-806(1)
diâmetro	FALCONI et al., 2015	10140	10000	140	9153	987	1,13 ⁽²⁾	1053 ⁽¹⁾

(1) Pela teoria, sabe-se que a carga residual é nula nestes casos de estacas escavadas que nunca foram carregadas anteriormente.

(2) Os valores de μ diferentes de 1 podem ser explicados pelas incertezas na obtenção de dados, pouco rigor na execução do descarregamento de provas de carga ou pelo efeito da viscosidade nos solos provocado pela velocidade da prova de carga.

A parcela de atrito lateral e o parâmetro que a relaciona com a carga residual (μ) apresentados na Tabela 25 foram calculados a partir da média entre as relações parabólica e exponencial nos casos em que foi possível aplicar as duas relações, ou só o resultado da relação parabólica, quando não foi possível utilizar a exponencial.

Observa-se que todas as estacas compressíveis são estacas predominantemente de atrito, resultando em altos valores de carga residual nas estacas cravadas. Ressalta-se que as cargas residuais surgem em decorrência do atrito lateral, que restringe o descarregamento da ponta. Logo, este resultado era esperado e confirma a teoria, de modo que µ variou de 1 a 2 nas estacas cravadas.

Por outro lado, nas estacas escavadas era esperado que não se encontrasse cargas residuais no carregamento, μ =1. Ressalta-se que valores de μ superiores a 1 para o primeiro carregamento de estacas escavadas nestes casos não significam a presença de carga residual. Eles podem ser explicados pelas incertezas na obtenção de dados, pouco rigor na execução do descarregamento de provas de carga ou pelo efeito da viscosidade nos solos provocado pela velocidade da prova de carga.

As estacas de grande diâmetro apresentaram comportamento satisfatório, na faixa de incerteza esperada, exceto as estacas E104 e E413, instrumentadas com *tell tale*, instrumento de menor acurácia, que pode justificar este comportamento fora do esperado.

Observa-se na última coluna que a carga residual aprisionada na ponta pode ser bastante significativa. Cientes da sua relevância na forma da curva carga recalque e, portanto, no recalque para carga de serviço. A presença de cargas residuais pode ter uma importância relevante no projeto de fundações profundas, permitindo o emprego de maiores cargas de trabalho, resultando em redução de custo nas fundações.

A Tabela 26 mostra uma comparação entre os resultados das relações parabólica e exponencial. Em 6 casos não foi possível utilizar a relação exponencial, como visto anteriormente. Nos outros 11 casos instrumentados apresentados na tabela, a relação exponencial apresentou uma estimativa melhor em 6 deles, enquanto a relação parabólica em 5. Destaca-se que o erro médio foi aproximadamente 12% na relação exponencial e 16% na parabólica.

				Para	oólico		Exponencial			
Тіро	Estaca	k _{reb} / k _{médio}	k _{reb} / k _{parab}	μ parab	Erro μA _{lr} parab	erro k _r pela expo	μ ехро	Erro µA _{lr} expo	Melhor estimativa de μA _{ir}	
	Amendola et al., 2018	5,70	4,64	1,31	4%	17%	1,15	16%	Parabólico	
Matáliaa	ST-2	183,10	136,51	1,71	2%	29%	1,50	11%	Parabólico	
wetalica	ST-1/3°	0,98	0,89	1,74	6%	6%	1,71	4%	Exponencial	
	TP	4,39	4,05	1,90	14%	10%	1,98	10%	Exponencial	
	D-2	-	-	-	-	-	-	-	-	
Pré-	RJ PI-4	7,11	5,22	1,38	12%	8%	1,85	18%	Parabólico	
moldada	RJ PI-3	1,56	1,56	1,95	17%	-	-	-	Parabólico	
de concreto	P2-C	168,73	119,81	1,49	19%	-	-	-	Parabólico	
Tubada	61	2,99	2,99	1,30	-	-	-	-	Parabólico	
Tubaua	164	2,56	2,56	2,05	-	-	-	-	Parabólico	
	CFA 1	1,33	1,44	0,63	64% ⁽¹⁾	61%	1,67	5%	Exponencial	
	PCR3	1,94	3,40	1,16	-	40%	1,94	-	-	
Helice	EH3	0,15	0,15	0,98	53% ⁽¹⁾	-	-	-	Parabólico	
continua	EH4	6,11	8,08	1,12	13%	23%	1,46	14%	Parabólico	
	EH6	31,90	38,41	0,94	13%	17%	1,12	3%	Exponencial	

Tabela 26 – comparação entre os resultados das relações parabólico e exponencial

				Paral	oólico		Ехро	nencial	
Тіро	Estaca	k _{reb} / k _{médio}	k _{reb} / k _{parab}	μ parab	Erro µA _{ır} parab	erro k _r pela expo	µ ехро	Erro µA _{ır} expo	Melhor estimativa de μA _{lr}
	E104	2,12	1,77	1,64	33%	10%	1,55	26%	Exponencial
Escavada	E413	1,15	1,15	1,68	42%	-	-	-	Parabólico
de grande	FRUTUOSO et al., 2016	1,89	1,89	0,89	16%	-	-	-	Parabólico
diâmetro	FALCONI et al., 2015	25,08	17,02	1,24	0%	27%	1,03	17%	Parabólico

Legenda: parab = parabólico; expo = exponencial

(1) Estacas não instrumentadas, parcela de atrito obtida por outros métodos de cálculo

A Tabela 26 também mostra a relação entre o coeficiente de rigidez relativa solo-estaca (k), no carregamento, e no descarregamento (k_{reb}). Espera-se que esta relação seja maior que 1, face à rigidez maior no descarregamento. Isto foi observado na maioria das estacas, com exceção de 2 casos (ST-1/3° e EH3).

Observou-se que os casos de relação k_{reb}/k excessiva, correspondem a ensaios do banco de dados de Chow et al (2016) em que o recalque, durante a etapa de descarregamento, ainda aumentava antes de começar a reduzir, como indica a Figura 33. Ressalta-se que o modelo de Massad não contempla este comportamento.

Uma possível explicação para o comportamento atípico do banco de dados de Chow et al (2016) seria o fato de muitos desses ensaios poderem ter sido do tipo CRS (*constant ratio penetration*). No Brasil se emprega o ensaio SML (*slow mantained load*). No ensaio CRS, quando ocorre uma mudança brusca na velocidade de penetração da estaca (descendente para ascendente), a resposta do solo em termos de sua resistência não deve ser tão rápida, sendo ainda descendente como ilustra a Figura 33. Tendo em vista o exposto, esse aspecto merece uma melhor investigação futura.



Figura 33 – Curvas carga recalque da estaca ST-1 (CHOW et al, 2016)

4.2 Estacas que apresentaram comportamento rígido

Neste capítulo, serão apresentadas as planilhas resumo do método das duas retas aplicado ao banco de dados, com comparação com a instrumentação e comentários sobre os resultados obtidos. A apresentação gráfica do método pode ser consultada no Apêndice B. Além disso, no Apêndice D, são apresentados gráficos com a curva carga recalque do ensaio sobreposta pela curva estimada pelo modelo para cada estaca analisada.

4.2.1 Estacas metálicas (cravadas)

A Tabela 27 apresenta os coeficientes angulares e lineares das retas dos trechos 2-3 e 4-5 no carregamento e 8-9 no descarregamento. Em seguida, a Tabela 28 mostra os parâmetros obtidos no desenvolvimento dos cálculos. Por último, a Tabela 29 expõe os resultados e a comparação com a instrumentação. Vale

ressaltar que a coluna "erro" é uma comparação entre a parcela de atrito µA_{lr} e a instrumentação, onde foi considerado que os equipamentos não foram zerados após a cravação, registando a parcela de atrito com a influência da carga residual.

		Carreg	jamento		Descarre	gamento		
Estaca	Trecho 2 C2*Yo	-3 (Po = + C1)	Trecho d2*Y	9 4-5 (Po = ′o + d1)	Trecho 8-9 (∆Po = J2*∆Yo + J1)			
	C2	C2 C1 d2		d1	J2	J1		
D-2	153,8462	0,0000	33,2226	984,8837	-	-		
EPM4	123,4568	0,0000	3,5868	995,1220	55,5556	-1294,4444		
EPM5	151,5152	0,0000	1,8182	789,9091	87,7193	-1815,7895		
TP4	226,1420	0,0000	7,0323	3867,7918	170,0680	-10459,1837		
TP	1428,5714	0,0000	13,1579	32103,9474	1428,5714	-270000		

Tabela 27 – Coeficientes das retas consideradas para o método das duas retas

Tabela 28 – Desenvolvimento do método das duas retas

Estaca	RS	u.A _{ir} +AS	Z	λ	B' 3	ω2	AS	u.A _{ir}	$\mathbf{u}.\mathbf{Y}_1$	k
D-2	57,2235	1246	1,9772	0,3654	0,9823	0,2010	0	1246	4,02	3,91
EPM4	3,6092	998	0,4736	0,0132	0,4517	0,8922	0	998	7,71	0,22
EPM5	1,8222	791	0,4382	0,0050	0,4163	0,9092	0	791	4,96	0,19
TP4	7,0602	3875	0,3586	0,0110	0,3536	0,9354	0	3875	16,90	0,13
TP	13,2791	32251	1,1900	0,0077	0,8330	0,5533	0	32251	15,80	1,42

Tabela 29 – Resultados do método das duas retas

	_	Carrega	mento		Des	carregam	ento	Instrumente são	
Fstaca	Mé	etodo duas	retas		Mét	odo duas	retas	- instrumentação	Frro
Lotada	k	μA _{lr} [kN]	µy₁ [mm]	μ_	µ _{reb}	µ _{reb} .A _{lr} [kN]	A _{lr} [kN]	μA _{lr} [kN]	Eno
D-2	3,91	1246	4,02	-	-	-	-	-	-
EPM4	0,22	998	7,71	2,78	2	718	359	1033	3%
EPM5	0,19	791	4,96	3,15	2	502	251	800	1%
TP4	0,13	3875	16,90	5,08	2	1527	763	3350	16%
TP	1,42	32251	15,80	3,20	2	20167	10083	25938	24%

De modo geral, a parcela de atrito apresentou ótima acurácia para as estacas metálicas de comportamento rígido, variando de 1% a 24% de diferença em comparação a instrumentação. Destacam-se as estacas **EPM4 e EPM5** que apresentaram erro de 3% e 1%, respectivamente, da parcela de atrito com influência da carga residual (µA_{lr}) em relação à instrumentação.

Por outro lado, μ apresentou valores acima do intervalo previsto, maiores que 2. Tendo em vista que a parcela de atrito com influência da carga residual (μ A_{lr}) se mostrou bem estimada, o valor de μ superior a 2 pode ser justificado por um resultado ruim da parcela de atrito calculada pelo descarregamento (A_{lr}). Este valor foi ficou abaixo do esperado, Isto fez com que o valor de μ fosse superior ao previsto. Observou-se que os maiores valores de μ e diferenças entre parcela de atrito estimada e instrumentada ocorreram em estacas do banco de dados de Chow et al. (2016). Possivelmente, a provável execução do ensaio do tipo CRS induziu um efeito de viscosidade do solo no descarregamento, responsável por este resultado não esperado na fase de descarregamento. Esta é uma conclusão que precisa ser comprovada em uma pesquisa mais refinada.

Não foi possível calcular o valor de µ para a estaca **D-2**, pois não tem dados do descarregamento. Também não foi realizada instrumentação da estaca, não permitindo comparar o resultado do modelo. Destaca-se que esta estaca foi calculada pela hipótese de comportamento compressível no capítulo anterior e por comportamento rígido neste, pois apresentou uma rigidez relativa (k) com valor intermediário. Ao comparar o atrito lateral estimado pelo método das duas retas com a média do parabólico e exponencial, observa-se uma diferença de apenas 2% entre os dois resultados.

4.2.2 Estacas pré-moldadas de concreto (cravadas)

A Tabela 30 apresenta os coeficientes angulares e lineares das retas dos trechos 2-3 e 4-5 no carregamento e 8-9 no descarregamento. Em seguida, a Tabela 31 mostra os parâmetros obtidos no desenvolvimento dos cálculos. Por último, a Tabela 32 expõe os resultados e a comparação com a instrumentação. Vale destacar que a coluna "erro" é uma comparação entre a parcela de atrito µA_{lr} e a instrumentação, onde foi considerado que os equipamentos não foram zerados após a cravação, registando a parcela de atrito com a influência da carga residual.

			Descar	regamento			
Estaca	Trecho 2- C2*Yo	-3 (Po = + C1)	Trecho d2*Ye	4-5 (Po = o + d1)	Trecho 8-9 (∆Po = J2*∆Yo + J1)		
	C2	C1	d2	d1	J2	J1	
HRV P1	357,1429	0,0000	178,5714	1021,1607	370,3704	-5148,1481	
H-2	185,1852	0,0000	7,0822	2375,0000	119,0476	-14285,7143	
P2-C	138,8889	0,0000	5,4348	1431,7935	97,0874	-2155,3398	

Tabela 30 – Coeficientes das retas consideradas para o método das duas retas

Tabela 31 – Desenvolvimento do método das duas retas

Estaca	RS	u.A _{lr} +AS	Ζ	٨	B' 3	ω ₂	AS	u.A _{lr}	u.Y₁	k
HRV P1	268,9054	1227	0,7311	0,6920	0,9190	0,5460	0	1227	4,32	0,53
H-2	6,0917	2492	0,9485	0,0247	0,7501	0,6615	0	2492	10,64	0,90
P2-C	5,7394	1471	1,4902	0,0376	0,9101	0,4148	0	1471	6,47	2,22

Tabela 32 – Resultados do método das duas retas

	Carregamento				Desc	carregan	nento	Instrumente são	
Ectopo	Método duas retas			Método duas retas			- instrumentação	Erro	
ESIACA	k	µA _{lr} [kN]	µy₁ [mm]	μ	µ _{reb}	µ _{reb} .Aır [kN]	A _{lr} [kN]	μA _{lr} [kN]	EIIO
HRV P1	0,53	1227	4,32	1,25	2	1965	982	2406	49%
H-2	0,9	2492	10,64	2,29	2	2181	1091	1189 ⁽¹⁾	8% (1)
P2-C	2,22	1471	6,47	2,21	2	1331	665	1251	18%

(1) Para a estaca H-2, a instrumentação foi comparada com Alr, instrumentos zerados antes da cravação (registro do atrito verdadeiro)

Para a estaca **H-2**, diferentemente das outras apresentadas, os instrumentos provavelmente foram zerados antes da cravação. Dessa forma, estes teriam medido A_{lr} sem carga residual, atrito verdadeiro. Portanto, o erro deste caso foi avaliado a partir de uma comparação entre A_{lr} e a instrumentação.

Uma vez que a estaca **P2-C** apresentou valor de k intermediário, foram consideradas as duas hipóteses de comportamento. A relação parabólica apresentada anteriormente resultou em um erro de 19%, enquanto o método das duas retas 18%. Vale destacar que as duas hipóteses chegaram a valores bem próximos para a parcela de atrito. A grande diferença foi no A_{Ir} calculado pelo descarregamento, o que gerou valores distantes para a carga residual estimada por cada método. Enquanto o comportamento rígido apresentou μ igual a 2,21; o compressível 1,49. Este é um aspecto que merece discussão, uma vez que as

estacas compressíveis costumam apresentar maiores tensões residuais do que aquelas mais rígidas, segundo resultados de Danziger (2023).

4.2.3 Estacas hélice continua (escavadas)

A Tabela 33 apresenta os coeficientes angulares e lineares das retas dos trechos 2-3 e 4-5 no carregamento e 8-9 no descarregamento. Em seguida, a Tabela 34 mostra os parâmetros obtidos no desenvolvimento dos cálculos. Por último, a Tabela 35 expõe os resultados e a comparação com a instrumentação.

Vale ressaltar que são estacas escavadas que não receberam carregamento prévio, logo μ é igual a 1. Portanto, a parcela de atrito lateral (A_{Ir}) pode ser calculada diretamente pelo carregamento.

Como visto anteriormente, de acordo com Massad (1992), µreb=2 nos casos em que a prova de carga mobiliza todo o atrito lateral disponível, ou seja, supera o ponto 4 da Figura 7. Por outro lado, este parâmetro será calculado na presente pesquisa a fim de verificar a reprodução do modelo. Após calcular o atrito lateral (Aır) pela curva do carregamento, o autor desta pesquisa calcula, através do descarregamento, µreb.Aır. Assim, µreb será determinado através da divisão µreb.Aır/Aır.

		Descarr	egamento				
Estaca	Trecho 2 C2*Yo	-3 (Po = + C1)	Trecho d2*Y	4-5 (Po = o + d1)	Trecho 8-9 (∆Po = J2*∆Yo + J1)		
	C2	C1	d2	d1	J2	J1	
CFA 2	476,1905	0,0000	51,5464	922,4742	277,7778	-1694,4444	
PCE-01	192,3077	0,0000	7,5075	563,4384	133,3333	-3653,3333	
IX.1	133,3333	0,0000	4,0112	561,1312	62,8931	-2199,3711	
EH1	34,8432	0,0000	1,3633	662,7539	121,9512	-4878,0488	
EH2	57,8035	0,0000	3,9809	839,8885	108,6957	-7144,5652	
EH5	149,2537	0,0000	36,6300	933,3333	103,0928	-1752,5773	
EH6	238,0952	0,0000	80,0000	1158,8800	217,3913	-2082,6087	

Tabela 33 – Coeficientes das retas consideradas para o método das duas retas

Estaca	RS	U.A.+AS	7	λ	B' ₂	(1)2	AS	U.A.,	u.Y₄	k
Eotuou			_	~	23	002	/ 10	un di	ann	
CFA 2	61,0929	1001	1,5497	0,1195	0,9315	0,3663	0	1001	1,26	2,40
PCE-01	7,8655	577	1,3288	0,0359	0,8775	0,4799	0	577	1,98	1,77
IX.1	4,0631	565	0,6935	0,0186	0,6120	0,7910	0	565	3,74	0,48
EH1	1,3675	664	0,2791	0,0111	0,2823	0,9594	0	664	19,27	0,08
EH2	4,0441	847	0,4805	0,0331	0,4727	0,8817	0	847	14,41	0,23
EH5	46,6754	1046	1,0192	0,2691	0,8604	0,5291	0	1046	5,92	1,04
EH6	159,1883	1543	1,5109	0,6552	0,9799	0,2640	0	1543	4,20	2,28

Tabela 34 – Desenvolvimento do método das duas retas

Tabela 35 - Resultados do método das duas retas

	(Carrega	mento		Descarre	gamento	Instrumentação	_
Estaca	k	μA _{lr} [kN]	µy₁ [mm]	μ	µ _{reb}	µ _{reb} .A _{lr} [kN]	μA _{lr} [kN]	Erro
CFA 2	2,4	1001	1,26	1,00	0,80	800	1239*	19% ⁽¹⁾
PCE-01	1,77	577	1,98	1,00	1,04	599	640	10%
IX.1	0,48	565	3,74	1,00	0,55	309	535	6%
EH1	0,08	664	19,27	1,00	0,83	554	613	8%
EH2	0,23	847	14,41	1,00	0,99	838	854	1%
EH5	1,04	1046	5,92	1,00	1,57	1639	1100	5%
EH6	2,28	1543	4,20	1,00	2,21	3407	1843	16%

(1) Parcela de atrito estimada através de análise CAPWAP

De modo geral, estes casos apresentaram ótima estimativa para a parcela de atrito, variando de 1% a 19% em relação à instrumentação. Por outro lado, não se observou um padrão para os resultados de μ_{reb} . Entretanto, destaca-se a provável influência da qualidade de execução da etapa de descarregamento da prova de carga. Como foi visto, o descarregamento costuma ser feito com uma velocidade maior do que o carregamento, podendo gerar maior influência da resistência viscosa. Isto modifica o formato da curva de descarregamento e prejudica a acurácia dos parâmetros obtidos por meio desta.

Apesar de **CFA 2**, ter apresentado um valor de k intermediário pelo método das duas retas, na relação parabólica ele ficou abaixo de 2. Portanto, foi considerado apenas o comportamento rígido neste caso.

Por se tratar de um caso intermediário, a estaca **EH6** pôde ser calculada pelas duas hipóteses de comportamento, onde a consideração de comportamento

compressível apresentou um resultado melhor, 5% de erro em comparação a instrumentação, contra 16% pela hipótese de comportamento rígido.

Alledi (2013) já havia calculado a parcela de atrito das estacas EH1, EH2, EH5 e EH6 pelo método desenvolvido por Massad, encontrando, respectivamente, 665, 927, 1030 e 1563, o que representa de 0 a 8% de diferença do calculado nesta presente pesquisa.

4.2.4 Avaliação do perfil de transferência de carga dos casos de estacas rígidas estudados

A Tabela 36 apresenta um comparativo entre as parcelas de atrito e ponta instrumentadas e as obtidas pelo modelo de Massad. Além disso, ela mostra a carga residual estimada pelo modelo.

Ressalta-se que no caso da instrumentação, foi considerado que os instrumentos tenham sido zerados após a cravação, como é de ocorrência mais comum, e não anteriormente à instalação da estaca. Neste caso, a curva instrumentada medida revela o atrito falso, e não o real, exceto nas estacas escavadas. O atrito falso seria aquele com influência da carga residual, correspondente ao verdadeiro multiplicado pelo valor de µ definido por Massad (1992), isto é, µA_{lr}. Sendo assim, a acurácia do modelo será verificada pela comparação entre µA_{lr} de Massad e a instrumentação.

Тіро	Estaca	Carga máxima do ensaio (kN)	Atrito lateral instrumen- tado (kN)	Parcela ponta instrumen- tada (kN)	Atrito lateral Massad µAır (kN)	Parcela de ponta Massad (kN)	μ	Carga residual Massad (kN)
	D-2	1560	-	-	1246	314	-	-
	EPM4	1106	1033	73	998	108	2,78	639
Metálica	EPM5	835	800	35	791	44	3,15	540
	TP4	4260	3350	910	3875	385	5,08	3112
	TP	34680	25938	8742	32251	2429	3,20	22168
Pré-	HRV P1	3095	2406	689	1227	1868	1,25	245
moldada	H-2	3160	1189	1971	2492	668	2,29	1402
concreto	P2-C	1603	1251	352	1471	132	2,21	805
	CFA 2	1380	1239	141	1001	379	1,00	0
	PCE-01	787	640	147	577	210	1,00	0
11/12	IX.1	720	535	185	565	155	1,00	0
Helice contínua - -	EH1	720	613	107	664	56	1,00	0
	EH2	1100	854	246	847	253	1,00	0
	EH5	1800	1100	700	998	802	1,00	0
	EH6	2400	1843	557	1543	857	1,00	0

Tabela 36 – Perfil de transferência de carga das estacas analisadas

Observa-se que todas são estacas são predominantemente de atrito, resultando em altos valores de carga residual nas estacas cravadas. Ressalta-se que as cargas residuais surgem em decorrência do atrito lateral, logo este resultado era esperado pela teoria. Por outro lado, µ atingiu valores superiores a 2 em alguns casos de estacas cravadas, sendo fortemente influenciado pelo comportamento da curva de descarregamento que apresenta um aumento do recalque no trecho inicial nestes casos, como observado no item 4.2.1.

5 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE DECOURT (1991) E MASSAD (1992, 1998) ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO

Neste capítulo serão reinterpretadas quatro estacas estudadas por Decourt (1991), apresentadas na Figura 34, através do modelo matemático de Massad com o objetivo de comparar os métodos. Uma vez que todos os casos indicaram comportamento rígido, os ensaios foram analisados por meio do método das duas retas de Massad et al. (1998), que foi aplicado ao segundo ciclo de carga dos ensaios, pois é o trecho onde Decourt estima a parcela de carga residual, como mostrado na Figura 35. A Tabela 37 mostra as características das estacas estudadas.



Estaca	Tipo	S (cm²)	h (m)	E (GPa)	K _r (kN/mm)	Fonte
Site 1	Escavada de grande diâmetro	6362	11,84	26	1397	(DECOURT, 1989)
TE-3	Pré-moldada de Concreto protendido	961	21,00	35	160	(MARTIN, 1987)
BAR-1	Diafragma de Concreto	6600	7,50	24	2112	(ABEF,1989)
STR-1	Strauss	804	7,50	24	257	(ABEF,1989)

Carga (kN) Carga (kN) Recalque (mm) 0 10 8 0 Recalque (2Alr = 45142Alr = 1368 Carga (kN) Carga (kN) Recalque (mm) 2Alr = 702 2Alr = 3269

Figura 35 - Método das duas retas ao 2° ciclo de ensaio da estaca Site1(a), TE-3(b), BAR-1(c) e STR-1(d)

Os valores de Q₁₀, Q₁₅, Q_{re}/2, são formas alternativas de Decourt para o atrito lateral verdadeiro. Destaca-se que o Q_{re} de Decourt nada mais é do que o atrito com influência da carga residual, μ A_{lr} de Massad. Sendo assim, Q_{re}/2 de Decourt é o mesmo que A_{lr} de Massad, para os casos em que μ = 2. Dessa forma, Decourt considera que metade do valor que compõe Q_{re} é devido à parcela de carga residual (P_h de Massad) e a outra metade é o atrito lateral na ruptura verdadeiro (A_{lr}).

A Figura 35, ilustra o método de Massad et al. (1998) aplicado ao segundo ciclo de carga, transladado para a origem do gráfico para facilitar a sua aplicação. Ressalta-se que a imagem ampliada da aplicação do método de Massad pode ser

Tabela 37 – Características das estacas

encontrada no Apêndice B, Figura 176 a Figura 179. A Tabela 38 e a Tabela 39 apresentam um resumo dos resultados das análises das provas de carga obtidos por ambos os métodos. Observa-se que todas as estacas analisadas apresentaram provas de carga com formatos que indicavam comportamento rígido, duas retas com pouco ou nenhum desenvolvimento do trecho curvo, sendo confirmado pelos valores de k inferiores a 2. No caso de TE-3, apesar de ter um valor de k intermediário, seu gráfico foi mais coerente com o comportamento rígido.

		Carreg	amento		0	Ph		
Estaca	k	μAır (kN)	µy₁ (mm)	μ	µreb	µ _{reb} .A _{lr} (kN)	Aır (kN)	(kN)
Site 1	1,02	4425	3,12	1,96	2	4514	2257	2167
TE-3	2,66	1801	4,22	2,63	2	1368	684	1115
BAR-1	0,68	3011	2,1	1,84	2	3269	1634	1373
STR-1	1,32	634	1,87	1,8	2	702	351	281

Tabela 38 – Resultados obtidos pelo método das duas retas de Massad et al. (1998)

Tabela 39 – Resultados	pelo método de Decourt (1991)
------------------------	--------------------------	-------

Q ₁₀ (kN)	Q ₁₅ (kN)	Q _{re} /2 (kN)	Qinstrumentada (kN)
2600	3440	2330	-
1442	1647	>1113	1406 - 1646
1310	1550	1590	1590
480	540	>290	-
	Q ₁₀ (kN) 2600 1442 1310 480	Q10 (kN)Q15 (kN)260034401442164713101550480540	Q10 (kN)Q15 (kN)Qre/2 (kN)26003440233014421647>1113131015501590480540>290

Ao comparar a carga residual de Massad (P_h) com a de Decourt (Q_{re}), podese concluir que os dois métodos resultaram em valores muito próximos, apresentando diferença de 0, 3, 5 e 15% entre si. Houve apenas um caso em que um dos valores alternativos de Decourt, o Q_{10} , se apresentou mais acurado em relação a estimativa de Massad, na estaca BAR-1. Embora o método de Decourt seja gráfico e, portanto, rápido, ele oferece resultados bastante semelhantes aos do método de Massad, que é mais refinado e elegante do ponto de vista conceitual. No entanto, estes são casos específicos de estacas rígidas e não se pode generalizar.

O valor de µ ficou dentro do intervalo esperado, exceto pela estaca TE-3 que excedeu o limite em 32%. Por outro lado, deve-se destacar que a obtenção dos dados da prova de carga foi realizada através da figura do artigo publicado. Portanto, a falta de acesso ao relatório completo compromete a acurácia dos dados. Além disso, a velocidade de execução do descarregamento pode influenciar o formato da curva, tornando-se aparentemente mais rígida em velocidades mais

elevadas, o que pode gerar valores distorcidos de atrito verdadeiro (Alr) obtidos através do descarregamento, e, consequentemente, µ fora do esperado.

Em relação às duas provas de carga instrumentadas, não há informações detalhadas sobre a sua execução. Portanto, não é possível ter certeza se foi medida a transferência de carga verdadeira (instrumentos zerados antes da instalação da estaca) ou a falsa (instrumentos zerados antes do ensaio). O método de Massad indica que a estaca TE-3 registrou a carga falsa (µAır, atrito lateral com influência da carga residual), enquanto a BAR-1 a verdadeira (Aır, atrito lateral na ruptura).

6 CONCLUSÃO

Foi observado o grande potencial do modelo matemático de Massad na interpretação de provas de carga convencionais em que as medições de carga e recalques são realizadas apenas no topo da estaca, durante o seu carregamento e descarregamento. A aplicação pode ser efetuada tanto em provas de carga estáticas, com diferentes velocidades de carregamento, como em ensaios de carregamento dinâmico. O banco de dados analisado pelo autor incluiu 34 ensaios, sendo 28 instrumentados.

O modelo permite uma interpretação consistente com os mecanismos desenvolvidos na transferência de carga da estaca para o solo. A partir da curva carga recalque no topo da estaca obtida em provas de carga, O modelo desenvolvido por Massad é capaz de separar as parcelas da carga transferida por atrito lateral, ponta e a residual aprisionada na ponta.

Ressalta-se que cargas residuais ocorrem após instalação de estacas cravadas ou prensadas, além de estacas sem deslocamento, do tipo escavadas, após o primeiro carregamento, como por exemplo, após um ensaio estático ou dinâmico. Embora a aplicação do modelo não altere o conhecimento sobre a de ruptura global, as informações acerca do atrito verdadeiro e falso (aquele influenciado pelas cargas residuais), a resistência mobilizada pela ponta verdadeira e falsa (afetada da carga residual), é relevante no comportamento da estaca no estado limite de serviço.

6.1 Em relação à calibração da planilha desenvolvida

O autor desenvolveu em uma planilha as etapas de cálculo detalhadas por Massad em seus trabalhos e as aplicou a vários casos publicados por Massad e colaboradores.

 Para estacas rígidas cravadas, os resultados da planilha do autor pelo método das duas retas foram sempre muito próximos aos publicados por Massad. A diferença maior foi observada em relação ao valor de k, que o autor calculou de forma iterativa com o auxílio de um software, enquanto Massad desenvolveu um ábaco para facilitar e agilizar a aplicação do seu método em situações que não é possível recorrer a um software de cálculo.

Para o método das duas retas, aplicado a estacas rígidas escavadas, ii) as diferenças obtidas entre os valores de atrito lateral, µAır, a planilha do autor e os valores anteriormente publicados por Massad foram muito pequenas. Além disso, nesta pesquisa a parcela de atrito com influência da carga residual no rebound (µ_{reb}.A_{lr}) foi calculada a partir do descarregamento, de modo a verificar a premissa do modelo de Massad de que μ_{reb} =2 nos casos em que a prova de carga mobiliza todo o atrito lateral disponível. Por outro lado, ao calcular este parâmetro para as estacas escavadas, considerando µ=1 no carregamento, esta condição não foi verificada. Entretanto, destaca-se a provável influência da qualidade de execução da etapa de descarregamento da prova de carga, pois o descarregamento costuma ser feito com uma velocidade maior do que o carregamento, podendo gerar maior da resistência viscosa. Isto modifica o formato da curva influência de descarregamento e prejudica a acurácia dos parâmetros obtidos por meio desta.

iii) Na calibração das estacas **compressíveis cravadas**, foram analisados os métodos de ajuste parabólico e exponencial, pois as estacas compressíveis apresentam uma mobilização gradativa do atrito lateral. O autor verificou que seus valores de atrito lateral e μ foram muito próximos aos publicados por Massad em todos os casos analisados. Pequenas diferenças encontradas foram atribuídas ao caráter pouco acurado da obtenção dos valores de carga e recalque extraídos pelo autor das figuras do ensaio, em escala bem reduzida, e não diretamente do relatório de execução dos ensaios. Estes pequenos desvios já eram esperados.

iv) Na calibração de estacas **compressíveis escavadas**, Massad parte do valor de $\mu = 1$ para a determinação do A_{Ir}, pois a estaca nunca foi submetida a qualquer carregamento de instalação. Por outro lado, nesta pesquisa a parcela de atrito (A_{Ir}) também foi calculada a partir do descarregamento, a fim de verificar se razão entre o A_{Ir} calculado pela curva do carregamento e do descarregamento seria igual a 1. Para esta calibração foi utilizada uma estaca hélice contínua, resultando em $\mu = 1,31$. Ressalta-se que isto não significa a presença de carga residual e pode ser justificado pelas incertezas na obtenção de dados, pouco rigor na execução do descarregamento de provas de carga ou pelo efeito da viscosidade nos solos provocado pela velocidade do ensaio.
6.2 Em relação à interpretação do banco de dados de estacas compressíveis estudadas

v) Em relação às estacas compressíveis, destaca-se, em alguns casos, diferenças significativas entre a interpretação exponencial e a parabólica da curva de carregamento. Embora a diferença entre o valor de atrito mobilizado no carregamento seja semelhante nas duas interpretações, a principal diferença se dá em relação aos valores de k (rigidez relativa solo x estaca). Deve-se observar as premissas de cada relação e o perfil solo. Uma vez confirmada a possibilidade de se utilizar ambas, sugere-se verificar qual das duas funções, exponencial ou parabólica, melhor se aproxima da curva do ensaio, através de uma sobreposição entre a curva ensaiada e a estimada pelo modelo, conforme apresentado anteriormente para o caso publicado por Amendola et al. (2018). Neste caso, a curva do modelo se ajustou, de forma notável, aos valores experimentais.

vi) O autor verificou que o Kr obtido do método exponencial não foi muito discrepante, mas sempre superior àquele obtido teoricamente. Possivelmente, esta pode ser uma indicação de um valor significativo de atrito lateral aumenta a rigidez da estaca. Vale destacar que Massad (1992, 1993) observou que o valor de Kr estimado pela relação exponencial pode ser influenciado pelo perfil do solo, sendo sugestionado pela presença de uma camada mais resistente.

vii) De uma forma geral, a relação parabólica pôde ser aplicada a um número maior de estacas, resultando em um "erro" médio de 16%, enquanto a exponencial apresentou uma acurácia melhor em relação à instrumentação, 12%. Destaca-se que as relações exponencial e parabólica só podem ser usadas em estacas compressíveis, quando a prova de carga mobilizar todo o atrito disponível. Além disso, ressalta-se que a relação exponencial só deve ser utilizada em provas de carga que a carga máxima aplicada se aproxima da ruptura, para que não resulte em uma estimativa excessivamente alta.

viii) As estacas metálicas compressíveis apresentaram uma excelente estimativa da parcela de atrito pelo modelo de Massad, observando uma diferença em relação à instrumentação na faixa entre 4% e 14%. Cabe destacar que o valor da instrumentação foi considerado como correspondente ao atrito falso, que é o valor $\mu A_{\rm lr}$, uma vez que na grande maioria dos casos a instrumentação é zerada após a

cravação. Além disso, µ variou entre 1 e 2 em todos os casos, confirmando o esperado pelo modelo para estacas compressíveis, indicando a presença de cargas residuais provocadas pela cravação.

ix) No caso da estaca ST-1, foram estudados 3 ciclos de carregamento consecutivos e observou-se que houve um aumento dos valores da parcela de atrito com influência da carga residual a cada novo ciclo. Isto caracteriza a presença da carga residual (P_h) e certa superposição, em função dos vários ciclos de carregamento.

x) O erro entre a parcela de atrito falso, μ A_{lr}, estimada pelo modelo de Massad e a medida para as estacas pré-moldadas de concreto ficou entre 3% e 17% e os valores de μ ficaram dentro do intervalo previsto. Por outro lado, a estimativa de K_r das estacas pré-moldadas não foi tão acurada quanto no caso das estacas metálicas. Isto ocorre, muito provavelmente, por haver mais incerteza na determinação do módulo de elasticidade do concreto do que do aço.

xi) Para as estacas compressíveis escavadas do tipo hélice contínuas, os resultados de estimativa para a parcela de atrito do modelo foram razoáveis, variando de 0% a 35% em relação à instrumentação. Além disso, ao comparar o atrito lateral calculado pelo carregamento (μ A_Ir), com μ =1, com o A_Ir calculado pelo descarregamento, na maioria dos casos os valores tiveram alguma divergência. Isto pode ser justificado pelas incertezas na obtenção de dados, pouco rigor na execução do descarregamento de provas de carga ou pela velocidade mais elevada na execução do descarregamento, que faria com que a curva tivesse uma aparência mais rígida que a real, provocado pelo efeito da viscosidade nos solos.

xii) Para as estacas compressíveis escavadas de grande diâmetro, os resultados experimentais não foram conclusivos para 2 estacas, possivelmente pela falta de acurácia dos equipamentos de medida, ensaios antigos com *tell tale*. Por outro lado, as estacas de Frutuoso et al. (2016) e Falconi et al. (2015) apresentaram erro de no máximo 16% ao se comparar a parcela de atrito calculada pelo modelo e a instrumentação, resultado dentro da margem encontrada para os outros tipos de estacas compressíveis estudadas. Além disso, o valor de µ calculado foi muito próximo de 1, reproduzindo a condição de inexistência de cargas residuais.

xiii) Observa-se que todas as estacas compressíveis são estacas predominantemente de atrito, resultando em altos valores de carga residual nas

estacas cravadas. Ressalta-se que as cargas residuais surgem em decorrência do atrito lateral, que restringe o descarregamento da ponta. Logo, este resultado era esperado e confirma a teoria, μ variou de 1 a 2 nas estacas cravadas.

xiv) O atrito lateral (A_{lr}) obtido pelo modelo de Massad não incorpora a parcela residual, ou seja, é um valor verdadeiro e inferior ao atrito medido no ensaio, que é o valor falso. A influência da carga residual é determinada pelo parâmetro μ.

xv) A relação entre o coeficiente de rigidez relativa solo-estaca no carregamento, k, e no descarregamento (k_{reb}) foi comparada. Esperava-se uma relação k_{reb}/ k maior que 1, já que a rigidez é maior no descarregamento. Isto foi observado na grande maioria das estacas, exceto em 2 casos. Estes valores inesperados podem ser justificados pelo formato atípico da curva de descarregamento, que apresentou um aumento dos recalques no primeiro trecho de descarregamento. Esta ocorrência, possivelmente, decorre da mudança brusca no sentido da velocidade, de descendente para ascendente, num ensaio CRS.

xvi) Embora as estacas escavadas não apresentem carga residual, no primeiro carregamento, no descarregamento, estas tensões devem surgir, $\mu_{rebound}$ maior que 1. Como o descarregamento tende a ser mais rígido que o carregamento, ao retirar toda a carga do topo, uma parcela de carga deve ficar presa na ponta, não devida a um carregamento prévio, mas ao descarregamento. Este é um aspecto que deve ser melhor investigado em pesquisas futuras. Por exemplo, pode-se futuramente verificar os valores de $\mu_{rebound}$ de estacas escavadas em uma tentativa de comprovar maiores valores de $\mu_{rebound}$ para estacas com comprimentos menores e menores valores de $\mu_{rebound}$ para estacas mais longas

6.3 Em relação à interpretação do banco de dados de estacas rígidas estudadas

xvii) Deve-se ter atenção aos casos de estacas com coeficiente de rigidez relativa solo-estaca (k) intermediários, entre 2 e 8. O autor desta pesquisa sugere que sejam verificadas as duas hipóteses de comportamento nestes casos e que a parcela de atrito seja comparada. Deve-se verificar com qual formato a curva carga recalque mais se assemelha, sendo mais próximo de trechos retilíneos, comportamento rígido, ou mais curvo, comportamento compressível.

Isto aconteceu, por exemplo, com a estaca D-2 (COSTA, 1994). Foi verificado um comportamento intermediário, portanto, as duas hipóteses foram calculadas. Ao comparar o atrito lateral estimado pelo método das duas retas com a média do parabólico e exponencial, observou-se uma diferença de apenas 2% entre os dois resultados.

xviii) De forma geral, nas estacas rígidas, a parcela de atrito falso (μ.A_{lr}) apresentou ótima acurácia, variando de 1% a 24% de diferença em comparação à instrumentação.

xix) Por outro lado, μ apresentou alguns valores acima do intervalo previsto, maiores que 2, para as estacas rígidas cravadas. Tendo em vista que a parcela de atrito com influência da carga residual (μ A_{lr}) se mostrou bem estimada, o valor de μ superior a 2 pode ser justificado por um resultado ruim da parcela de atrito calculada pelo descarregamento (A_{lr}), ficando abaixo do esperado. Isto fez com que o valor de μ fosse superior ao previsto. Cabe destacar que Massad (1992) pontua que para o segundo carregamento em estacas escavadas, como na Figura 3, não se deve descartar a possibilidade de μ maior que 2.

Para as estacas hélice contínua de comportamento rígido, o autor XX) calculou µreb a partir da divisão µreb.Ar/Ar, onde o numerador foi obtido da curva do descarregamento, enquanto o denominador foi obtido através do carregamento. Como visto anteriormente, de acordo com Massad (1992), µreb=2 nos casos em que a prova de carga mobiliza todo o atrito lateral disponível. Por outro lado, esta condição não foi reproduzida nos casos estudados. Destaca-se que esta estimativa foi provavelmente influenciada pela qualidade de execução da etapa de descarregamento da prova de carga. Como visto, o descarregamento costuma ser feito com uma velocidade maior do que o carregamento, podendo gerar maior da resistência viscosa. Isto modifica o formato da curva influência de descarregamento e prejudica a acurácia dos parâmetros obtidos por meio desta.

6.4 Quanto à comparação entre os métodos de Decourt e Massad

 xxi) Decourt (1991) analisou apenas casos de estacas curtas com parcela preponderante de resistência ponta, onde a carga residual máxima ocorre na ponta, ou seja, o atrito é revertido em todo o trecho do fuste. No caso de estacas longas, com atrito lateral preponderante, a carga residual máxima ocorre ao longo do fuste, e não na ponta. Portanto, há que se ter cautela no emprego do método de Decourt.

xxii) O método de Massad pode ser aplicado a uma diversidade de casos, enquanto o método de Decourt, em sua concepção, parece ter sido concebido apenas para estacas curtas, com elevada resistência de ponta, para as quais se considera μ = 2. Destaca-se que o que Decourt chama de Q_{rebound} nada mais é do que o atrito falso, que é o μ x A_{Ir} de Massad, ou seja, Q_{rebound}/2 de Decourt é o mesmo que μ x AIr de Massad dividido por 2. Conclui-se, assim, que o método gráfico de Decourt fornece o mesmo resultado do método gráfico de Massad, porém ele é válido apenas para estacas escavadas curtas, ou rígidas, com μ = 2. O método de Massad é mais geral, pois pode ser aplicado para estacas rígidas e compressíveis, cravadas e escavadas, enquanto o método de Decourt é válido apenas para estacas curtas, além de precisar de dois carregamentos que, em geral, são feitos com velocidade diferente, o que pode causar também efeito de viscosidade em solos de elevada plasticidade.

7 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

i) Aumentar o banco de dados com outros casos de obra, dando preferência aos casos de estacas instrumentadas.

 ii) Reavaliar, de forma crítica, resultados anômalos obtidos neste banco de dados, procurando observar o perfil estratigráfico, ocorrências observadas nas publicações originais dos autores citados, de forma a melhor investigar a razão das anomalias encontradas nos poucos casos com resultado diferentes do esperado.

iii) Investigar casos de ensaios cíclicos, analisando os valores de μ de Massad em descarregamentos sucessivos.

 iv) Investigar a influência da velocidade de carregamento em ensaios com ciclos contemplando diferentes velocidades de carregamento, já que é comum o primeiro carregamento ter menor velocidade.

v) Utilizar o banco de dados com instrumentação na tentativa de validar o método de Fellenius.

 vi) Separar os casos de estacas monitoradas com instrumentos inseridos antes da instalação, como os casos clássicos de Gregerssen et al. (1973) e Cooke (1979) para comparar tantos os valores de atrito falso como verdadeiros, à luz do modelo de Massad.

vii) Comparar os valores de K_r obtidos do ajuste exponencial com o valor teórico em função da porcentagem de carga transferida por atrito lateral.

viii) Verificar a relação k_{reb}/ k e sua variação com a porcentagem de carga na ponta.

ix) Verificar o motivo de alguns ensaios do banco de dados de Chow et al.
(2016) apresentarem, ao iniciar a fase de descarregamento do ensaio, um aumento dos deslocamentos, para, em seguida, reduzirem.

 x) Estudar um banco de dados de estacas escavadas em uma tentativa de comprovar maiores valores de µ para estacas com comprimentos menores e menores valores de µ para estacas mais longas.

REFERÊNCIAS

ALLEDI, C.T.D.B. *Transferência de carga de estacas hélice contínua instrumentadas em profundidade*. 2013. 216-237 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

AMENDOLA, C.D.E. *Influência do modelo de transferência de carga de estacas isoladas na previsão do seu comportamento*. 2018. 249 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UERJ, Rio de Janeiro, RJ, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA, ABEF. *Research on Foundation Engineering*. São Paulo, 1989.

BAGUELIN, F.; VENON, V.P. *Influence de la Compressibilité des Pieux sur la Mobilizations des Éfforts Resistant*. -Bulletin des Liaison Lab. des Ponts et Chaussées. Num. Especial, May. Paris, 1971. pp. 308-322. 1971.

BRIAUD, J.L.; TUCKER, L. *Piles in sand: a method includ-ing residual stresses.* Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 110: 1666–1680, 1984.

COSTA, L.M. *Previsão do Comportamento de Estacas considerando as Tensões Residuais de cravação*. 1994. 99 p. Tese (M.Sc) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.

CARVALHO, D.; ALBUQUERQUE, P.J.R. *Ensinando prova de carga estática em fundações*. [livro eletrônico]: realização – interpretação – projeto – resultados. Campinas, SP: Ed. Dos autores, 2023.

CHOW, F.; GUO, W.; JARDINE, R.; YANG, Z. A Comprehensive Database of Tests on Axially Loaded Piles Driven in Sand. [S. I.]: Elsevier, 250 p, 2016.

COOKE, R.W. Influence of residual installation forces on thestress transfer and settlement under working loads of jacked andbored piles in cohesive soils. In Behaviour of deep foundations. Edited by R. Lundgren. American Society for Testing and Mate-rials, Special Technical Publication STP 670, pp. 231–249, 1979.

DANZIGER, BERNADETE RAGONI. (comunicação pessoal), agosto, 2023.

DANZIGER, B.R. The 2022 Pacheco Silva lecture: the influence of residual loads on pile foundation behavior. Soils & Rocks, 46 (2), 2023.

DANZIGER, B.R. *Provas de carga em estacas tubadas. Solos e Rochas*, [s. l.], 1980, v. 3, n. 3, ed. 3, p. 29-39, 1 dez. 1980.

DARRAG, A.A.; LOVELL, C.W. *A simplified procedure for predicting residual stresses for piles.* Proc. XII ISSMFE, Vol. 2, 1127-1130, Rio de Janeiro, 1989.

DECOURT, L. *Thoughts concerning the interpretation of suc-cessive load tests on the same pile*. In Proceedings of the 9thPanamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation En-gineering, Vol. 2, pp. 585–597, 1991.

DECOURT, L. *Instrumented Bored Piles in Residual Soils*. Suplementary Contributions by the ABMS. Published on the ocasion of the XII Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Rio de Janeiro, 1989.

FALCONI, F.; CAPUTO, A.; HACHICH, W.; HORTA, C. *Prova de carga instrumentada em profundidade em estaca escavada de grande diâmetro em santos, sp.* In: 8° Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 8, São Paulo. Anais. ABMS. v.1. São Paulo, 2015.

FELLENIUS, B.H.; SANTOS, J.A.; FONSECA, A.V. *Analysis of piles in a residual soil* – *The ISC'2 prediction*. Canadian Geotechnical Journal. Accepted for publication in vol.1, Janeiro, 2007.

FRUTUOSO, A.; MELO, R.M.; MOTA, N.M.B.; DANTAS, S.A.; MOIZINHO, J.C. *Análise numérica do comportamento de fundações superficiais tipo sapata.* COBRAMSEG - Cong. Brasileiro Mec. dos Solos e Eng. Geotécnica, Belo Horizonte, ano 2016. ABMS, 2016.

GREGERSEN, O.S.; AAS, G.; DIBIAGIO, E. *Load tests onfriction piles in loose sand*. In Proceedings of the 8th Interna-tional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol. 2.1, pp. 109–117, 1973.

HOLLOWAY, D.M.; CLOUGH, G.W.; VESIC, A.S. *The effectsof residual driving stress on piles performance under axial loads*. In Proceedings of the Offshore Technology Conference, Hous-ton, OTC 3306, pp. 2225–2236, 1978.

KORMANN, A.C.M.; CHAMECKI, P.R.; RUSSO NETO, L.; ANTONIUTTI NETO, L.; BERNARDES, G.P. *Estacas hélice contínua em argila sobreadensada: comportamento em provas de carga estáticas e dinâmicas.* In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 4., São Paulo, 2000. Anais. São Paulo: ABMS/ABEF, p.58-70, 2000.

MARQUES, J.A.F.; MASSAD, F. Load tests on instrumented bored piles with bulbs, executed at seafront Maceió, Alagoas. Revista "Solos e Rochas", ABMS, vol. 27, n. 3, p. 243-260, 2004.

MARTIN, R.E. ET AL. *Concrete pile design in tidewater Virginia*. ASCE. JGE, Vol. 113, N° 6, 568-585, 1987.

MASSAD F. Sobre a Interpretação de Provas de Carga em Estacas, Considerando as Cargas Residuais de Ponta e a Reversão do Atrito Lateral. Parte I. Revista Solos e Rochas, 15(2):103-115, S. P, 1992.

MASSAD, F. Sobre a Interpretação de Provas de Carga em Estacas, Considerando as Cargas Residuais na Ponta e a Reversão do Atrito Lateral. Parte II. Revista Solos e Rochas, 16 (2): 93- 112, S. Paulo, 1993.

MASSAD F.; LAZO, G. *Método Gráfico para Interpretar a Curva Carga-Recalque de Provas de Carga Verticais em Estacas Rígidas ou Curtas*. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, vol III:1407-1414, Brasília, Brasil, 1998.

MASSAD, F.; FONSECA, A.V.; SANTOS, J.A.; ESTEVES, E.C. *Analysis of piles in residual soil from granite considering residual loads.* Solos e Rochas, v.30, p.63 - 80, 2007.

PEREZ, W.; FALCONI, F.F. *Estacas metálicas com seção variável ao longo da profundidade*. In: Seminário de Fundações Profundas e Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, 9., Ijuí, RS, Brasil, 2007. Anais. 14 p, CD-ROM, 2007.

PALUDETO, T.M.L. Desempenho de estacas tipo hélice continua por meio de provas de carga estática instrumentada e simulação numérica. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – FECFAU - Universidade Estadual de Campinas - Unicamp. 207 págs, 2022.

POLIDO, U.F.; ALMEIDA, R.C.M.B.; ALLEDI, C.T.D.B.; ALBUQUERQUE, P.J.R.; LEMOS, S.G.F.P. *Capacidade de Carga Geotécnica de Estacas de Perfil Metálico com Base em Provas de Carga à Compressão*. In: 9° Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 9, São Paulo. Anais. ABEF. v.1, São Paulo, 2019.

POULOS, H.G. Analysis of residual stress effects in piles. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113: 216–229, 1987.

RIEKE, R.D.; CROWSER, J.C. *Interpretation of pile load testconsidering residual stresses.* Journal of Geotechnical Engi-neering, ASCE, 113: 320–334, 1987.

VELLOSO, D.A.; AOKI, N.; SALAMONI, J.A. *Fundações para o silo vertical de 100.000t no Porto de Paranagua.* In: 6° Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Rio de Janeiro, 1978. Anais. Vol. 3, p. 125–151, 1978.





Figura 36 - Curva carga x recalque Estaca 225 (Raiz Engenharia, 1990 apud Massad, 1992)



Figura 37 - Curva carga x recalque Estaca PC-90 (Lazo, 1996 apud Lazo e Massad, 1998)



Figura 38 - Curva carga x recalque Estaca Met. Casqueiro (Rin et al., 1983 apud Massad, 1992)



Figura 39 - Curva carga x recalque Estaca Met. Penha (Nápoles Neto, 1958 apud Massad, 1992)



Figura 40 - Curva carga x recalque Estaca PC-25 (Penna, 1993 apud Lazo e Massad, 1998)



Figura 41 - Curva carga x recalque Estaca HLC-2 (Geofix, 1998 apud Lazo e Massad, 1998)



Figura 42 - Curva carga x recalque Amendola et al., 2018 (PEREZ E FALCONI, 2007 apud AMENDOLA 2018)



Figura 43 - Curva carga x recalque estaca CFA1 (KORMANN et al., 2000)







Figura 45 - Curva carga x recalque estaca D-2 (COSTA, 1994)















Figura 49 - Curva carga x recalque estaca TP4 (CHOW et al., 2016)







Figura 51 - Curva carga x recalque estaca H-2 (CHOW et al., 2016)



Figura 52 - Curva carga x recalque estaca RJ PI-3 (CHOW et al., 2016)



Figura 53 - Curva carga x recalque estaca ST-2 (CHOW et al., 2016)







Figura 55 - Curva carga x recalque estaca TP (CHOW et al., 2016)



Figura 56 - Curva carga x recalque estaca FRUTUOSO et al., 2016 (FRUTUOSO et al., 2016)



Figura 57 - Curva carga x recalque estaca FALCONI et al., 2015 (FALCONI et al.,







Figura 59 - Curva carga x recalque estaca EPM4 (POLIDO et al., 2019)















Figura 63 - Curva carga x recalque estaca E413 (VELLOSO et al., 1978)







Figura 65 - Curva carga x recalque estaca IX.1 (CARVALHO et al., 2023)



Figura 66 - Curva carga x recalque estaca PCR3 (CARVALHO et al., 2023)



Figura 67 - Curva carga x recalque estaca EH1 (ALLEDI, 2013)















Figura 71 - Curva carga x recalque estaca EH5 (ALLEDI, 2013)







Figura 73 - Curva carga x Recalque estaca HLC-2

APÊNDICE A - DESENVOLVIMENTO PARA ESTACAS COMPRESSÍVEIS (RELAÇÕES PARABÓLICA E EXPONENCIAL)



Figura 74 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca RJ PI-3



Figura 75 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) - Estaca RJ PI-3



Figura 76 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca RJ PI-3



Figura 77 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca RJ PI-3



Figura 78 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca RJ PI-4



Figura 79 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) - Estaca RJ PI-4



Figura 80 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca RJ PI-4



Figura 81 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca RJ PI-4



Figura 82 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca H-2



Figura 83 - Determinação de Pr com Δ = 10mm (Carregamento) - Estaca H-2



Figura 84 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca H-2



Figura 85 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca H-2



Figura 86 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca P2-C



Figura 87 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) - Estaca P2-C



Figura 88 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca P2-C



Figura 89 - Relação parabólica (descarregamento) - Estaca P2-c


Figura 90 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca TP



Figura 91 - Determinação de Pr com Δ = 10mm (Carregamento) - Estaca TP



Figura 92 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca TP



Figura 93 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca TP



Figura 94 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca ST-2



Figura 95 - Determinação de Pr com Δ = 5mm (Carregamento) - Estaca ST-2



Figura 96 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca ST-2



Figura 97 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca ST-2



Figura 98 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca D-2



Figura 99 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) – Estaca D-2



Figura 100 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca D-2



Figura 101 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca ST-1/1° carregamento



Figura 102 - Determinação de Pr com Δ = 5mm (Carregamento) - Estaca ST-1/1° carregamento



Figura 103 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca ST-1/1° carregamento



Figura 104 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca ST-1/1° carregamento



Figura 105 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca ST-1/2° carregamento



Figura 106 - Determinação de Pr com Δ = 5mm (Carregamento) - Estaca ST-1/2° carregamento



Figura 107 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca ST-1/2° carregamento



Figura 108 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca ST-1/2° carregamento



Figura 109 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca ST-1/3° carregamento



Figura 110 - Determinação de Pr com Δ = 5mm (Carregamento) - Estaca ST-1/3° carregamento



Figura 111 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca ST-1/3° carregamento



Figura 112 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca ST-1/3° carregamento



Figura 113 - Relação Parabólica (Carregamento) - ESTACA E104



Figura 114 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - Estaca E104



Figura 115 - Relação Exponencial (Carregamento) - ESTACA E104



Figura 116 - Relação parabólica (Descarregamento) - ESTACA E104



Figura 117 - Relação Parabólica (Carregamento) - ESTACA E413



Figura 118 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - ESTACA E413



Figura 119 - Relação Exponencial (Carregamento) - ESTACA E413



Figura 120 - Relação parabólica (Descarregamento) - ESTACA E413



Figura 121 - Relação Parabólica (Carregamento) - ESTACA PCR3



Figura 122 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - ESTACA PCR3



Figura 123 - Relação Exponencial (Carregamento) - ESTACA PCR3



Figura 124 - Relação parabólica (Descarregamento) - ESTACA PCR3



Figura 125 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca EH3



Figura 126 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - Estaca EH3



Figura 127 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca EH3



Figura 128 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca EH3



Figura 129 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca EH4



Figura 130 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - Estaca EH4



Figura 131 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca EH4



Figura 132 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca EH4



Figura 133 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca EH6



Figura 134 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) - Estaca EH6



Figura 135 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca EH6



Figura 136 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca EH6



Figura 137 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca CFA1



Figura 138 - Determinação de Pr com Δ = 0,5mm (Carregamento) - Estaca CFA1



Figura 139 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca CFA1



Figura 140 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca CFA1



Figura 141 - Relação Parabólica (Carregamento) - Amendola et al., 2018



Figura 142 - Determinação de Pr com Δ = 5mm (Carregamento) - Amendola et al., 2018



Figura 143 - Relação Exponencial (Carregamento) - Amendola et al., 2018



Figura 144 - Relação parabólica (Descarregamento) - Amendola et al., 2018



Figura 145 - Relação Parabólica (Carregamento) - FRUTUOSO et al., 2016



Figura 146 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) - FRUTUOSO et al., 2016



Figura 147 - Relação Exponencial (Carregamento) - FRUTUOSO et al., 2016



Figura 148 - Relação parabólica (Descarregamento) - FRUTUOSO et al., 2016



Figura 149 - Relação Parabólica (Carregamento) - FALCONI et al., 2015



Figura 150 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) – FALCONI et al., 2015



Figura 151 - Relação Exponencial (Carregamento) - FALCONI et al., 2015



Figura 152 - Relação parabólica (Descarregamento) - FALCONI et al., 2015



Figura 153 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca 61

174



Figura 154 - Determinação de Pr com Δ = 2mm (Carregamento) - Estaca 61



Figura 155 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca 61



Figura 156 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca 61



Figura 157 - Relação Parabólica (Carregamento) - Estaca 164



Figura 158 - Determinação de Pr com Δ = 1mm (Carregamento) – Estaca 164



Figura 159 - Relação Exponencial (Carregamento) - Estaca 164



Figura 160 - Relação parabólica (Descarregamento) - Estaca 164
APÊNDICE B - DESENVOLVIMENTO GRÁFICO PARA ESTACAS CURTAS (MÉTODO DAS DUAS RETAS)



Figura 161 - Método das duas retas aplicado à estaca D-2



Figura 162 - Método das duas retas aplicado à estaca EPM4



Figura 163 - Método das duas retas aplicado à estaca EPM5



Figura 164 - Método das duas retas aplicado à estaca TP4















Figura 168 - Método das duas retas aplicado à estaca P2-C



Figura 169 - Método das duas retas aplicado à estaca CFA2



Figura 170 - Método das duas retas aplicado à estaca PCE-01



Figura 171 - Método das duas retas aplicado à estaca IX.1



Figura 172 - Método das duas retas aplicado à estaca EH1



Figura 173 - Método das duas retas aplicado à estaca EH2



Figura 174 - Método das duas retas aplicado à estaca EH5



Figura 175 - Método das duas retas aplicado à estaca EH6



Figura 176 - Método das duas retas aplicado à estaca Site1



Figura 177 - Método das duas retas aplicado à estaca TE-3



Figura 178 - Método das duas retas aplicado à estaca BAR-1



Figura 179 - Método das duas retas aplicado à estaca STR-1

APÊNDICE C – REPRODUÇÃO DA CURVA CARGA RECALQUE PELO MÉTODO DE MASSAD E COMPARAÇÃO COM O ENSAIO (ESTACAS COMPRESSÍVEIS)



Figura 180 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca de Amendola et al. (2018)











Figura 183 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca TP







Figura 185 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca RJ PI-4







Figura 187 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca P2-C



Figura 188 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca 61



Figura 189 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca 164



Figura 190 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca CFA1



Figura 191 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca PCR3



Figura 192 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH3



Figura 193 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH4



Figura 194 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH6



Figura 195 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca E104



Figura 196 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca E413



Figura 197 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca de Frutuoso et al. (2016)



Figura 198 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca de Falconi et al. (2015)

APÊNDICE D – REPRODUÇÃO DA CURVA CARGA RECALQUE PELO MÉTODO DE MASSAD E COMPARAÇÃO COM O ENSAIO (ESTACAS RÍGIDAS)



Figura 199 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca D-2



Figura 200 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EPM4



Figura 201 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EPM5



Figura 202 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca TP4



Figura 203 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca TP



Figura 204 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca HRV P1



Figura 205 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca H-2



Figura 206 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca P2-C



Figura 207 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca CFA2



Figura 208 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca PCE-01



Figura 209 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca IX.1



Figura 210 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH1



Figura 211 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH2



Figura 212 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH5



Figura 213 - Reprodução da curva carga recalque pelo método de Massad e comparação com o ensaio – Estaca EH6

APÊNDICE E – LINK PARA ACESSAR A PLANILHA

https://drive.google.com/drive/folders/13uJqwHbm1p004ePkl0zQaHoeCilbTGP5?usp =sharing