



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DANTON FRANÇA DA SILVA

**RECALQUES DE ESTACAS COM CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA A
PARTIR DE FUNÇÕES HIPERBÓLICAS EM PERFIS DE SOLOS GRANULARES**

FORTALEZA
2022

DANTON FRANÇA DA SILVA

RECALQUES DE ESTACAS COM CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA A
PARTIR DE FUNÇÕES HIPERBÓLICAS EM PERFIS DE SOLOS GRANULARES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S579r Silva, Danton França da.
Recalques de estacas com curvas de transferência de carga a partir de funções hiperbólicas em perfis de solos granulares / Danton França da Silva. – 2022.
242 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura.

1. Curvas de transferência de carga. 2. Solos granulares. 3. Funções hiperbólicas. 4. Correlações de parâmetros. 5. Medidas de ensaios SPT e CPT. I. Título.

CDD 624.15

DANTON FRANÇA DA SILVA

RECALQUES DE ESTACAS COM CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA A
PARTIR DE FUNÇÕES HIPERBÓLICAS EM PERFIS DE SOLOS GRANULARES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 25/11/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Maurício Martines Sales
Universidade Federal de Goiás (UFG)

À minha amada esposa Amanda.

Aos meus pais, Daniel e Dora.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo seu grande cuidado, sabedoria e misericórdia.

À CAPES e ao CNPq, pelo incentivo à pesquisa e apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao meu orientador prof. Dr. Alfran Sampaio Moura, pelo apoio, ideias, correções, palavras de incentivo e por ser um exemplar orientador.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Maurício Martines Sales e Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto pela disponibilidade e colaborações.

Ao POSDEHA, por proporcionar grandes aprendizados através do ensino de excelência.

Aos meus pais Daniel e Dora, por sempre acreditar em mim e me incentivar à estudar.

À minha esposa Amanda, pelo carinho, compreensão, pelas palavras de ânimo e ser minha parceira para toda a vida.

Ao movimento estudantil Cru Campus e todos os meus amigos envolvidos com este movimento, agradeço imensamente pelas conversas, pela amizade, pelo crescimento e por me fazer compreender que a universidade foi bem mais do que eu poderia imaginar.

RESUMO

As previsões de capacidade de carga e recalques são requisitos essenciais para a elaboração de projeto de fundações, a fim de atender condições satisfatórias do sistema solo-fundação quanto aos estados limite último (ELU) e de serviço (ELS). De modo geral, os métodos de transferência de carga são métodos numéricos amplamente empregados para estimar curvas carga-recalque de estacas isoladas ou em grupo de estacas. Desse modo, a presente pesquisa apresenta propostas para previsão de curvas de transferência de carga em estacas isoladas e em grupos executadas em perfis de solos granulares a partir de funções hiperbólicas. Para tanto, foram coletados os dados de 22 estudos experimentais, totalizando 59 estacas isoladas e 25 grupos de estacas, avaliando-se a aderência das curvas de transferência de carga $t-z$ e $q-z$ a funções hiperbólicas. São propostos, ainda, valores para os parâmetros de deformação M de estacas isoladas e em grupo de estacas. Além disso, foram avaliadas previsões dos parâmetros de curva hiperbólica $t-z$ e $q-z$ a partir de correlações com medidas de ensaios de campo, geometria das estacas e tensões iniciais no solo, além de previsões do comportamento de grupo de estacas a partir do comportamento das respectivas estacas isoladas. De modo geral, conclui-se que as curvas de transferência de carga são convergentes a funções hiperbólicas. A previsão dos parâmetros de deformação M em estacas isoladas apresentaram-se convergentes e numericamente superiores aos valores propostos por Bohn, Santos e Frank (2016). Para estacas em grupo foram propostos, preliminarmente, valores de referência do parâmetro M . Quanto às propostas de previsão das curvas $t-z$ e $q-z$ hiperbólicas a partir do N_{SPT} de ensaios de sondagem à percussão (SPT) e de q_c e f_s do ensaio de penetração de cone (CPT), observou-se convergência apenas nas análises para estacas isoladas. Para estacas em grupo, as previsões das curvas $t-z$ e $q-z$ foram mais convergentes na proposta de previsão a partir de correlações com os parâmetros das estacas isoladas.

Palavras-chave: Curvas de transferência de carga. Solos granulares. Funções hiperbólicas. Correlações de parâmetros. Medidas de ensaios SPT e CPT.

ABSTRACT

Load capacity and settlements predictions are essential requirements for the design of foundations, in order to meet satisfactory conditions of the soil-foundation system in terms of ultimate limit states (ELU) and service (ELS). In general, load transfer methods are numerical methods widely used to estimate load-settlement curves of single piles or pile groups. In this way, the present research presents proposals for the prediction of load transfer curves on single piles and on groups executed in granular soil profiles from hyperbolic functions. For that, 22 experimental studies were collected, totaling 59 single piles and 25 pile groups, evaluating the adherence of the t-z and q-z load transfer curves to hyperbolic functions. It is also proposed values for the deformation parameters M of single piles and pile groups. In addition, predictions of t-z and q-z hyperbolic curve parameters were evaluated from correlations with field test measurements, pile geometry and initial subsoil stresses, as well as predictions of pile group behavior from the behavior of the respective single piles. In general, it is concluded that the load transfer curves are convergent to hyperbolic functions. The prediction of deformation parameters M on single piles showed to be convergent and numerically superior to the values proposed by Bohn, Santos, and Frank (2016). For piles on groups, reference values of the parameter M were preliminarily proposed. As for the prediction proposals of the hyperbolic t-z and q-z curves from the N_{SPT} of standard penetration tests (SPT) and q_c and f_s of the cone penetration test (CPT), convergence was observed only in the analyzes for single piles. For piles on groups, the predictions of the t-z and q-z curves were more convergent in the prediction proposal based on correlations with the parameters of the single piles.

Keywords: Load transfer curves. Granular soils. Hyperbolic functions. Parameter correlations. Measurements of SPT and CPT tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacidade de carga em grupo de estacas cravadas em areia.....	22
Figura 2 – Comportamento carga-recalque em grupo de estacas cravadas em areia	23
Figura 3 – Fator de eficiência em estacas modelo em argilas	25
Figura 4 – Histogramas de fator de eficiência em grupos de estacas espaçadas 3D	26
Figura 5 – Tensões na massa de solo ocasionada por grupo de estacas	27
Figura 6 – Variação do fator de interação em um espaço semi-infinito	28
Figura 7 – Influência do número de estacas no fator de interação	29
Figura 8 – Fator de interação em função do grau de homogeneidade.....	30
Figura 9 – Desenho esquemático para cálculo do deslocamento	32
Figura 10 – Fator de atenuação no fuste em camada de solo homogêneo.....	35
Figura 11 – diagramas de carga axial e atrito lateral ao longo da estaca.....	36
Figura 12 – Transferência de carga: a) divisão da estaca em segmentos; b) segmento da estaca e modelo de mola proposto; c) comportamento genérico de uma mola não-linear.....	37
Figura 13 – Curva t-z sugerida por API (2000).....	40
Figura 14 – Curva q-z sugerida por API (2000)	40
Figura 15 – Comportamento típico da curva módulo de cisalhamento x deformação cisalhante	41
Figura 16 – Curvas de transferência de carga conforme Zhang e Zhang (2012): a) t-z; b) q-z	42
Figura 17 – Relação experimental e teórica das curvas de transferência de carga: a) t-z; b) q-z	43
Figura 18 – Curvas de transferência de carga de Bohn, Santos e Frank (2016): a) curvas de raiz cúbica; b) curvas hiperbólicas	45
Figura 19 – Comparação entre as curvas carga-recalque calculada e experimental para grupos de 4 estacas: a) QZ4; b) QZ4L	50
Figura 20 – Fluxograma da presente pesquisa.....	52
Figura 21 – Localização em mapa dos estudos experimentais selecionados	54
Figura 22 – Disposição dos grupos de estacas com 2, 4 e 5 estacas	58
Figura 23 – Ensaio SPT e CPT de Paik <i>et al.</i> (2003).....	62
Figura 24 – Provas de carga das estacas isoladas de Paik <i>et al.</i> (2003)	62
Figura 25 – Curvas de transferência de carga de Paik <i>et al.</i> (2003): a) curvas t-z; b) curvas q-z	63
Figura 26 – Locais de estudos experimentais agrupados por continentes e subcontinentes	70

Figura 27 –Quantidade de estacas analisadas em função da instrumentação e investigações geotécnicas relacionadas – diagrama de Venn: a) Estacas isoladas; b) Grupo de estacas.....	71
Figura 28 – Resumo da quantidade de estacas em grupo: a) por quantidade de estacas no grupo; b) por espaçamento entre estacas.....	72
Figura 29 – Ajuste da curva t-z a função hiperbólica na estaca 1-2A	75
Figura 30 – Ajuste da curva t-z a função hiperbólica na estaca 7-1	75
Figura 31 – Parâmetros das curvas t-z hiperbólicas: a) estacas isoladas; b) estacas em grupo	78
Figura 32 – Parâmetros das curvas q-z hiperbólicas: a) estacas isoladas; b) estacas em grupo	79
Figura 33 – Diagrama de caixa dos valores obtidos por ajuste do parâmetro M em estacas isoladas	81
Figura 34 – Diagrama de caixa dos pontos considerados do parâmetro M em estacas isoladas	82
Figura 35 – Validação dos parâmetros $M_{s,i}$ e $M_{b,i}$ da estaca 7-1: a) curva t-z; b) curva q-z.....	84
Figura 36 – Diagrama de caixa dos valores obtidos por ajuste do parâmetro M de estacas em grupo.....	86
Figura 37 – Diagrama de caixa dos valores M_g/M_i	87
Figura 38 – Valores experimentais de estacas em grupo do parâmetro M_g/M_i em função do espaçamento entre estacas	87
Figura 39 – Validação dos parâmetros $M_{s,g}$ e $M_{b,g}$ da estaca 1-2B: a) curva t-z; b) curva q-z.	89
Figura 40 – Correlação do parâmetro $a_{i,t}$ com σ'_{v0} e D	93
Figura 41 – Correlação do parâmetro $b_{i,t}$ com N_{SPT} , σ'_{v0} e D	93
Figura 42 – Correlação do parâmetro $b_{i,t}$ com f_s (CPT), σ'_{v0} e D	94
Figura 43 – Correlação do parâmetro $b_{i,t}$ com o q_c (CPT).....	94
Figura 44 – Correlação do inverso do parâmetro $b_{i,t}$ com N_{SPT} e D	95
Figura 45 – Correlação do inverso do parâmetro $b_{i,t}$ com f_s (CPT) e D	95
Figura 46 – Correlação do inverso do parâmetro $b_{i,t}$ com q_c (CPT) e D	96
Figura 47 – Correlação do parâmetro $a_{i,q}$ com σ'_{v0} e D	96
Figura 48 – Correlação do parâmetro $b_{i,q}$ com o N_{SPT}	97
Figura 49 – Correlação do parâmetro $b_{i,q}$ com o q_c (CPT)	97
Figura 50 – Comparação entre as curvas carga-recalque (experimental e estimada) da estaca 2-1	102
Figura 51 – Comparação entre as curvas carga-recalque (experimental e estimada) da estaca 7-	

1	103
Figura 52 – Comparação entre as curvas carga-recalque experimentais e estimadas: a) Estaca 10-1; b) Estaca 10-2.....	104
Figura 53 – Comparação entre as curvas carga-recalque (experimental e estimadas) da estaca 8-1.....	105
Figura 54 – Comparação entre as curvas carga-recalque (experimental e estimadas) da estaca 9-1.....	106
Figura 55 – Correlação do parâmetro $a_{g,t}$ com N_{SPT} e D	107
Figura 56 – Correlação do parâmetro $a_{g,t}$ com f_s (CPT) e D	107
Figura 57 – Correlação do parâmetro $a_{g,t}$ com a relação r_{ij}/D e D	107
Figura 58 – Correlação do parâmetro $b_{g,t}$ com N_{SPT} e σ'_{v0}	108
Figura 59 – Correlação do parâmetro $b_{g,t}$ com f_s (CPT) e relação r_{ij}/D	108
Figura 60 – Correlação do parâmetro $a_{g,q}$ com N_{SPT} e σ'_{v0}	109
Figura 61 – Correlação do parâmetro $a_{g,q}$ com q_c (CPT), relação r_{ij}/D e D	110
Figura 62 – Correlação do parâmetro $a_{g,q}$ com σ'_{v0} , relação r_{ij}/D e D	110
Figura 63 – Correlação do parâmetro $b_{g,q}$ com N_{SPT} , relação r_{ij}/D e D	111
Figura 64 – Correlação do parâmetro $b_{g,q}$ com q_c (CPT) e relação r_{ij}/D	111
Figura 65 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimental e estimadas) do grupo de estacas 2-3a.....	112
Figura 66 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimentais e estimadas): a) Grupo 7-2a; b) Grupo 7-3a.....	113
Figura 67 – Correlação do parâmetro $a_{g,t}$ com o parâmetro $a_{i,t}$	117
Figura 68 – Correlação do parâmetro $a_{g,t}$ com a relação r_{ij}/D e D	118
Figura 69 – Correlação do parâmetro $b_{g,t}$ linearmente proporcional a $b_{i,t}$	118
Figura 70 – Correlação do parâmetro $b_{g,t}$ com o parâmetro $b_{i,t}$	119
Figura 71 – Correlação do parâmetro $a_{g,q}$ com o parâmetro $a_{i,q}$, σ'_{v0} , relação r_{ij}/D e D	120
Figura 72 – Correlação do parâmetro $b_{g,q}$ com o parâmetro $b_{i,q}$ e D	120
Figura 73 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimental e estimadas) do grupo 2-3a.....	122
Figura 74 – Curvas carga total x recalque (experimental e estimadas) do grupo de estacas 3-3a	123
Figura 75 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimentais e estimadas): a) Grupo 7-2a; b) Grupo 7-3a.....	124

Figura 76 – Proposta para previsão do comportamento de estacas em grupo.....	124
Figura 77 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimentais e estimadas): a) Grupo 8-4a; b) Grupo 8-8a.....	125
Figura 78 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimental e estimadas) do grupo de estacas 2-3a.....	126
Figura 79 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimentais e estimadas): a) Grupo 7-2a; b) Grupo 7-3a.....	127
Figura 80 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimentais e estimadas) dos grupos de estacas 9-2a e 9-3a.....	128

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição dos locais de estudo	53
Quadro 2 – Caracterização das estacas isoladas	55
Quadro 3 – Caracterização das estacas em grupo.....	57
Quadro 4 – Resultados de ensaios de campo e informações relacionadas	60
Quadro 5 – Identificação das estacas isoladas de referência e ensaios de campo relacionados	64
Quadro 6 – Metodologias empregadas na definição dos parâmetros das curvas t-z e q-z	102
Quadro 7 – Metodologias empregadas na definição dos parâmetros $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos parâmetros M_s e M_b propostos por Bohn, Santos e Frank (2016)	45
Tabela 2 – Localização da instrumentação ao longo da profundidade	59
Tabela 3 – Informações das provas de carga utilizadas na pesquisa	65
Tabela 4 – Informações gerais das curvas de transferência de carga experimentais	67
Tabela 5 – Resumo da quantidade de estacas analisadas em função do tipo de estaca	71
Tabela 6 – Análise estatística dos parâmetros geométricos e peso específico do solo das estacas e grupos de estacas selecionados	72
Tabela 7 – Análise estatística dos parâmetros obtidos das provas de carga	73
Tabela 8 – Parâmetros das curvas de transferência de carga de estacas isoladas obtidos a partir de ajuste às funções hiperbólicas	76
Tabela 9 – Parâmetros das curvas de transferência de carga de estacas em grupo obtidos a partir de ajuste às funções hiperbólicas	77
Tabela 10 – Estatística descritiva dos valores obtidos por ajuste do parâmetro M em estacas isoladas	81
Tabela 11 – Valores dos parâmetros M para estacas isoladas definidos na presente pesquisa .	83
Tabela 12 – Validação dos parâmetros M em estacas isoladas	83
Tabela 13 – Estatística descritiva dos valores obtidos por ajuste do parâmetro M de estacas em grupo	85
Tabela 14 – Valores dos parâmetros M de estacas em grupo definidos na presente pesquisa em caráter preliminar	88
Tabela 15 – Validação dos parâmetros M para estacas em grupo	88
Tabela 16 – Estimativas do parâmetro $b_{i,t}$ e comparação com o valor experimental	99
Tabela 17 – Estimativas do parâmetro $a_{i,t}$ e comparação com o valor experimental	100
Tabela 18 – Estimativas do parâmetro $b_{i,q}$ e comparação com o valor experimental	101
Tabela 19 – Estimativas do parâmetro $a_{i,q}$ e comparação com o valor experimental	101

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Fator de interação
l	Comprimento da estaca
D, d	Diâmetro da estaca
P	Carga no topo da estaca
s	Espaçamento entre estacas
ν	Coefficiente de Poisson
h	Espessura da camada de solo
ρ	Grau de homogeneidade
ρ_g	Recalque do grupo
ρ_i	Recalque da estaca isolada sob sua contribuição de carga no grupo
B_g	Dimensão transversal do grupo de estacas em pés
ζ	Relação espaçamento por diâmetro das estacas
n_r	Quantidade de linhas de estacas em um bloco quadrado
w_i	Recalque da estaca i
w_1	Recalque da estaca isolada sob carga unitária
P_i	Carga no topo da estaca i
α'_{ij}	Fator de interação corrigido entre as estacas i e j
$w(r)$	Recalque de um ponto distante r do eixo da estaca
$w_b(r)$	Recalque de um ponto distante r do eixo da estaca no nível da ponta
τ_0	Tensão de cisalhamento no fuste no nível de análise
r_0	Raio da estaca
G_s, G_b	Módulo de cisalhamento do solo no nível do fuste e da base da estaca
r_m	Raio de influência limite
Q_b	Carga axial do solo à ponta da estaca
w_b	Deslocamento da estaca no nível da base da estaca
ν_b	Coefficiente de Poisson no nível da base da estaca
$G_{l/2}$	Módulo de cisalhamento do solo na profundidade média da estaca
G_l	Módulo de cisalhamento do solo na base da estaca
Q_s	Carga mobilizada pelo fuste da estaca
w_s	Deslocamento médio do fuste da estaca
w_t	Deslocamento do topo da estaca

E_p	Módulo de elasticidade da estaca
α_s, α_b	Fatores de interação para o fuste e para base
ψ_s, ψ_b	Fator de interação do fuste e base considerando apenas o deslocamento livre
ζ_s, ζ_b	Fator de atenuação no fuste e na base devido a rigidez da estaca adjacente
h_i	Espessura da i-ésima camada de solo ao longo do fuste da estaca
λ_i	Parâmetro de transferência de carga de Winkler da i-ésima camada de solo
Ω	Rigidez estaca-base adimensional
Q	Carga axial na estaca
T	Força cisalhante devido o atrito lateral mobilizado
Z	Profundidade
$Q_{t,n}, Q_{b,n}$	Carga axial de topo e base do n-ésimo segmento da estaca
$z_n, z_{b,n}$	Deslocamento axial médio e de base do n-ésimo segmento da estaca
E_s	Módulo de elasticidade do solo abaixo da ponta da estaca
mI_s	Fator de forma
I_F	Fator de incorporação da razão L/D
F_1	Fator de redução devido transferência de carga
T_n	Força cisalhante devido o atrito lateral mobilizado do n-ésimo segmento
t_n	Resistência ao atrito lateral mobilizado unitário do n-ésimo segmento
U	Perímetro da seção transversal da estaca
$z_{e,n}$	Encurtamento elástico do n-ésimo segmento
A	Área da seção transversal
$Q_{méd,n}$	Carga axial média no n-ésimo segmento
z	Deslocamento axial da estaca no ponto analisado
t	Resistência ao atrito lateral mobilizado
t_{max}	Resistência de máxima mobilização do atrito lateral
q	Resistência de ponta mobilizada
q_{max}	Resistência máxima de ponta
$G_{máx}$	Módulo de cisalhamento máximo do solo
$\tau, \tau_{máx}$	Tensão de cisalhamento atuante e máximo
F_1, F_2	Parâmetros de ajustes da curva de Fahey e Carter (1993)
a, b, k_1, k_2	Parâmetros de ajustes das curvas de Zhang e Zhang (2012)
τ_{su}	Resistência última ao atrito lateral assintótica
R_{sf}	Razão de falha no fuste

$\Delta P, \Delta w$	Acréscimo de carga e recalque no topo da estaca no segundo estágio de carga
f, g	Parâmetros de ajuste da curva q-z de Zhang et al. (2014)
q_{bu}	Resistência última ao atrito lateral assintótica
R_{bf}	Razão de falha na base da estaca
K	Coefficiente de pressão lateral
σ'_v	Acréscimo de tensão efetiva vertical
δ	Ângulo de atrito da interface estaca-solo
K_0	Coefficiente de empuxo no repouso
ϕ'	Ângulo de atrito interno do solo circundante
M_s, M_b	Parâmetros de deformação do fuste e da base no modelo de curva hiperbólica
$z_{s,lim}, z_{b,lim}$	Deslocamentos limite de máxima mobilização da resistência lateral e da base
a_g, b_g, f_g, g_g	Parâmetros de ajustes das curvas de estacas em grupo de Zhang et al. (2014)
k_{si}	Rigidez inicial no fuste da estaca i
k_{sii}	Rigidez no fuste da estaca i devido próprio carregamento
k_{sij}	Varição da rigidez no fuste da estaca i devido acréscimo de deslocamento provocado pelas estacas vizinhas
k'_{sij}	Rigidez devido a força de reação no fuste da estaca ao deslocamento livre proposto por Randolph e Wroth (1979)
k_{bi}	Rigidez inicial na base da estaca i
k_{bii}	Rigidez na base da estaca i devido próprio carregamento
k_{bij}	Varição da rigidez na base da estaca i devido acréscimo de deslocamento provocado pelas estacas vizinhas
$\Delta z_{si}, \Delta z_{bi}$	Deslocamento médio do fuste e da base de um elemento da estaca i devido exclusivamente a interação com as demais estacas do grupo
z_{si}, z_{bi}	Deslocamento médio do fuste e da base de um elemento da estaca i
z_{sii}, z_{bii}	Deslocamento médio do fuste e da base de um elemento da estaca i devido o próprio carregamento.
L	Comprimento da estaca embutida no solo
L_t	Comprimento total da estaca
t_w	Espessura da parede de estacas tubulares
N	Número de estacas no grupo
γ	Peso específico aparente do solo
γ_d	Peso específico seco do solo

N_{SPT}	Índice de resistência à penetração
$Q_{máx}$	Máximo carregamento obtido em prova de carga
$a_{i,t}, a_{i,q}$	Parâmetro “a” de curvas t-z e q-z hiperbólicas de estacas isoladas
$a_{g,t}, a_{g,q}$	Parâmetro “a” de curvas t-z e q-z hiperbólicas de estacas em grupo
$b_{i,t}, b_{i,q}$	Parâmetro “b” de curvas t-z e q-z hiperbólicas de estacas isoladas
$b_{i,t}, b_{i,q}$	Parâmetro “b” de curvas t-z e q-z hiperbólicas de estacas em grupo
M	Parâmetro de deformação da curva de transferência de carga hiperbólica
$M_{s,i}, M_{b,i}$	Parâmetros de deformação M do fuste e da base em estacas isoladas
$M_{s,g}, M_{b,g}$	Parâmetros de deformação M do fuste e da base em estacas em grupo
M_g/M_i	Razão do parâmetro M de estaca em grupo com o da respectiva estaca isolada
σ'_{v0}	Tensão geostática inicial
r_{ij}	Distância eixo a eixo entre as estacas i e j
q_c	Resistência de ponta do ensaio de penetração do cone
f_s	Resistência ao atrito lateral do ensaio de penetração do cone
R^2	Coefficiente de determinação
Q_{ult}	Carga última obtida nas curvas carga-recalque
q_t	Resistência de ponta corrigida para efeitos de poropressão do ensaio CPT

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivos.....	20
1.2 Escopo da dissertação.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Comportamento de estacas em grupo.....	22
2.1.1 Capacidade de carga em areias	26
2.1.2 Capacidade de carga em argilas	22
2.1.3 Recalque em grupo de estacas.....	24
2.1.4 Métodos de cálculo de recalques em grupo de estacas.....	30
2.2 Métodos de transferência de carga em estaca isolada.....	35
2.3 Métodos de transferência de carga em grupos de estacas	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 Metodologia.....	51
3.2 Áreas de estudo	52
3.3 Caracterização das estacas	54
3.4 Caracterização geotécnica dos estudos experimentais	59
3.4.1 Investigações geotécnicas em campo (SPT e CPT)	63
3.4.2 Provas de carga.....	65
3.5 Resumo dos estudos experimentais utilizados na pesquisa.....	69
4 PROPOSTA DE CONSIDERAÇÃO DE FUNÇÕES HIPERBÓLICAS NA PREVISÃO DAS CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA	74
4.1 Ajuste e obtenção dos parâmetros das curvas hiperbólicas.....	74
4.2 Obtenção e análise dos parâmetros M_s e M_b a partir dos ajustes das curvas de transferência de carga	79
4.2.1 Estacas isoladas	80
4.2.2 Estacas em grupo	84
4.3 Conclusões parciais.....	89
5 PREVISÕES DAS CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA A PARTIR DE MEDIDAS DE ENSAIOS DE CAMPO	91
5.1 Estacas isoladas.....	92
5.1.1 Curvas $t-z$	92
5.1.2 Curvas $q-z$	96

5.1.3 Validação	98
5.1.3.1 <i>Validação em termos de curva de transferência de carga</i>	98
5.1.3.2 <i>Validação em termos de curva carga-recalque</i>	101
5.2 Estacas em grupo	106
5.2.1 <i>Curvas t-z</i>	106
5.2.2 <i>Curvas q-z</i>	109
5.2.3 <i>Validação</i>	111
5.3 Conclusões parciais	113
6 PREVISÃO DAS CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA EM GRUPO DE ESTACAS A PARTIR DE ESTACAS ISOLADAS	116
6.1 Correlações baseadas em resultados experimentais das respectivas estacas isoladas	116
6.1.1 <i>Curvas t-z</i>	116
6.1.2 <i>Curvas q-z</i>	119
6.1.3 <i>Validação</i>	121
6.2 Previsão de comportamento em grupo de estacas a partir das correlações de estaca isolada	124
6.2.1 <i>Validação</i>	125
6.3 Conclusões parciais	128
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	131
7.1 Conclusões	131
7.2 Sugestões para pesquisas futuras	134
REFERÊNCIAS	136
APÊNDICE A – CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA EXPERIMENTAIS E HIPERBÓLICAS	142
ANEXO A – SONDA GENS À PERCUSSÃO (SPT)	188
ANEXO B – ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DO CONE (CPT)	194
ANEXO C – PROVAS DE CARGAS	204
ANEXO D – CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA EXPERIMENTAIS	218

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fundações em estacas é amplamente difundida em obras civis e são alternativas atrativas a depender das características técnicas e econômicas dos empreendimentos. É frequente a execução de estacas agrupadas em conjunto de duas ou mais estacas, das quais pode ocorrer o efeito de agrupamento quanto mais próximas essas estacas estiverem entre si.

A ABNT NBR 6122:2019 define que as fundações, inclusive em estacas, devem atender às condições de Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS), os quais estão associados à ruptura do sistema solo-fundação (capacidade de carga) e problemas de desempenho de maneira geral, respectivamente. Dentre as verificações de desempenho do sistema solo-fundação, destaca-se, principalmente, a verificação quanto aos recalques admissíveis a fim de não comprometer o desempenho da superestrutura.

As estacas possuem mecanismos de transferência de carga ao solo bem definidos, de modo que a carga aplicada no topo induz forças de reação ao longo do fuste e da ponta das estacas. Vale destacar, principalmente para as estacas escavadas, que estas trabalham predominantemente por atrito lateral, de forma que o cálculo da interação solo-fuste na lateral da estaca exerce maior importância no comportamento global da estaca. Os métodos de previsão de recalques são divididos, basicamente, em métodos empíricos, analíticos e numéricos. Dentre os métodos numéricos destaca-se os métodos de transferência de carga, utilizados na presente pesquisa, os quais empregam o mencionado mecanismo de transferência de carga.

Os métodos de transferência de carga se apresentam como uma ferramenta eficiente e intuitiva para a análise de estacas isoladas, e facilmente adaptável a sistemas de fundações mais complexas. Os métodos de transferência de carga preveem a mobilização do fuste e da ponta da estaca através da distribuição de carga axial ao longo da estaca, relacionando a resistência ao atrito lateral mobilizado em um determinado trecho e a resistência de base mobilizada com o deslocamento mobilizado, denominados de curvas t-z e q-z, respectivamente.

Diversos estudos em estacas isoladas, tais como Zhang *et al.* (2014) e Bohn, Santos e Frank (2016), apresentam que as curvas de transferência de carga t-z e q-z aderem a modelos de curvas hiperbólicas. Para grupos de estacas, estudos como Zhang *et al.* (2014), Zhang *et al.* (2016) e Gomes Filho e Moura (2021) definem curvas hiperbólicas para a estaca individual, adicionando o efeito de grupo através de formulações de interação entre estacas. De modo geral, a previsão das curvas de transferência de carga através de estudos recentes requer conhecimento da degradação do módulo cisalhante do solo para diferentes níveis de deformação cisalhante

nas diversas camadas e outras variáveis de difícil obtenção, da transferência de carga de estaca isolada para previsão em grupo de estacas e as curvas t-z e q-z em grupos de estacas são de difícil compreensão.

Desse modo, foram coletados resultados de provas de carga de 59 estacas isoladas e 25 grupos de estacas, a maioria instrumentada em profundidade com medidores de deformação (*strain gauges*), executadas em perfis de solos granulares. Inicialmente, avaliou-se a aderência das curvas t-z e q-z experimentais a funções hiperbólicas. Posteriormente, foram propostos valores do parâmetro de deformação M de estacas isoladas e em grupo de estacas. Por fim, foram realizadas previsões dos parâmetros de curva hiperbólica t-z e q-z a partir de correlações com medidas de ensaios de campo (N_{SPT} , q_c e f_s), geometria das estacas e tensões iniciais no solo, além de previsões do comportamento de grupo de estacas a partir do comportamento das respectivas estacas isoladas.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é apresentar propostas para a previsão de curvas de transferência de carga de estacas isoladas e em grupo de estacas todas executadas em perfis de solos granulares, considerando um modelo de função hiperbólica. Para tanto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a aderência de curvas de transferência de carga de estacas isoladas e em grupos a funções hiperbólicas;
- Comparar os valores dos parâmetros de deformação M propostos por Bohn, Santos e Frank (2016) com os obtidos por ajustes em estacas isoladas instrumentadas, propor novos valores de referência em estacas isoladas e validar os resultados;
- Propor e validar, preliminarmente, valores dos parâmetros de deformação M em grupos de estacas;
- Desenvolver e validar propostas para obtenção dos parâmetros de curvas de transferência de carga hiperbólicas em estacas isoladas e em grupo de estacas baseadas em medidas de ensaios de campo;
- Desenvolver e validar propostas para obtenção dos parâmetros de curvas de transferência de carga hiperbólicas em grupo de estacas baseados nos parâmetros das respectivas estacas isoladas;

1.2 Escopo da dissertação

A estrutura desta dissertação está dividida em sete capítulos. O presente capítulo consiste na introdução do trabalho, abrangendo definições gerais, contextualização do tema, objetivo geral, objetivos específicos e escopo da dissertação.

O segundo capítulo consiste na revisão bibliográfica dos principais conceitos e fundamentação teórica do tema abordado, compreendendo o efeito de grupo, os métodos de previsão de recalque em estacas e, mais especificamente, os métodos de transferência de carga em estacas isoladas e em grupos, incluindo o estado da arte.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia empregada, a definição das áreas de estudo, a caracterização das estacas selecionadas no presente trabalho e a caracterização geotécnica dos solos estudados. Por fim, é realizado um resumo acerca dos dados coletados dos estudos experimentais utilizados nesta pesquisa.

No quarto capítulo é avaliada a representação de curvas de transferência de carga a partir de funções hiperbólicas. Inicialmente, são efetuadas regressões das curvas experimentais a modelos hiperbólicos e, posteriormente, são obtidos e analisados os valores dos parâmetros de deformação M a partir das curvas experimentais e propostos novos valores de referência.

O quinto capítulo apresenta propostas para previsões de curvas de transferência de carga, em estacas isoladas e em grupos de estacas, a partir de medidas de ensaios de campo em profundidade (SPT e CPT).

O sexto capítulo apresenta proposta para previsão de curvas de transferência de carga em grupo de estacas a partir de estacas isoladas. Inicialmente os parâmetros de curva hiperbólica de estacas em grupo são correlacionados com os respectivos parâmetros de estacas isoladas. Em um segundo momento, foi efetuada a previsão dos parâmetros de curva hiperbólica de estacas em grupo a partir de estacas isoladas, concomitantemente com a previsão dos parâmetros das respectivas estacas isoladas, conforme apresentado no capítulo anterior.

O sétimo capítulo consolida as principais conclusões obtidas em cada etapa da pesquisa e apresenta sugestões para pesquisas futuras.

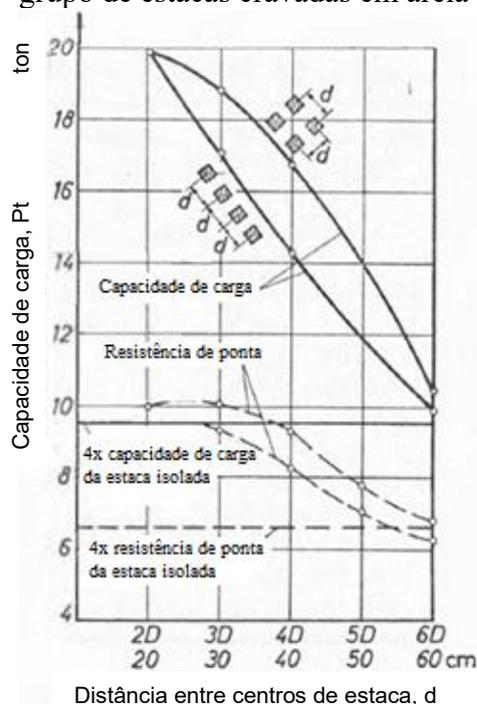
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Comportamento de estacas em grupo

2.1.1 Capacidade de carga em areias

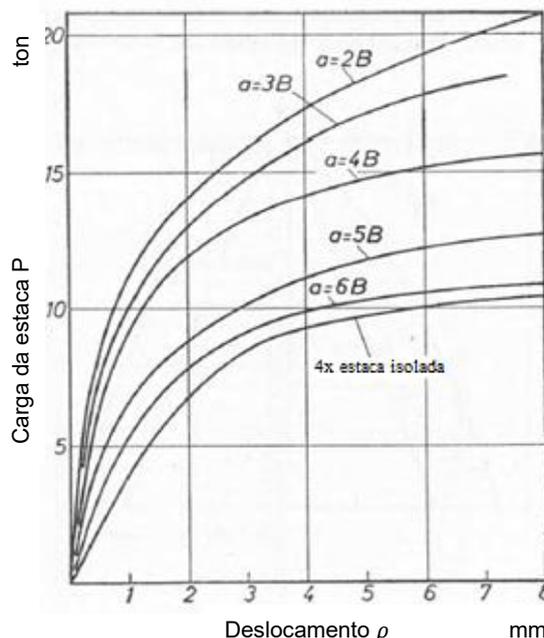
Kezdi (1957) estudando o efeito de grupo de estacas cravadas em areia, obteve fatores de eficiência superiores a unidade apontando que as estacas podem suportar maiores cargas quando configuradas em grupo, além disso, observou-se que em um grupo de 4 estacas, a disposição das estacas em formato de quadrado apresenta maior eficiência do que disposto em linha conforme Figura 1. Pode-se observar na Figura 2, quanto aos recalques, a redução do espaçamento entre estacas e , conseqüentemente, o aumento no efeito de grupo promove uma redução dos recalques. A explicação para estes fatos é que o núcleo de solo adjacente as estacas em grupo tornam-se sobremodo compactados.

Figura 1 – Capacidade de carga em grupo de estacas cravadas em areia



Fonte: Kezdi (1957)

Figura 2 – Comportamento carga-recalque em grupo de estacas cravadas em areia



Fonte: Kezdi (1957)

Le Kouby *et al.* (2016) realizou um estudo paramétrico sobre comportamento da resistência por atrito lateral e pela base em grupo de 5 estacas cravadas em areia fofa a medianamente compacta em uma câmara de calibração, variando espaçamento e ordem de instalação das estacas. Obteve-se que o efeito de grupo influenciou significativamente para espaçamentos de 2 a 4 vezes o diâmetro e que a ordem de instalação das estacas C5 (estaca central executada por último) apresenta melhor resposta do efeito de grupo e maior rigidez do sistema estaca solo comparado a instalação C1 (estaca central executada primeiro), quanto a capacidade de carga da estaca central, os grupos de estacas C5 apresentaram maiores resistência pela base e pelo fuste do que a ordem de instalação C1, sendo este último apresentando valores superiores a resistência lateral da estaca isolada.

Firoozfar *et al.* (2017) realizaram um estudo paramétrico para diferentes configurações de estacas avaliando seus efeitos na capacidade de carga de grupo de estacas em solo granular através de um programa computacional de elementos finitos. Analisou-se blocos de 16 estacas distribuídas em 4 linhas e 4 colunas de estacas de 1 m de diâmetro e comprimentos de 8, 10 e 12 m e intervalos entre estacas de 0,5 a 2 m, assentes em uma camada de solo de 30m, fornecendo condições de capacidade de carga máximas para razão comprimento da estaca e espaçamento entre estacas de 8. Além disso, analisou-se o efeito da inclinação nas estacas para um grupo de 4 estacas sob um mesmo alinhamento, as quais, as estacas de canto variaram o ângulo de inclinação com a vertical em 0, 15, 30 e 45°, os resultados forneceram que quanto

maior a inclinação maior a capacidade de suporte do grupo, e para estacas a 45° a capacidade de carga chega a ser 6 vezes a condição de instalação das estacas verticalmente, esse fato ocorre, pois além da resistência de ponta e lateral das estacas, há um componente de força axial da estaca que é transmitido para o solo abaixo da estaca.

Sales *et al.* (2017) analisou 16 provas de carga em estacas e grupos de estacas instaladas em câmara de calibração de grandes dimensões, permitindo a avaliação dos efeitos da compactação da areia adjacente as estacas e o método de execução, cravada ou escavada, das estacas modelo. Os ensaios realizados permitiram concluir que a rigidez do sistema solo-fundação aumenta com o aumento da compactação da areia e é maior em estacas cravadas, sendo o aumento da rigidez do sistema solo-fundação definida como a capacidade de apresentar menores recalques sob uma carga determinada. Além disso, o fator de eficiência em estacas cravadas, definido como a razão entre a capacidade de carga do grupo e o somatório da capacidade de carga considerando as estacas isoladas, apresentou valores superiores a unidade, ou seja, a capacidade de carga do grupo de estacas é maior que as mesmas atuando de forma isolada, somente nas condições de areia fofa e medianamente compacta, e valores inferiores a unidade em areia compacta.

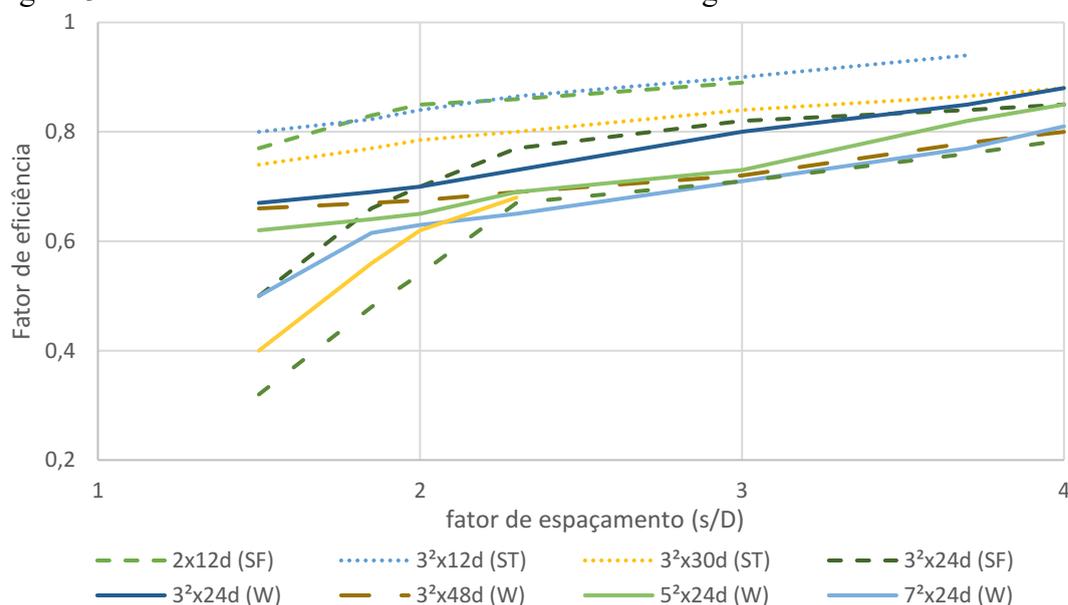
Melchior Filho, Bonan e Moura (2020) realizaram um estudo experimental da influência do efeito de grupo na capacidade de carga de estacas escavadas em solos arenosos. Para tanto, foram realizadas provas de carga estáticas em estacas escavadas de concreto, isoladas e em grupo, sem o contato do bloco de coroamento com o solo, no campo experimental de geotecnia e fundações da Universidade Federal do Ceará. Verificou-se o efeito de grupo em grupos de 2 e 4 estacas com distanciamento entre 2 e 4 vezes o diâmetro, concluindo que métodos semiempíricos clássicos de previsão de capacidade de carga em estacas isoladas não concordam com os resultados em grupo, o que era esperado. Além disso, o fator de eficiência em grupo de 2 estacas foi inferior a unidade para todos os espaçamentos analisados, e os grupos com 4 estacas apresentaram fator de eficiência ainda menor, ressaltando que o efeito de grupo é maior com o aumento do número de estacas no grupo.

2.1.2 Capacidade de carga em argilas

Sowers *et al.* (1961) realizaram estudo paramétrico do comportamento de estacas flutuantes em estacas modelo executadas em argila homogênea, isoladas e em grupo. Obteve-se que o fator de eficiência de grupo foi menor que a unidade para todos os casos, e que, para argilas mais sensíveis o processo de falha progressiva pode resultar em maior perda da

capacidade de carga. De Mello (1969) agrupando provas de carga em estacas modelo executadas em argilas como de Whitaker (1957), Saffery e Tate (1961) e Sowers *et al.* (1961), obtém que o fator de eficiência é maior para estacas curtas, mais espaçadas e para um menor número de estacas no grupo. A Figura 3 mostra a relação de diferentes configurações de grupos de estacas e seus respectivos fatores de eficiência, a nomenclatura da legenda diz respeito à disposição das estacas (por exemplo 3^2 significa 9 estacas disposta em 3 linhas e 3 colunas de estacas), ao comprimento da estaca em relação ao diâmetro e de qual estudo foi retirado os dados (W: Whitaker, ST: Saffery e Tate, SF: Sowers *et al.*).

Figura 3 – Fator de eficiência em estacas modelo em argilas



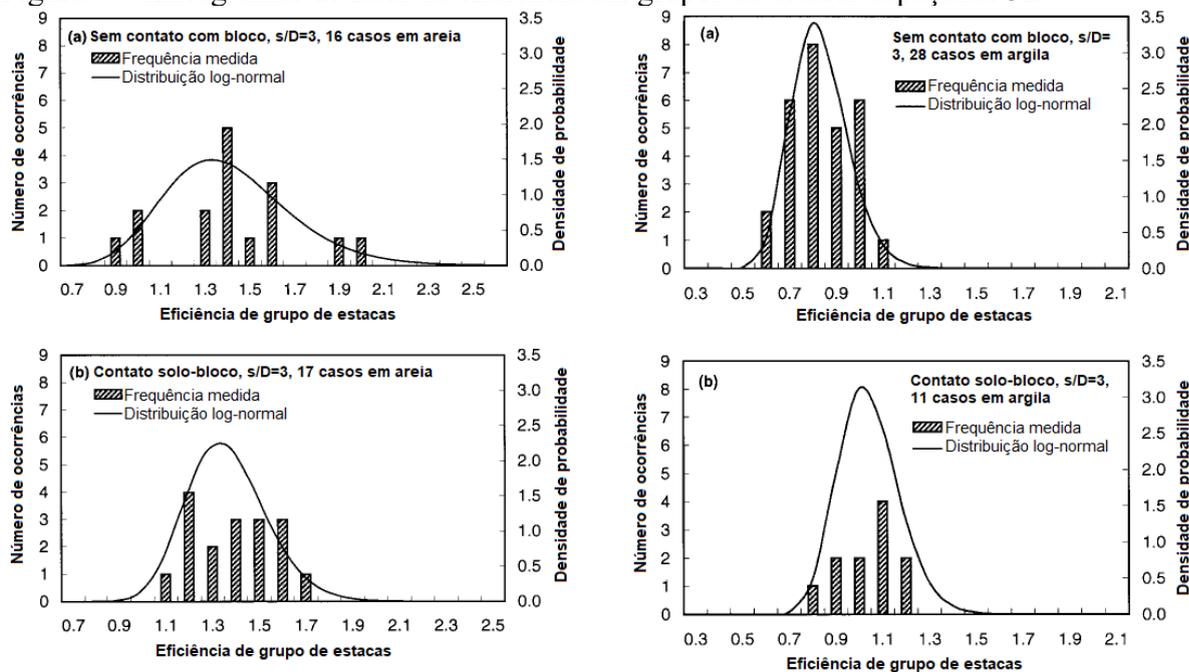
Fonte: Adaptado de De Mello (1969)

Sowers *et al.* (1961) destaca ainda que o mecanismo de ruptura do grupo de estacas para pequenos espaçamentos se comporta como um sistema composto das estacas e solo adjacente e, para maiores espaçamentos, as estacas perfuram o solo de base e, quanto a distribuição de carga em grupos de estacas 3 x 3 espaçadas duas vezes o diâmetro, observou-se que as estacas de canto apresentaram maior carga, aproximadamente o triplo da carga da estaca central, enquanto que a estaca de borda central apresenta cerca de duas vezes a carga da estaca central.

Zhang, Tang e Ng (2001) analisando a confiabilidade de grupo de estacas cravadas sob carregamento axial, coletaram dados de provas de cargas experimentais de diversos autores, obtendo fatores de eficiência de grupo inferiores a unidade para a maioria dos grupos de estacas executados em solos coesivos sem o contato do bloco de coroamento no terreno. Além disso,

obteve-se também que o coeficiente de variação do fator de eficiência é menor em solos coesivos que em solos granulares para blocos de coroamento sem contato com o solo e espaçamento de três vezes o diâmetro (3D) conforme Figura 4.

Figura 4 – Histogramas de fator de eficiência em grupos de estacas espaçadas 3D



Fonte: Zhang, Tang e Ng (2001)

Chan (2006) afirma que a extensão dos efeitos de execução das estacas em argila, independentemente se cravada ou escavada, propicia um efeito de grupo geralmente pequeno comparado a perfis de solo granular. Além disso, diferentemente de perfis granulares, a cravação de estacas em argilas saturadas proporciona um excesso de poropressão, cuja dissipação será em função do tempo, devendo-se levar este fator no carregamento das estacas.

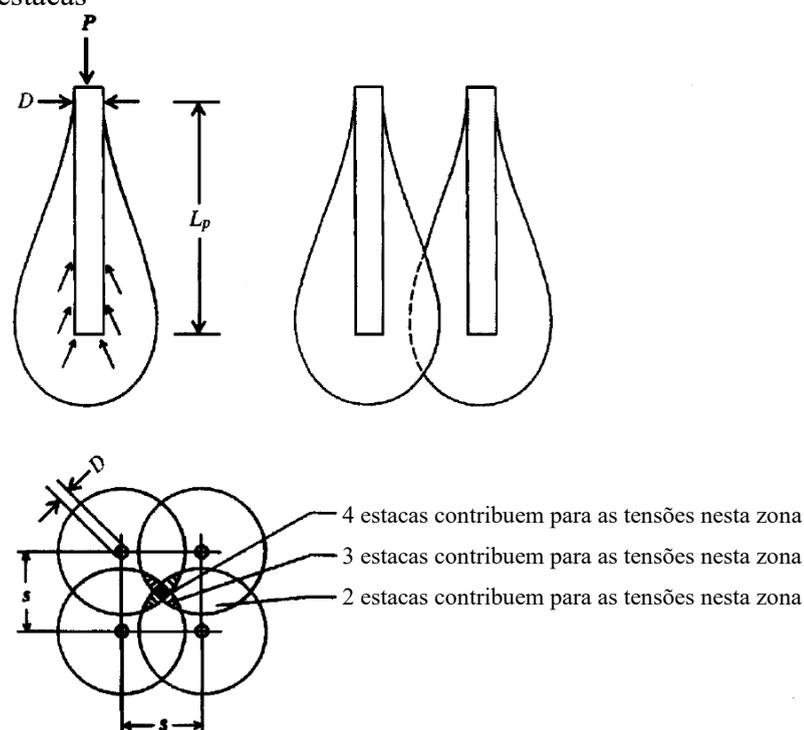
2.1.3 Recalque em grupo de estacas

As estacas frequentemente trabalham em grupo, o qual caracteriza-se por uma ligação estrutural entre os elementos no topo, que recebe a denominação de bloco de coroamento. Quando as estacas se encontram relativamente distantes entre si, a capacidade de carga do grupo e o recalque pode ser estimado a partir da sobreposição de efeitos tomando as mesmas como isoladas. Por outro lado, quando este espaçamento é menor, há alteração no modo de transferência de carga (VELLOSO E LOPES, 2011). Dessa forma, a ABNT NBR 6122 conceitua o efeito de grupo como a interação entre as diversas estacas (ou tubulões) presentes

no grupo no processo de transmissão do carregamento aplicado ao terreno de fundação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Quando as estacas estão agrupadas próximas poderá ocorrer sobreposição dos campos de tensões (e deformações) do solo pelo atrito lateral e pela base conforme ilustração da Figura 5. Dessa forma, as elevadas tensões sobrepostas podem proporcionar a ruptura por cisalhamento ou recalques excessivos (BOWLES, 1997). Segundo Chan (2006), o comportamento do grupo de estacas devido à sobreposição dos campos de tensões e deformações são influenciados pelo método executivo (cravada ou escavada), modo dominante de transferência de carga (pelo fuste ou pela base), natureza dos materiais de fundação (tipo de solo ou rocha, compacidade ou consistência, estratigrafia, peso específico, entre outros), localização tridimensional das estacas (espaçamentos entre estacas e a verticalidade das mesmas), presença ou não de bloco de coroamento e, rigidez relativa da estrutura, estacas e terreno de fundação.

Figura 5 – Tensões na massa de solo ocasionada por grupo de estacas



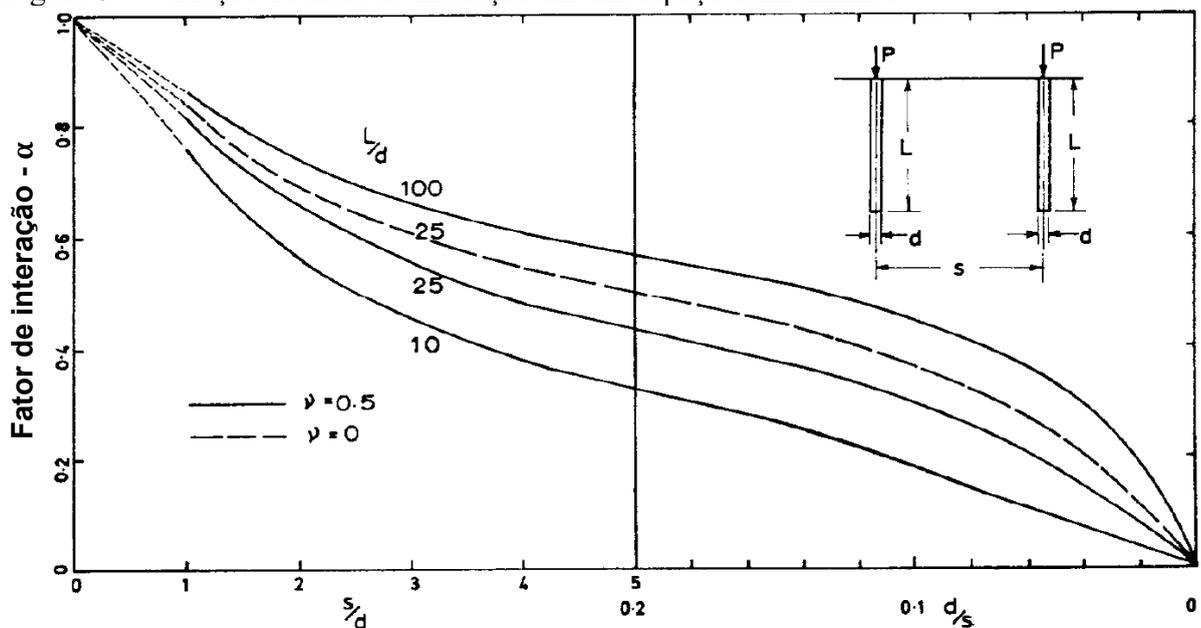
Fonte: Bowles (1997)

Poulos (1968) realizou um estudo paramétrico relacionado a recalques em grupos de estacas, inicialmente de duas estacas carregadas majoritariamente pelo fuste (estacas flutuantes), estendendo-se a casos gerais de estacas em grupo considerando blocos de estacas

perfeitamente rígidos e blocos perfeitamente flexíveis, considerando comportamento elástico, base do bloco acima da superfície do solo e as estacas incompressíveis, tendo maior aplicabilidade em solos de argila mole. As análises basearam-se na definição fator de interação α conforme Equação 1 e a razão do espaçamento pelo diâmetro. A Figura 6 apresenta o comportamento do fator de interação pela razão espaçamento por diâmetro para diferentes razões comprimento por diâmetro das estacas em um espaço semi-infinito, onde L é o comprimento da estaca, d é o diâmetro da estaca, P é a carga no topo da estaca, s é o espaçamento entre estacas e ν é o coeficiente de Poisson.

$$\alpha = \frac{\text{recalque adicional devido estaca adjacente}}{\text{recalque da estaca devido seu próprio carregamento}} \quad (1)$$

Figura 6 – Variação do fator de interação em um espaço semi-infinito



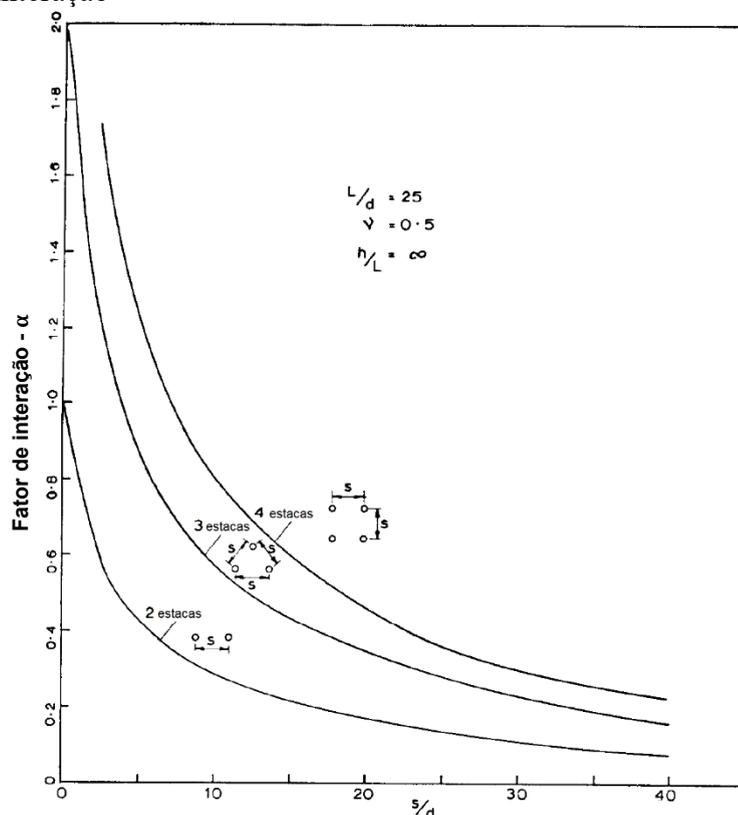
Poulos (1968)

Observa-se que o fator de interação decresce com o aumento do espaçamento das estacas, diminuindo assim o recalque adicional provocado pelo efeito de grupo, além disso observa-se que estacas mais esbeltas (relação L/d maiores) apresentam maior fator de interação, bem como solos com menores coeficientes de Poisson. Vale mencionar que o fator de interação também varia com a espessura da camada de solo (h) apresentando maiores valores para maiores relações h/L .

Comparando grupos de 2, 3 e 4 estacas dispostas simetricamente, Poulos (1968) observou que o fator de interação aumenta com o aumento do número de estacas para um

determinado espaçamento e que o fator de interação no grupo de 3 estacas é aproximadamente o dobro do fator de interação no grupo de 2 estacas, e que o recalque adicional da quarta estaca no grupo apresenta um incremento de fator de interação menor, conforme pode ser observado na Figura 7. Além disso, estudando grupos de 4, 9, 16 e 25 estacas, Poulos (1968) afirma que a quantidade de estacas, sob largura do grupo de estacas pré-definido (distância entre as estacas mais externas do grupo), não influencia significativamente na redução dos recalques, sendo preferível para um considerável intervalo de espaçamentos, a adoção de um menor número de estacas mais espaçadas.

Figura 7 – Influência do número de estacas no fator de interação



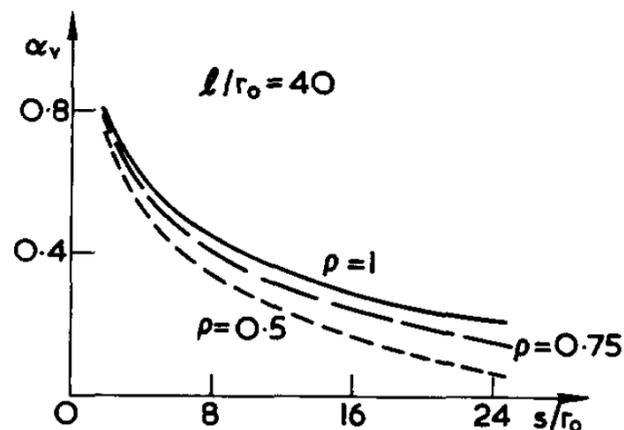
Poulos (1968)

Poulos e Mattes (1971) propõem uma solução para distribuição de carga e recalques em grupos de estacas quadradas baseadas em estacas flutuantes e estacas que suportam pela resistência de ponta em solos que se configuram com comportamento elástico perfeitamente plástico a partir do fator de rigidez da estaca, ou rigidez relativa solo-estaca, o qual define-se como a razão entre os módulos de elasticidade da estaca e do solo. Em estacas que resistem a maior parte pela ponta, a tendência geral é que o fator de interação aumente com a redução da rigidez relativa (estacas mais compressíveis) causando menor uniformidade de carregamento

nas estacas do grupo, o inverso ocorre com as estacas flutuantes, excetuando-se no caso de estacas muito delgadas e compressíveis. Além disso, observou-se que assim como nas estacas flutuantes, nas estacas que resistem grande parte pela base, as estacas mais delgadas apresentam maiores fator de interação.

Comparando a interação entre estacas flutuantes em perfis de solo homogêneo e não homogêneo com aumento do módulo de elasticidade do solo linear com a profundidade, Poulos (1980) afirma que o fator de interação em solo não homogêneo é da ordem de 75 a 80% do previsto no solo homogêneo. De igual modo, a mesma tendência foi observada por Randolph e Wroth (1979) conforme visto na Figura 8, os quais definem o grau de homogeneidade ρ como a razão entre o módulo de cisalhamento na cota do ponto médio do comprimento da estaca e da base da estaca, onde valores próximos a unidade refletem condições mais homogêneas.

Figura 8 – Fator de interação em função do grau de homogeneidade



Randolph e Wroth (1979)

Enquanto o fator de interação está associado a recalques em grupos de estacas, o fator de eficiência relaciona-se à capacidade de carga do sistema solo-fundação. Desta forma, o efeito de grupo pode ser benéfico na capacidade de suporte, apresentando valores superiores a unidade, característico de estacas cravadas em areias fofas pouco espaçadas, ou pode apresentar baixa eficiência, característico de estacas cravadas em argilas para pequenos espaçamentos, sendo necessária a análise do comportamento separadamente para solos granulares e finos (VELLOSO E LOPES, 2010).

2.1.4 Métodos de cálculo de recalques em grupo de estacas

Os métodos de cálculo de recalques em grupo de estacas podem ser divididos em métodos empíricos, analíticos e numéricos. Os métodos empíricos como Skempton (1953) para estacas em areia e Meyerhof (1959) para estacas cravadas em areia consideram que o recalque do grupo de estacas é função da configuração espacial das estacas no grupo e diretamente proporcional ao recalque de uma estaca isolada conforme visto nas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$\frac{\rho_g}{\rho_i} = \left(\frac{4B_g + 9}{B_g + 12} \right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{\rho_g}{\rho_i} = \frac{\zeta(5 - \zeta/3)}{(1 + 1/n_r)^2} \quad (3)$$

Onde ρ_g é o recalque do grupo, ρ_i é o recalque da estaca isolada sob sua parcela de carga no grupo, B_g é a dimensão transversal (largura) do grupo de estacas em pés, ζ é a relação espaçamento por diâmetro das estacas e n_r é a quantidade de linhas de estacas em um bloco quadrado.

Os métodos analíticos, por sua vez, conforme proposto por Poulos e colaboradores (Poulos, 1968; Poulos e Davis, 1980; Poulos, 1989) e Randolph e Wroth (1979) são baseados no princípio da sobreposição dos campos de deslocamentos baseado na elasticidade do solo, onde há uma parcela de aumento do recalque de cada estaca influenciado pelo campo de deslocamentos das demais estacas no grupo. A Equação 4 pode ser utilizada para o cálculo do recalque de uma estaca no grupo de estacas idênticas conforme Poulos e colaboradores (Poulos, 1968; Poulos e Davis, 1980; Poulos, 1989), onde o fator de interação α' é o fator de interação corrigido levando em consideração a espessura da camada de solo, alargamento da base, coeficiente de Poisson, variação do módulo de elasticidade com a profundidade e presença de solo mais rígido no nível da base, sendo o recalque do grupo de estacas calculado a partir da consideração do bloco de coroamento flexível (carregamento igual em todas as estacas) ou rígido (mesmo recalque para todas as estacas).

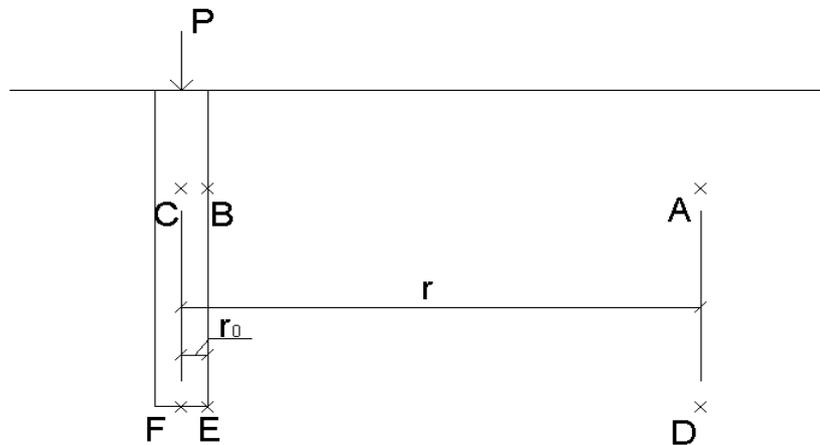
$$w_i = w_1 \left[\sum_{j \neq i} (P_j \alpha'_{ij}) + P_i \right] \quad (4)$$

Onde w_i é o recalque da estaca i , w_1 é o recalque da estaca isolada sob carga unitária, P_i é a carga no topo da estaca i e α'_{ij} é o fator de interação corrigido entre as estacas i e j conforme Poulos e Davis (1980).

Randolph e Wroth (1979) propuseram uma solução analítica para recalque de grupo de estacas a partir da determinação dos campos de deslocamentos gerados por uma estaca carregada verticalmente, onde as estacas do grupo são embutidas na mesma profundidade, presumindo constância ou uma variação linear do módulo de cisalhamento ao longo da profundidade, coeficiente de Poisson constante e, características carga-deformação distintas para o fuste e a base.

O cálculo do deslocamento, conforme Figura 9, de um ponto A distando r do eixo da estaca é dado pelas Equações 5 e 6. Para um ponto D distante r do ponto F situado no nível da base da estaca o deslocamento vertical é dado pela Equação 7 e para um ponto E no contorno da estaca, a base da estaca atua punccionando o solo localizado logo abaixo e o deslocamento é dado pela solução de Boussinesq conforme Equação 8.

Figura 9 – Desenho esquemático para cálculo do deslocamento



Fonte: Elaborado pelo Autor

$$w(r) = \frac{\tau_0 r_0}{G_s} \ln\left(\frac{r_m}{r}\right), \quad r_0 \leq r \leq r_m \quad (5)$$

$$w(r) = 0, \quad r > r_m \quad (6)$$

$$w_b(r) = \frac{Q_b(1 - \nu_b)}{2\pi r G_b} \quad (7)$$

$$w_b = \frac{Q_b(1 - \nu_b)}{4r_0 G_b} \quad (8)$$

Onde $w(r)$ é o deslocamento vertical de um ponto distante r do eixo da estaca, $w_b(r)$ é o deslocamento vertical de um ponto distante r do eixo da estaca no nível da ponta, τ_0 é a tensão de cisalhamento no nível de análise (ponto B), r_0 é o raio da estaca, G_s e G_b são os módulos de cisalhamento do solo no nível do fuste e da base da estaca, respectivamente, r_m é o raio de influência limite definido conforme Equações 9 e 10, Q_b e w_b são, respectivamente, a carga axial do solo à estaca e deslocamento da estaca no nível da base da estaca, e ν_b é o coeficiente de Poisson no nível da base da estaca.

$$r_m = 2,5\rho l(1 - \nu) \quad (9)$$

$$\rho = G_{1/2}/G_1 \quad (10)$$

Onde l é o comprimento da estaca, ρ é o grau de homogeneidade e, $G_{1/2}$ e G_1 são os módulos de cisalhamento na profundidade média e na base da estaca, respectivamente.

Desprezando o efeito do encurtamento elástico, o comportamento carga-recalque de estacas rígidas pelo método de Randolph e Wroth (1979) pode ser dado a partir das Equações 5 a 10. As Equações 11 a 14 mostram o desenvolvimento da solução analítica para o caso de duas estacas em grupo.

$$\left(\frac{P}{G_1 r_0 w_t}\right)_2 = \left(\frac{Q_s}{G_1 r_0 w_s}\right) + \left(\frac{Q_b}{G_1 r_0 w_b}\right) \quad (11)$$

$$w_s = \frac{\tau_0 r_0}{G_{1/2}} \left[\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) + \ln\left(\frac{r_m}{s}\right) \right] = \frac{Q_s}{2\pi l G_{1/2}} \left[\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) + \ln\left(\frac{r_m}{s}\right) \right] \quad (12)$$

$$w_b = \frac{Q_b(1 - \nu)}{4r_0 G_1} \left(1 + \frac{2r_0}{\pi s} \right) \quad (13)$$

$$\left(\frac{P}{G_1 r_0 w_t}\right)_2 = \frac{4}{1 - \nu} \frac{\pi s}{2r_0 + \pi s} + \frac{2\pi\rho}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) + \ln\left(\frac{r_m}{s}\right)} \frac{l}{r_0} \quad (14)$$

Onde Q_s é a carga mobilizada pelo fuste da estaca.

Para estacas compressíveis, o método de Randolph e Wroth (1979) prescreve um procedimento iterativo conforme descritos nos seguintes passos:

Considera-se inicialmente as estacas rígidas (deslocamento equivalente ao longo de toda a estaca) obtendo os valores de carga no topo e na base;

Estima-se os novos valores de deslocamento da base (w_b) e deslocamento médio do fuste (w_s) dados pelas Equações 15 e 16, respectivamente, para o caso do solo com módulo de cisalhamento proporcional a profundidade.

$$w_t - w_b = \frac{1}{3\pi r_0^2 E_p} (2P + Q_b) \quad (15)$$

$$w_s \approx \frac{1}{3} (2w_b + w_t) \quad (16)$$

Onde w_t é o deslocamento do topo da estaca e E_p é o módulo de elasticidade da estaca.

Esses valores de deslocamentos são substituídos nas equações para determinação do campo de deslocamento como, por exemplo nas Equações 12 e 13 para obtenção de uma nova solução, repetindo-se o procedimento até um critério de convergência satisfatória.

Mylonakis e Gazetas (1998) desenvolveram uma formulação analítica geral baseado no modelo de Winkler de reação do solo para a interação entre duas estacas instaladas em solo com múltiplas camadas. Esse método considera que os fatores de interação não dependem apenas dos campos de deslocamento (livre) gerado em torno da estaca carregada conforme proposto por Randolph e Wroth (1979), mas complementa sua teoria por meio de uma função de atenuação incorporado ao campo de deslocamento livre devido a rigidez axial que a adição de outra estaca promove, a qual, tende a reduzir os deslocamentos. Além disso, os fatores de interação são tomados separadamente para o fuste e a base da estaca conforme Equações 17 e 18, respectivamente.

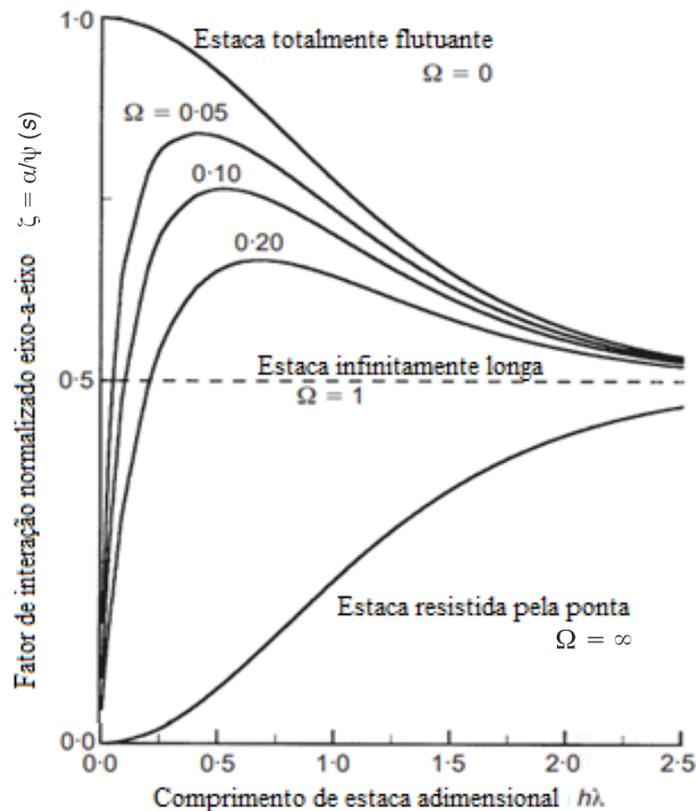
$$\alpha_s = \psi_s(s) \zeta_s(h_1 \lambda_1, \dots, h_i \lambda_i, \dots, h_n \lambda_n, \Omega) \quad (17)$$

$$\alpha_b = \psi_b(s) \zeta_b(h_1 \lambda_1, \dots, h_i \lambda_i, \dots, h_n \lambda_n, \Omega) \quad (18)$$

Onde α_s e α_b são os fatores de interação para o fuste e para base, respectivamente, ψ_s e ψ_b são os fatores de interação do fuste e da base considerando apenas o campo de deslocamento livre proposto por Randolph e Wroth (1979), ζ_s e ζ_b são os fatores de atenuação no fuste e na base devido a rigidez da estaca adjacente, h_i é a espessura da i -ésima camada de solo ao longo do fuste da estaca, λ_i é o parâmetro de transferência de carga de Winkler da i -ésima camada de solo e Ω é a rigidez estaca-base adimensional.

Mylonakis e Gazetas (1998) obtiveram que interação base-base das estacas são insignificantes, ocorrendo o processo de atenuação principalmente ao longo do fuste da estaca. A Figura 10 mostra a variação do fator de atenuação no fuste para diferentes configurações de estacas.

Figura 10 – Fator de atenuação no fuste em camada de solo homogêneo



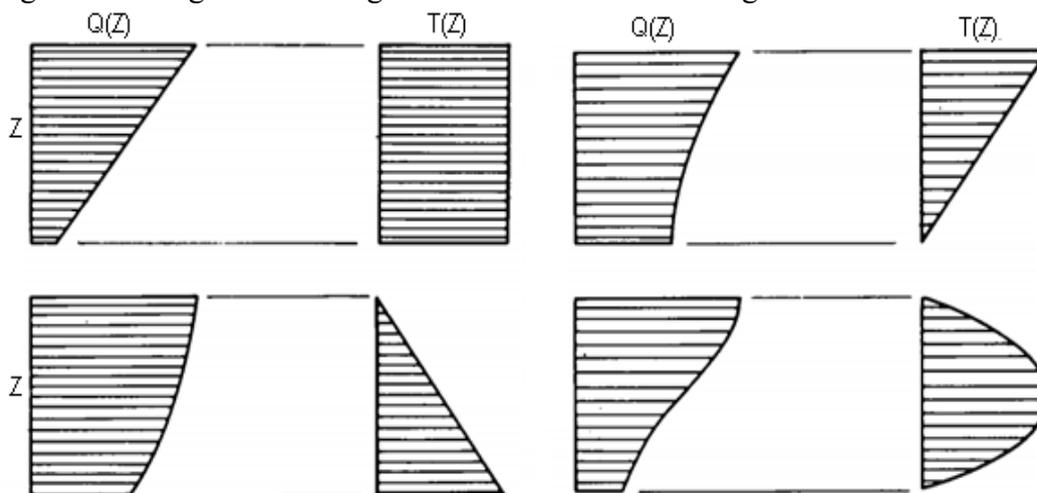
Mylonakis e Gazetas (1998)

2.2 Métodos de transferência de carga em estaca isolada

Além dos métodos empíricos e analíticos para obtenção de recalques, destaca-se os métodos de transferência de carga calculados por métodos numéricos para obtenção da curva carga-recalque aplicada a estacas isoladas ou grupo de estacas.

O mecanismo de transferência de carga da estaca ao solo de fundação proporciona, segundo Velloso e Lopes (2010), uma reação do solo à estaca por meio de tensões de cisalhamento no fuste da estaca devido ao atrito lateral na interface estaca-solo e tensões normais na ponta da estaca. Dessa forma, os métodos de transferência de carga preveem a mobilização do eixo e da ponta da estaca através de funções de distribuição de carga axial ao longo da estaca, permitindo a construção de funções que relacionam a resistência ao atrito lateral mobilizado unitário em um determinado trecho e a resistência de base unitária com o deslocamento vertical, denominados de funções de transferência de carga $t-z$ e $q-z$, respectivamente. A Figura 11 mostra diagramas típicos de carga axial e atrito lateral ao longo da profundidade.

Figura 11 – diagramas de carga axial e atrito lateral ao longo da estaca



Fonte: Vesic (1977)

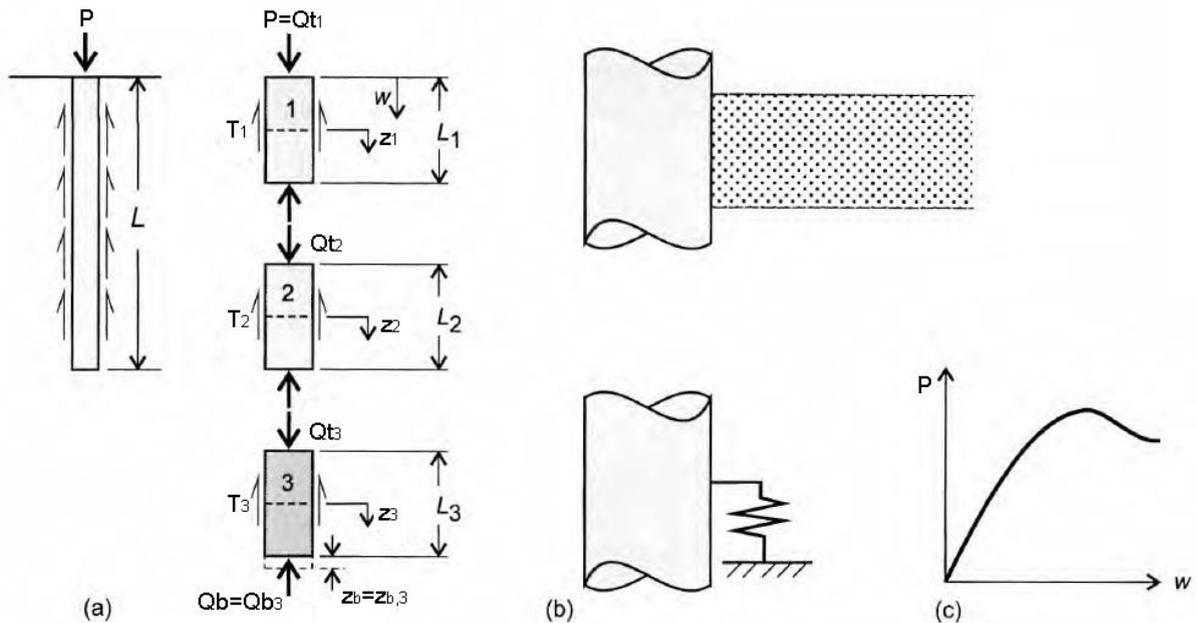
Onde Q é a carga axial na estaca, T é a força cisalhante devido ao atrito lateral mobilizado e Z é a profundidade.

Para obtenção da distribuição da carga axial ao longo da profundidade deve-se instrumentar estacas por meio de medidores de deformação (*strain gauges*) e/ou indicadores (*telltales*), onde este primeiro quando calibrado permite também obter a tensão na estaca no nível em que o instrumento estiver instalado, obtendo um conjunto discreto de cargas axiais ao longo da estaca para diferentes estágios de carregamento no topo da estaca (BOWLES, 1997). Dessa forma, a diferença entre duas leituras consecutivas de carga axial fornece a resistência

ao atrito lateral mobilizado para o referido trecho e a carga axial na ponta da estaca é a resistência de ponta mobilizada.

As funções de transferência de carga representam, portanto, a ação do solo à estaca, sendo a estaca representada por segmentos unidimensionais, a partir de um modelo constituído de molas não-lineares conforme Figura 12 (VELLOSO E LOPES, 2010).

Figura 12 – Transferência de carga: a) divisão da estaca em segmentos; b) segmento da estaca e modelo de mola proposto; c) comportamento genérico de uma mola não-linear



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Onde $Q_{t,n}$ e $Q_{b,n}$ são as cargas axiais de topo e base do n -ésimo segmento da estaca, respectivamente e, z_n e $z_{b,n}$ são os deslocamentos axiais médio e de base do n -ésimo segmento da estaca, respectivamente.

Coyle e Reese (1966) coletaram resultados de testes de instrumentação de campo e laboratoriais em modelos reduzidos de estacas em argilas propondo um método baseado na relação transferência de carga e resistência ao cisalhamento do solo em função do deslocamento da estaca. O procedimento iterativo proposto por Coyle e Reese (1966) também é a base para cálculos de métodos mais recentes de transferência de carga, e pode ser descrito nas seguintes etapas:

1. Dividir toda a estaca em n segmentos numerados em ordem crescente do topo até a ponta;
2. Supor um pequeno deslocamento na base da estaca (z_b);

3. Calcular a carga mobilizada na base da estaca Q_b em função do deslocamento da ponta a partir da consideração de uma mola na ponta da estaca ou solução da teoria da elasticidade conforme Equação 19. Onde E_s é o módulo de elasticidade do solo abaixo da ponta da estaca, mI_s é o fator de forma, I_F é o fator de incorporação da razão L/D e F_1 é o fator de redução devido transferência de carga.

$$Q_b = \frac{DE_s z_b \pi}{1 - \nu^2} \frac{1}{4 m I_s I_F F_1} \quad (19)$$

4. Calcular o deslocamento médio do segmento inferior. Para uma primeira tentativa, pode-se assumir o deslocamento médio igual ao deslocamento da ponta do segmento ($z_n = z_{b,n}$). A partir da curva de transferência de carga t - z , determina-se, para o segmento da estaca, a resistência ao atrito lateral mobilizado unitário t_n , obtendo a carga de topo $Q_{t,n}$ através do equilíbrio de forças verticais conforme Equação 20. Onde T_n é a força cisalhante devido o atrito lateral mobilizado do n -ésimo segmento, t_n é a resistência ao atrito lateral mobilizado unitário do n -ésimo segmento e U é o perímetro da seção transversal da estaca.

$$Q_{t,n} = Q_{b,n} + T_n = Q_b + t_n L_n U \quad (20)$$

5. Recalcular o deslocamento médio do segmento adicionando, conforme Equação 21, o efeito do encurtamento elástico do material da estaca definido pela Equação 22, supondo que a distribuição de carga axial em um segmento é linear com a profundidade. Onde $z_{e,n}$ é o encurtamento elástico do n -ésimo segmento A é a área da seção transversal e $Q_{méd,n}$ é a carga axial média no n -ésimo segmento.

$$z'_n = z_n + z_{e,n} \quad (21)$$

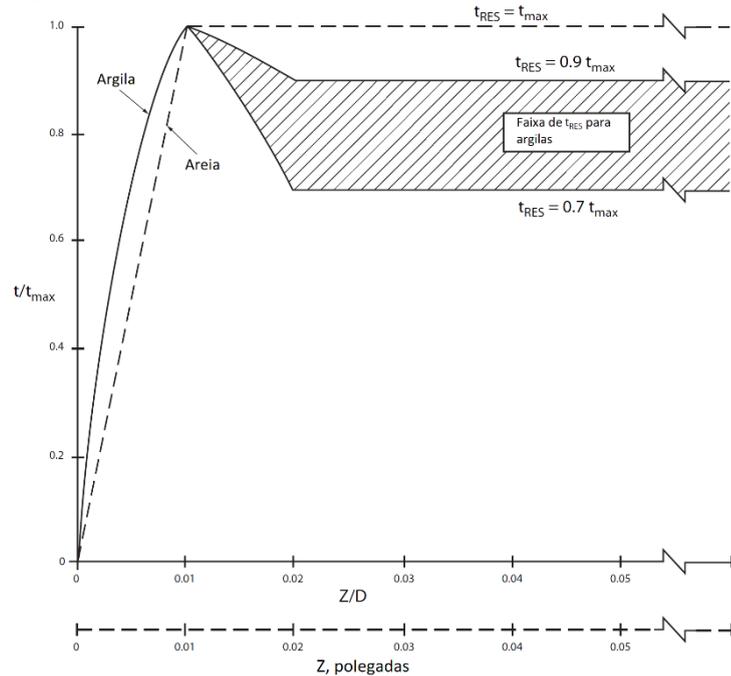
$$z_{e,n} = \frac{PL}{AE} = \left(\frac{Q_{méd,n} + Q_{b,n}}{2} \right) \frac{L_n}{2} \frac{1}{AE_p}; \quad Q_{méd,n} = \frac{Q_{t,n} + Q_{b,n}}{2} \quad (22)$$

6. Repetir os passos 4 e 5 até convergência satisfatória do deslocamento médio do segmento (z_n) para o último segmento da estaca. Prossiga para o segmento imediatamente acima seguindo os passos 4 e 5 até o segmento do topo da estaca, sabendo-se que a carga e o deslocamento da base de um segmento são iguais a carga e deslocamento do topo do segmento imediatamente abaixo do segmento em questão.

Os métodos de transferência de carga se diferenciam principalmente no que tange ao aprimoramento do procedimento de cálculo e das curvas de transferência de carga. As leis de Cambeftort (1964) afirmam que as relações de atrito lateral mobilizado e reação da base da estaca (curvas t-z e q-z) crescem linearmente com o deslocamento da estaca até um valor máximo, quando há plastificação no trecho analisado, seguindo comportamento elástico perfeitamente plástico e um processo de ruptura progressiva do sistema solo-estaca.

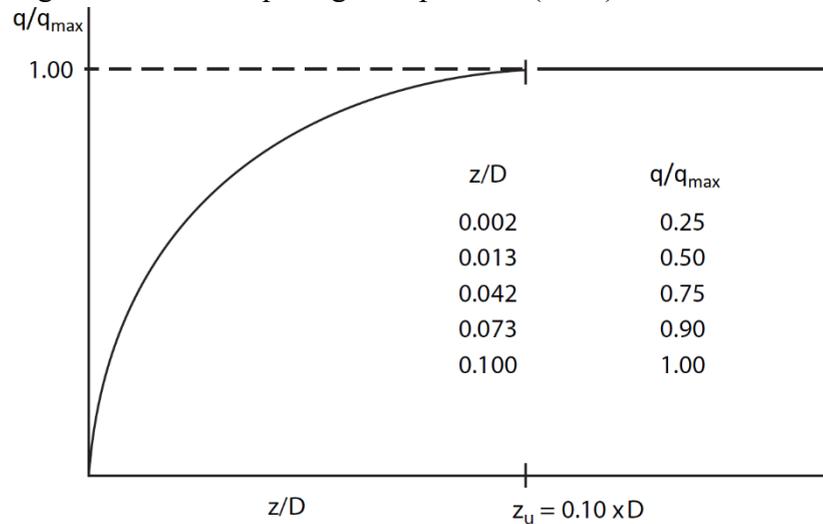
Kraft, Ray e Kagawa (1981) propuseram um procedimento teórico para estimativa da curva de transferência de carga “t-z” para movimento de estacas submetidas a carregamentos axiais, admitindo comportamento elástico até tensão de máxima mobilização do atrito lateral e simulação laboratorial para tensões pós-pico. Na ausência de critério mais definitivos, o Instituto de Petróleo Americano - API (2000), recomenda para aplicação em plataformas fixa *offshore*, curvas t-z e q-z para solos não carbonáticos conforme descritos nas Figura 13 e Figura 14, respectivamente. API (2000) prevê um comportamento elástico perfeitamente plástico da curva q-z em areias e, em argilas, um trecho curvo até resistência de pico e posteriormente uma redução de 10 a 30% descrito como a resistência residual, além disso, há mobilização total da resistência de ponta quando há deslocamento de 10% do diâmetro. As resistências unitárias de máxima mobilização do atrito lateral e de base, $t_{máx}$ e $q_{máx}$, são calculados segundo API (2000) em função dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, tensões geostáticas, classificação do solo e densidade relativa em areias.

Figura 13 – Curva t-z sugerida por API (2000)



Fonte: Adaptado de API (2000)

Figura 14 – Curva q-z sugerida por API (2000)



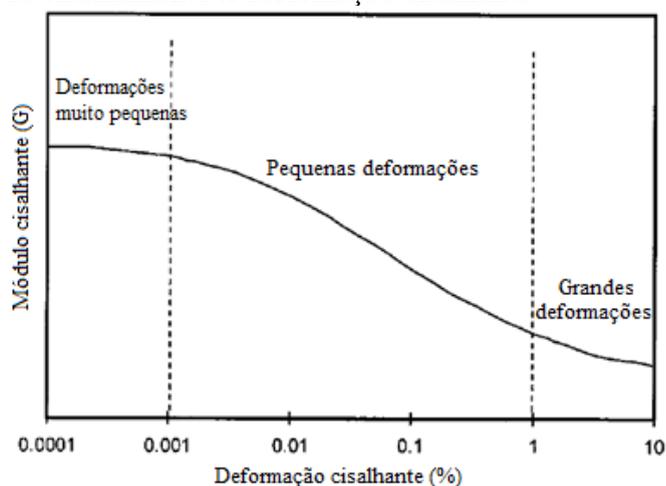
Fonte: Adaptado de API (2000)

Onde z é o deslocamento axial da estaca no ponto analisado, t é a resistência ao atrito lateral mobilizado, t_{\max} é a resistência de máxima mobilização do atrito lateral, q é a resistência de ponta mobilizada e q_{\max} é a resistência máxima de ponta.

Fleming (1992) propôs um método de previsão de comportamento de estacas isoladas descrevendo o comportamento da resistência lateral e de ponta mobilizadas como funções hiperbólicas do deslocamento, podendo ser acoplado o deslocamento devido ao encurtamento elástico em estacas flexíveis.

Zhu e Chang (2002) propuseram uma abordagem teórica para estimativa da curva t-z levando em consideração características elásticas não lineares e a degradação do módulo de cisalhamento em estacas escavadas em solos residuais ou rochas meteorizadas a partir de ensaios pressiométricos. O módulo de cisalhamento segue um comportamento não linear em relação a deformação cisalhante conforme Figura 15, sendo necessários diferentes valores de módulo de cisalhamento de acordo com o nível de deformação submetido. O procedimento de cálculo proposto por Zhu e Chang (2002) é uma modificação da solução de Randolph e Wroth (1978) conforme Equações 5 e 6, associado a equação de degradação do módulo de cisalhamento de Fahey e Carter (1993) descrito na Equação 23.

Figura 15 – Comportamento típico da curva módulo de cisalhamento x deformação cisalhante



Fonte: Zhu e Chang (2002)

$$\frac{G}{G_{\text{máx}}} = 1 - F_1 \left(\frac{\tau}{\tau_{\text{máx}}} \right)^{F_2} \quad (23)$$

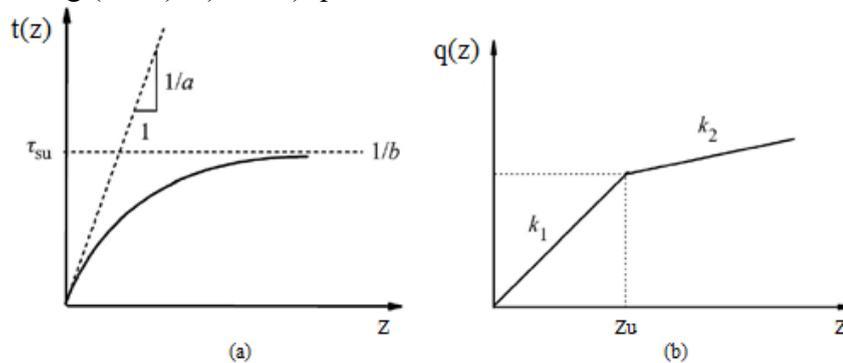
Onde $G_{\text{máx}}$ é o módulo de cisalhamento máximo do solo, τ e $\tau_{\text{máx}}$ são as tensões de cisalhamento atuante e máximo e, F_1 e F_2 são os parâmetros de ajustes da curva.

Liu *et al.* (2004) desenvolveram um modelo elasto-plástico com amolecimento para interação da resistência ao atrito lateral e deslocamento de estaca isolada e, um modelo tri-linear totalmente plástico para interação da carga axial na base da estaca pelo deslocamento de ponta. Liu *et al.* (2004) concluíram que para areias e argilas duras é razoável a utilização de um modelo hiperbólico para interação fuste-solo e que em camada de base composta por solo duro ou rocha é razoável a admissão de modelo tri-linear ou hiperbólico totalmente plástico para descrever a interação de base da estaca com deslocamento.

Nanda e Patra (2014) desenvolveram uma abordagem analítica de previsão da curva de transferência de carga t - z considerando comportamento tensão-deformação não linear, amolecimento ou endurecimento da interação solo-estaca e previsão do comportamento de campo a partir de ensaios realizados em laboratório. O modelo proposto tem ampla aplicação para diferentes tipos de solo e métodos de execução de estaca, Nanda e Patra (2014) consideram um modelo elástico para a resistência de ponta da estaca dada pela solução de Boussinesq conforme Equação 8, tornando esse método mais relevante para estacas longas, a qual a contribuição da carga de ponta na capacidade total da estaca é mínima.

Zhang e Zhang (2012) propuseram um modelo hiperbólico para curva t - z e um modelo bilinear de dois estágios de carregamento (elasto-plástico com endurecimento) para curva q - z . As curvas típicas de transferência de carga estão mostradas na Figura 16, os parâmetros de ajustes das curvas – a , b , k_1 e k_2 – são dados conforme Equações 24 a 27, onde a e k_1 estão relacionados a rigidez inicial no fuste e na base da estaca e são dados conforme a solução analítica de Randolph e Wroth (1978), b está relacionado a ruptura local no fuste e k_2 ao estágio de endurecimento do comportamento da ponta da estaca.

Figura 16 – Curvas de transferência de carga conforme Zhang e Zhang (2012): a) t - z ; b) q - z



Fonte: Zhang e Zhang (2012)

$$a = \frac{r_0}{G} \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right) \quad (24)$$

$$b = \frac{1}{\tau_{su}} = \frac{R_{sf}}{t_{m\acute{a}x}} \quad (25)$$

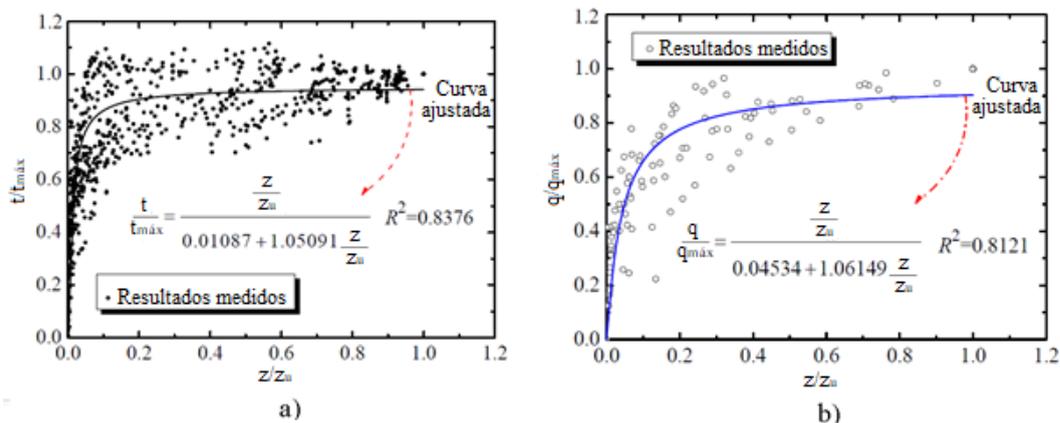
$$k_1 = \frac{4G_b}{\pi r_0 (1 - \nu_b)} \quad (26)$$

$$k_2 = \frac{\Delta P}{\left(\Delta w - \frac{\Delta PL}{E_p A_p}\right) A_b} \quad (27)$$

Onde τ_{su} é a resistência última ao atrito lateral assintótica, R_{sf} é a razão de falha no fuste que conforme Clough and Duncan (1971) pode variar entre 0,8 e 0,95 e, ΔP e Δw são, respectivamente, o acréscimo de carga e recalque no topo da estaca no segundo estágio de carregamento.

Posteriormente, Zhang *et al.* (2014) propuseram um método simplificado de transferência de carga considerando modelo hiperbólico de ambas as curvas de transferência de carga, tendências observadas a partir de 7 provas de carga em estacas instrumentadas coletando o total de 808 pontos referente a tensão de cisalhamento mobilizado e deslocamento do referido segmento da estaca (curva t-z) e 108 pontos dados por 14 provas de carga em estacas instrumentadas para observação da relação resistência de ponta mobilizada por deslocamento da ponta. Os dados experimentais e o ajuste às curvas hiperbólicas constam na Figura 17. As curvas de transferência de carga são apresentadas nas Equações 28 e 29.

Figura 17 – Relação experimental e teórica das curvas de transferência de carga:
a) t-z; b) q-z



Fonte: Zhang *et al.* (2014)

$$t = \frac{z}{a + bz} \quad (28)$$

$$q = \frac{z}{f + gz} \quad (29)$$

Onde os parâmetros de ajustes da curva t-z, a e b, são dados conforme Equações 24 e 25, respectivamente, e os parâmetros de ajuste da curva q-z, f e g, são definidos conforme Equações 30 e 31, respectivamente. Em abordagem analítica é comum a determinação de $t_{\text{máx}}$ com base em fórmulas que usam parâmetros do solo derivados de ensaios de laboratório e de campo ou através do método de tensões efetivas baseado na lei de atrito de Coulomb (Equação 32) que pode ser escrita conforme Equação 33 dado por Yang *et al.* (2006). Além disso, o cálculo de $q_{\text{máx}}$ pode ser determinado a partir do ângulo de atrito do solo circundante e do acréscimo de tensão efetiva vertical na base da estaca (ZHANG *et al.*, 2014).

$$f = 1/k_1 \quad (30)$$

$$g = \frac{1}{q_{\text{bu}}} = \frac{R_{\text{bf}}}{q_{\text{máx}}} \quad (31)$$

$$t_{\text{máx}} = K\sigma'_v \tan \delta \quad (32)$$

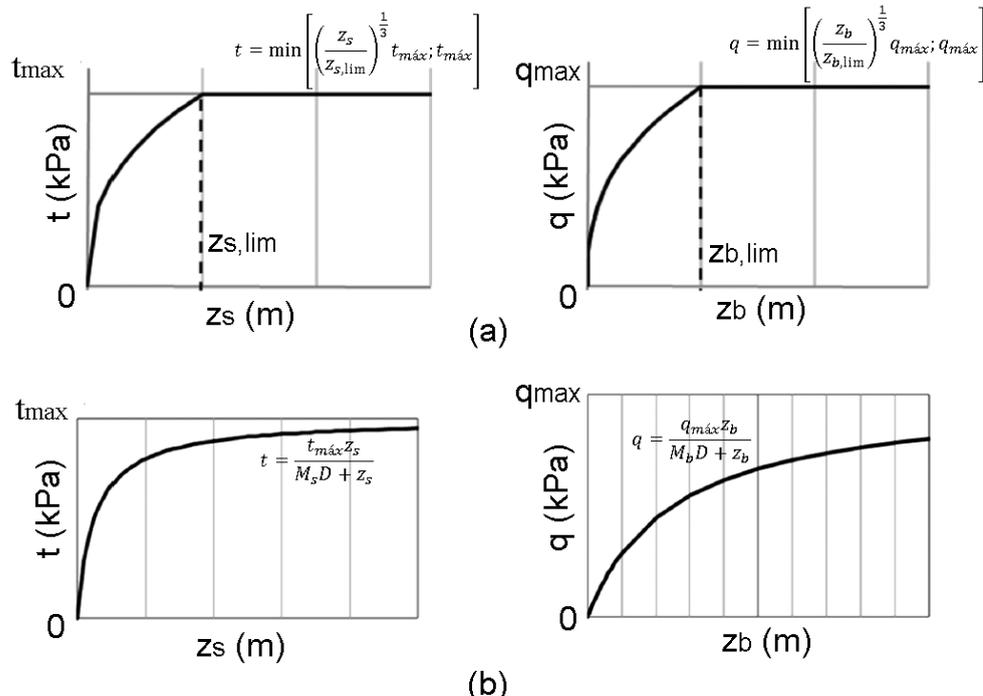
$$t_{\text{máx}} = K_0 \left(\frac{K}{K_0} \right) \tan \left[\phi' \left(\frac{\delta}{\phi'} \right) \right] \sigma'_v \quad (33)$$

Onde q_{bu} é a resistência última ao atrito lateral assintótica, R_{bf} é a razão de falha na base da estaca a qual Zhang *et al.* (2016) sugere valores entre 0,8 e 0,95, K é o coeficiente de pressão lateral, σ'_v é o acréscimo de tensão efetiva vertical, δ é o ângulo de atrito da interface estaca-solo, K_0 é o coeficiente de empuxo no repouso e ϕ' é o ângulo de atrito interno do solo circundante.

Bohn, Santos e Frank (2016) coletaram dados de 50 provas de carga instrumentadas sob diversos métodos executivos e geometria, e diferentes perfis de solo em localizações geográficas distintas, propondo curvas de transferência de carga para o fuste e a base da estaca ajustadas a comportamento de função raiz cúbica (até máxima mobilização da resistência) e hiperbólica. As curvas t-z e q-z propostas foram descritas, basicamente, em termos do diâmetro da estaca, resistência mobilizada última e dos parâmetros de deformação M_s e M_b , sendo estes últimos propostos por Bohn, Santos e Frank (2016). A validação das propostas foi efetuada a partir de 72 provas de carga não necessariamente instrumentadas, com estimativa das resistências unitárias últimas de estacas não instrumentadas a partir de resultados de ensaios de campo do tipo ensaio de penetração do cone (CPT) ou ensaio pressiométrico (PMT). Bohn,

Santos e Frank (2016) constatam que ambas as funções apresentam boa concordância, e que as curvas hiperbólicas se apresentam vantajosas por apresentar rigidez inicial finita e valores de resistência nunca alcançados, conforme é visto na prática. A Figura 18 apresenta os gráficos e as equações típicas das curvas de transferência de carga desenvolvidos por Bohn, Santos e Frank (2016), sendo os parâmetros de deformação do fuste e da base e os deslocamentos limite de máxima mobilização da resistência lateral e da base – M_s e M_b , $z_{s,lim}$ e $z_{b,lim}$, respectivamente, calibrados a partir do banco de dados levantado de acordo com o método executivo e o material adjacente à estaca. A Tabela 1 apresenta os valores propostos de M_s e M_b propostos por Bohn, Santos e Frank (2016).

Figura 18 – Curvas de transferência de carga de Bohn, Santos e Frank (2016):
a) curvas de raiz cúbica; b) curvas hiperbólicas



Fonte: Adaptado de Bohn, Santos e Frank (2016)

Tabela 1 – Valores dos parâmetros M_s e M_b propostos por Bohn, Santos e Frank (2016)

Tipo de Solo	Estacas cravadas		Estacas escavadas	
	M_s	M_b	M_s	M_b
Solo fino	0,0041	0,0055	0,0028	0,0086
Solo granular	0,0050	0,0150	0,0032	0,0100
Rocha branda	0,0068	0,0125	0,0026	0,0147

Fonte: Elaborado pelo Autor

Bezerra *et al.* (2021) realizaram um estudo comparativo de previsão de recalques obtidos por métodos de transferência de carga de Coyle e Reese (1966) e Leis de Cambefort

modificadas por Massad (1992), com resultados experimentais de uma estaca escavada em um solo granular típico de Fortaleza, Ceará. Na utilização do método de Coyle e Reese (1966), Bezerra *et al.* (2021) adotaram distintas metodologias de cálculo, variando o modo de obtenção do módulo de elasticidade do solo através da correlação de Teixeira e Godoy (1996) ou obtido pelo ensaio de compressão triaxial, e a obtenção da curva de tensão de cisalhamento por deslocamento vertical (curva t-z) através da curva proposta pelo Instituto Americano de Petróleo (API) em função do resultado de sondagens à percussão (SPT), do resultado de ensaios de compressão triaxial ou de ensaios de cisalhamento direto. A comparação dos valores previstos e experimentais apontaram uma razoável concordância na zona elástica do comportamento do solo em todas as metodologias, e dentre as metodologias utilizadas no método de Coyle e Reese (1966) para a carga de trabalho, os parâmetros obtidos dos ensaios triaxiais foram os mais convergentes.

2.3 Métodos de transferência de carga em grupos de estacas

O efeito de grupo está diretamente relacionado com os mecanismos de transferência de carga. Estudos recentes como Zhang *et al.* (2014), Zhang *et al.* (2016), Pan *et al.* (2018) e Gomes Filho e Moura (2021) incorporaram a interação estaca-estaca nas curvas de transferência de carga t-z e q-z, a partir de alterações em métodos convencionais de estacas isoladas, do princípio de superposição do campo de deslocamento e de instrumentação em campo de estacas isoladas. Importante mencionar que, até poucas décadas atrás, não se acreditava ser possível usar os métodos de transferência de carga para previsão do comportamento de grupo de estacas, sendo considerado como uma limitação do método, tal como apresentado por Poulos (1980).

Zhang *et al.* (2014) estenderam a abordagem do método de transferência de carga de estacas isoladas para estacas arbitrárias em um grupo de estacas, considerando as interações no fuste e na base para cada estaca individual no grupo os modelos hiperbólicos conforme Equações 28 e 29, adicionando aos parâmetros de ajustes das curvas t-z e q-z, um índice g referente a análise de grupo de estacas. O desenvolvimento do método foi realizado a partir da rigidez das molas não lineares definida como a razão entre a tensão atuante e o deslocamento observado, calculadas a partir da teoria de Randolph e Wroth (1979) descontando a rigidez devido à força de reação no fuste da estaca ao deslocamento livre. As Equações 34 a 37 mostram o desenvolvimento do parâmetro de ajuste a_g da curva t-z.

$$a_g = \frac{1}{k_{si}} = \frac{1}{k_{sii}} + \frac{1}{k_{sij}} - \frac{1}{k'_{sij}} \quad (34)$$

$$k_{sii} = \frac{\tau_s}{z_s} = \frac{G_s}{r_0 \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} \quad (35)$$

$$k_{sij} = \sum_{j \neq i} \frac{G_s}{r_0 \ln\left(\frac{r_m}{r_{ij}}\right)} \quad (36)$$

$$k'_{sij} = \sum_{j \neq i} \frac{G_s r_{ij}}{r_0^2 \ln\left(\frac{r_m}{r_{ij}}\right)} \quad (37)$$

Onde k_{si} é a rigidez inicial no fuste da estaca i , k_{sii} é a rigidez no fuste da estaca i devido próprio carregamento, k_{sij} é a variação da rigidez no fuste da estaca i devido acréscimo de deslocamento provocado pelas estacas vizinhas e k'_{sij} é a rigidez devido a força de reação no fuste da estaca ao deslocamento livre proposto por Randolph e Wroth (1979).

De forma análoga é obtido o parâmetro de ajuste f_g da curva q - z conforme Equações 38 e 39.

$$f_g = \frac{1}{k_{bi}} = \frac{1}{k_{bii}} + \frac{1}{k_{bij}} \quad (38)$$

$$k_{bij} = \frac{2\pi G_b}{(1 - \nu_b) \sum_{j \neq i} 1/r_{ij}} \quad (39)$$

Onde k_{bi} é a rigidez inicial na base da estaca i , k_{bii} é a rigidez na base da estaca i devido próprio carregamento equivalente a k_1 dado na Equação 26 e k_{bij} é a variação da rigidez na base da estaca i devido acréscimo de deslocamento provocado pelas estacas vizinhas.

Os parâmetros de ajuste das curvas de transferência de carga b_g e g_g são numericamente equivalentes aos valores obtidos para estacas isoladas conforme Equações 25 e 31 (ZHANG *et al.*, 2014).

Zhang *et al.* (2016) estendeu o método de transferência de carga para estacas isoladas de Zhang *et al.* (2014) referente ao deslocamento relativo estaca-solo, incorporando à estaca arbitrada, um deslocamento vertical elástico desenvolvido na massa de solo conforme formulação de Randolph e Wroth (1979), induzido pelas demais estacas no grupo conforme podem ser visto nas Equações 40 a 42 para a curva t-z e Equações 43 a 45 para a curva q-z.

$$\Delta z_{si} = \bar{c}t = \left[\sum_{j=1}^n \frac{r_0}{G_s} \ln \left(\frac{r_m}{r_{ij}} \right) - \sum_{j \neq i} \frac{r_0^2}{G_s r_{ij}} \ln \left(\frac{r_m}{r_{ij}} \right) \right] t \quad (40)$$

$$z_{si} = z_{sii} + \Delta z_{si} = \frac{at}{1 - bt} + \bar{c}t \quad (41)$$

$$t = \frac{(a + \bar{c} + bz_s) - \sqrt{(a + \bar{c} + bz_s)^2 - 4b\bar{c}z_s}}{2b\bar{c}} \quad (42)$$

$$\Delta z_{bi} = \bar{C}q = \left[\frac{1 - \nu_b}{2\pi G_b} \sum_{j \neq i} \frac{1}{r_{ij}} \right] q \quad (43)$$

$$z_{bi} = z_{bii} + \Delta z_{bi} = \frac{fq}{1 - gq} + \bar{C}q \quad (44)$$

$$q = \frac{(f + \bar{C} + gz_b) - \sqrt{(f + \bar{C} + gz_b)^2 - 4g\bar{C}z_b}}{2g\bar{C}} \quad (45)$$

Onde Δz_{si} e Δz_{bi} são respectivamente, os deslocamentos médios do fuste e da base de um elemento da estaca i devido exclusivamente a interação com as demais estacas do grupo, z_{si} e z_{bi} são os deslocamentos médios do fuste e da base de um elemento da estaca i e, z_{sii} e z_{bii} são os deslocamentos médios do fuste e da base de um elemento da estaca i devido o próprio carregamento.

Zhang *et al.* (2016) validaram o método a partir dos casos históricos de O'Neill, Hawkins e Mahar (1982) e Koizumi e Ito (1967) concluindo que a relação carga-recalque calculada se apresenta um pouco subestimada nos estágios iniciais, porém não comprometendo

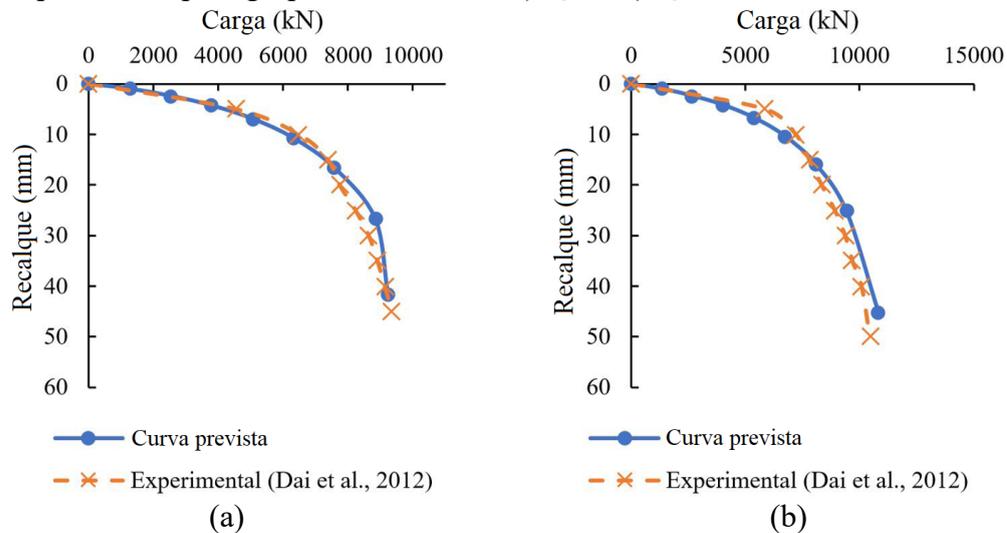
a aplicabilidade do método. Além disso, o método se restringe a bloco de estacas rígido e despreza a interação bloco-solo.

Pan *et al.* (2018) apresentaram uma abordagem de análise da resposta de grupo de estacas baseado nas curvas de transferência de carga desenvolvidas por Zhang *et al.* (2016). A abordagem fundamentou-se considerando o equilíbrio de força vertical nos elementos infinitesimais no fuste da estaca, sendo aplicado o método de Runge-Kutta de quarta ordem para solução numérica da equação diferencial de segunda ordem para a curva t-z.

Mais recentemente, Gomes Filho e Moura (2021) estenderam as curvas de transferência de carga em estacas isoladas desenvolvidas por Bohn, Santos e Frank (2016) incorporando o efeito de grupo. Gomes Filho e Moura (2021) adicionaram ao deslocamento da estaca isolada definido por Bohn, Santos e Frank (2016) a parcela do deslocamento vertical elástico desenvolvido na massa de solo conforme Equações 40 e 43 realizado também no método de Zhang *et al.* (2016). A Formulação consiste em dados de entrada de resistência ao atrito lateral máxima e resistência de ponta máxima – $t_{máx}$ e $q_{máx}$, a partir de instrumentação de prova de carga isolada, determinação do módulo de cisalhamento máximo a partir das equações de Baldi *et al.* (1989) e Mayne e Rix (1995) que correlacionam a resistência a penetração do cone (oriundo do ensaio CPT) com a velocidade de onda cisalhante e, equação de degradação do módulo de cisalhamento dado por Fahey e Carter (1993) como descrito na Equação 23.

Gomes Filho e Moura (2021) compararam as previsões obtidas pelo método desenvolvido com resultados de provas de cargas realizadas em um campo experimental localizado em Jiangsu, China, realizado por Dai *et al.* (2012), os quais apresentaram razoável concordância de resultados. Nesse campo experimental foram executadas estacas isoladas e grupos de estacas, escavadas, de 20 ou 24 m de comprimento, assentes em um solo heterogêneo composto de camadas de argila, silte e areia siltosa. A Figura 19 apresenta as curvas carga-recalque para os blocos de 4 estacas de 20 m (QZ4) e 24 m (QZ4L), os quais tiveram os resultados mais discordantes e concordantes, respectivamente, observando maiores convergências principalmente nos trechos iniciais de carregamento.

Figura 19 – Comparação entre as curvas carga-recalque calculada e experimental para grupos de 4 estacas: a) QZ4; b) QZ4L



Fonte: Gomes Filho e Moura (2021)

Além disso, Gomes Filho (2020) validou também as modificações realizadas do trabalho de Bohn, Santos e Frank (2016) para os estudos de provas de carga experimentais realizadas por O'Neill, Hawkins e Mahar (1982) e Briaud *et al.* (1989), promovendo para grupos de estacas cravadas em areias fofas ou medianamente compactas conforme o caso dos estudos experimentais de Briaud *et al.* (1989), a multiplicação das resistências de máxima mobilização do fuste e da base pelos fatores de eficiência para o fuste e a base obtidos por Le Kouby *et al.* (2016) para todas as estacas do grupo. Verificou-se boa concordância para a maioria dos grupos de estacas, apresentando para determinadas faixas de carregamento, resultados mais concordantes que os preditos por Castelli e Maugeri (2002) e Zhang *et al.* (2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

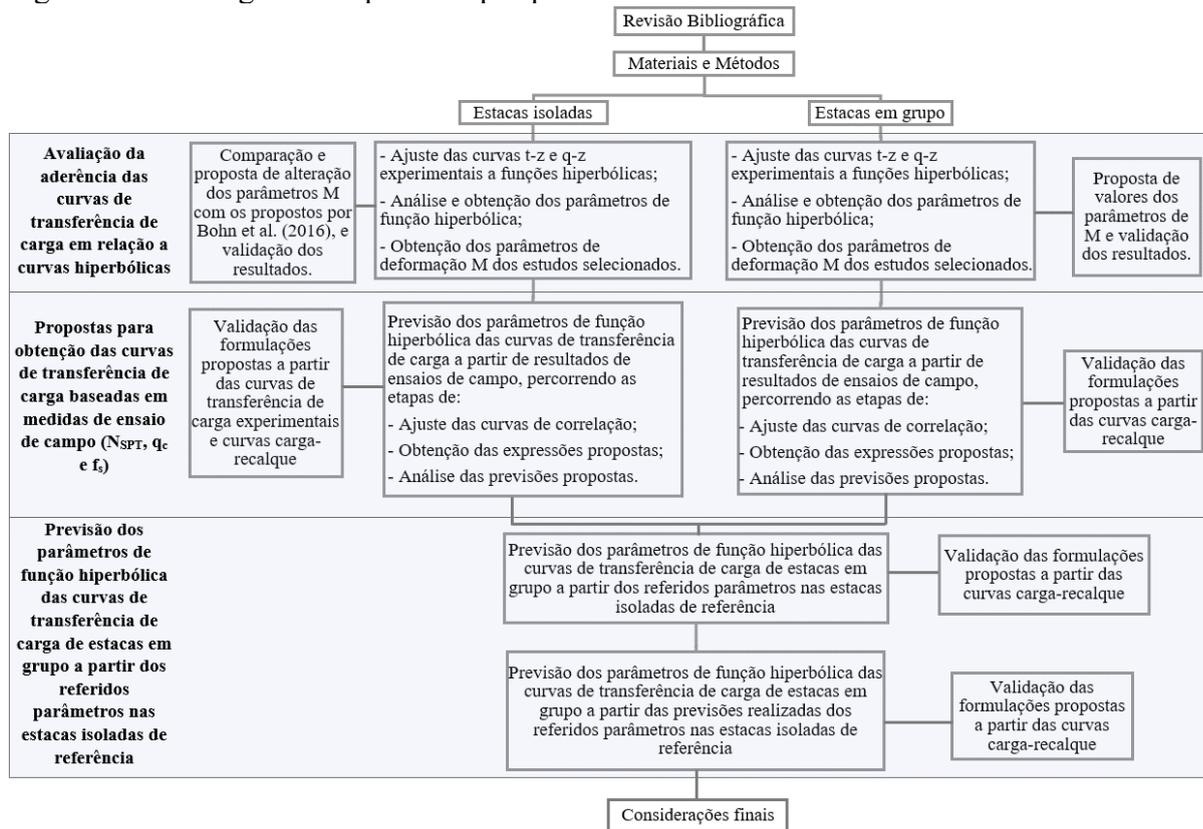
3.1 Metodologia

A metodologia empregada para o desenvolvimento do presente trabalho baseia-se na realização das seguintes etapas:

- a) Definição dos locais de estudo;
- b) Caracterização geométrica das estacas;
- c) Caracterização geotécnica dos estudos experimentais selecionados;
- d) Coleta de curvas de transferência de carga experimentais a partir de provas de carga instrumentadas;
- e) Avaliação da aderência das curvas de transferência de carga em relação a curvas hiperbólicas;
- f) Desenvolvimento de propostas para obtenção das curvas de transferência de carga baseadas em medidas de ensaios de campo;
- g) Desenvolvimento de propostas para obtenção das curvas de transferência de carga de estacas em grupo a partir das referidas curvas em estacas isoladas;
- h) Validação das formulações propostas;
- i) Considerações finais

A avaliação da aderência das curvas de transferência de carga a curvas hiperbólicas, desenvolvimento de propostas para obtenção das curvas de transferência de carga e validação das formulações propostas compõem o desenvolvimento da proposta do estudo em questão e são abordados nos capítulos 4 a 6. A Figura 20 apresenta o fluxograma da pesquisa proposta. Por fim, nas considerações finais são apresentadas as conclusões obtidas do estudo e recomendações para futuras pesquisas.

Figura 20 – Fluxograma da presente pesquisa



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2 Áreas de estudo

O desenvolvimento da pesquisa foi realizado a partir da coleta de resultados de estudos experimentais de campo em perfis de solo granular obtidos na literatura, com a realização de provas de cargas estáticas (PCE) em estacas isoladas e grupo de estacas, preferencialmente instrumentadas e com realização de ensaios de investigação de campo. Foram localizados, ao todo, 22 estudos de campo em estacas isoladas, dos quais 9 apresentam também resultados de provas de carga em grupos de estacas. O Quadro 1 apresenta os autores dos estudos experimentais utilizados e a descrição dos locais de estudos da presente pesquisa, nesta observa-se que as áreas estudadas envolvem 11 países distintos, abrangendo principalmente os Estados Unidos e a Europa. A Figura 21 indica em um mapa do mundo a localização dos estudos utilizados nesta pesquisa.

Quadro 1 – Descrição dos locais de estudo (continua)

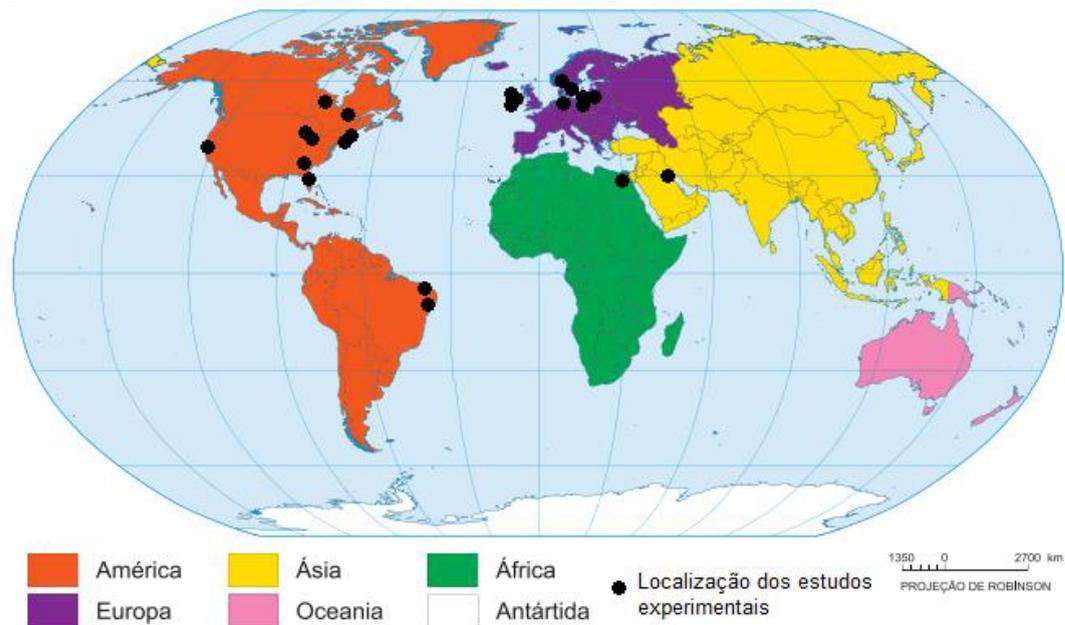
Obra	Autor(es)	Quantidade de PCEs consideradas		Localização	Observação
		Estacas isoladas	Grupo de estacas		
1	Briaud, Tucker e Ng (1989)	1	1	Califórnia, EUA	Projeto de pesquisa sobre estacas em areia com testes realizados na cidade de São Francisco
2	Abdlrahem e El Naggar (2020)	5	4	Ontário, Canadá	Localidade de Ayr
3	Ismael (2001)	1	2	Cidade do Kuwait, Kuwait	Localidade de South Surra
4	Long (1993)	3	3	Gråbo, Suécia	Localidade no condado de Västra Götaland
5	Norkus e Martinkus (2019)	1	2	Lituânia	Depósito artificial
6	Elsamny <i>et al.</i> (2017)	1	1	Egito	Não há informações da localização, Egito é o provável país cujos ensaios foram realizados
7	Soares, Coutinho e Cunha (2021)	1	2	Paraíba, Brasil	Região litorânea da cidade de João Pessoa
8	Melchior Filho, Bonan e Moura (2020)	1	8	Ceará, Brasil	Campo experimental da Universidade Federal do Ceará
9	Foglia <i>et al.</i> (2021)	1	2	Hannover, Alemanha	Depósito artificial localizado no Centro de Teste para Estruturas de Suporte da Universidade de Hannover
10	Tucker e Briaud (1988)	2	Não se aplica	Illinois, EUA	Programa de ensaios realizados para projeto de substituição de eclusas e barragem 26 no rio Mississippi no distrito de St. Louis
11	Tavenas (1971)	8	Não se aplica	Quebec, Canadá	Programa de ensaios realizados para projeto de muros de arrimo ao longo do rio St. Charles em Quebec
12	Paik <i>et al.</i> (2003)	2	Não se aplica	Indiana, EUA	Programa de ensaios realizados no canteiro de obras de ponte sobre o rio Pigeon. Informações complementares foram obtidos de Lee, Salgado e Paik (2003)
13	Nottingham (1975)	16	Não se aplica	Flórida, EUA	Depósito de areia uniforme na localidade de Fairbanks
14	Mayne e Harris (1993)	1	Não se aplica	Geórgia, EUA	Programa de ensaios realizados no Instituto de Tecnologia da Geórgia, em Atlanta
15	Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)	4	Não se aplica	Viken, Noruega	Localizado em uma pequena ilha chamada Holmen no meio do rio Drammen perto da cidade de Drammen

Quadro 1 – Descrição dos locais de estudo (conclusão)

Obra	Autor(es)	Quantidade de PCEs consideradas		Localização	Observação
		Estacas isoladas	Grupo de estacas		
16	Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014)	1	Não se aplica	Condado de Wicklow, Irlanda	Programa de ensaios realizados no local de testes geotécnicos da University College Dublin em Blessington
17	Gavin, Cadogan e Casey (2009)	2	Não se aplica	Condado de Kerry, Irlanda	Ensaaios realizados na cidade de Killarney, no sudoeste da Irlanda
18	Gavin e O'Kelly (2007)	1	Não se aplica	Condado de Wicklow, Irlanda	Programa de ensaios realizados em um depósito de areia fina em Blessington
19	Fellenius, Brusey e Pepe (2000)	2	Não se aplica	Nova York, EUA	Localizado nas adjacências da Baía da Jamaica na costa sul de Long Island, Nova York
20	Bradshaw e Baxter (2006)	1	Não se aplica	Massachusetts, EUA	Projeto de construção rodoviária ao norte do rio Charles, em Boston
21	Krasinski (2011)	3	Não se aplica	Região de Zulawy, Polônia	Projeto rodoviário de melhoria de solo em Zulawy
22	Krasinski (2012)	1	Não se aplica	Próximo da cidade de Gdansk, Polônia	Projeto de construção de estradas localizado em Pruszcz

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 21 – Localização em mapa dos estudos experimentais selecionados



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.3 Caracterização das estacas

A seguir são apresentadas as características geométricas, construtivas e especificidades das estacas executadas e identificação da estaca ou grupo de estacas conforme presente trabalho e identificação dos autores nos respectivos estudos experimentais. Os dados catalogados foram: tipo e procedimento executivo da estaca (cravada ou escavada), diâmetro da estaca (D), espessura da parede (t_w) se estacas tubulares, comprimento da estaca embutida no solo (L) e comprimento total da estaca (L_t), quando informado, conforme mostrado no Quadro 2 para estacas isoladas.

Quadro 2 – Caracterização das estacas isoladas (continua)

Obra	Estaca	Identificação do autor	Tipo de estaca	Procedimento executivo	D (m)	t_w (mm)	L (m)	L_t (m)
1	1-1	S	Estaca tubular de aço de ponta fechada cravada a percussão	cravada	0,273	9,30	9,15	-
2	2-1	MP2	Microestaca de aço escavada	escavada	0,172	-	5,75	6,0
	2-2	MP3			0,132			
3	3-1	1	Estaca maciça escavada de concreto reforçada com barra de aço 20 mm	escavada	0,1	-	2,25	-
4	4-1	T1S	Estaca tubular de aço cravada a percussão	cravada	0,06	5,00	2,0	2,3
	4-2	T2S						
	4-3	T3S						
5	5-1	-	Estaca tubular de aço cravada	cravada	0,219	56,50	1,445	1,445
6	6-1	Group (1)	Estaca de concreto pré-moldada cravada	cravada	0,15	-	1,5	1,5
7	7-1	HA1	Estaca de trado oco (<i>hollow auger pile</i>)	escavada	0,3	-	4,5	4,5
8	8-1 ⁽¹⁾	-	Estaca escavada manualmente de concreto	escavada	0,1	-	1,5	1,8
9	9-1 ⁽¹⁾	P1	Estaca tubular de aço de ponta aberta cravada	cravada	0,254	8,00	5,5	6,3
10	10-1 ⁽²⁾	1-3A	Estaca perfil "H" metálica cravada	cravada	0,338	12,80	16,46	-
	10-2 ⁽²⁾	1-6					16,15	-
11	11-1 ⁽²⁾	H3	Estaca perfil "H" de aço cravada	cravada	0,285	15,5	11,6	-
	11-2 ⁽²⁾	H4					14,6	-
	11-3 ⁽²⁾	H5					17,7	-
	11-4 ⁽²⁾	H6					20,7	-
	11-5 ⁽³⁾	J3	Estaca de concreto pré-moldada Hércules cravada		0,319	-	11,9	-
	11-6 ⁽³⁾	J4					14,9	-
	11-7 ⁽³⁾	J5					18,0	-
	11-8 ⁽³⁾	J6					21,0	-
12	12-1	Closed-ended pile	Estaca tubular metálica cravada com ponta fechada	cravada	0,356	12,7	6,87	8,24
	12-2 ⁽²⁾	Open-ended pile	Estaca tubular metálica cravada com ponta aberta		0,331	12,8	7,04	8,24

Quadro 2 – Caracterização das estacas isoladas (conclusão)

Obra	Estaca	Identificação do autor	Tipo de estaca	Procedimento executivo	D (m)	t _w (mm)	L (m)	L _t (m)
13	13-1	Test 1-1	Estaca tubular metálica cravada	cravada	0,102	Não informado	1,22	-
	13-2	Test 1-2					1,98	-
	13-3	Test 1-3					2,74	-
	13-4	Test 2-1					1,37	-
	13-5	Test 2-2					2,71	-
	13-6	Test 2-1					1,37	-
	13-7	Test 2-1					1,37	-
	13-8	Test 2-1					1,37	-
	13-9	Test 2-2					2,71	-
	13-10	Test 2-2					2,71	-
	13-11	Test 3-1					1,37	-
	13-12	Test 3-1					1,37	-
	13-13	Test 3-1					1,37	-
	13-14	Test 3-2					2,44	-
	13-15	Test 3-2					2,59	-
13-16	Test 3-2	2,59	-					
14	14-1	C2	Estaca escavada de concreto (<i>drilled shaft</i>)	escavada	0,762	-	16,8	-
15	15-1	A	Estaca de concreto pré-fabricada cravada	cravada	0,28	-	8	-
	15-2	D/A			0,28		16	-
	15-3 ⁽⁴⁾	C	Estaca de concreto pré-fabricada cravada		0,24		8	-
	15-4 ⁽⁴⁾	B/C			0,26		16	-
16	16-1	P1	Estaca parafusada metálica (<i>helical pile</i>)	cravada	0,11	8,50	2,6	3,07
17	17-1	TP1	Estaca hélice contínua	escavada	0,8	-	14,00	14,00
	17-2	TP2			0,45		15,00	15,00
18	18-1	B2	Estaca tubular de aço cravada com ponta fechada	cravada	0,073	Não informado	2,6	3,5
19	19-1 ⁽⁴⁾	2	Estaca tubular de aço cravada com ponta fechada (preenchida com concreto)	cravada	0,328	5,3	20,00	20,90
	19-2 ⁽⁴⁾	3					20,50	21,30
20	20-1	IPW	Estaca tubular de aço cravada com ponta fechada (preenchida com concreto)	cravada	0,32	Entre 9,5 e 13,0 mm	22,6	-
21	21-1	CMC-b1	Estaca ômega: colunas de módulo controlado (CMC)	cravada	0,40	-	9,25	10,00
	21-2	CMC-b2					9,45	10,00
	21-3	CMC-b3					9,25	10,00
22	22-1	SDP-b3	Estaca ômega: estaca de deslocamento de parafuso (SDP)	cravada	0,36	-	8,00	8,85

(1) Estacas não instrumentadas;

(2) Adota-se o diâmetro equivalente a uma estaca tubular de mesma espessura da parede e mesma área da seção transversal;

(3) Adota-se o diâmetro equivalente a uma estaca maciça de mesma área da seção transversal;

(4) Estaca apresenta diâmetro variável com a profundidade, sendo apresentado apenas em termos de valor médio.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em termos gerais, as estacas isoladas são em sua maioria cravadas e instrumentadas, com diâmetros que variaram de 0,06 a 0,80 m, e comprimento de estacas de 1,22 a 22,60 m.

Para os grupos de estacas foram apresentadas as estacas em grupo instrumentadas ou grupos de estacas não instrumentados, o número de estacas no grupo (N), espaçamento por diâmetro entre estacas (s/D), informações se o bloco de coroamento é rígido ou flexível e se há contato entre o bloco de coroamento e o solo, conforme apresentado no Quadro 3. Destaca-se ainda, que mesmo para os grupos de estaca cujo bloco de coroamento está em contato com o solo, não foi considerada a contribuição do bloco de coroamento no comportamento do grupo de estacas, desprezando a parcela de carga acima do trecho instrumentado.

Quadro 3 – Caracterização das estacas em grupo

Obra	Estaca	Identificação do autor	Procedimento executivo	D (m)	L (m)	Instrumentada	N	s/D	Bloco de coroamento
1	1-2A	14	cravada	0,273	9,15	Sim	5	3	Rígido
	1-2B	11				Sim			
	1-2C	13				Sim			
2	2-3a	MPG1	escavada	0,172	5,75	Não	4	2,61	Rígido
	2-4A	MPG2-1				Sim		4,36	
	2-4B	MPG2-2		Sim		2,61			
	2-5A	MPG3-1		Sim					
	2-6A	MPG4-1		Sim			4,36		
3 ⁽¹⁾	3-2A	4	escavada	0,1	2,25	Sim	5	3	Rígido
	3-3a	3				Não		2	
4	4-4A	T1G	cravada	0,06	2,1	Sim	5	4	Rígido
	4-5A	T2G				Sim		6	
	4-6A	T3G				Sim		8	
5	5-2A	3D	cravada	0,219	1,445	Sim	4	3	Flexível
	5-3A	2D				Sim		2	
6 ⁽¹⁾	6-2A	Group (2)	cravada	0,15	1,5	Sim	2	3	Rígido
7	7-2a	2-piled group	escavada	0,3	4,5	Não	2	3,5	Rígido
	7-3a	4-piled group				Não			
8	8-2a	-	escavada	0,1	1,5	Não	2	2	Rígido
	8-3a	-				Não		2,5	
	8-4a	-				Não	3		
	8-5a	-				Não	4		
	8-6a	-				Não	4	2	
	8-7a	-				Não		2,5	
	8-8a	-				Não		3	
	8-9a	-				Não		4	
9	9-2a	G1	cravada	0,254	5,5	Não	2	2,6	Rígido
	9-3a	G2				Não			

(1) Há contato entre o bloco de coroamento e o solo de fundação.

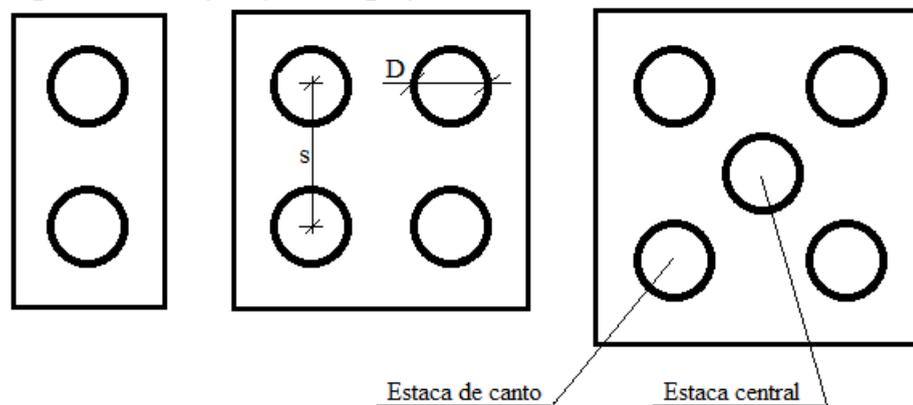
Fonte: Elaborado pelo Autor

Em termos gerais, metade das estacas em grupo são instrumentadas, e em sua maioria, possuem bloco de coroamento rígido e sem o contato do mesmo com o solo de

fundação. Os grupos são compostos de 2 a 5 estacas, com diâmetros que variam de 0,06 a 0,30 m, e comprimentos de estacas de 1,445 a 9,15 m.

A disposição do grupo de estacas utilizadas no presente estudo está em conformidade com a Figura 22, a qual apresenta grupo de 4 estacas disposta em forma quadrada com o número de linhas de estacas iguais ao número de colunas, e grupo de 5 estacas com uma estaca central. A nomenclatura de estacas centrais e de canto dos grupos com 5 estacas são apresentados na referida figura.

Figura 22 – Disposição dos grupos de estacas com 2, 4 e 5 estacas



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em seguida, mostra-se na Tabela 2 a profundidade de escavação e a locação dos medidores de deformação (*strain gauges*) utilizados na instrumentação das estacas a partir da cota de escavação (ou não havendo escavação, até o nível do terreno natural). Destaca-se que alguns estudos experimentais não apresentaram informações da localização da instrumentação, nestes casos foi considerado que foram dispostos, pelo menos, no topo e na base da estaca.

Tabela 2 – Localização da instrumentação ao longo da profundidade

Obra	Estacas	Profundidade de escavação (m)	L (m)	Distância da instrumentação à superfície (m)					
1	Todas as estacas	0	9,15	-	-	-	-	-	-
2	2-1, 2-2, 2-4A, 2-4B, 2-5 e 2-6	0	5,75	0,8	3,1	5,6	-	-	-
3	3-1 e 3-2A	0,4	2,25	0,2	0,9	1,5	2,1	-	-
4	Todas as estacas	0	2,10	-	-	-	-	-	-
5	Todas as estacas	0	1,445	0	1,15	1,445	-	-	-
6	Todas as estacas	0	1,50	0	0,375	0,75	1,125	1,5	-
7	7-1	0,5	4,50	-	-	-	-	-	-
10	10-1	6,71	16,46	-	-	-	-	-	-
	10-2	6,71	16,15	-	-	-	-	-	-
11	Todas as estacas	0	variável	Na base da estaca e em um ponto 20 pés (6 m) acima da base.					
12	12-1	0	6,87	-0,63	-0,13	0,87	1,87	2,87	3,87
				4,87	5,87	6,57	-	-	-
	12-2	0	7,04	-0,46	0,04	1,04	2,04	3,04	4,04
				5,04	5,54	6,04	6,44	6,74	-
13	Todas as estacas	0	1,22 a 2,74	-	-	-	-	-	-
14	14-1	0	16,80	0	9,1	16,8	-	-	-
15	15-2 e 15-4	0	16,00	0	1,5	3,5	5,5	7,5	9,5
				11,5	13,5	16	-	-	-
	15-1 e 15-3	0	8,00	0	1,5	3,5	5,5	8	-
16	16-1	0	2,60	-0,03	0,68	1,25	1,88	2,36	-
17	17-1	0	14,00	0	3,1	6,05	8,9	11,85	-
	17-2	0	15,00	1,55	4,65	7,6	10,45	13,4	-
18	18-1	0,95	2,60	1,87	2,20	2,49	-	-	-
19	19-1	0	20,00	-0,5	1,6	3,7	8,0	11,8	15,9
				19,3					
	19-2	0	20,50	0,2	2,3	4,4	8,7	12,4	16,6
				20,0					
20	20-1	0	22,60	0	7,7	18,0	-	-	-
21	21-1 e 21-3	0,85	9,25	0,10	3,65	7,20	8,25	9,10	-
	21-2	0,85	9,45	0,10	3,65	7,20	8,25	9,30	-
22	22-1	0,85	8,00	-0,70	0,15	3,70	5,25	6,10	6,95

Fonte: Elaborado pelo Autor

Das informações dispostas na Tabela 2, obtém-se que para a maioria das estacas não houve escavação do terreno natural para execução das mesmas, e que para as estacas com informações de localização de instrumentação, houve pelo menos 3 níveis (seções) instrumentadas, dentre estas uma próxima ao topo e outra próxima a ponta das estacas.

3.4 Caracterização geotécnica dos estudos experimentais selecionados

O Quadro 4 apresenta as principais informações e resultados dos ensaios experimentais de campo, quanto ao nível freático, compactidade do solo, teor de umidade natural e peso específico do solo. Vale ressaltar que foram coletados os resultados de ensaios de campo, tais como: sondagens à percussão (SPT), ensaio de penetração do cone (CPT), ensaios dilatométricos (DMT) e ensaios pressiométrico (PMT), conforme apresentado no Quadro 4. Observa-se ainda que além das investigações geológico-geotécnicas realizadas, foram coletados os resultados de provas de carga de todas as estacas selecionadas do presente estudo.

Quadro 4 – Resultados de ensaios de campo e informações relacionadas (continua)

Obra	Nível freático	Compactidade	Compactidade Relativa (CR)	Umidade natural	Peso específico aparente (γ) ou seco (γ_d)	Investigações de campo coletadas
1	2,4 m	Medianamente compacta	-	22,6%	$\gamma_d = 15,7 \text{ kN/m}^3$	SPT, CPT e PMT
2	9,5 a 10,5 m	Medianamente compacta a compacta	-	2 a 13%	$\gamma_d = 19,5 \text{ kN/m}^3$	SPT e CPT
3	Não encontrado	Medianamente compacta	-	1,4 a 4,5%	$\gamma = 17,65 \text{ a } 19,6 \text{ kN/m}^3$	SPT, CPT dinâmico e PMT
4	Não encontrado	Medianamente compacta a compacta	Séries: T1 - 38% T2 - 67% T3 - 62%	5,94 a 6,31%	$\gamma_d = 15,6 \text{ a } 16,8 \text{ kN/m}^3$	CPT, PMT e DMT
5	Não encontrado	Compacta	79%	4,40%	$\gamma = 16,09 \text{ kN/m}^3$	CPT
6	Não encontrado	Compacta	-	-	-	-
7	2,3 m	Pouco compacta a compacta	-	2,7 a 8,4%	$\gamma = 14,9 \text{ kN/m}^3$	SPT
8	7,36 m	Medianamente compacta	-	1,1 a 6,9%	$\gamma = 17,0 \text{ kN/m}^3$	SPT
9	$\geq 6,0 \text{ m}$	Compacta	70,5%	-	-	CPT
10	Acima do terreno natural	Compacta	-	19%	$\gamma_d = 17,3 \text{ kN/m}^3$	SPT, CPT e PMT
11	4,9 m	Medianamente compacta	59%	-	$\gamma_d = 15,4 \text{ kN/m}^3$	SPT
12	3 m	Pouco compacta a compacta	30% (até 3 m) 80% (abaixo de 3 m)	-	-	SPT e CPT
13	Não informado	Pouco compacta a compacta	-	-	-	CPT
14	16,8 m	Medianamente compacta a compacta	-	-	-	SPT, CPT, PMT e DMT
15	1,7 m	Fofa	< 33%	23%	$\gamma = 18,9 \text{ kN/m}^3$	SPT e CPT

Quadro 4 – Resultados de ensaios de campo e informações relacionadas (conclusão)

Obra	Nível freático	Compacidade	Compacidade Relativa (CR)	Umidade natural	Peso específico aparente (γ) ou seco (γ_d)	Investigações de campo coletadas
16	13 m	Muito compacta	$\approx 100\%$	10%	-	CPT
17	Não informado	Pouco compacta a compacta	27 a 74% (Variável)	-	-	SPT e CPT
18	6 m	Muito compacta	$\approx 100\%$	11%	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$	CPT
19	2,5 m	Medianamente compacta a compacta	-	-	-	CPT
20	Não informado	Fofa a muito compacta	-	-	-	SPT
21	0,8 m	Medianamente compacta	-	-	-	CPT
22	1,0 m	Medianamente compacta a compacta	-	-	-	CPT

Fonte: Elaborado pelo Autor

A título de ilustração são apresentadas as informações de interesse desta pesquisa de um dos trabalhos coletados. Dessa forma, o estudo de Paik *et al.* (2003) apresenta resultados experimentais de 2 provas de carga instrumentadas em estacas isoladas cravadas e tubulares, uma de ponta fechada (estaca 12-1) e outra de ponta aberta (Estaca 12-2). Além disso, o estudo em questão apresenta sondagem à percussão (denominado SPT-12) e, ensaio de penetração do cone executados nos mesmos locais que cada estaca foi executada (denominados CPT-12-1 e CPT-12-2). Deve-se mencionar ainda que todos os ensaios mencionados foram realizados anteriormente à execução das estacas em cada local. A Figura 23 mostra os resultados dos ensaios mencionados. Já a Figura 24 apresenta a curva carga-recalque e a Figura 25 apresenta as curvas de transferência de carga para ambas as estacas.

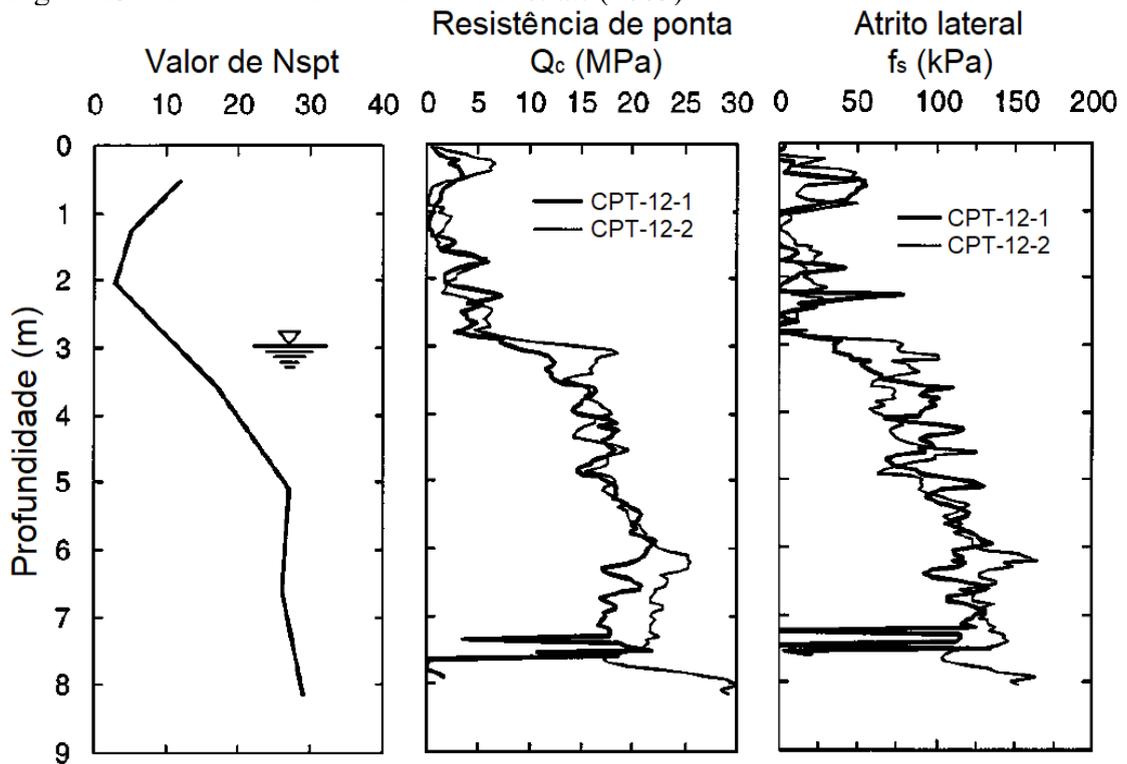
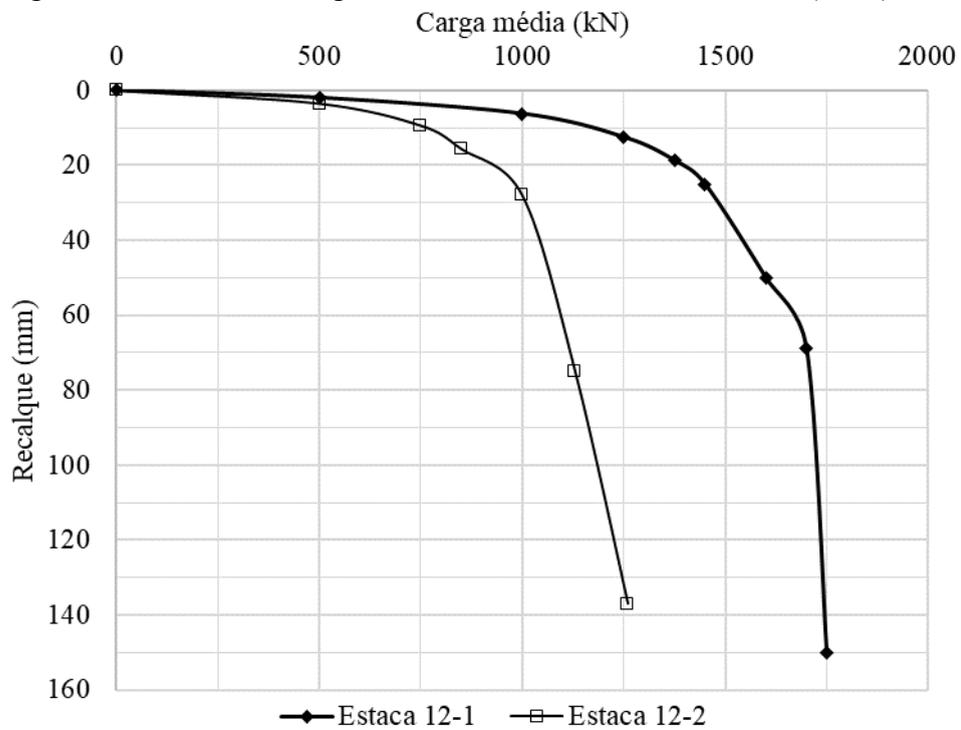
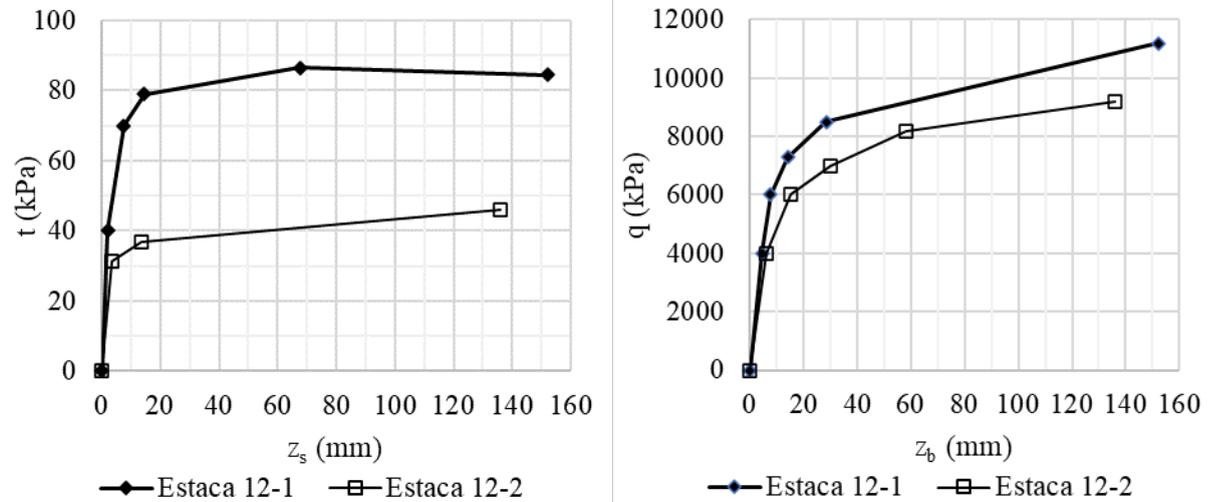
Figura 23 – Ensaio SPT e CPT de Paik *et al.* (2003)Fonte: Adaptado de Paik *et al.* (2003)Figura 24 – Provas de carga das estacas isoladas de Paik *et al.* (2003)Fonte: Adaptado de Paik *et al.* (2003)

Figura 25 – Curvas de transferência de carga de Paik *et al.* (2003): a) curvas t-z; b) curvas q-z



Fonte: Adaptado de Lee, Salgado e Paik (2003)

Pela Figura 23 o N_{SPT} do furo investigado variou de 3 a 30 golpes. Conforme mencionado no Quadro 4, o perfil de solo apresenta-se arenoso (areia pedregulhosa) pouco compacto até 3 m e abaixo disso compacto, com nível de água na profundidade de 3 m. As provas de carga estáticas executadas em estacas isoladas foram de carga controlada do tipo lentas e atingiram a ruptura conforme mostra a Figura 24. Já as curvas de transferência de carga apresentadas na Figura 25 indicaram que a mobilização da resistência lateral das estacas foi atingida a menos de 20 mm de deslocamento do fuste das estacas, sendo observado pequenos ganhos de resistência nos incrementos de deslocamento. Ademais, as curvas q-z apresentaram ganho de resistência de ponta para deslocamentos superiores a 20 mm, sendo que a estaca de ponta fechada apresentou maiores resistências mobilizadoras (nas curvas t-z e q-z) que a estaca aberta do respectivo estudo.

O detalhamento dos resultados dos ensaios de campo coletados, das provas de carga e curvas de transferência de carga de todos os locais estudados são apresentados nos Anexos A, B, C e D, em ordem. A seguir, são apresentadas informações gerais e os resultados resumidos dos ensaios de campo coletados para todas as estacas selecionadas no presente estudo.

3.4.1 Investigações geotécnicas em campo (SPT e CPT)

Dentre os ensaios de campo realizados, além das provas de carga, são utilizados na presente pesquisa os resultados de ensaios de SPT e CPT. O Quadro 5 apresenta para todas as estacas analisadas a simbologia dos ensaios de campo SPT e CPT relacionados aos respectivos

locais, além de associar as estacas em grupo às estacas isoladas de referência. Deve-se mencionar que os perfis de sondagens à percussão e os resultados dos ensaios de penetração do cone encontram-se individualmente apresentados no Anexo A e Anexo B, respectivamente.

Quadro 5 – Identificação das estacas isoladas de referência e ensaios de campo relacionados
(continua)

Obra	Estacas	Estaca isolada de referência	SPT relacionado	CPT relacionado
1	1-1		SPT-1	CPT-1
	1-2A, 1-2B e 1-2C	1-1		
2	2-1 e 2-2		SPT-2-1	CPTméd (média de CPT-2-1 e CPT-2-2)
	2-3a, 2-4A e 2-4B	2-1		CPT-2-1
	2-5A e 2-6A	2-2		
3	3-1		SPT-3	-
	3-2A e 3-3a	3-1		
4	4-1		-	CPT-4-1
	4-4A	4-1		
	4-2			CPT-4-2
	4-5A	4-2		
	4-3			
4-6A	4-3	CPT-4-3		
5	5-1		-	CPT-5
	5-2A e 5-3A	5-1		
6	6-1		-	-
	6-2A	6-1		
7	7-1		SPT-7	-
	7-2a e 7-3a	SCC-1		
8	8-1		SPT-8	-
	8-2a, 8-3a, 8-4a, 8-5a, 8-6a, 8-7a, 8-8a e 8-9a	8-1		
9	9-1		-	CPT-9 (média dos 3 CPTs realizados)
	9-2a e 9-3a	9-1		
10	10-1 e 10-2		SPT-10	CPT-10
11	11-1, 11-2, 11-3, 11-4, 11-5, 11-6, 11-7 e 11-8		SPT-11	-
12	12-1		SPT-12	CPT-12-1
	12-2			CPT-12-2
13	13-1, 13-2 e 13-3		-	CPT-13-1
	13-4, 13-5, 13-6, 13-7, 13-8, 13-9 e 13-10		-	CPT-13-2
	13-11, 13-12, 13-13, 13-14, 13-15 e 13-16		-	CPT-13-3
14	14-1		SPT-14	CPT-14
15	15-1, 15-2, 15-3 e 15-4		SPT-15	CPT-15
16	16-1		-	CPT-16
17	17-1		SPT-17	CPT-17-1
	17-2			CPT-17-2
18	18-1		-	CPT-18
19	19-1 e 19-2		-	CPT-19
20	20-1		SPT-20	-

Quadro 5 – Identificação das estacas isoladas de referência e ensaios de campo relacionados (conclusão)

Obra	Estacas	Estaca isolada de referência	SPT relacionado	CPT relacionado
21	21-1		-	CPT-21-1
	21-2		-	CPT-21-2
	21-3		-	CPT-21-3
22	22-1		-	CPT-22-1

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.4.2 Provas de carga

As provas de carga executadas nas estacas utilizadas na presente pesquisa foram estáticas e executadas com cargas em estágios até a carga máxima. A Tabela 3 apresenta informações gerais da execução das provas de carga, ou seja, tipo de carregamento, máximo carregamento total ($Q_{m\acute{a}x}$) e por estaca ($Q_{m\acute{a}x}/N$) para as estacas em grupo e o recalque máximo obtido ($w_{m\acute{a}x}$), além da obtenção do recalque residual nas provas de carga em que foram apresentadas a etapa de descarregamento dos ensaios. No Anexo C são apresentadas todas as curvas carga-recalque experimentais no trecho de carregamento dos ensaios utilizados no presente trabalho.

Tabela 3 – Informações das provas de carga utilizadas na pesquisa (continua)

Estaca	Grupo de estacas	Tipo de carregamento	Leitura de máximo carregamento do ensaio			Recalque residual (mm)
			$Q_{m\acute{a}x}$ (kN)	$Q_{m\acute{a}x}/N$ (kN)	$w_{m\acute{a}x}$ (mm)	
1-1	-	Lento (carga controlada)	400,0	-	13,9	-
1-2A	1-2		2.000,0	400,0	18,0	-
1-2B						
1-2C						
2-1	-	Lento (carga controlada)	620,0	-	8,6	3,9
2-2	-		540,0	-	10,7	6,0
2-3a	2-3		1.940,0	485,0	14,5	6,1
2-4A	2-4		1.975,0	493,8	8,8	3,9
2-4B						
2-5A	2-5		2.120,0	530,0	18,1	8,2
2-6A	2-6	2.150,0	537,5	11,4	5,5	
3-1	-	Lento (carga controlada)	115,3	-	25,0	-
3-2A	3-2		1.177,2	235,4	21,0	-
3-3a	3-3		882,9	176,6	16,4	-
4-1	-	Rápido (carga controlada)	2,3	-	40,0	-
4-4A	4-4		26,4	5,3	40,0	-
4-2	-		14,0	-	40,0	-
4-5A	4-5		80,3	16,1	40,0	-
4-3	-		10,0	-	40,0	-
4-6A	4-6		59,1	11,8	40,0	-

Tabela 3 – Informações das provas de carga utilizadas na pesquisa (continuação)

Estaca	Grupo de estacas	Tipo de carregamento	Leitura de máximo carregamento do ensaio			Recalque residual (mm)
			$Q_{\text{máx}}$ (kN)	$Q_{\text{máx}}/N$ (kN)	$W_{\text{máx}}$ (mm)	
5-1	-	Lento (carga controlada)	154,0	-	21,5	17,0
5-2A	5-2		640,0	160,0	25,0	20,8
5-3A	5-3		700,0	175,0	22,5	19,3
6-1	-	Lento (carga controlada)	45,0	-	6,4	-
6-2A	6-2	Lento (carga controlada)	120,0	60,0	6,6	-
7-1	-	Lento (carga controlada)	539,7	-	84,0	81,0
7-2a	7-2		1.215,0	607,5	47,4	41,0
7-3a	7-3		2.400,0	600,0	60,2	53,0
8-1	-	Rápido (carga controlada)	68,7	-	7,1	6,8
8-2a	8-2		111,3	55,6	5,4	5,0
8-3a	8-3		117,7	58,9	1,9	1,4
8-4a	8-4		98,1	49,1	5,6	4,7
8-5a	8-5		95,2	47,6	12,7	12,6
8-6a	8-6		120,7	30,2	1,1	0,5
8-7a	8-7		114,8	28,7	19,8	18,3
8-8a	8-8		122,6	30,7	9,1	8,4
8-9a	8-9		68,7	17,2	16,3	16,3
9-1	-		Rápido (carga controlada)	355,0	-	62,5
9-2a	9-2	688,0		344,0	65,0	61,3
9-3a	9-3	715,0		357,5	62,0	59,0
10-1	-	Lento (carga controlada)	3.188,3	-	68,1	-
10-2	-	Rápido (carga controlada)	3.924,0	-	36,3	-
11-1	-	Lento (carga controlada)	1.103,6	-	34,3	30,2
11-2	-		1.226,3	-	34,0	28,4
11-3	-		1.471,5	-	33,0	25,4
11-4	-		2.207,3	-	30,5	19,3
11-5	-		981,0	-	29,2	24,1
11-6	-		1.226,3	-	25,5	19,0
11-7	-		1.471,5	-	33,8	24,9
11-8	-		1.594,1	-	33,8	26,4
12-1	-	Lento (carga controlada)	1.750,0	-	150,0	-
12-2	-		1.260,0	-	137,0	-
13-1	-	Lento (carga controlada)	26,9	-	24,1	-
13-2	-		25,3	-	27,7	-
13-3	-		45,6	-	23,6	-
13-4	-		28,1	-	21,8	-
13-5	-		99,2	-	20,7	-
13-6	-		31,1	-	9,7	-
13-7	-		37,4	-	7,6	-
13-8	-		26,7	-	21,3	-
13-9	-		97,9	-	19,3	-
13-10	-		97,6	-	18,8	-
13-11	-		47,6	-	22,1	-
13-12	-		51,0	-	15,5	-
13-13	-		44,5	-	21,1	-
13-14	-		54,7	-	21,3	-

Tabela 3 – Informações das provas de carga utilizadas na pesquisa (conclusão)

Estaca	Grupo de estacas	Tipo de carregamento	Leitura de máximo carregamento do ensaio			Recalque residual (mm)
			$Q_{\text{máx}}$ (kN)	$Q_{\text{máx}}/N$ (kN)	$W_{\text{máx}}$ (mm)	
13-15	-		53,2	-	15,5	-
13-16	-		57,8	-	22,4	-
14-1	-	Rápido (carga controlada)	4.905,0	-	161,3	-
15-1	-		301,2	-	85,0	-
15-2	-	Rápido (carga controlada)	508,2	-	40,0	-
15-3	-		312,0	-	70,0	-
15-4	-		512,1	-	60,0	-
16-1	-	Lento (carga controlada)	462,0	-	52,0	-
17-1	-	Lento (carga controlada)	4.050,0	-	124,0	-
17-2	-	Lento (carga controlada)	1.720,0	-	236,0	225,0
18-1	-	Lento (carga controlada)	163,0	-	25,0	-
19-1	-	Rápido (carga controlada)	2.000,0	-	16,0	8,9
19-2	-	Rápido (carga controlada)	2.500,0	-	13,6	3,1
20-1	-	Rápido (carga controlada)	2.900,0	-	4,1	2,1
21-1	-		565,0	-	11,0	6,0
21-2	-	Lento (carga controlada)	784,0	-	10,0	6,0
21-3	-		581,0	-	12,0	7,3
22-1	-	Lento (carga controlada)	1.232,0	-	15,0	8,0

Fonte: Elaborado pelo Autor

As curvas de transferência de carga obtidas experimentalmente (curvas t-z e q-z) são apresentadas no Anexo D. Salienta-se que quando não especificada o trecho da curva t-z experimental, o mesmo refere-se a todo o comprimento do fuste da estaca. A Tabela 4 apresenta um resumo das principais informações obtidas das curvas de transferência experimentais, incluindo identificação das estacas em grupo e as respectivas estacas isoladas de referência e a posição das estacas nos grupos de 5 estacas, conforme descrito na Figura 22.

Tabela 4 – Informações gerais das curvas de transferência de carga experimentais (continua)

Estaca	Posição da estaca	Estaca isolada de referência	Trecho fuste (m)	$t_{\text{máx}}$ (kPa)	$Q_{\text{máx}}$ (kPa)
1-1			-	22,7	5935
1-2A	Centro	1-1	-	41,5	4237
1-2B	Canto	1-1	-	34,6	4168
1-2C	Canto	1-1	-	49,4	3615
2-1			0,8 - 3,1	280,0	2496
			3,1 - 5,6	122,0	
2-2			0,8 - 3,1	295,0	4384
			3,1 - 5,6	123,0	

Tabela 4 – Informações gerais das curvas de transferência de carga experimentais
(continuação)

Estaca	Posição da estaca	Estaca isolada de referência	Trecho fuste (m)	t_{\max} (kPa)	Q_{\max} (kPa)
2-4A	-	2-1	0,8 - 3,1	187,5	2410
			3,1 - 5,6	114,0	
2-4B	-	2-1	0,8 - 3,1	204,0	2410
			3,1 - 5,6	99,0	
2-5A	-	2-2	0,8 - 3,1	278,4	5115
			3,1 - 5,6	124,9	
2-6A	-	2-2	0,8 - 3,1	245,0	4823
			3,1 - 5,6	148,9	
3-1			0,2 - 0,9	75,8	3872
			0,9 - 1,5	114,5	
			1,5 - 2,1	135,3	
			0,2 - 0,9	205,2	
3-2A	Centro	3-1	0,9 - 1,5	229,0	4996
			1,5 - 2,1	255,0	
4-1			-	3,2	250
4-4A	Canto	4-1	-	6,1	583
4-2			-	5,8	3194
4-5A	Canto	4-2	-	12,7	2222
4-3			-	4,7	2250
4-6A	Canto	4-3	-	8,8	2722
5-1			0 - 1,15	33,1	3106
			1,15 - 1,445	55,2	
5-2A	-	5-1	0 - 1,15	32,9	2867
			1,15 - 1,445	39,4	
5-3A	-	5-1	0 - 1,15	31,0	3186
			1,15 - 1,445	78,8	
6-1			0 - 0,375	45,3	255
			0,375 - 0,75	67,9	
			0,75 - 1,125	66,2	
			1,125 - 1,5	49,8	
6-2A	-	6-1	0 - 0,375	141,5	204
			0,375 - 0,75	206,6	
			0,75 - 1,125	155,6	
			1,125 - 1,5	155,0	
7-1			-	52,7	5531
10-1			-	91,5	12263
10-2			-	148,7	6745
11-1			5,5 - 11,6	23,9	5267
11-2			8,5 - 14,6	27,5	5985
11-3			11,6 - 17,7	32,1	6895
11-4			14,6 - 20,7	31,1	7182
11-5			5,8 - 11,9	26,8	6224
11-6			8,8 - 14,9	26,8	6224
11-7			11,9 - 18,0	30,2	6703
11-8			14,9 - 21,0	30,6	5554
12-1			-	86,5	11200
12-2			-	46,0	9200
13-1			-	37,2	1715
13-2			-	8,8	2406

Tabela 4 – Informações gerais das curvas de transferência de carga experimentais (conclusão)

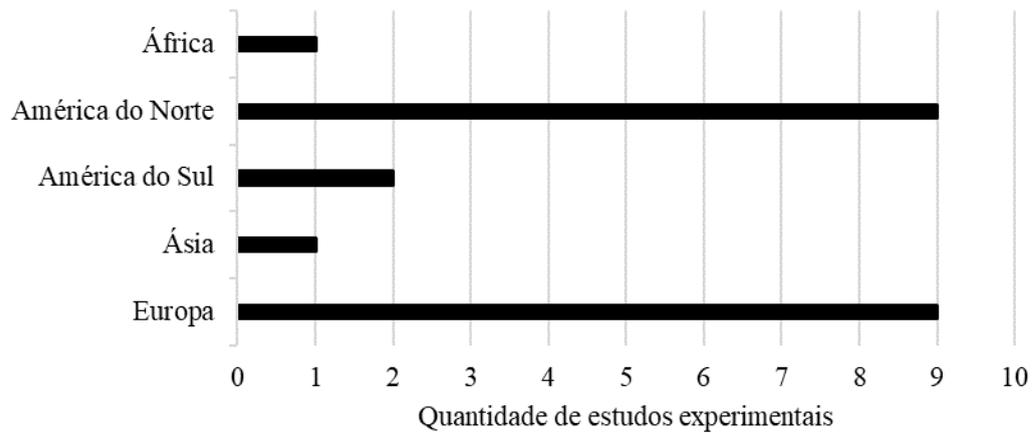
Estaca	Posição da estaca	Estaca isolada de referência	Trecho fuste (m)	$t_{m\acute{a}x}$ (kPa)	$q_{m\acute{a}x}$ (kPa)
13-3			-	12,3	4257
13-4			-	17,6	2531
13-5			-	31,7	9254
13-6			-	27,8	2286
13-7			-	47,7	2041
13-8			-	40,0	1105
13-9			-	29,9	8764
13-10			-	26,1	9472
13-11			-	41,8	3620
13-12			-	47,7	3680
13-13			-	43,2	3119
13-14			-	13,4	5444
13-15			-	10,2	5471
13-16			-	10,2	6043
14-1			-	85,9	3184
15-1			-	33,7	1036
15-2			-	27,9	1976
15-3			-	45,2	867
15-4			-	33,2	1497
16-1			0 - 1,88	123,0	3200
17-1			3,0 - 12,0	36,0	4198
17-2			4,5 - 13,5	34,6	4590
18-1			-	174,1	14400
19-1			0 - 11,7	63,3	1207
			11,7 - 19,3	144,9	
19-2			0 - 12,4	70,5	911
			12,4 - 20,0	194,3	
20-1			7,7 - 18,0	186,4	-
21-1			8,25 - 10,2	142,0	1305
21-2			8,7 - 10,45	150,1	2069
21-3			8,1 - 10,15	142,1	1114
22-1			4,7 - 8,85	130,0	3272

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.5 Resumo dos estudos experimentais utilizados na pesquisa

Os resultados dos 22 estudos experimentais coletados para a presente pesquisa compreendem locais em distintas partes do planeta, conforme mencionado anteriormente, no total de 11 países pertencentes aos continentes da América, Europa, África e Ásia. A Figura 26 apresenta a localização dos estudos experimentais por região.

Figura 26 – Locais de estudos experimentais agrupados por continentes e subcontinentes



Fonte: Elaborado pelo Autor

Ao todo, foram selecionadas 56 estacas isoladas e 28 estacas em grupo, submetidas a provas de carga estática, com ou sem instrumentação. As premissas adotadas para seleção dos estudos experimentais foram:

- a) Provas de carga estáticas submetidas somente a esforços axiais de compressão;
- b) Execução das estacas em perfis de solos granulares;
- c) Estudos experimentais realizados em campo em verdadeira grandeza, não realizados em câmara de calibração ou modelos reduzidos inferiores a 1,0 m;
- d) Estacas instaladas verticalmente e base da estaca não alargada;
- e) Não considera as tensões residuais em estacas cravadas;
- f) Não considera a contribuição do bloco de coroamento na resistência do grupo de estacas;
- g) Ensaios de campo SPT e CPT para a condição de execução antes da instalação das estacas;
- h) Para efeitos de análise, não é levado em consideração a ordem de instalação das estacas e, os diversos tipos execução de estacas foram agrupados apenas em cravadas ou escavadas, e estacas isoladas ou em grupo de estacas.

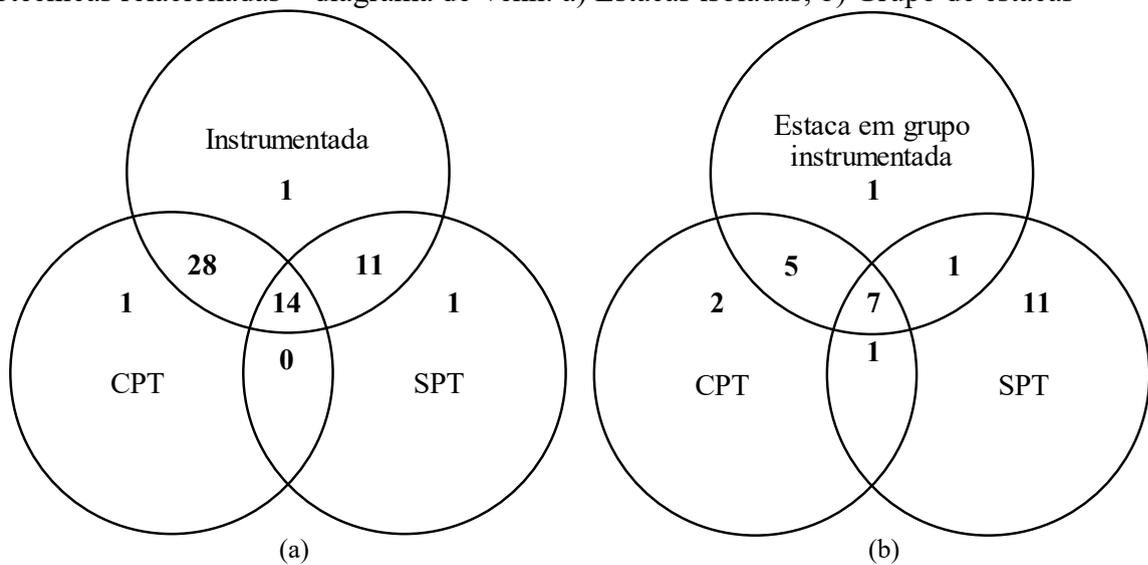
A Tabela 5 apresenta um resumo da quantidade de estacas obtidas dos estudos experimentais, separados por estacas isoladas e em grupo, instrumentadas ou não, escavadas ou cravadas. A Figura 27 apresenta diagramas de Venn das estacas isoladas e em grupo selecionadas, com a quantidade de estacas instrumentadas e que possuem ensaios de campo (SPT e CPT) relacionados.

Tabela 5 – Resumo da quantidade de estacas analisadas em função do tipo de estaca

Quantidade de estacas	Estacas isoladas		Estacas em grupo instrumentadas	Grupos de estacas não instrumentados
	Instrumentadas	Não instrumentadas		
Cravadas	47	1	9	2
Escavadas	7	1	5	12
Cravadas + Escavadas	54	2	14	14

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 27 – Quantidade de estacas analisadas em função da instrumentação e investigações geotécnicas relacionadas – diagrama de Venn: a) Estacas isoladas; b) Grupo de estacas

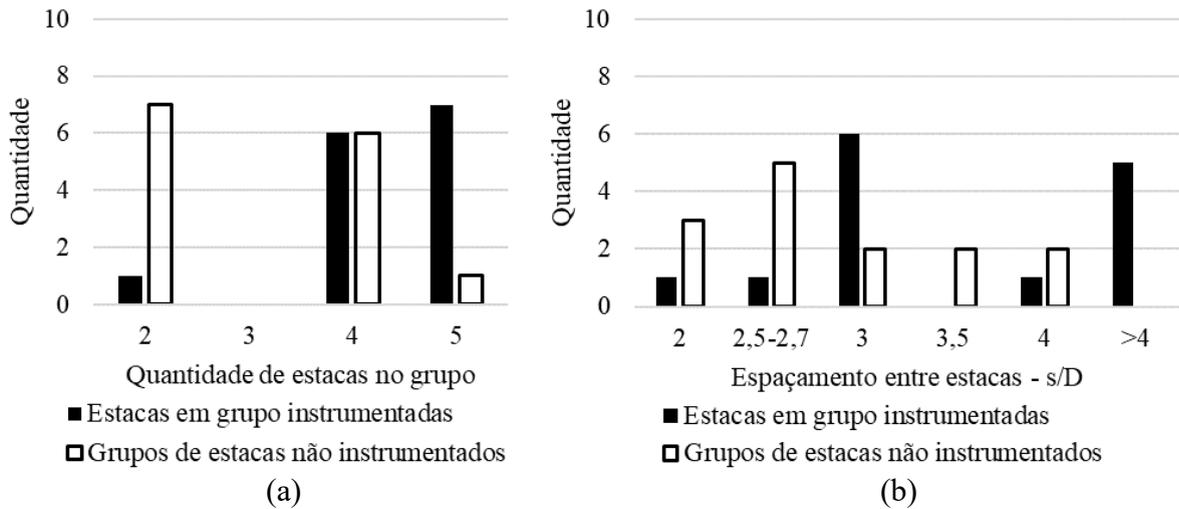


Fonte: Elaborado pelo Autor

A título de exemplo da Figura 27, é possível observar que há 7 estacas em grupo que são instrumentadas e possuem ensaios de SPT e CPT no local.

Especificamente quanto aos grupos de estacas, o número de estacas por grupo variou de 2 a 5 estacas e os espaçamentos entre estacas variaram entre 2 e 8 vezes o diâmetro da estaca. A Figura 28 apresenta a quantidade de estacas instrumentadas e totais de acordo com a quantidade de estacas no grupo e o espaçamento entre estacas.

Figura 28 – Resumo da quantidade de estacas em grupo: a) por quantidade de estacas no grupo; b) por espaçamento entre estacas



Fonte: Elaborado pelo Autor

Já os diâmetros das estacas variam de 60 mm a 800 mm, com comprimentos de estacas de até 9,15 m para grupos de estacas e 22,60 m para estacas isoladas. O peso específico do solo adjacentes às estacas variam de 15 a 21 kN/m³, em geral, e as cargas máximas aplicadas nas estacas variaram entre 2 e 5.000 kN. Vale ressaltar que o peso específico foi obtido através de informações apresentadas diretamente nos estudos, e quando não disponível, foi baseado em correções com ensaios de SPT, CPT ou compacidade do solo.

A Tabela 6 apresenta os quartis e o valor médio das seguintes variáveis: diâmetro da estaca (d), comprimento da estaca (L), razão L/d e peso específico do solo (γ). A Tabela 7 apresenta os quartis e valor médio dos valores de carga máxima submetida nas estacas isoladas ($Q_{\text{máx},i}$) e o valor médio por estaca da máxima carga de ensaio nas estacas em grupo ($Q_{\text{máx},m}$), além da máxima resistência lateral mobilizadora ($t_{\text{máx}}$) e máxima resistência de ponta mobilizadora ($q_{\text{máx}}$).

Tabela 6 – Análise estatística dos parâmetros geométricos e peso específico do solo das estacas e grupos de estacas selecionados

	Estacas isoladas				Estacas em grupo			
	d (mm)	L (m)	L/d	γ (kN/m ³)	d (mm)	L (m)	L/d	γ (kN/m ³)
Mínimo	60,0	1,22	6,6	14,9	60,0	1,445	6,6	14,9
1º quartil	101,6	2,00	19,4	-	100,0	1,50	15,0	-
Mediana	247,0	5,75	26,7	-	132,0	2,18	21,7	-
3º quartil	319,4	14,71	41,3	-	227,8	5,75	33,5	-
Máximo	800,0	22,60	72,7	20,6	300,0	9,15	43,6	20,6
Média	233,5	8,03	31,8	19,3	159,0	2,67	16,1	18,1

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 7 – Análise estatística dos parâmetros obtidos das provas de carga

	Estacas isoladas			Estacas em grupo		
	$Q_{máx,i}$ (kN)	$t_{máx}$ (kPa)	$q_{máx}$ (kPa)	$Q_{máx,m}$ (kN)	$t_{máx}$ (kPa)	$q_{máx}$ (kPa)
Mínimo	2,3	3,2	250	5,3	6,1	204
1° quartil	52,6	27,9	2.069	30,7	39,4	2.410
Mediana	431,0	44,2	3.680	160,0	124,9	3.027
3° quartil	1239,0	97,2	6.043	400,0	204,0	4.220
Máximo	4905,0	295,0	14.400	607,5	278,4	5.115
Média	867,6	69,0	4.467	220,5	123,4	3.111

Fonte: Elaborado pelo Autor

Das informações apresentadas nas tabelas acima, destaca-se que a relação L/d variou de 6 a 73 nas estacas selecionadas da pesquisa. Ademais, as resistências máximas mobilizadas pelo fuste ($t_{máx}$) variaram entre 3 kPa e 295 kPa e, pela ponta ($q_{máx}$) variaram entre 204 kPa e 14.400 kPa.

4 PROPOSTA DE CONSIDERAÇÃO DE FUNÇÕES HIPERBÓLICAS NA PREVISÃO DAS CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA

Diversos estudos, tais como de Fleming (1992), Liu *et al.* (2004), Zhang *et al.* (2014) e Bohn, Santos e Frank (2016), apontam que as curvas de transferência de carga em estacas isoladas podem ser representadas a partir de funções hiperbólicas. Considerando o reconhecimento da adequabilidade desse tipo de função a previsões de curvas t-z e q-z, são efetuados ajustes das curvas de transferência de carga experimentais a funções hiperbólicas. Isso é efetuado tanto para estacas isoladas quanto as estacas em grupo, permitindo avaliar a adequabilidade das mencionadas curvas às funções hiperbólicas. Posteriormente, os parâmetros de deformação, M_s e M_b , proposto por Bohn, Santos e Frank (2016) para estaca isolada são confrontados com os valores obtidos das estacas do presente estudo, e propostos novos valores de referência. Além disso, é avaliado a proposta de extensão da utilização desses parâmetros para estacas em grupo e propostos valores de referência. Vale mencionar que os valores obtidos dos parâmetros a, b e M serão utilizados também nos capítulos seguintes de desenvolvimento desta pesquisa para elaboração de modelos de previsão das curvas de transferência de carga.

4.1 Ajuste e obtenção dos parâmetros das curvas hiperbólicas

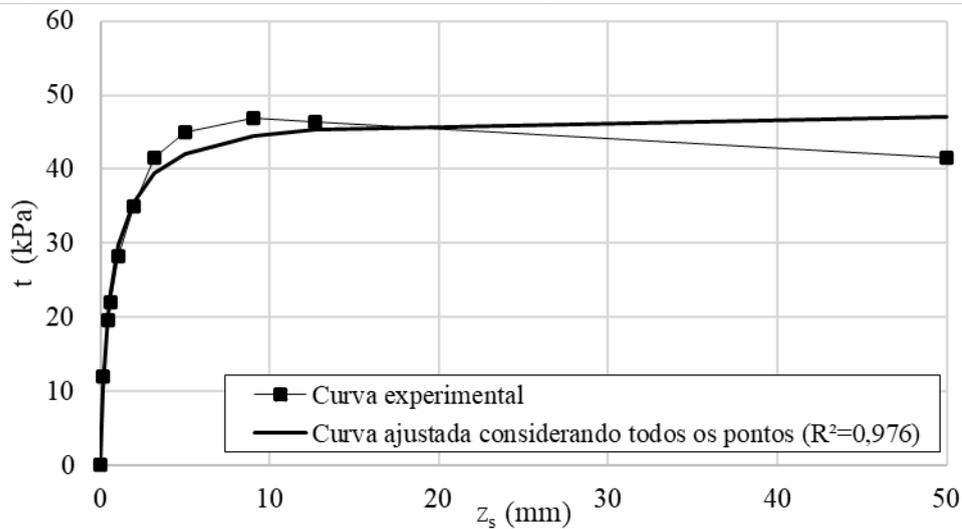
Os ajustes das curvas experimentais de transferência de carga às curvas hiperbólicas foram realizados por meio da técnica de regressão ao modelo hiperbólico. Os parâmetros “a” e “b” das curvas hiperbólica (definidos conforme Figura 16a) são obtidos da regressão para cada curva experimental, os quais relacionam-se à rigidez inicial (ou ao trecho elástico inicial) e à resistência mobilizada última (zona de plastificação) das curvas de transferência de carga, respectivamente.

O ajuste das curvas experimentais às funções hiperbólicas foi realizado, de modo geral, pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) considerando todos os pontos experimentais das curvas experimentais, conforme apresentado na Figura 29 para a curva t-z da estaca 1-2A.

Somente em três casos foram realizados ajustes para a obtenção das curvas de regressão. Primeiramente, para algumas curvas de transferência de carga das estacas 2-2, 2-5A, 2-6A e 3-2a que apresentam apenas o trecho de comportamento inicial da curva, o ajuste pode ter sido realizado manualmente considerando a retirada de pontos de pequenos deslocamentos, a fim de obter ajustes mais representativos nos trechos de maiores deslocamentos. Além deste

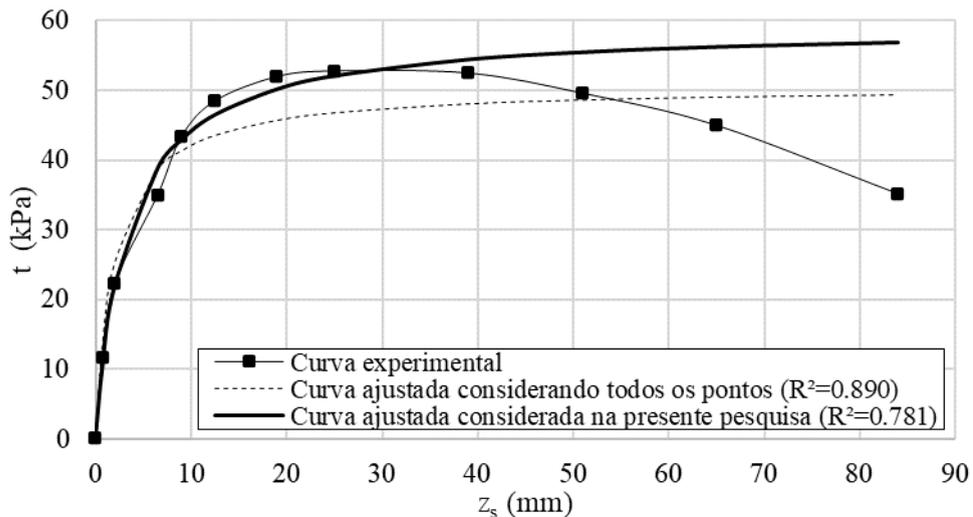
caso, para algumas curvas experimentais da obra 2 e 19, houve trechos que apresentaram redução brusca da rigidez da curva e posterior aumento. Neste caso, foram retirados da análise alguns pontos considerados como atípicos. Por fim, para a estaca 7-1 foi observado para deslocamentos superiores a 40 mm, que as curvas de transferência de carga experimentais apresentavam um patamar de endurecimento (ou amolecimento), não sendo considerados no ajuste das curvas hiperbólicas, conforme apresentado na Figura 30 para a curva t-z.

Figura 29 – Ajuste da curva t-z a função hiperbólica na estaca 1-2A



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 30 – Ajuste da curva t-z a função hiperbólica na estaca 7-1



Fonte: Elaborado pelo Autor

A fim de facilitar a nomenclatura dos parâmetros “a” e “b” da curva hiperbólica para estacas isoladas ou em grupo de estacas e referentes a curva t-z ou q-z, esses parâmetros

para estacas isoladas são denominados $a_{i,t}$ e $a_{i,q}$ para as curvas t-z e q-z, respectivamente, relativos ao parâmetro “a”. Analogamente $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$ se referem ao parâmetro “a” para estaca em grupo, e para as curvas t-z e q-z, respectivamente. As mesmas observações valem para o parâmetro “b” da curva hiperbólica.

O Apêndice A apresenta as curvas de transferência de carga experimentais com as respectivas curvas de regressão hiperbólica, além dos valores dos parâmetros das curvas hiperbólicas, coeficiente de determinação R^2 e R^2 -ajustado. Nas Tabela 8 e Tabela 9 são listados os parâmetros de curva hiperbólica de cada estaca com o respectivo valor de R^2 -ajustado, para as estacas isoladas e estacas em grupo, respectivamente.

Tabela 8 – Parâmetros das curvas de transferência de carga de estacas isoladas obtidos a partir de ajuste às funções hiperbólicas

(continua)							
Estaca	Trecho (m)	$a_{i,t}$ (mm/kPa)	$b_{i,t}$ (1/kPa)	$R^2_{i,t}$ (ajustado)	$a_{i,q}$ (mm/kPa)	$b_{i,q}$ (1/kPa)	$R^2_{i,q}$ (ajustado)
1-1	-	0,03870	0,04418	0,867	0,000511	0,000161	0,940
2-1	0,8 - 3,1	0,01854	0,00143	0,771	0,001754	0,000190	0,994
	3,1 - 5,6	0,02125	0,00600	0,979			
2-2	0,8 - 3,1	0,01739	0,00178	0,986	0,000701	0,000168	0,959
	3,1 - 5,6	0,03603	0,00482	0,895			
3-1	0,2 - 0,9	0,00508	0,01305	0,993	0,000631	0,000196	0,959
	0,9 - 1,5	0,01018	0,00755	1,000			
	1,5 - 2,1	0,00378	0,00699	1,000			
4-1	-	0,06580	0,30648	1,000	0,001832	0,004004	0,999
4-2	-	0,18084	0,18623	0,950	0,000400	0,000309	0,994
4-3	-	0,24399	0,22402	0,968	0,000712	0,000438	0,996
5-1	0 - 1,15	0,04245	0,02596	0,959	0,001141	0,000260	0,989
	1,15 - 1,445	0,02010	0,01592	0,910			
6-1	0 - 0,375	0,02348	0,01907	0,964	0,001038	0,003930	0,988
	0,375 - 0,75	0,02085	0,01269	0,963			
	0,75 - 1,125	0,01963	0,01284	0,975			
	1,125 - 1,5	0,02909	0,01806	0,942			
7-1	-	0,05775	0,01691	0,781	0,006595	0,000172	0,894
8-1	-	0,05174	0,01062	0,987	0,000585	0,000117	0,946
9-1	-	0,06005	0,00451	0,966	0,000547	0,000076	0,983
10-1	5,5 - 11,6	0,13313	0,03822	0,953	0,000297	0,000196	0,958
10-2	8,5 - 14,6	0,26745	0,02974	0,982	0,000264	0,000165	0,976
11-1	11,6 - 17,7	0,10447	0,02678	0,991	0,000813	0,000123	0,988
11-2	14,6 - 20,7	0,30230	0,00600	0,994	0,000523	0,000098	0,994
11-3	5,8 - 11,9	0,07008	0,03132	0,857	0,000224	0,000157	0,959
11-4	8,8 - 14,9	0,07976	0,03003	0,879	0,000250	0,000154	0,970
11-5	11,9 - 18,0	0,04966	0,03094	0,937	0,000336	0,000147	0,984
11-6	14,9 - 21,0	0,06848	0,02912	0,961	0,000326	0,000173	0,942
11-7	-	0,02501	0,01129	0,996	0,000702	0,000087	0,992
11-8	-	0,03721	0,02235	0,984	0,000948	0,000105	0,995
12-1	-	0,00294	0,02728	0,975	0,002477	0,000452	0,979
12-2	-	0,06291	0,10639	0,964	0,001537	0,000370	0,993
13-3	-	0,13922	0,07502	0,962	0,001313	0,000169	0,979

Tabela 8 – Parâmetros das curvas de transferência de carga de estacas isoladas obtidos a partir de ajuste às funções hiperbólicas (conclusão)

Estaca	Trecho (m)	$a_{i,t}$ (mm/kPa)	$b_{i,t}$ (1/kPa)	$R^2_{i,t}$ (ajustado)	$a_{i,q}$ (mm/kPa)	$b_{i,q}$ (1/kPa)	$R^2_{i,q}$ (ajustado)
13-4	-	0,02119	0,05746	0,996	0,001402	0,000311	0,973
13-5	-	0,14348	0,02366	0,987	0,000703	0,000067	0,969
13-6	-	0,01361	0,03414	0,989	0,000672	0,000362	0,997
13-7	-	0,02004	0,01827	0,989	0,001046	0,000369	0,981
13-8	-	0,02443	0,02438	0,953	0,000832	0,000917	0,907
13-9	-	0,12751	0,02772	0,992	0,000673	0,000072	0,979
13-10	-	0,23493	0,02576	0,999	0,000738	0,000062	0,990
13-11	-	0,02123	0,02189	0,976	0,000670	0,000235	0,981
13-12	-	0,01716	0,01889	0,987	0,000679	0,000218	0,993
13-13	-	0,02963	0,02126	0,959	0,000800	0,000317	0,943
13-14	-	0,10146	0,06756	0,980	0,001036	0,000125	0,973
13-15	-	0,23851	0,08196	0,995	0,001153	0,000101	0,987
13-16	-	0,27073	0,08418	0,984	0,000845	0,000121	0,984
14-1	-	0,03582	0,01156	0,998	0,018243	0,000220	0,966
15-1	-	0,04776	0,03097	0,988	0,001242	0,000871	0,976
15-2	-	0,04938	0,03625	0,994	0,000893	0,000523	0,918
15-3	-	0,03431	0,02192	0,999	0,001067	0,001178	0,947
15-4	-	0,05665	0,03009	0,994	0,000593	0,000705	0,956
16-1	0 - 1,88	0,03190	0,00791	0,979	0,005552	0,000215	0,997
17-1	3,0 - 12,0	0,19323	0,02480	0,953	0,013899	0,000130	0,980
17-2	4,5 - 13,5	0,13476	0,02560	0,962	0,011180	0,000179	0,985
18-1	-	0,00558	0,00521	0,903	0,000117	0,000059	0,902
19-1	0 - 11,7	0,06065	0,01138	0,993	0,004902	0,000500	0,918
	11,7 - 19,3	0,04190	0,00419	0,874			
19-2	0 - 12,4	0,03463	0,01086	0,990	0,005237	0,000651	0,814
	12,4 - 20,0	0,03986	0,00232	0,938			
20-1	7,7 - 18,0	0,00610	0,00381	0,996	-	-	-
21-1	8,25 - 10,2	0,03400	0,00335	0,999	0,001107	0,000653	0,998
21-2	8,7 - 10,45	0,04067	0,00258	0,921	0,002220	0,000269	0,994
21-3	8,1 - 10,15	0,02392	0,00472	0,999	0,003388	0,000546	0,994
22-1	4,7 - 8,85	0,02289	0,00625	0,994	0,000686	0,000258	0,999

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 9 – Parâmetros das curvas de transferência de carga de estacas em grupo obtidos a partir de ajuste às funções hiperbólicas

Estaca	Trecho (m)	$a_{g,t}$ (mm/kPa)	$b_{g,t}$ (1/kPa)	$R^2_{g,t}$ (ajustado)	$a_{g,q}$ (mm/kPa)	$b_{g,q}$ (1/kPa)	$R^2_{g,q}$ (ajustado)
1-2A	-	0,01374	0,02100	0,974	0,005382	0,000204	0,989
1-2B	-	0,01896	0,02563	0,965	0,002562	0,000222	0,972
1-2C	-	0,02805	0,01907	0,991	0,002633	0,000271	0,996
2-4A	0,8 - 3,1	0,02212	0,00267	0,979	0,001183	0,000282	0,894
	3,1 - 5,6	0,03677	0,00494	0,982			
2-4B	0,8 - 3,1	0,02126	0,00240	0,916	0,001910	0,000188	0,998
	3,1 - 5,6	0,03377	0,00670	0,979			
2-5A	0,8 - 3,1	0,03655	0,00162	0,995	0,001839	0,000094	0,988
	3,1 - 5,6	0,03218	0,00600	0,944			

(continua)

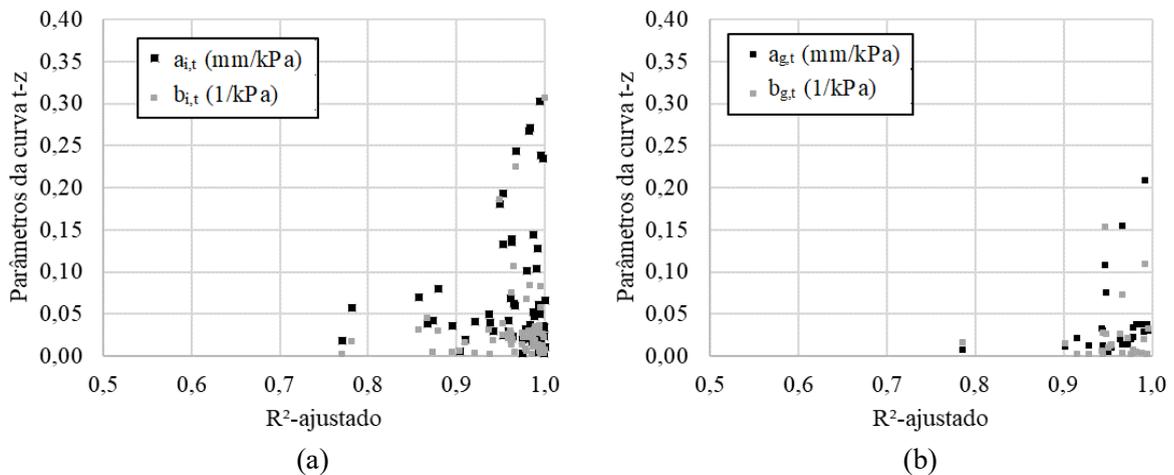
Tabela 9 – Parâmetros das curvas de transferência de carga de estacas em grupo obtidos a partir de ajuste às funções hiperbólicas (conclusão)

Estaca	Trecho (m)	$a_{g,t}$ (mm/kPa)	$b_{g,t}$ (1/kPa)	$R^2_{g,t}$ (ajustado)	$a_{g,q}$ (mm/kPa)	$b_{g,q}$ (1/kPa)	$R^2_{g,q}$ (ajustado)
2-6A	0,8 - 3,1	0,02974	0,00163	0,945	0,001964	0,000066	0,930
	3,1 - 5,6	0,03710	0,00356	0,989			
3-2A	0,2 - 0,9	0,01996	0,00244	0,977	0,001003	0,000086	0,988
	0,9 - 1,5	0,01340	0,00284	0,967			
	1,5 - 2,1	0,01159	0,00255	0,929			
4-4A	-	0,10746	0,15322	0,947	0,000755	0,001637	0,999
4-5A	-	0,15372	0,07257	0,967	0,000904	0,000417	0,976
4-6A	-	0,20798	0,10945	0,993	0,000604	0,000361	0,988
5-2A	0 - 1,15	0,07524	0,02591	0,948	0,001293	0,000300	0,994
	1,15 - 1,445	0,01313	0,02812	0,945			
5-3A	0 - 1,15	0,02971	0,03214	0,996	0,002667	0,000217	0,998
	1,15 - 1,445	0,00673	0,01643	0,787			
6-2A	0 - 0,375	0,01112	0,01420	0,903	0,000135	0,005199	0,749
	0,375 - 0,75	0,00452	0,00970	0,951			
	0,75 - 1,125	0,00902	0,01291	0,955			
	1,125 - 1,5	0,00940	0,01246	0,954			

Fonte: Elaborado pelo Autor

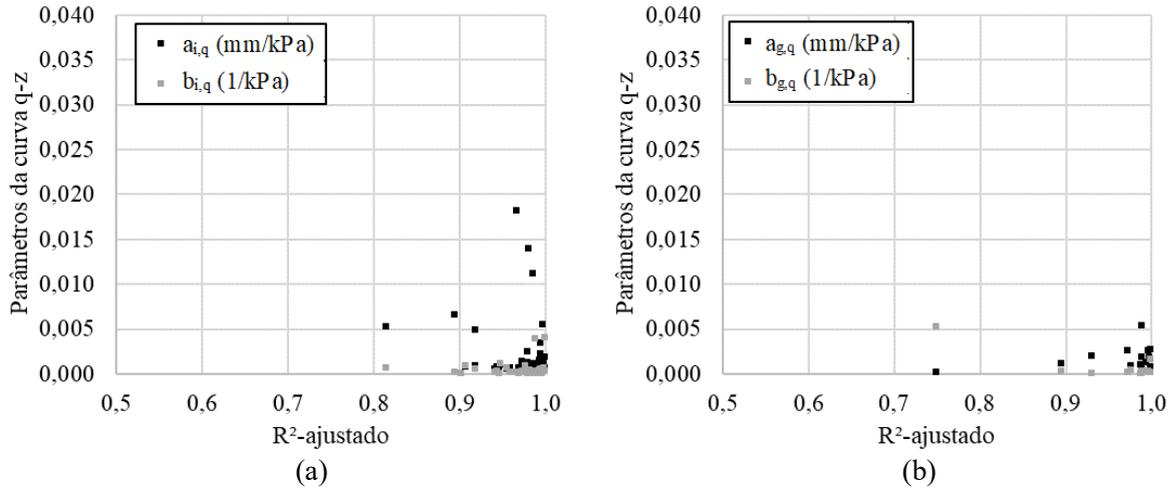
As Figura 31 e Figura 32 apresentam os valores obtidos dos parâmetros da curva hiperbólica obtidos por ajustes das curvas t-z e q-z, respectivamente. De modo geral os resultados apontaram valores de R^2 -ajustado elevados (próximos a unidade) e valores dos parâmetros “a” levemente superiores, numericamente, aos respectivos parâmetros “b”. Observa-se ainda que os parâmetros da curva t-z para estacas isoladas e em grupo (Figura 31) compreendem um intervalo de 0 a 0,31 e para a curva q-z (Figura 32), os valores obtidos são inferiores e estão entre 0 e 0,019.

Figura 31 – Parâmetros das curvas t-z hiperbólicas: a) estacas isoladas; b) estacas em grupo



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 32 – Parâmetros das curvas q-z hiperbólicas: a) estacas isoladas; b) estacas em grupo



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2 Obtenção e análise dos parâmetros M_s e M_b a partir dos ajustes das curvas de transferência de carga

Das equações apresentadas para a curva de transferência de carga a partir de um modelo utilizando funções hiperbólicas de Bohn, Santos e Frank (2016) segundo a Figura 18b, os parâmetros de deformação M_s e M_b (ou denominado neste trabalho apenas parâmetro M da curva hiperbólica) são responsáveis por descrever a curva normalizada de transferência de carga para o fuste e ponta da estaca, respectivamente, conforme pode ser descrito na Equação 46 para a curva t-z.

$$\left(\frac{t}{t_{m\acute{a}x}}\right) = \frac{\left(\frac{z_s}{D}\right)}{M_s + \left(\frac{z_s}{D}\right)} \quad (46)$$

Desenvolvendo a Equação 46 a partir da equação de função hiperbólica (Equação 28), obtém-se das Equações 47 a 49 a Equação 50 que relaciona o parâmetro M_s aos parâmetros da curva hiperbólica de ajuste obtidas no item 4.1, procedimento análogo é obtido na definição do parâmetro M_b .

$$t = \frac{z}{a + bz} = \frac{(z/D)}{a/D + b(z/D)} \quad (47)$$

$$t_{m\acute{a}x} = 1/b \quad (48)$$

$$\frac{t}{t_{\text{máx}}} = \frac{(z/D)}{t_{\text{máx}}[a/D + b(z/D)]} = \frac{(z/D)}{\left(\frac{1}{b} \frac{a}{D}\right) + (z/D)} \quad (49)$$

Dessa forma, M_s é dado por:

$$M_s = \frac{1}{b} \frac{a}{D} \quad (50)$$

Para avaliação do parâmetro adimensional M (M_s e M_b) de Bohn, Santos e Frank (2016) para estacas isoladas, verifica-se a aderência dos valores sugeridos destes autores aos valores obtidos por ajuste das estacas elencadas no presente estudo. A validação dos valores dos parâmetros foi realizada a partir dos ajustes obtidos na estaca escavada 7-1 de Soares, Coutinho e Cunha (2021) e na estaca cravada 10-1 de Tucker e Briaud (1988).

Para estacas em grupo, o presente trabalho propõe a extensão da metodologia adotada por Bohn, Santos e Frank (2016) a partir do ajuste das curvas de transferência de carga de estacas em grupo e obtenção dos valores de M . A validação dos valores dos parâmetros foi realizada a partir dos ajustes obtidos na estaca em grupo cravada 1-2B de Briaud, Tucker e Ng (1989) e na estaca em grupo escavada 2-4B de Abdalrahem e El Naggat (2020).

De modo a diferenciar o parâmetro M para estacas isoladas e estacas em grupo, adota-se a partir de então, a simbologia dos parâmetros $M_{s,i}$ e $M_{s,g}$ representando o parâmetro M_s (curvas t - z) em estacas isoladas e em grupo, respectivamente, sendo o mesmo procedimento válido para o parâmetro M_b (curvas q - z).

4.2.1 Estacas isoladas

Das curvas ajustadas à função hiperbólica foram obtidos valores do parâmetro M para estacas isoladas. A Tabela 10 mostra valores de parâmetros estatísticos realizadas na série de dados experimentais, tais como quartis, média, desvio padrão e coeficiente de variação. Além disso, os valores de referência propostos por Bohn, Santos e Frank (2016) são apresentados para fins de comparação, para as curvas t - z e q - z e estacas escavadas e cravadas, separadamente. A Figura 33 apresenta o diagrama de caixa dos pontos experimentais destacando os valores médios, faixa de valores e pontos atípicos (*outliers*).

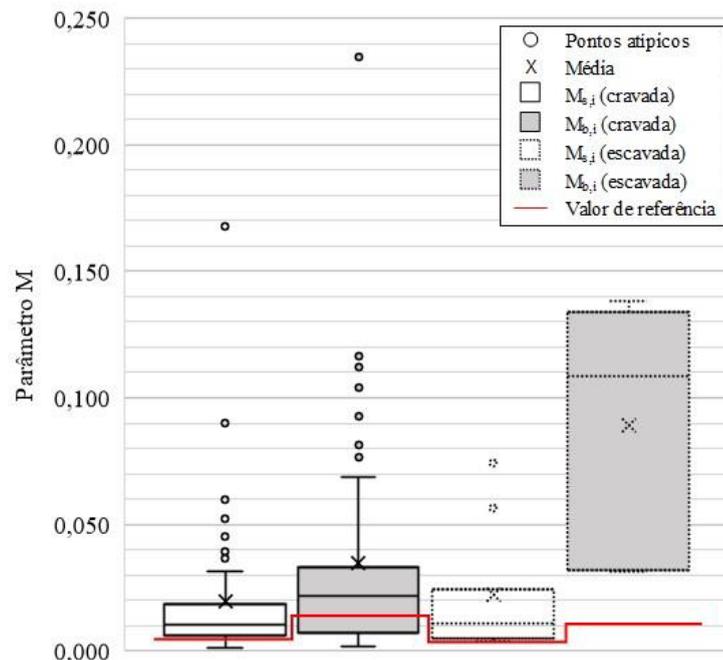
Destaca-se que não foram apresentados, neste momento, os valores obtidos por ajustes das estacas utilizadas na etapa de validação (estacas 7-1 e 10-1) e das estacas 2-1 e 10-2, já que estas fazem parte da validação no capítulo seguinte, conforme apresentado no item 5.1.3, e utilizam os parâmetros M desenvolvidos no presente capítulo. A escolha do subgrupo de validação se deu, de modo a preservar as mesmas estacas para validação neste e nos próximos capítulos, que tenham preferencialmente estacas em grupo no mesmo campo experimental e que as propostas sejam validadas para estacas cravadas e escavadas.

Tabela 10 – Estatística descritiva dos valores obtidos por ajuste do parâmetro M em estacas isoladas

	Estacas cravadas		Estacas escavadas	
	$M_{s,i}$	$M_{b,i}$	$M_{s,i}$	$M_{b,i}$
Número de amostras	51	44	8	5
Mínimo	0,0011	0,002	0,0039	0,032
1º quartil	0,0064	0,007	0,0051	0,032
Mediana	0,0102	0,022	0,0107	0,109
3º quartil	0,0182	0,033	0,0243	0,134
Máximo	0,1766	0,235	0,0741	0,138
Média	0,0196	0,035	0,0224	0,089
Desvio padrão	0,0280	0,0437	0,0272	0,0533
Coefficiente de variação	143%	126%	121%	60%
Valor de referência de Bohn, Santos e Frank (2016)	0,0050	0,015	0,0032	0,010

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 33 – Diagrama de caixa dos valores obtidos por ajuste do parâmetro M em estacas isoladas

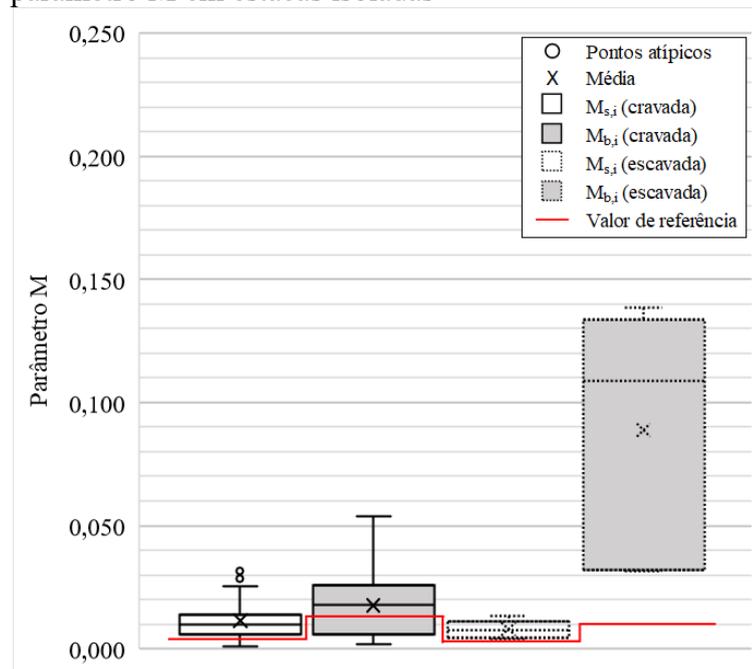


Fonte: Elaborado pelo Autor

Vale ressaltar que o parâmetro M por ser obtido através de duas variáveis (a e b), apresenta uma variação muito grande, superando facilmente coeficientes de variação superiores a 100%, sendo um parâmetro de difícil previsão.

Comparando os valores obtidos dos parâmetros M nos diversos estudos experimentais selecionados, observa-se que estes apresentaram-se significativamente superiores aos valores de referência propostos por Bohn, Santos e Frank (2016), excetuando-se, neste caso, apenas o parâmetro M_b para estacas cravadas. Ademais, com exceção do parâmetro M_b em estacas escavadas, houve alguns pontos dispersos, de modo que estes foram retirados da análise para obtenção de novos valores de referência dos parâmetros M . A Figura 34 apresenta o diagrama de caixa dos valores dos parâmetros M com a retirada dos valores dispersos.

Figura 34 – Diagrama de caixa dos pontos considerados do parâmetro M em estacas isoladas



Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se que os parâmetros tenderam a ser levemente superiores ao proposto por Bohn, Santos e Frank (2016) com exceção do parâmetro M_b para estaca escavada, a qual apresentou uma faixa de valores consideravelmente acima do valor de referência. Além disso, para os parâmetros da ponta da estaca ($M_{b,i}$) foram observadas uma faixa de valores (entre 1º e

3º quartil) mais ampla. Destaca-se ainda que o parâmetro M_b definido é consideravelmente superior para estacas escavadas, o que difere do definido por Bohn, Santos e Frank (2016).

Deste modo, para fins de definição de novos valores de referência foram considerados os valores medianos dos parâmetros M da Figura 34, conforme apresentados numericamente na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores dos parâmetros M para estacas isoladas definidos na presente pesquisa

	Estacas cravadas		Estacas escavadas	
	$M_{s,i}$	$M_{b,i}$	$M_{s,i}$	$M_{b,i}$
Valor proposto	0,0096	0,018	0,0076	0,109

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para validação foram utilizadas as estacas isoladas 7-1 e 10-1, as quais são escavada e cravada, respectivamente. Os valores dos parâmetros M obtidos por ajustes são apresentados na Tabela 12, apresentando também os valores de referência desenvolvidos no presente estudo e erro percentual.

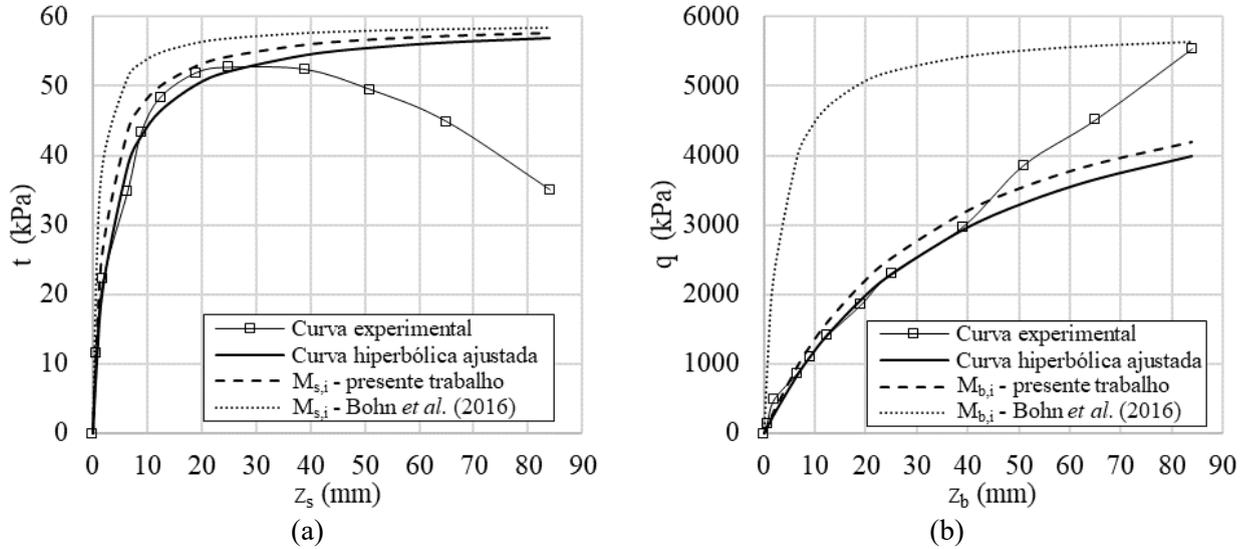
Tabela 12 – Validação dos parâmetros M em estacas isoladas

	Estacas cravadas		Estacas escavadas	
	$M_{s,i}$	$M_{b,i}$	$M_{s,i}$	$M_{b,i}$
Valores de referência do presente estudo	0,0096	0,018	0,0076	0,109
Estaca 7-1	-	-	0,0114	0,128
Estaca 10-1	0,0162	0,017	-	-
Erro percentual (%)	69%	-6%	50%	17%
Valores de referência de Bohn, Santos e Frank (2016)	0,0050	0,015	0,0032	0,010

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 35 mostra, para a estaca 7-1, as curvas experimentais e hiperbólicas obtidas por ajuste dos resultados experimentais, baseados nos parâmetros M definidos no presente trabalho e de acordo com os valores propostos por Bohn, Santos e Frank (2016).

Figura 35 – Validação dos parâmetros $M_{s,i}$ e $M_{b,i}$ da estaca 7-1: a) curva t-z; b) curva q-z



Fonte: Elaborado pelo Autor

De modo geral, observa-se que houve boa aderência aos valores propostos, com destaque aos valores dos parâmetros $M_{b,i}$, cujos valores obtidos por ajustes apresentaram-se na faixa de valores dos intervalos interquartis (entre 1º e 3º quartil). Ademais, destaca-se que os erros percentuais dos parâmetros $M_{s,i}$ apresentaram-se próximos dos intervalos interquartis, e de modo geral, os erros percentuais variaram entre -6% e 69%. Por fim, comparando a aderência dos valores obtidos por ajuste com os valores de referência no presente trabalho e o proposto por Bohn, Santos e Frank (2016), é possível concluir que os novos valores de referência se apresentam mais convergentes em todas as análises.

4.2.2 Estacas em grupo

Analogamente ao realizado para as estacas isoladas, foram efetuados ajustes a partir das funções hiperbólicas, conforme mostrado na Tabela 13, obtendo-se valores do parâmetro M para estacas em grupo. A Tabela 13 mostra valores de parâmetros estatísticos realizadas na série de dados experimentais, tais como quartis, média, desvio padrão e coeficiente de variação. Além disso são apresentados os valores de referência propostos por Bohn, Santos e Frank (2016) para estacas isoladas, para as curvas t-z e q-z e estacas escavadas e cravadas, separadamente.

Tabela 13 – Estatística descritiva dos valores obtidos por ajuste do parâmetro M de estacas em grupo

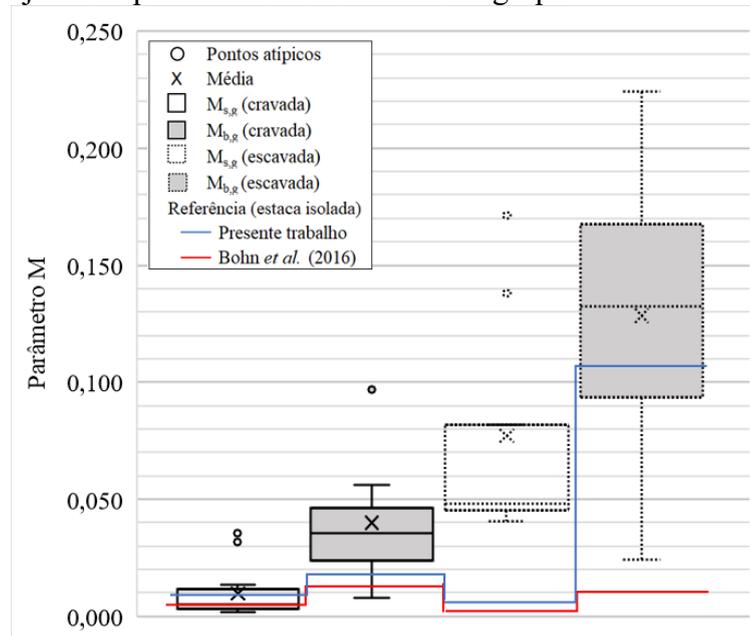
	Estacas cravadas		Estacas escavadas	
	$M_{s,g}$	$M_{b,g}$	$M_{s,g}$	$M_{b,g}$
Número de amostras	13	7	9	4
Mínimo	0,0020	0,008	0,0406	0,024
1º quartil	0,0031	0,024	0,0455	0,093
Mediana	0,0050	0,036	0,0482	0,132
3º quartil	0,0117	0,046	0,0819	0,167
Máximo	0,0353	0,097	0,1713	0,224
Média	0,0097	0,040	0,0772	0,128
Desvio padrão	0,0111	0,0292	0,0472	0,0828
Coefficiente de variação	115%	73%	61%	64%
Valor de referência de Bohn, Santos e Frank (2016) para estacas isoladas	0,005	0,015	0,0032	0,010

Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se em geral, que o parâmetro $M_{s,g}$ é superior ao valor correspondente do parâmetro $M_{b,g}$, e há uma diferença significativa dos parâmetros $M_{s,g}$ e $M_{b,g}$ apenas em função do tipo de execução de estacas (estacas escavadas apresentam maiores valores dos referidos parâmetros). Além disso, comparando os valores dos parâmetros M calculados, o valor mediano do parâmetro $M_{s,g}$ em estacas cravadas foi numericamente igual ao valor proposto por Bohn, Santos e Frank (2016) para estacas isoladas, enquanto os demais parâmetros de referência apresentaram-se inferiores ao 1º quartil dos valores obtidos.

A Figura 36 apresenta o diagrama de caixa dos pontos experimentais destacando os valores médios, faixa de valores, pontos atípicos e os valores de referência para estacas isoladas. Vale ressaltar que devido a quantidade limitada de amostras, não é retirado os valores dispersos, excetuando-se apenas o valor de ajuste de $M_{b,g}$ obtido para a estaca 6-2A por encontrar-se muito distante da ordem de grandeza dos valores.

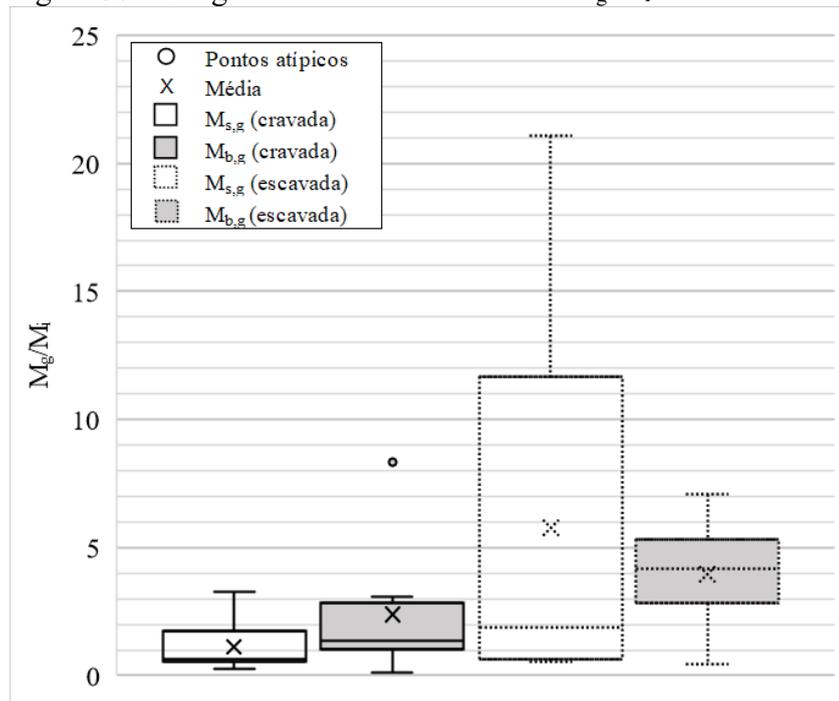
Figura 36 – Diagrama de caixa dos valores obtidos por ajuste do parâmetro M de estacas em grupo



Fonte: Elaborado pelo Autor

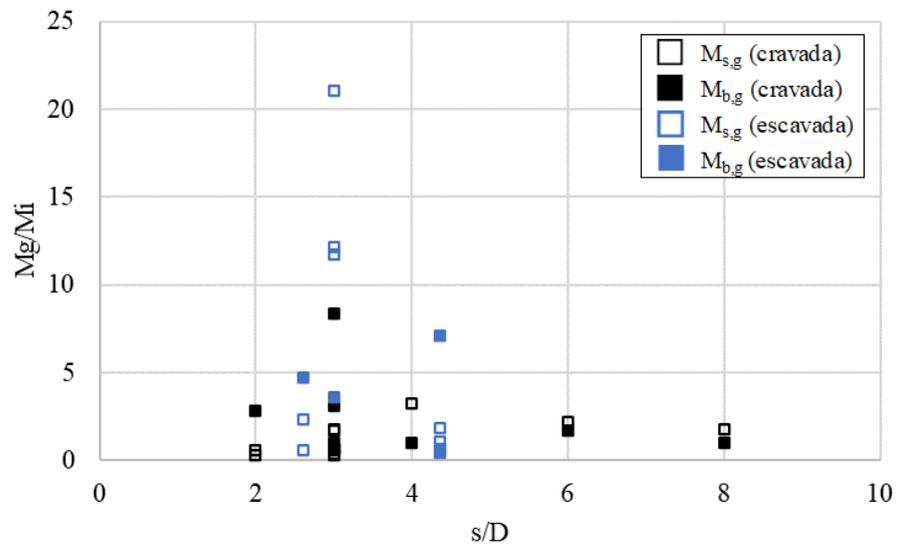
Destaca-se que, comparando os valores medianos em estacas em grupo aos definidos na presente pesquisa para estacas isoladas, é possível observar uma pequena redução do parâmetro M_s em estacas cravadas e um acréscimo significativo para estacas escavadas. Os valores medianos dos parâmetros M_b apresentaram-se superiores aos respectivos parâmetros em estacas isoladas.

Comparando a razão do parâmetro M da estaca em grupo com a respectiva estaca isolada de referência (conforme Quadro 5), M_g/M_i , obtém-se que os valores medianos variaram entre 0,64 para o parâmetro $M_{s,g}$ em estacas cravadas e 4,2 para o parâmetro $M_{b,g}$ em estacas escavadas. Ademais, observa-se que a amplitude interquartil é maior para estacas escavadas e de forma mais destacada para o parâmetro $M_{s,g}$, conforme observado na Figura 37.

Figura 37 – Diagrama de caixa dos valores M_g/M_i 

Fonte: Elaborado pelo Autor

Além disso, analisou-se a dispersão da razão M_g/M_i para as curvas t-z e q-z em relação ao espaçamento das estacas no grupo (relação s/D), apresentada na Figura 38. Observa-se que há maior amplitude de valores principalmente para grupo de estacas com menor espaçamento, onde há maior efeito de grupo, e para as estacas escavadas.

Figura 38 – Valores experimentais de estacas em grupo do parâmetro M_g/M_i em função do espaçamento entre estacas

Fonte: Elaborado pelo Autor

Já que há uma quantidade limitada de pontos obtidos por ajustes dos parâmetros M em estacas em grupo, define-se no presente trabalho em caráter preliminar, a adoção dos valores medianos dos parâmetros calculados por ajuste conforme Figura 36 dos parâmetros M em estacas em grupo, os quais são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores dos parâmetros M de estacas em grupo definidos na presente pesquisa em caráter preliminar

	Estacas cravadas		Estacas escavadas	
	$M_{s,i}$	$M_{b,i}$	$M_{s,i}$	$M_{b,i}$
Valor mediano (presente pesquisa)	0,0050	0,036	0,0482	0,132

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para fins de validação foram utilizadas as estacas em grupo 1-2B e 2-4B para estacas cravadas e escavadas, respectivamente. Os valores dos parâmetros M obtidos por ajustes são apresentados na Tabela 15, apresentando também os valores de referência desenvolvidos no presente estudo e erro percentual.

Tabela 15 – Validação dos parâmetros M para estacas em grupo

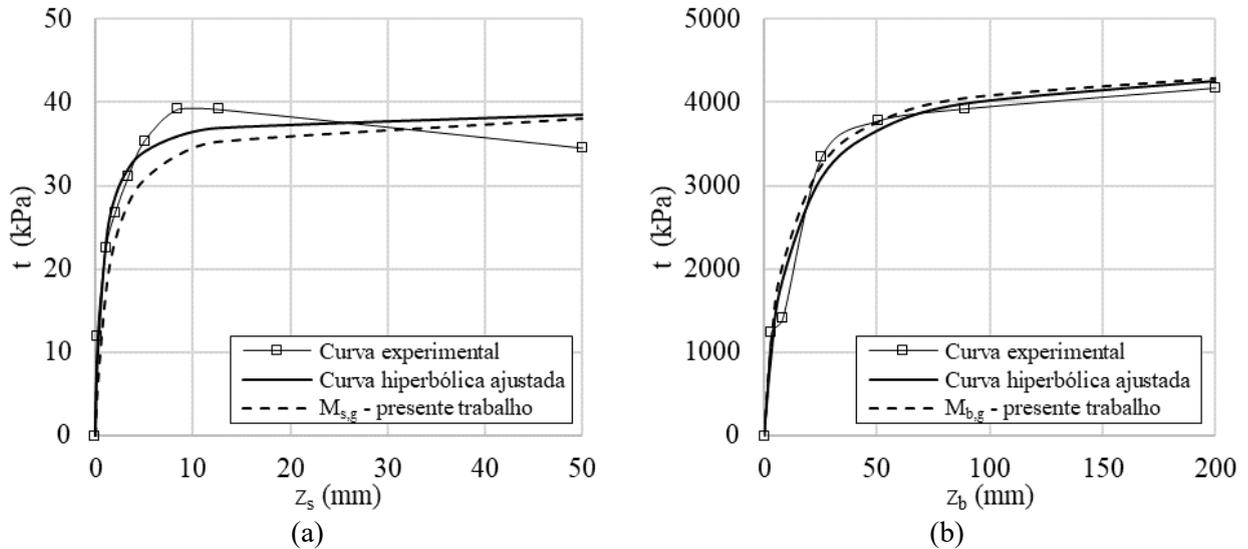
	Estacas cravadas		Estacas escavadas	
	$M_{s,i}$	$M_{b,i}$	$M_{s,i}$	$M_{b,i}$
Valores de referência do presente estudo	0,0050	0,036	0,0482	0,132
Estaca 1-2B	0,0027	0,042	-	-
Estaca 2-3B	-	-	0,0515 ^[1] 0,0293 ^[2]	0,059
Erro percentual (%)	-46%	17%	7% ^[1] -39% ^[2]	-55%

Notas: [1] Corresponde ao trecho de 0,8 m a 3,1 m; e [2] corresponde ao trecho 3,1 m a 5,6 m.

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 39 apresenta de forma gráfica para a estaca 1-2B, as curvas experimentais e hiperbólicas obtidas por ajuste dos resultados experimentais e baseados nos parâmetros M definidos no presente trabalho.

Figura 39 – Validação dos parâmetros $M_{s,g}$ e $M_{b,g}$ da estaca 1-2B: a) curva t-z; b) curva q-z



Fonte: Elaborado pelo Autor

De modo geral, observa-se que houve uma menor aderência aos valores propostos comparando com as análises realizadas para estacas isoladas, destacando que apenas os valores dos parâmetros $M_{b,g}$ da estaca BTN-11 e $M_{s,g}$ da estaca MPG2-2 (trecho 0,8 a 3,1 m) apresentaram-se na faixa de valores dos intervalos interquartis. Ademais, os erros percentuais variaram entre -55% e 17%.

4.3 Conclusões parciais

De forma genérica, as curvas de transferência de carga apresentaram boa convergência às funções hiperbólicas, com valores médios de R^2 -ajustado na ordem de 0,96. Destaca-se, no entanto, que apenas as curvas t-z das estacas 5-3A, 2-1 e 7-1, e as curvas q-z das estacas 6-2A e 19-2 apresentaram valores de R^2 -ajustado inferiores a 0,85.

Quanto ao intervalo de valores típicos dos parâmetros “a” e “b” das curvas de transferência de carga, observa-se para as curvas t-z que os referidos parâmetros variam em um intervalo entre 0 e 0,31 e para curvas q-z de 0 a 0,020, destacando-se ainda que, em geral, o parâmetro “a” é numericamente maior que o respectivo parâmetro “b”.

Quanto aos parâmetros adimensionais $M_{s,i}$ e $M_{b,i}$ para estacas isoladas obtidas das curvas ajustadas, observou-se que os valores propostos por Bohn, Santos e Frank (2016) apresentaram-se abaixo dos valores dos parâmetros obtidos por ajustes dos estudos selecionados. Destaca-se que com exceção do parâmetro $M_{b,i}$ em estacas cravadas, os valores propostos por Bohn, Santos e Frank (2016) apresentaram-se abaixo do primeiro quartil dos

resultados obtidos. Verifica-se ainda que apenas o parâmetro $M_{b,i}$ em estacas escavadas apresentou uma faixa de valores do intervalo interquartil (entre 1º e 3º quartil) elevado e distante significativamente do valor de referência proposto por Bohn, Santos e Frank (2016). Adotou-se para fins de definição de novos valores de referência de $M_{s,i}$ e $M_{b,i}$, os valores medianos dos parâmetros obtidos por ajustes dos estudos selecionados, os quais com a validação, apresentaram-se mais convergentes aos valores experimentais quando comparados com os valores propostos por Bohn, Santos e Frank (2016).

Na proposta de expandir a utilização do parâmetro M em grupo de estacas, observou-se, de modo geral, que os valores dos parâmetros tenderam a aumentar. Dessa forma, observa-se que os mesmos são influenciados pelo efeito de grupo, além de se apresentarem em uma faixa mais ampla de valores. Comparando o parâmetro M de estacas em grupo em relação ao respectivo parâmetro para a estaca isolada de referência, obteve-se que o parâmetro M em estacas em grupo é, em geral, 0,64 a 4,2 vezes que o mesmo parâmetro para estaca isolada, e que a diferença de valores entre estacas em grupo e isoladas é maior para estacas com menores espaçamentos entre estacas (relação s/D), a qual estão associados o efeito de grupo nas estacas, e para estacas escavadas.

Para grupos de estacas observa-se, preliminarmente, que os parâmetros $M_{s,g}$ e $M_{b,g}$ propostos, a partir dos valores medianos dos parâmetros obtidos nos estudos selecionados, são menos convergentes aos valores obtidos experimentalmente, do que em análises de estacas isoladas.

5 PREVISÕES DAS CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA A PARTIR DE MEDIDAS DE ENSAIOS DE CAMPO

Visando prever as curvas de transferência de carga de estacas submetidas a esforços axiais de compressão em perfis de solos arenosos, os parâmetros das curvas de transferência de carga hiperbólica “a” e “b” obtidas por regressão são analisados a seguir. Desse modo, no presente capítulo, busca-se correlacionar os parâmetros de definição das curvas de transferência de carga hiperbólica à geometria da estaca (ou grupo de estacas), tensões geostáticas iniciais (σ'_{v0}) e medidas de resultados de ensaios de campo em profundidade, especificamente, ensaios de penetração do cone (CPT) e sondagens à percussão (SPT).

Os parâmetros geométricos das estacas utilizados nas correlações foram o diâmetro (D, em metros) das estacas e o somatório das distâncias das estacas no grupo (Σr_{ij}), onde r_{ij} representa a distância eixo a eixo entre as estacas i e j, descrito em termos de logaritmo da soma relativa das distâncias, $\ln [\Sigma(r_{ij}/D)]$, para fins de obtenção de melhores correlações. Os parâmetros dos ensaios de campo foram tomados em termos de valores médios para o fuste de estaca do trecho analisado (curvas t-z) e o valor característico na ponta da estaca (curva q-z). Desse modo, busca-se correlacionar a resistência de ponta (q_c , em MPa), resistência ao atrito lateral (f_s , em kPa) dos ensaios de penetração do cone (CPT) e índice de resistência à penetração (N_{SPT} , em número de golpes para cravação de 30 cm no solo, conforme ABNT NBR 6484:2020) do ensaio de sondagem à percussão (SPT) às curvas t-z e q-z.

Desse modo, foram realizados ajustes das curvas de correlação, retirada de alguns pontos dispersos aos valores usuais, obtenção das expressões, e por fim, a previsão e validação dos parâmetros das curvas de transferência de carga. As análises foram em um primeiro momento para estacas isoladas, e posteriormente, para estacas em grupo, subdividindo, também, as análises para as curvas t-z e q-z, e quando julgadas necessárias, a subdivisão das análises por tipo de execução de estaca, cravada e escavada.

As validações são efetuadas a partir da comparação de valores experimentais e previstos das curvas de transferência de carga em estacas instrumentadas e das curvas carga-recalque nas estacas instrumentadas, ou não. Ressalta-se ainda, na validação das correlações propostas, que o cálculo baseado no método de transferência de carga procede-se com a utilização de segmentos de 1 metro ou frações, ou no mínimo 3 segmentos de comprimentos equivalentes.

5.1 Estacas isoladas

Das estacas isoladas que apresentam dados de instrumentação e ensaios de campo, apresentados no Quadro 5, foram efetuadas previsões dos parâmetros “a” e “b” das curvas de transferência de carga hiperbólica. Vale mencionar que isso foi realizado considerando as características geométricas das estacas e geotécnicas do solo adjacente às estacas.

Assim, inicialmente, são realizadas previsões para as curvas t-z em função dos resultados de ensaios SPT e CPT, e posteriormente, o mesmo procedimento para as curvas q-z. Por fim, a validação das correlações obtidas nas estacas isoladas instrumentadas SCC-1, MP2, 1-3A e 1-6 são efetuadas a partir da comparação com os valores dos parâmetros “a” e “b” ajustados de curvas experimentais. Além disso, para todas as estacas utilizadas na validação, instrumentadas ou não, foram efetuadas comparações das curvas carga-recalque experimentais e previstas.

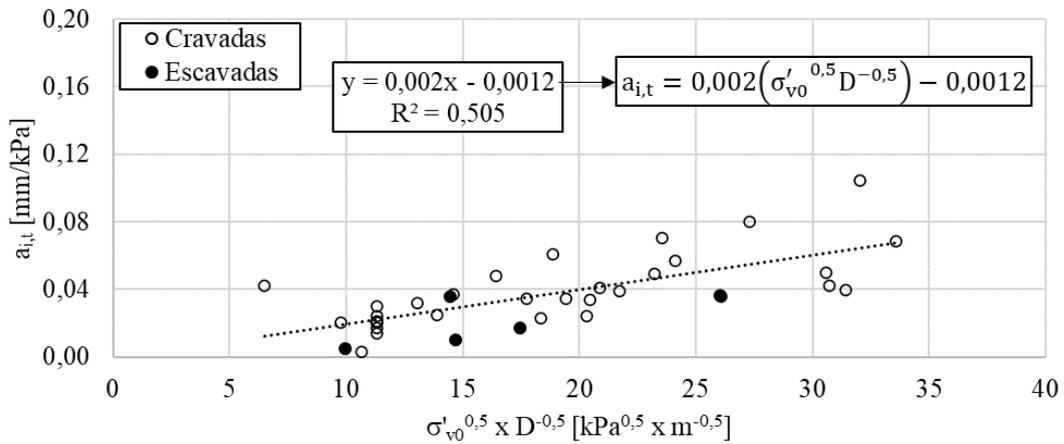
5.1.1 Curvas t-z

Para o parâmetro $a_{i,t}$ foram efetuadas correlações relacionadas ao N_{SPT} (do ensaio SPT) e f_s (do ensaio CPT), obtendo coeficientes de determinação R^2 inferiores a 0,1 para as curvas de correlação.

A matriz de correlação apresentou valores do coeficiente de determinação, R^2 , baixos para todas as variáveis destacadas na presente pesquisa, obtendo-se, em geral, curvas de correlação não satisfatórias. Dessa forma, foi realizado correlações com variáveis agrupadas, variando de mesmo modo os expoentes e realizando diversos testes, de modo a obter correlações mais bem ajustadas. Procedimentos semelhantes a estes foram realizados para as correlações que se seguem no presente estudo.

Desse modo correlacionou-se o parâmetro $a_{i,t}$ com a geometria (diâmetro da estaca) e a tensão geostática inicial no centro da estaca, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Vale mencionar que os pontos correlacionados foram representados por pontos preenchidos e não preenchidos para permitir a identificação do procedimento executivo de cada estaca (cravadas e escavadas). Ressalta-se que nesta análise e para as demais foram desconsiderados alguns pontos com valores dispersos.

Figura 40 – Correlação do parâmetro $a_{i,t}$ com σ'_{v0} e D

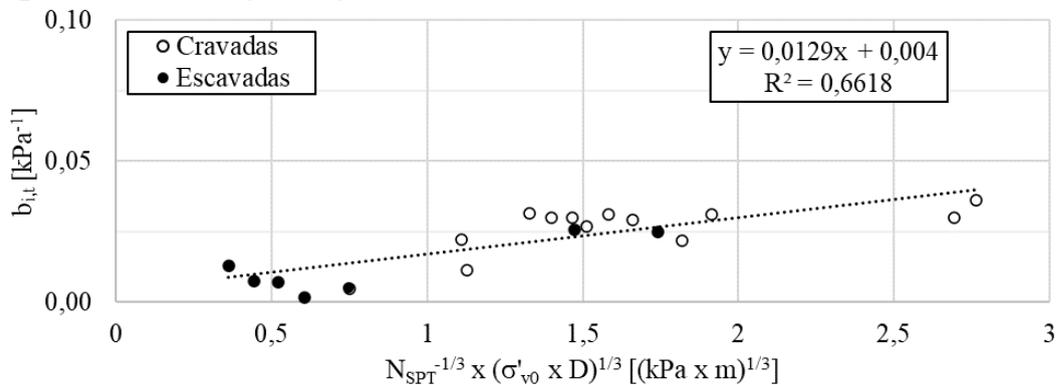


Fonte: Elaborado pelo Autor

A retirada de alguns pontos dispersos proporcionou melhores correlações do parâmetro $a_{i,t}$. Ainda assim, obteve-se um valor do parâmetro $a_{i,t}$ consideravelmente baixo (R^2 da ordem de 0,51), de modo que não é possível afirmar que o parâmetro $a_{i,t}$ é correlacionável com o diâmetro e a tensão geostática inicial.

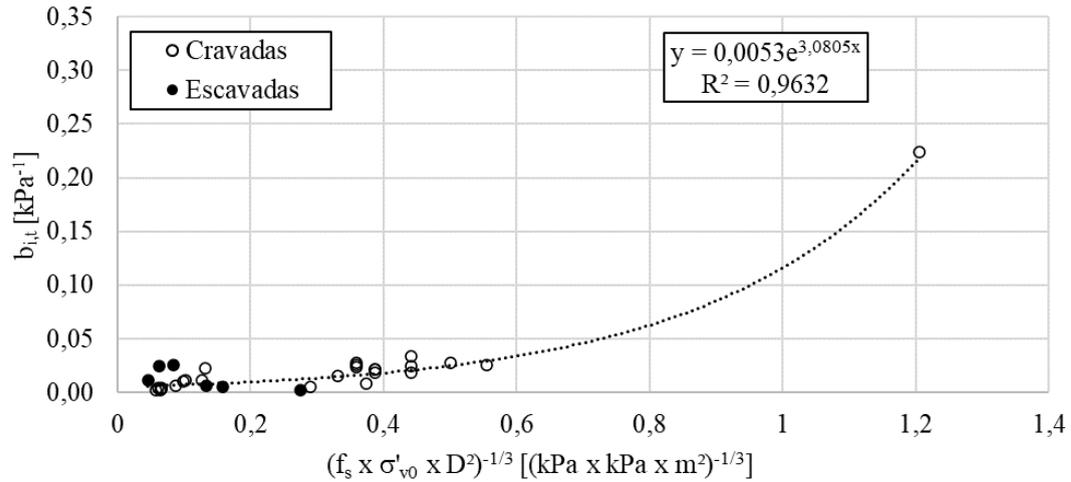
Para o parâmetro $b_{i,t}$ foram efetuadas correlações também com medidas de ensaios de campo SPT e CPT, sendo para este último em função dos parâmetros f_s e q_c , separadamente, já que alguns estudos experimentais utilizados nesta pesquisa não forneciam a resistência lateral do ensaio de cone (f_s). As correlações com N_{SPT} , f_s e q_c são apresentadas nas Figura 41, Figura 42 e Figura 43, respectivamente.

Figura 41 – Correlação do parâmetro $b_{i,t}$ com N_{SPT} , σ'_{v0} e D



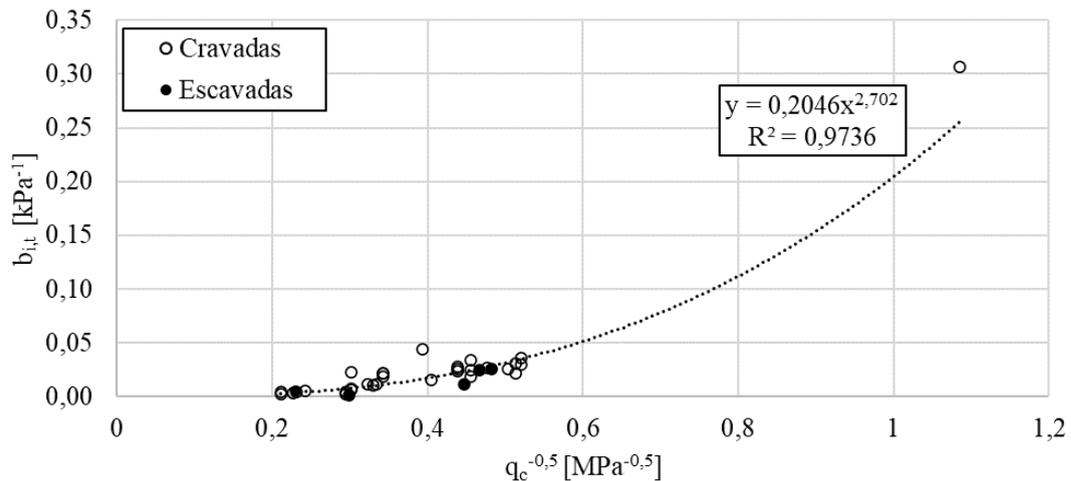
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 42 – Correlação do parâmetro $b_{i,t}$ com f_s (CPT), σ'_{v0} e D



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 43 – Correlação do parâmetro $b_{i,t}$ com o q_c (CPT)



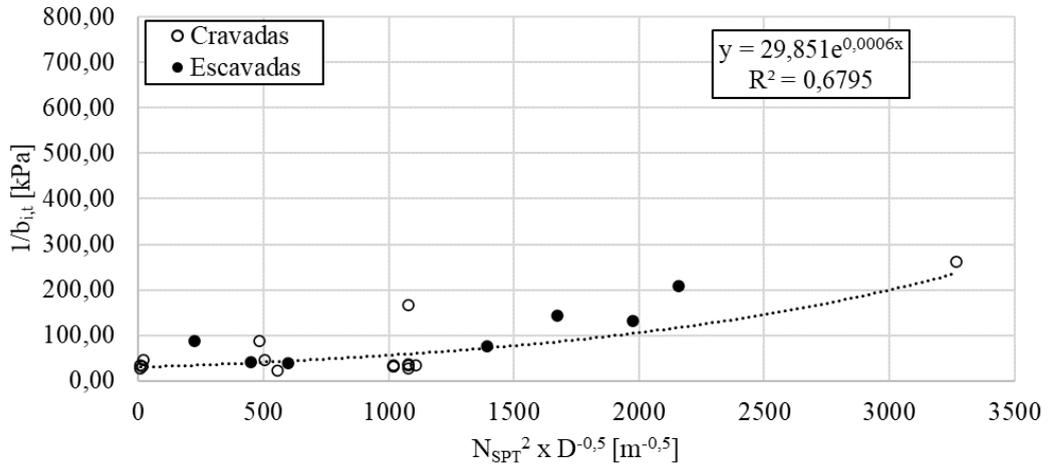
Fonte: Elaborado pelo Autor

É possível afirmar que o parâmetro $b_{i,t}$ apresentou correlação com as medidas de ensaios de campo utilizadas. Na Figura 43 é possível observar a correlação de $b_{i,t}$ diretamente com o q_c , e para as demais correlações, com N_{SPT} e f_s , foi utilizado no eixo da abcissa além das medidas de ensaios de campo, a tensão geostática vertical inicial e diâmetro da estaca. De modo geral, a correlação baseada no N_{SPT} apresentou baixo coeficiente de determinação (R^2 inferior a 0,70), enquanto as correlações com o f_s e q_c do ensaio CPT apresentaram R^2 elevados, superiores a 0,95.

Em face da escassez de pontos do parâmetro $b_{i,t}$ superiores a 0,05 nas correlações com o f_s e com o q_c (Figura 42 e Figura 43), o autor recomenda a utilização das referidas correlações para valores de $b_{i,t}$ de até 0,05.

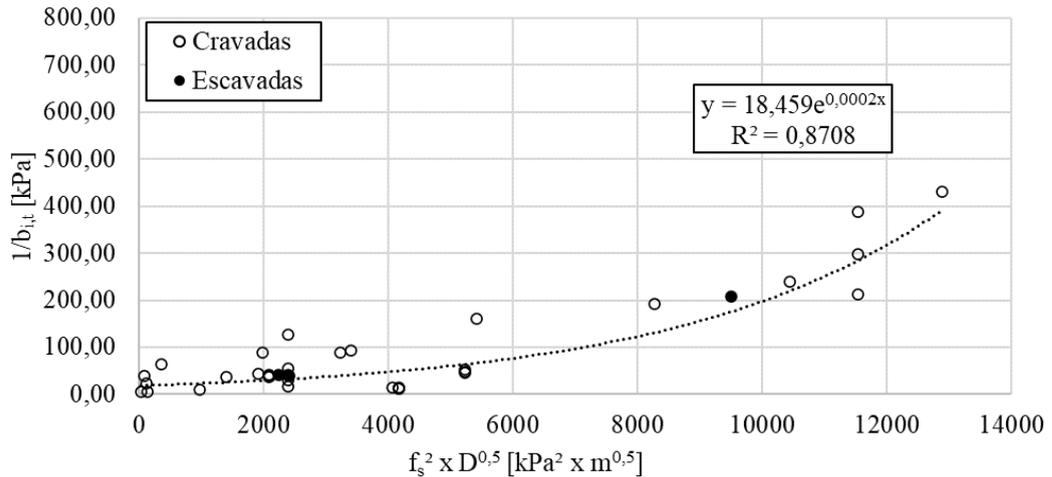
De forma a pesquisar melhores correlações, o inverso do parâmetro $b_{i,t}$ também foi relacionado com as medidas de ensaios de campo, conforme pode ser observado nas Figura 44, Figura 45 e Figura 46. Em geral, obteve-se conclusões similares às correlações baseadas no parâmetro $b_{i,t}$ exceto quanto a uma melhor distribuição dos pontos ao longo da faixa de valores e curvas de aderência com valores de R^2 inferiores quando comparados com as correlações baseadas no parâmetro $b_{i,t}$ e ensaio CPT (Figura 42 e Figura 43).

Figura 44 – Correlação do inverso do parâmetro $b_{i,t}$ com N_{SPT} e D



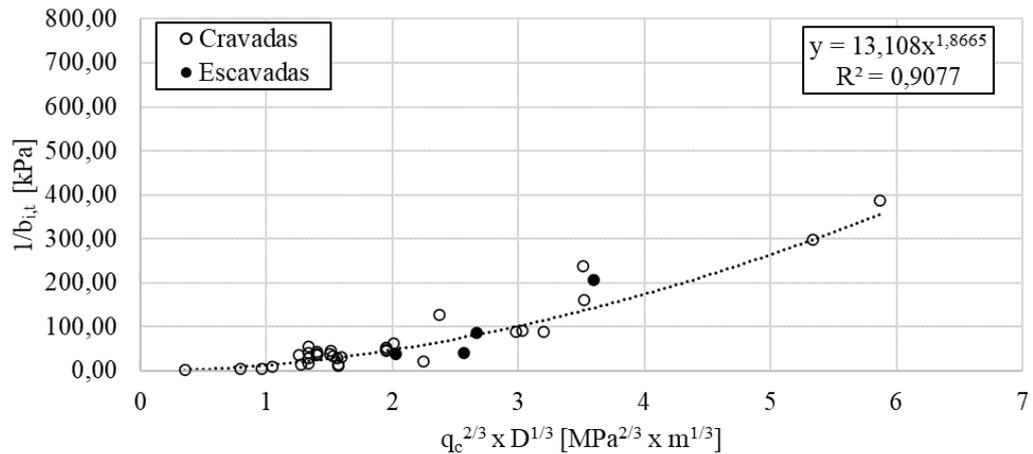
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 45 – Correlação do inverso do parâmetro $b_{i,t}$ com f_s (CPT) e D



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 46 – Correlação do inverso do parâmetro $b_{i,t}$ com q_c (CPT) e D



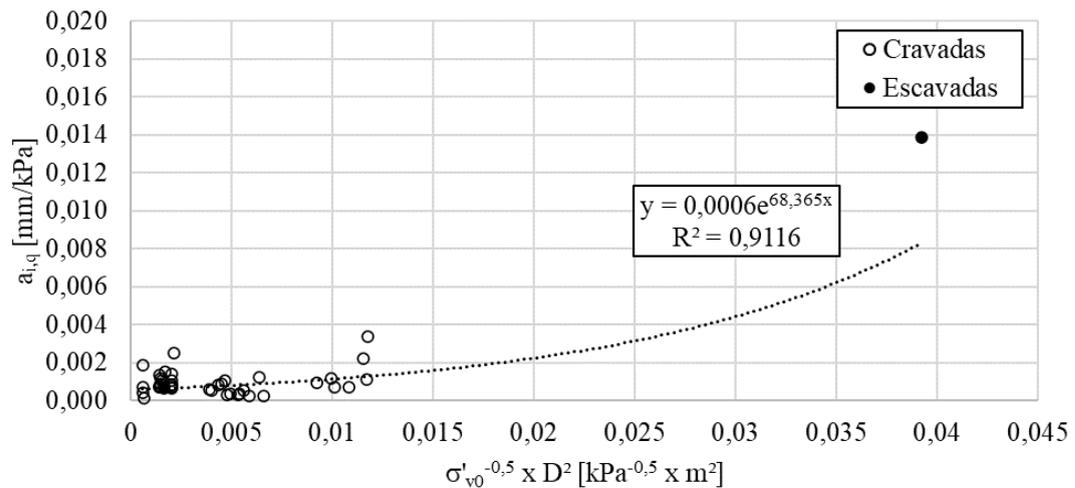
Fonte: Elaborado pelo Autor

5.1.2 Curvas q-z

Para o parâmetro $a_{i,q}$ obteve-se correlações com o N_{SPT} (do ensaio SPT) e q_c (do ensaio CPT), os quais apresentaram valores de R^2 das curvas de correlação de 0,23 e 0,004, respectivamente.

Desse modo, foi pesquisado, conforme mostra a Figura 47, correlações com o diâmetro da estaca e a tensão geostática inicial. Novamente, as estacas foram apresentadas por tipo de execução em cravadas e escavadas.

Figura 47 – Correlação do parâmetro $a_{i,q}$ com σ'_{v0} e D

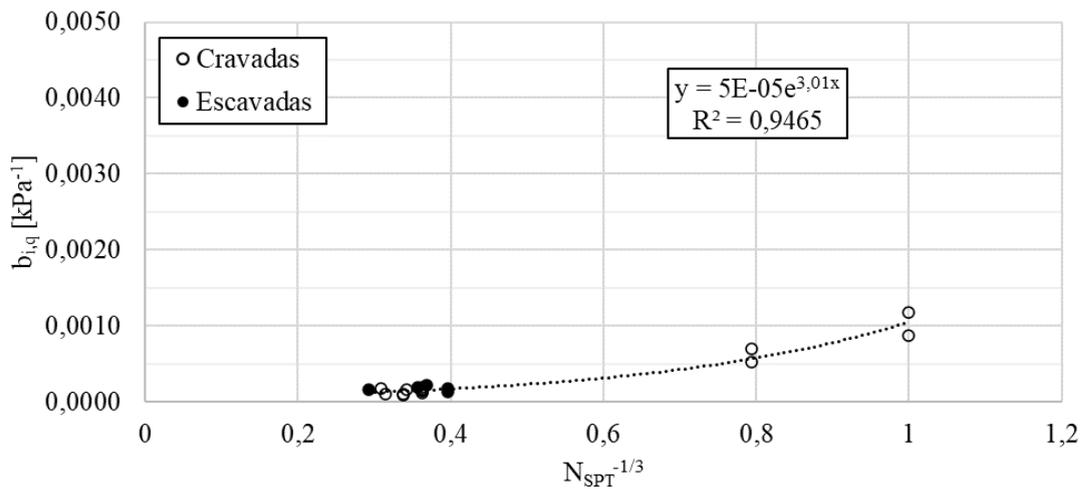


Fonte: Elaborado pelo Autor

A retirada de alguns pontos dispersos proporcionou melhores correlações para o parâmetro $a_{i,q}$. Desse modo, obteve-se que o parâmetro $a_{i,q}$ é mais correlacionável com o diâmetro da estaca e a tensão geostática inicial no nível da ponta da estaca, com R^2 da curva de ajuste da ordem de 0,91. Vale destacar, devido à escassez de pontos do parâmetro $a_{i,q}$ superiores a 0,002 (Figura 47), o autor recomenda a utilização da correlação para valores de $a_{i,q}$ de até 0,002.

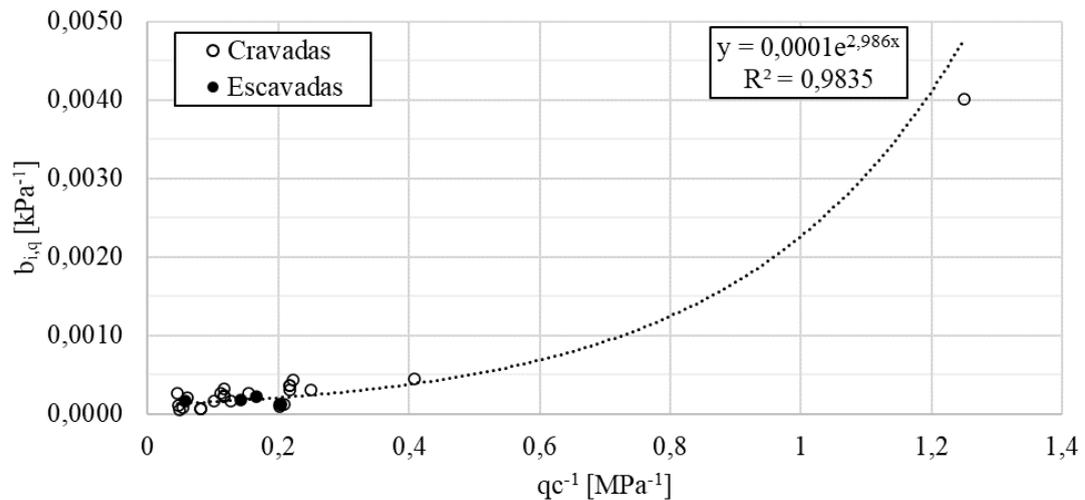
Para o parâmetro $b_{i,t}$ obteve-se correlações em relação aos ensaios de campo SPT (parâmetro N_{SPT}) e CPT (parâmetro q_c), as quais são apresentadas nas Figura 48 e Figura 49, respectivamente.

Figura 48 – Correlação do parâmetro $b_{i,q}$ com o N_{SPT}



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 49 – Correlação do parâmetro $b_{i,q}$ com o q_c (CPT)



Fonte: Elaborado pelo Autor

É possível afirmar que o parâmetro $b_{i,q}$ proporcionou boas correlações com N_{SPT} e q_c , com valores de R^2 superiores a 0,94. Destaca-se que, para a previsão do parâmetro $b_{i,q}$ em função do ensaio SPT, todos os pontos experimentais apresentaram boa aderência a curva. Foi observado ainda, que as medidas de ensaios de campo, N_{SPT} e q_c , apresentaram diretamente boa aderência na previsão do parâmetro $b_{i,q}$. Vale destacar, devido à escassez de pontos do parâmetro $b_{i,q}$ superiores a 0,0005, o autor recomenda a utilização da correlação para valores de $b_{i,q}$ de até 0,0005.

5.1.3 Validação

A validação das correlações obtidas e apresentadas foi baseada nas estimativas dos parâmetros $b_{i,t}$ e $b_{i,q}$ em função do N_{SPT} e q_c dos ensaios de campo (SPT ou CPT) e nas estimativas dos parâmetros $a_{i,t}$ e $a_{i,q}$ a partir do diâmetro das estacas e da tensão geostática inicial, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 47, já que estas apresentaram melhor aderência mesmo não sendo função de medidas de ensaios de campo.

Além disso, foram estimados os valores dos parâmetros $a_{i,t}$ e $a_{i,q}$, conforme Equação 51, a partir dos valores dos parâmetros $b_{i,t}$ e $b_{i,q}$, estes obtidos em função do N_{SPT} e do q_c de ensaios de campo e adotando os valores medianos dos parâmetros $M_{s,i}$ e $M_{b,i}$ apresentados no capítulo anterior (Tabela 11). É importante mencionar que os valores dos parâmetros $M_{s,i}$ e $M_{b,i}$ medianos foram obtidos na Figura 34 e que, para a construção da referida, alguns pontos dispersos foram retirados.

$$a_{i,t} = M_{s,i} b_{i,t} D \quad (51)$$

Desse modo, para a validação das correlações propostas foram utilizadas as estacas isoladas instrumentadas 2-1, 7-1, 10-1 e 10-2, e não instrumentadas 8-1 e 9-1.

5.1.3.1 Validação em termos de curva de transferência de carga

Para as estacas instrumentadas, inicialmente, comparou-se os parâmetros estimados pelas diferentes metodologias com os parâmetros ajustados das curvas hiperbólicas (denominados de experimentais), apresentando também o erro percentual. Vale mencionar que

o erro foi considerado como a diferença entre o valor estimado e o experimental, descrito em termos percentuais como a razão entre esta diferença e o valor experimental. A

Tabela 16 apresenta as estimativas do parâmetro $b_{i,t}$ e a comparação com os valores de referência para as estacas isoladas instrumentadas utilizadas na validação.

Tabela 16 – Estimativas do parâmetro $b_{i,t}$ e comparação com o valor experimental

Ensaio (parâmetro)	Estaca	Trecho	Valor experimental	Correlação do parâmetro $b_{i,t}$		Correlação do parâmetro $1/b_{i,t}$	
				Valor estimado	Erro (%)	Valor estimado	Erro (%)
SPT (N_{SPT})	2-1	0,8 - 3,1	0,0014	0,0125	776%	0,0146	919%
		3,1 - 5,6	0,0060	0,0146	143%	0,0108	80%
	7-1	-	0,0169	0,0162	-4%	0,0286	69%
	10-1	-	0,0106	0,0192	81%	0,0095	-11%
	10-2	-	0,0045	0,0191	324%	0,0095	110%
CPT (f_s)	2-1	0,8 - 3,1	0,0014	0,0119	731%	0,0368	2474%
		3,1 - 5,6	0,0060	0,0083	39%	0,0062	3%
	10-1	-	0,0106	0,0070	-34%	0,0245	130%
	10-2	-	0,0045	0,0070	56%	0,0245	443%
CPT (q_c)	2-1	0,8 - 3,1	0,0014	0,0079	451%	0,0113	694%
		3,1 - 5,6	0,0060	0,0029	-51%	0,0045	-24%
	10-1	-	0,0106	0,0094	-11%	0,0088	-17%
	10-2	-	0,0045	0,0092	104%	0,0088	95%

Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se, de modo geral, que os erros percentuais mais significativos foram observados na estaca 2-1 (trecho 0,8 a 3,1 m) com valores de erro superiores a 400% em todas as estimativas. Comparando as correlações realizadas para o parâmetro $b_{i,t}$ e as realizadas para $1/b_{i,t}$, é possível observar que as correlações baseadas no parâmetro f_s do ensaio CPT são mais convergentes na adoção da correlação realizada do parâmetro $b_{i,t}$ (Figura 42), e quando baseadas no parâmetro q_c a correlação realizada do parâmetro $1/b_{i,t}$ (Figura 46) apresentou maior convergência aos resultados experimentais. Quanto à previsão do parâmetro $b_{i,t}$ em função do N_{SPT} , a utilização da correlação do parâmetro $1/b_{i,t}$ proporcionou resultados mais convergentes aos valores obtidos por ajuste para a maioria dos casos.

Quanto a avaliação na obtenção do parâmetro $a_{i,t}$, devido também a baixa aderência obtida na curva de ajuste (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), é proposto também a obtenção do parâmetro $a_{i,t}$ partir do parâmetro $M_{s,i}$ e $b_{i,t}$ obtido no presente trabalho através das correlações destacadas. O valor de $M_{s,i}$ adotado na presente validação refere-se ao valor mediano obtido no capítulo anterior conforme Tabela 11. A Tabela 17 apresenta as estimativas

do parâmetro $a_{i,t}$ e a comparação com os valores de referência para as estacas isoladas instrumentadas utilizadas na validação.

Tabela 17 – Estimativas do parâmetro $a_{i,t}$ e comparação com o valor experimental

Ensaio	Estaca	Trecho	Valor experimental	Correlação do parâmetro $a_{i,t}$		$a_{i,t}$ em função de $M_{s,i}$ e $b_{i,t}$ estimado		$a_{i,t}$ em função de $M_{s,i}$ e $1/b_{i,t}$ estimado	
				Valor estimado	Erro (%)	Valor estimado	erro (%)	Valor estimado	erro (%)
SPT	2-1	0,8 - 3,1	0,0185	0,0294	58%	0,0164	-12%	0,0190	3%
		3,1 - 5,6	0,0213	0,0445	109%	0,0191	-10%	0,0141	-34%
	7-1	-	0,0578	0,0199	-65%	0,0369	-36%	0,0652	13%
	10-1	-	0,0517	0,0436	-16%	0,0623	20%	0,0307	-41%
	10-2	-	0,0600	0,0431	-28%	0,0620	3%	0,0307	-49%
Ensaio	Estaca	Trecho	Valor experimental	Correlação do parâmetro $a_{i,t}$		$a_{i,t}$ em função de $M_{s,i}$ e $b_{i,t}$ estimado a partir de f_s		$a_{i,t}$ em função de $M_{s,i}$ e $1/b_{i,t}$ estimado a partir de q_c	
				Valor estimado	Erro (%)	Valor estimado	Erro (%)	Valor estimado	Erro (%)
CPT	2-1	0,8 - 3,1	0,0185	0,0294	58%	0,0218	18%	0,0209	13%
		3,1 - 5,6	0,0213	0,0445	109%	0,0153	-28%	0,0109	-49%
	10-1	-	0,0517	0,0436	-16%	0,0242	-53%	0,0303	-41%
	10-2	-	0,0600	0,0431	-28%	0,0242	-60%	0,0303	-50%

Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se das metodologias empregadas, que a obtenção do parâmetro $a_{i,t}$ a partir do parâmetro $M_{s,i}$ e $b_{i,t}$ estimado a partir do N_{SPT} proporcionou determinações mais convergentes que as demais previsões realizadas, e até mesmo, às previsões realizadas com $b_{i,t}$ estimado a partir de f_s e q_c . Ademais, as previsões realizadas do parâmetro $a_{i,t}$ utilizando correlações em função de σ'_{v0} e D (conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) apresentou-se em geral, como as previsões mais divergentes para a maioria dos casos.

Na obtenção das curvas q - z , o parâmetro $b_{i,q}$ foi estimado a partir de medidas de ensaios de campo, N_{SPT} e q_c , conforme apresentados na Tabela 18 para as estacas isoladas instrumentadas utilizadas na validação das propostas realizadas no presente capítulo. Apresenta-se ainda a comparação em relação aos valores de referência do parâmetro $b_{i,q}$ obtido por regressão hiperbólica. Observa-se, de modo geral, que as previsões foram satisfatórias e conduziram a erros percentuais relativamente menores aos obtidos nas previsões realizadas nos parâmetros $a_{i,t}$ e $b_{i,t}$, na faixa de valores de -37% a 55%.

Tabela 18 – Estimativas do parâmetro $b_{i,q}$ e comparação com o valor experimental

Estaca	Valor experimental	Valor estimado (correlação de $b_{i,q}$ e N_{SPT})	Erro (%)	Valor estimado (correlação de $b_{i,q}$ e q_c)	Erro (%)
2-1	0,000190	0,000121	-37%	0,000127	-33%
7-1	0,000172	0,000130	-24%	-	-
10-1	0,000076	0,000107	42%	0,000117	55%
10-2	0,000117	0,000107	-8%	0,000117	1%

Fonte: Elaborado pelo Autor

Quanto à avaliação do parâmetro $a_{i,q}$, foi procedido de maneira análoga ao realizado para o parâmetro $a_{i,t}$, conforme Tabela 19, estimando a partir da correlação mais convergente (Figura 47) e em função do parâmetro $M_{b,i}$ e $b_{i,q}$ estimados através de correlações baseadas em resultados de ensaios de campo. Os valores do parâmetro $M_{b,i}$ adotados para estacas cravadas e escavadas definidos na presente validação são 0,018 e 0,109, respectivamente, conforme Tabela 11.

Tabela 19 – Estimativas do parâmetro $a_{i,q}$ e comparação com o valor experimental

Estaca	Valor experimental	Valor estimado (correlação de $a_{i,q}$)	Erro (%)	$a_{i,q}$ em função de $M_{b,i}$ e correlação de $b_{i,q}$ e N_{SPT}		$a_{i,q}$ em função de $M_{b,i}$ e correlação de $b_{i,q}$ e q_c	
				Valor estimado	Erro (%)	Valor estimado	Erro (%)
2-1	0,00175	0,00072	-59%	0,00226	29%	0,00238	36%
7-1	0,00659	0,00127	-81%	0,00426	-35%	-	-
10-1	0,00055	0,00092	68%	0,00065	20%	0,00071	30%
10-2	0,00059	0,00092	57%	0,00065	12%	0,00071	22%

Fonte: Elaborado pelo Autor

De modo geral, destaca-se da Tabela 19 que as estimativas de $a_{i,q}$ em função de $M_{b,i}$ e correlação de $b_{i,q}$ com o N_{SPT} apresentaram-se mais convergentes para todas as estacas utilizadas na validação. Além disso, é possível observar que as estimativas baseadas na correlação do parâmetro $a_{i,q}$ apresentaram-se como os resultados mais divergentes para todas as estacas utilizadas na validação.

5.1.3.2 Validação em termos de curva carga-recalque

Na sequência foi efetuada a validação das metodologias apresentadas no Quadro 6 tendo como referência resultados de curvas carga-recalque.

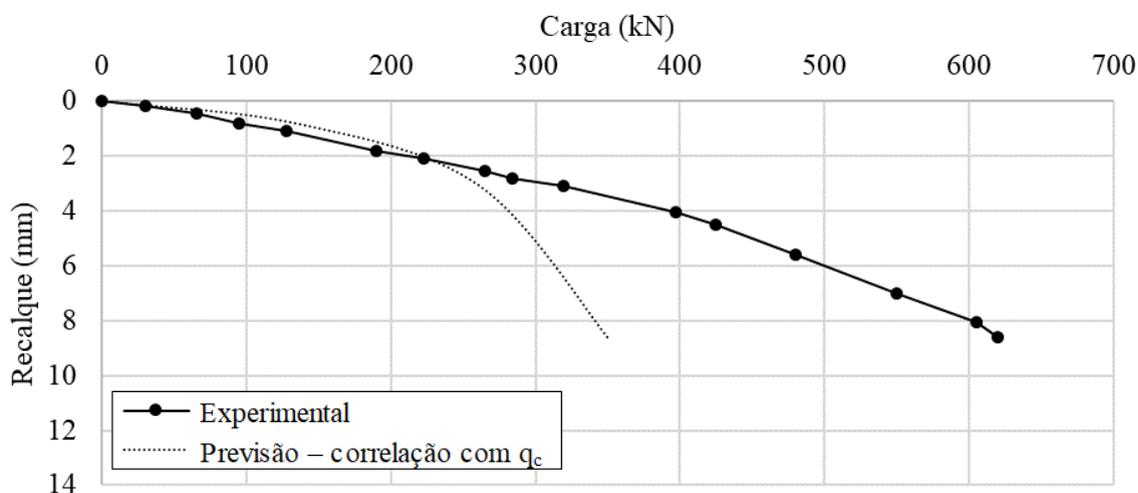
Quadro 6 – Metodologias empregadas na definição dos parâmetros das curvas t-z e q-z

Parâmetros das curvas hiperbólicas	Ensaio (medida de ensaios de campo)		
	SPT (N_{SPT})	CPT (q_c)	CPT (f_s)
$a_{i,t}$	$M_{s,i}$ e $b_{i,t}$ estimado	$M_{s,i}$ e $1/b_{i,t}$ estimado	$M_{s,i}$ e $b_{i,t}$ estimado
$b_{i,t}$	Correlação de $1/b_{i,t}$	Correlação de $1/b_{i,t}$	Correlação de $b_{i,t}$
$a_{i,q}$	$M_{b,i}$ e $b_{i,q}$ estimado	$M_{b,i}$ e $b_{i,q}$ estimado	Parâmetros obtidos em função de q_c
$b_{i,q}$	Correlação de $b_{i,q}$	Correlação de $b_{i,q}$	

Fonte: Elaborado pelo Autor

Inicialmente, para a estaca isolada 2-1 de Abdllrahem e El Naggar (2020), observou-se que as curvas carga-recalque estimadas não apresentaram boa convergência à curva experimental. Apenas a correlação com q_c apresentou alguma convergência à curva experimental para deslocamentos de até 2,5 mm, conforme observado na Figura 50.

Figura 50 – Comparação entre as curvas carga-recalque (experimental e estimada) da estaca 2-1



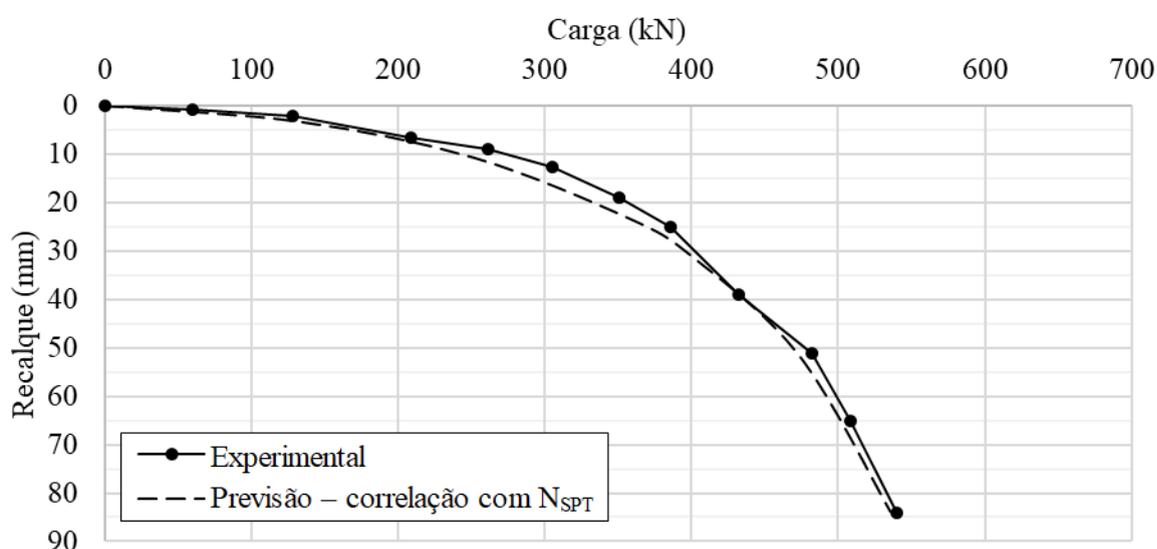
Fonte: Elaborado pelo Autor

Em geral, as previsões foram divergentes das observadas em campo, com valores de carga de ruptura consideravelmente inferiores à condição real de campo. Esse fator, assim como o observado na estaca 2-1 (Figura 50), pode estar associado à um atrito no fuste da estaca nas camadas mais superficiais subdimensionado, tendo em vista que, conforme Abdllrahem e El Naggar (2020) enfatiza, o processo executivo da estaca pode permitir que respingue argamassa pressurizada na superfície do terreno em uma ampla área, o que pode levar a uma resistência

melhorada na superfície do solo, já que essa camada superficial (areia pedregulhosa) permitiria uma permeação da argamassa.

De forma análoga foi estimada a curva carga-recalque da estaca 7-1 de Soares, Coutinho e Cunha (2021) utilizando a correlação com N_{SPT} e comparou-se com a curva experimental (Figura 51). É possível observar boa aderência à curva experimental, de modo que a curva carga-recalque estimada se encontra praticamente sobreposta aos resultados obtidos em campo ao longo de todo o carregamento do ensaio.

Figura 51 – Comparação entre as curvas carga-recalque (experimental e estimada) da estaca 7-1



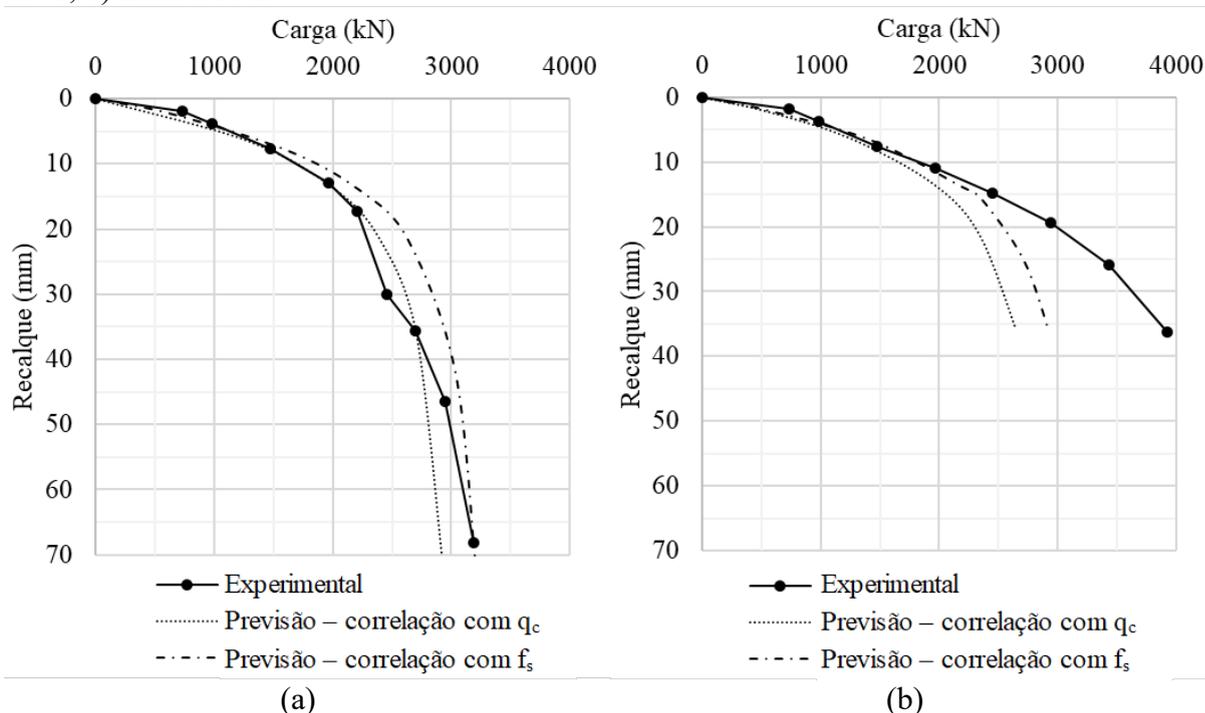
Fonte: Elaborado pelo Autor

Para as estacas isoladas 10-1 e 10-2 de Tucker e Briaud (1988), foram previstas suas respectivas curvas carga-recalque conforme abordagens indicadas no Quadro 6. De modo geral, as previsões baseadas em correlações com N_{SPT} conduziram a valores de carga de ruptura consideravelmente superiores aos valores experimentais que, por sua vez, pode estar associado a divergência na previsão do parâmetro $b_{i,t}$ para elevados valores de N_{SPT} . Por outro lado, foi possível observar previsões concordantes com as respectivas curvas experimentais para as estimativas baseadas no f_s e q_c e, principalmente, nos trechos iniciais das curvas (para pequenos deslocamentos), conforme Figura 52.

Para a estaca 10-1 as previsões realizadas a partir de correlações com o q_c , do ensaio CPT, apresentaram maior convergência da curva carga-recalque aos valores obtidos experimentalmente, especialmente para deslocamentos de até 45 mm. Para a estaca 10-2 as previsões baseadas no f_s e q_c foram convergentes aos valores experimentais até uma carga de

aproximadamente 2000 kN. Após esta carga, as curvas estimadas apresentaram maiores curvaturas que a curva experimental, conduzindo a cargas de ruptura menores que o valor experimental. Dessa forma, conclui-se que os valores de $b_{i,t}$ e/ou $b_{i,q}$ estimados estariam subestimados. Associado a isso, pode-se destacar que a estaca 1-6 foi aplicando estágios de carga na modalidade rápida, o que pode também ter conduzido a diferenças, neste caso, em relação às previsões.

Figura 52 – Comparação entre as curvas carga-recalque experimentais e estimadas: a) Estaca 10-1; b) Estaca 10-2



Fonte: Elaborado pelo Autor

Finalmente, realizou-se a previsão das curvas carga-recalque das estacas não instrumentadas 8-1 de Melchior Filho, Bonan e Moura (2020) e 9-1 de Foglia *et al.* (2021) baseados em medidas dos ensaios SPT e CPT, respectivamente.

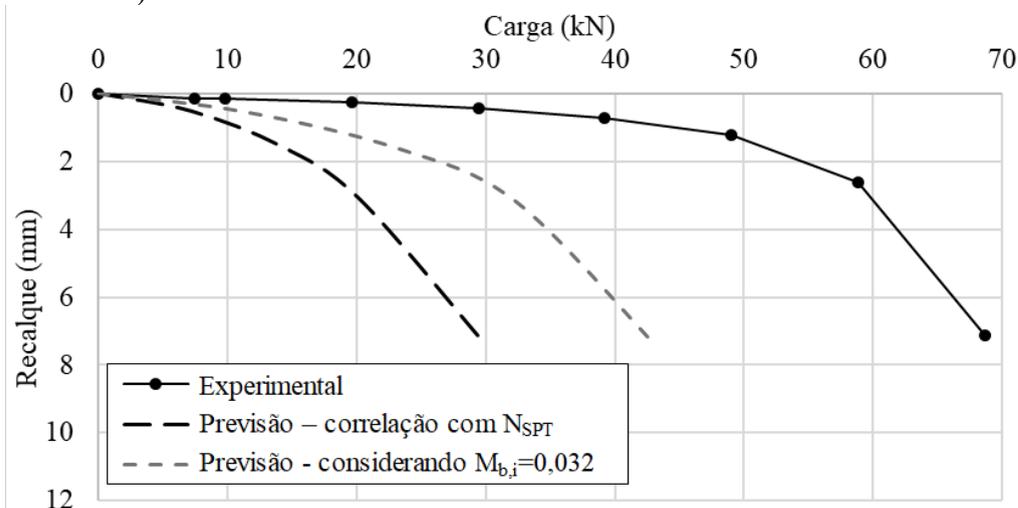
A previsão da curva carga-recalque da estaca 8-1 é apresentada na Figura 53. De modo geral, a metodologia proposta no presente trabalho forneceu uma curva carga-recalque com resistência consideravelmente inferior ao valor experimental.

Uma vez que, conforme apresentado no capítulo anterior (Figura 33), o parâmetro $M_{b,i}$ em estacas escavadas apresentou um intervalo de valores consideravelmente alto em comparação com os demais parâmetros M para estaca isolada, a estimativa divergente deste parâmetro ($M_{b,i}$) poderia justificar a diferença observada na curva carga-recalque da estaca 8-1. Deste modo, é apresentado também a previsão considerando o valor de $M_{b,i}$ equivalente ao

1º quartil dos resultados em estacas escavadas, a saber, 0,032, a modo de comparação. Os resultados mostraram que mesmo considerando a faixa de valores designada entre 1º e 3º quartil, os resultados ainda não se apresentaram satisfatórios.

Tendo em vista que os parâmetros $M_{b,i}$ de estacas escavadas obtidas no capítulo anterior são, em sua maioria, de estacas executadas com equipamentos mecânicos modernos como a hélice contínua, trado oco e eixo perfurado (*drilled shaft*), estes parâmetros podem não refletir de forma satisfatória as estacas escavadas manualmente como é o caso da estaca 8-1, que associado a variabilidade do parâmetro $M_{b,i}$ e efeito escala da estaca (relação L/d igual a 15), não proporcionaram resultados satisfatórios para o caso da estaca 8-1. Ademais, pode-se atribuir parcialmente a discordância dos resultados devido a coleta de dados estar majoritariamente localizada em formação de clima temperado e diferenças em relação a energia do ensaio SPT adotada. No entanto, vale mencionar, que os solos na presente pesquisa se trata de perfis predominantemente granulares, portanto, sendo solos menos sujeitos a variações de comportamento em função do clima e local de formação.

Figura 53 – Comparação entre as curvas carga-recalque (experimental e estimadas) da estaca 8-1

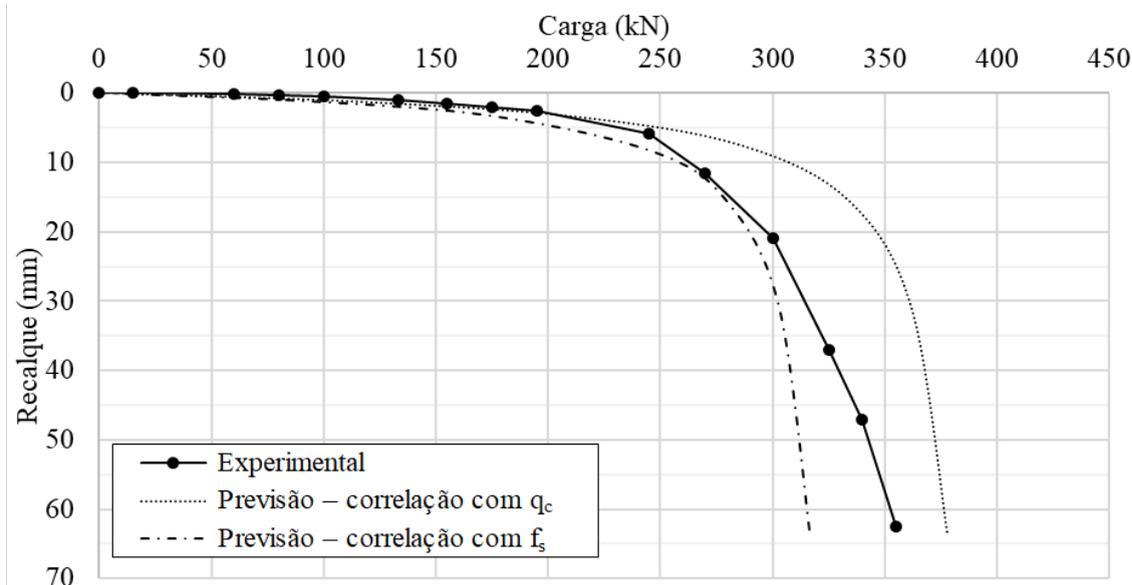


Fonte: Elaborado pelo Autor

As previsões para a estaca 9-1 foram realizadas considerando apenas a área anelar da estaca tubular tal como para estacas de ponta aberta não considerando o efeito do embuchamento (*plug*) na ponta da estaca, conforme corroborado pelos resultados apresentados de Foglia *et al.* (2021). A Figura 54 apresenta as curvas carga-recalque estimadas, as quais apresentaram-se consideravelmente convergentes à curva experimental. Ademais, comparando as previsões baseadas nos parâmetros q_c e f_s , é possível concluir que para deslocamentos de até

6 mm as previsões realizadas em função de q_c apresentaram maior convergência aos resultados experimentais.

Figura 54 – Comparação entre as curvas carga-recalque (experimental e estimadas) da estaca 9-1



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.2 Estacas em grupo

Utilizando as estacas em grupo que continham dados de instrumentação e ensaios de campo de referência, apresentados no Quadro 5, procede-se a previsão dos parâmetros “a” e “b” das curvas de transferência de carga hiperbólicas utilizando correlações.

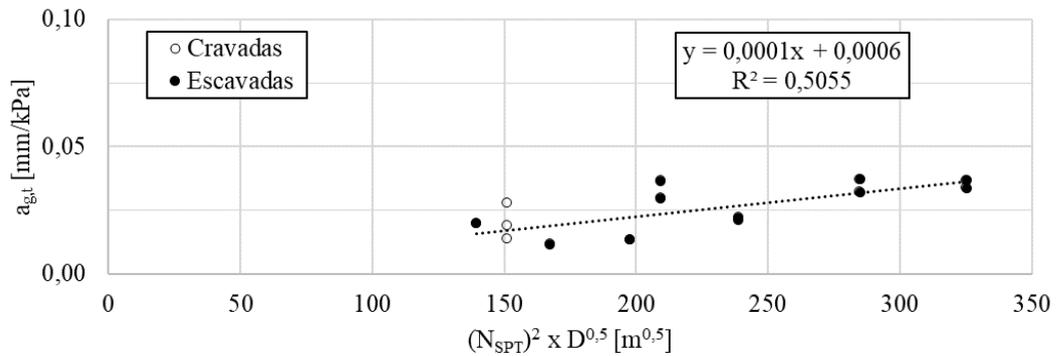
Inicialmente, as previsões efetuadas para as curvas t-z em função dos resultados de ensaios SPT e CPT, e posteriormente, o mesmo procedimento para as curvas q-z. Por fim, é realizado a validação das correlações obtidas nos grupos de estacas de Foglia *et al.* (2021), Soares, Coutinho e Cunha (2021), Melchior Filho, Bonan e Moura (2020) e os grupos de estacas MPG1 de Abdrahem e El Naggat (2020) e Ism-3 de Ismael (2001).

5.2.1 Curvas t-z

Para o parâmetro $a_{g,t}$ obteve-se correlações em função dos parâmetros N_{SPT} (do ensaio SPT), f_s (do ensaio CPT) e uma independente das medidas de ensaios de campo, conforme apresentadas nas Figura 55 a Figura 57, respectivamente. O valor $a_{g,t}$ obtido da estaca

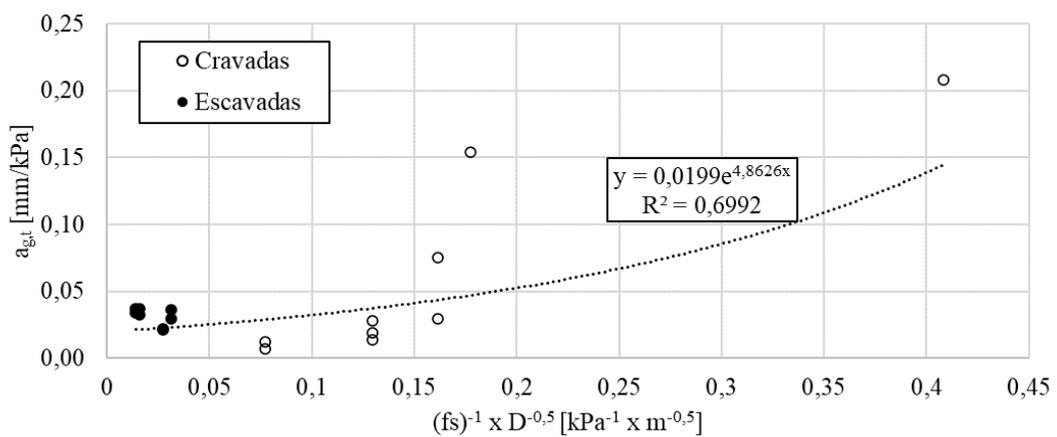
em grupo 5-2A não foi considerado na análise da Figura 57, tendo em vista que o mesmo se apresentava divergente do comportamento típico observado.

Figura 55 – Correlação do parâmetro $a_{g,t}$ com N_{SPT} e D



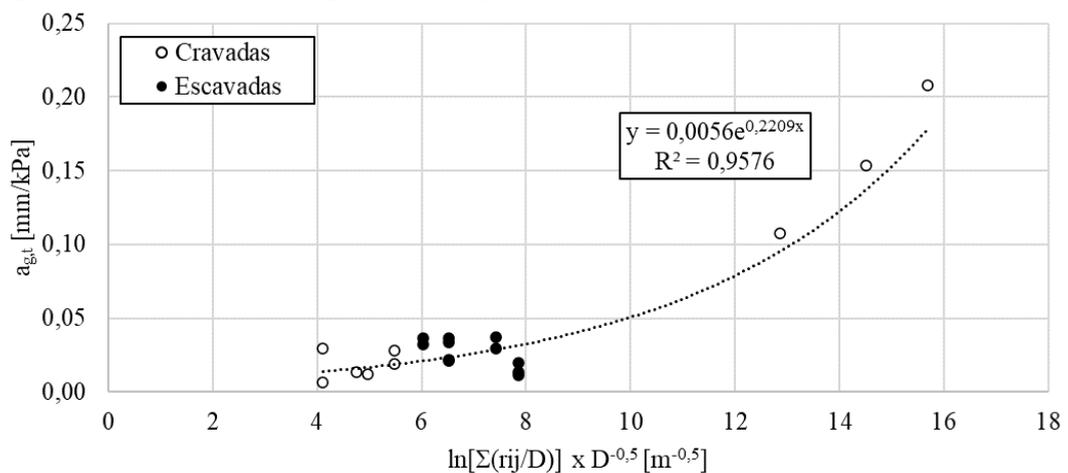
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 56 – Correlação do parâmetro $a_{g,t}$ com f_s (CPT) e D



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 57 – Correlação do parâmetro $a_{g,t}$ com a relação r_{ij}/D e D

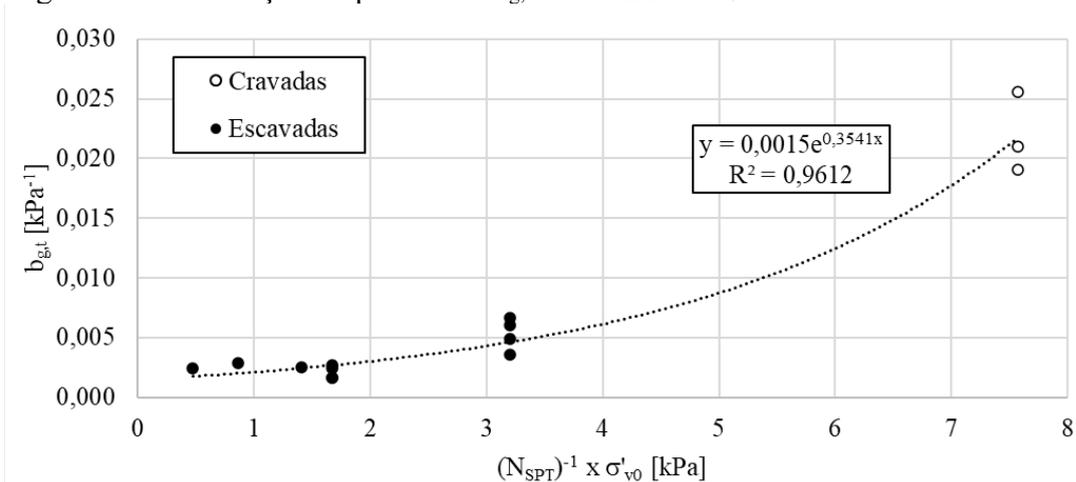


Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se de modo geral, que as correlações baseadas em resultados de ensaios de campo apresentaram baixa aderência, apresentando valores de R^2 inferiores a 0,70, indicando, portanto, que não há correlação entre as medidas de ensaios de campo e o parâmetro $a_{g,t}$ (Figura 55 e 56). A correlação mais concordante realizada, com valor de R^2 superior a 0,95, indicando que o parâmetro $a_{g,t}$ apresenta correlação mais convergente em função apenas da geometria das estacas no grupo (Figura 57).

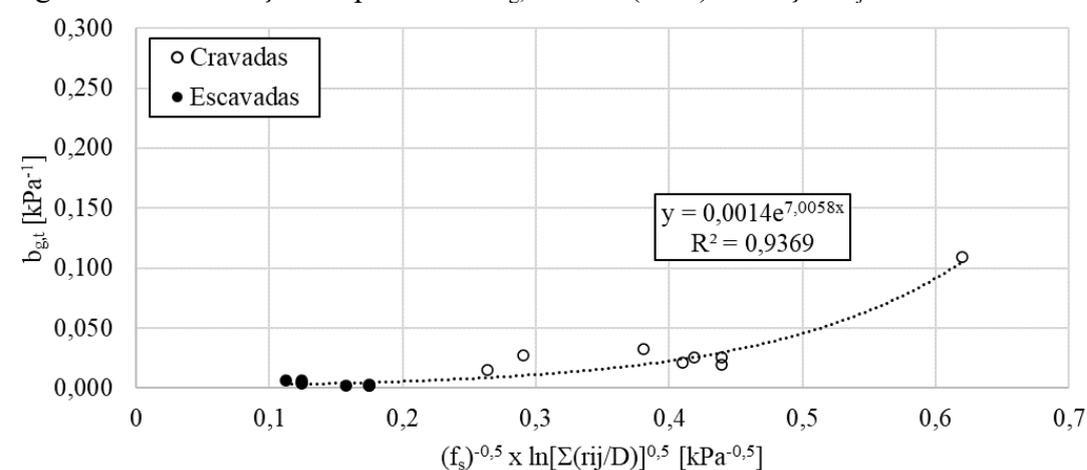
Para o parâmetro $b_{g,t}$ obteve-se correlações em relação as medidas de ensaios de campo, N_{SPT} e f_s , com valores de ajuste da curva R^2 superiores a 0,90. As correlações baseadas nas medidas de N_{SPT} e f_s são apresentadas nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 59, respectivamente.

Figura 58 – Correlação do parâmetro $b_{g,t}$ com N_{SPT} e σ'_{v0}



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 59 – Correlação do parâmetro $b_{g,t}$ com f_s (CPT) e relação r_{ij}/D



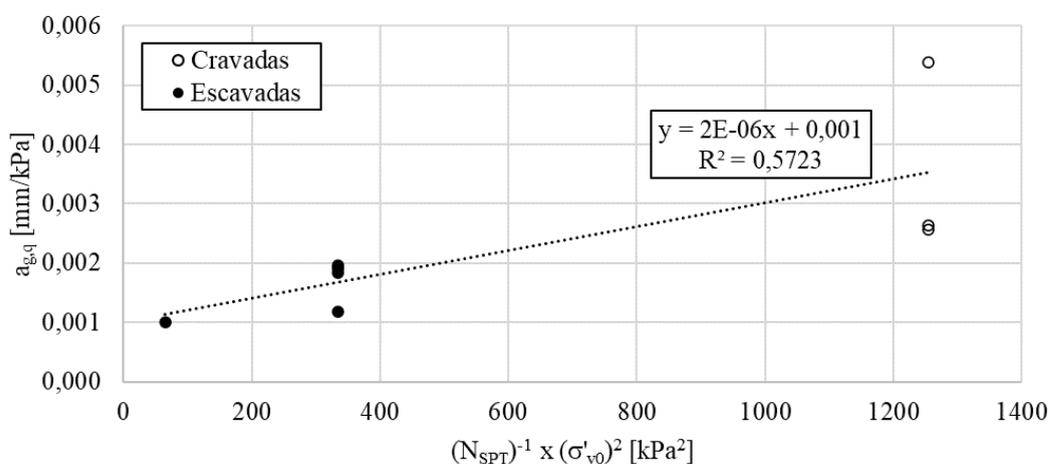
Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se que o parâmetro $b_{g,t}$ apresentou correlações convergentes quando realizadas a partir de resultados de ensaios de campo. Foi observado ainda que as medidas de resultados de ensaios de campo não representam na totalidade o valor do parâmetro $b_{g,t}$, de modo que, na correlação com o N_{SPT} utilizou-se também σ'_{v0} na correlação com o referido parâmetro. Analogamente baseado nos resultados de ensaio CPT, utilizou-se a correlação do parâmetro $b_{g,t}$ com o f_s e relação r_{ij}/D , sendo este último esperado, já que o efeito de grupo interfere diretamente no mecanismo de transferência de carga.

5.2.2 Curvas q-z

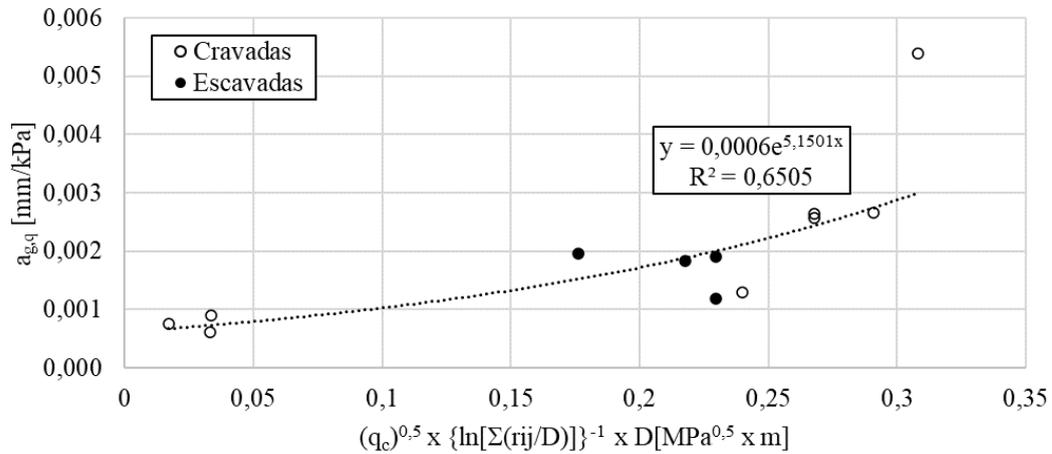
Para o parâmetro $a_{g,q}$ obteve-se correlações relacionadas ao N_{SPT} (do ensaio SPT), q_c (do ensaio CPT) e uma independente das medidas de ensaios de campo, conforme apresentadas nas Figura 60 a Figura 62, respectivamente.

Figura 60 – Correlação do parâmetro $a_{g,q}$ com N_{SPT} e σ'_{v0}



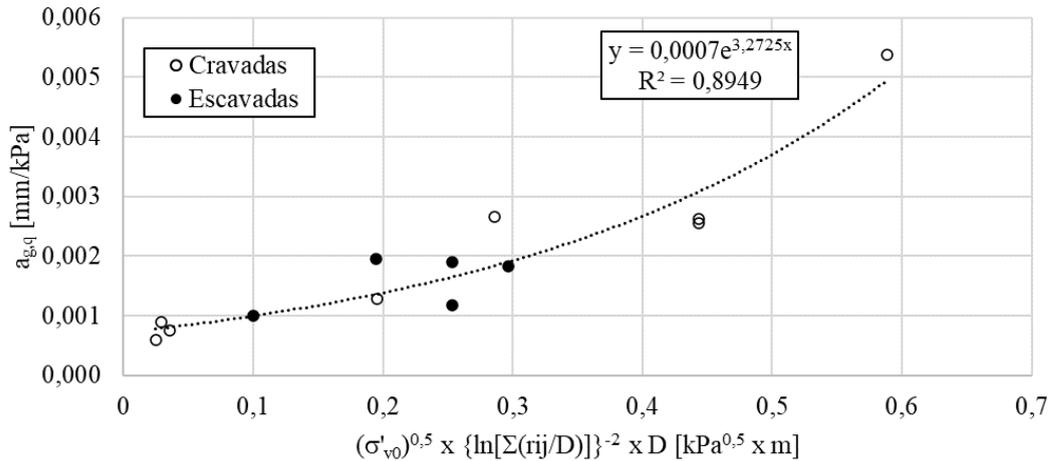
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 61 – Correlação do parâmetro $a_{g,q}$ com q_c (CPT), relação r_{ij}/D e D



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 62 – Correlação do parâmetro $a_{g,q}$ com σ'_{v0} , relação r_{ij}/D e D

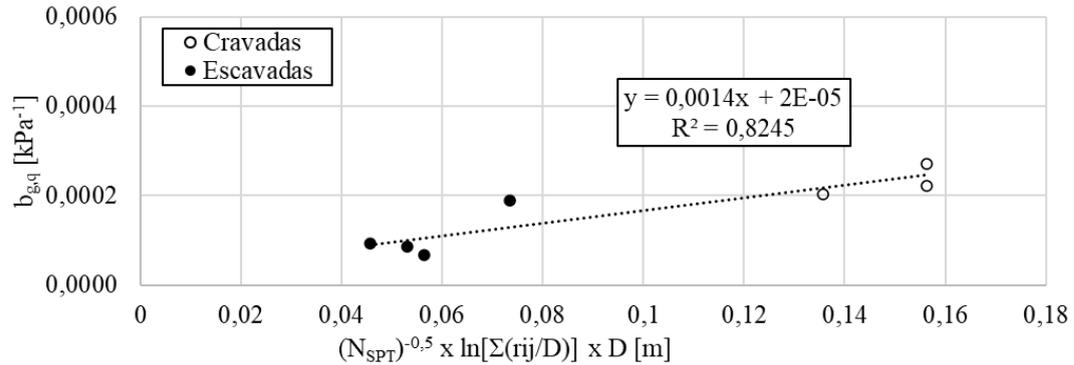


Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se de modo geral, que as correlações de $a_{g,q}$ apresentaram baixa aderência, apresentando valores de R^2 inferiores a 0,90. Além disso, não foi observado correlação entre as medidas de ensaios de campo para o parâmetro $a_{g,q}$, tendo em vista que a melhor estimativa do parâmetro $a_{g,q}$ em função dos ensaios de campo apresentou R^2 da ordem de 0,65. Por fim, destaca-se que a melhor correlação do parâmetro foi obtida em função apenas da geometria das estacas no grupo e das tensões geostáticas iniciais (Figura 62).

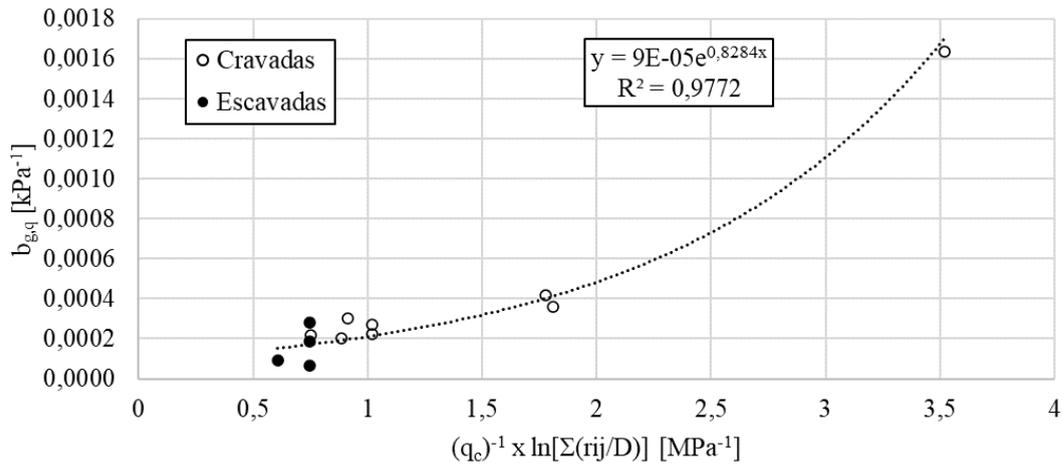
Para o parâmetro $b_{g,q}$ obteve-se correlações em função de N_{SPT} e em função de q_c , as quais são apresentadas nas Figura 63 e Figura 64, respectivamente.

Figura 63 – Correlação do parâmetro $b_{g,q}$ com N_{SPT} , relação r_{ij}/D e D



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 64 – Correlação do parâmetro $b_{g,q}$ com q_c (CPT) e relação r_{ij}/D



Fonte: Elaborado pelo Autor

É possível afirmar que a correlação do parâmetro $b_{g,q}$ baseada no N_{SPT} (Figura 63) apresentou aderência moderada, mesmo com análise conjunta com outras variáveis, apresentando valor R^2 da linha de tendência de 0,82. Quanto a correlação baseada no ensaio CPT, obteve-se correlação convergente utilizando-se conjuntamente parâmetros geométricos do grupo de estacas (Figura 64), com R^2 da ordem de 0,98. Vale destacar, devido à escassez de pontos do parâmetro $b_{g,q}$ superiores a 0,0005, o autor recomenda a utilização da correlação com o q_c (Figura 64) para valores de $b_{g,q}$ de até 0,0005.

5.2.3 Validação

A validação das correlações foram efetuadas em grupos de estacas, inicialmente, a partir da previsão dos parâmetros $b_{g,t}$ e $b_{g,q}$ utilizando correlações em função de N_{SPT} , conforme

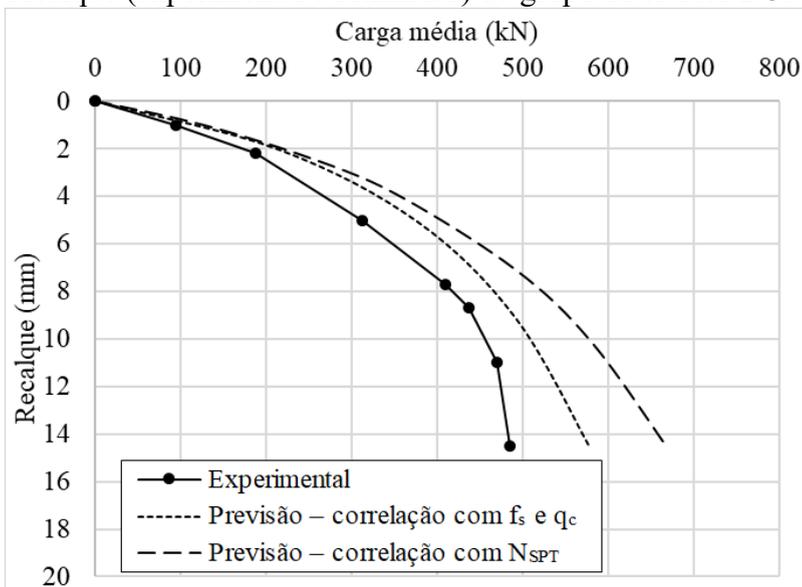
Erro! Fonte de referência não encontrada. e Figura 63, e em função de f_s e q_c , respectivamente, conforme Figura 59 e Figura 64. As estimativas dos parâmetros $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$ foram realizadas conforme Figura 57 e Figura 62, as quais apresentaram maiores aderências mesmo não sendo funções de variáveis provenientes de ensaios de campo.

Para tanto, utilizou-se de grupo de estacas não instrumentadas, assim a validação foi procedida apenas em termo da curva carga-recalque, ou seja, foi estimada a relação entre a carga média por estaca no grupo e o recalque correspondente.

Dessa forma, foram feitas previsões em função do N_{SPT} para os grupos de estacas de Melchior Filho, Bonan e Moura (2020) e os grupos de estacas 2-3a, 3-3a, 7-2a e 7-3a. Foram ainda efetuadas previsões em função de f_s e q_c para os grupos de estacas 2-3a, 9-2a e 9-3a.

Para o grupo de estacas 2-3a de Abdllrahem e El Naggar (2020) foram previstas curvas carga-recalque a partir das correlações baseadas em N_{SPT} (ensaio SPT), f_s e q_c (ensaio CPT), conforme apresentado na Figura 65. Observa-se, de modo geral, que as curvas apresentaram boa aderência à curva experimental. Nela é possível observar que a previsão baseada nas correlações com f_s e q_c (CPT) apresentou-se mais convergente que a curva obtida a partir de correlações com o N_{SPT} .

Figura 65 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimental e estimadas) do grupo de estacas 2-3a

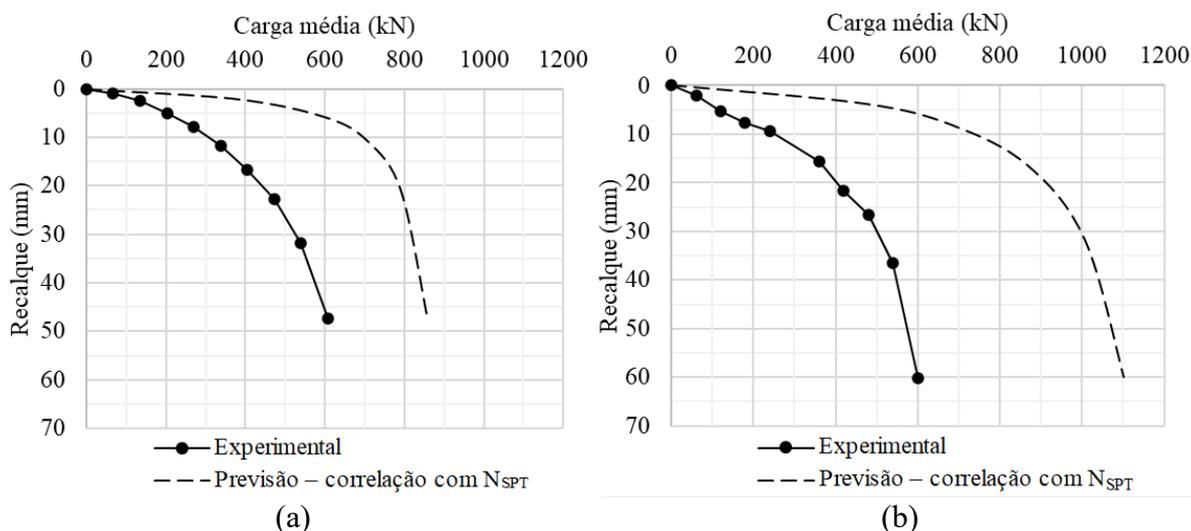


Fonte: Elaborado pelo Autor

Para os demais grupos de estacas utilizadas na validação, as previsões realizadas apontaram divergência aos resultados experimentais, apresentando, de modo geral, cargas de ruptura previstas superiores aos obtidos experimentalmente que, por sua vez, estão associados

a um subdimensionamento dos parâmetros “b” de curva hiperbólica, conforme pode ser observado na Figura 66 para os grupos de estacas 7-2a e 7-3a.

Figura 66 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimentais e estimadas): a) Grupo 7-2a; b) Grupo 7-3a



Fonte: Elaborado pelo Autor

Destaca-se da Figura 66, que para maiores deslocamentos, acima de 10 mm, as curvas experimentais e previstas do grupo 7-3a apresentaram forma aproximadamente paralela, o que pode sugerir que, de fato, apenas os parâmetros “b” das curvas de transferência de carga estejam subdimensionados. Tal discordância em relação ao parâmetro “b” é atribuído ao reduzido coeficiente de determinação (R^2) obtido no ajuste da curva q-z (Figura 63).

5.3 Conclusões parciais

Quanto as previsões realizadas para estacas isoladas e em grupo, observou-se pelas correlações realizadas que as estacas cravadas e escavadas apresentaram tendência única e, dessa forma, indicando a possibilidade de previsões a partir de uma mesma curva. Essa tendência única foi observada com maior ênfase, ainda, nas estacas isoladas, já que as previsões para estacas em grupo foram limitadas pela baixa quantidade de dados experimentais utilizados.

Quanto aos parâmetros “a” das curvas de transferência de carga, observou-se que estes não apresentam aderência às correlações diretas com as medidas de ensaios de campo, N_{SPT} , q_c e f_s . Dessa forma, foi realizado correlações com variáveis agrupadas (também para os parâmetros “b”, quando necessários), variando também os expoentes das expressões e realizando diversos testes, de modo a obter correlações mais bem ajustadas. Deste modo, os

parâmetros “a” quando correlacionados com o diâmetro da estaca, a tensão geostática inicial e, para estacas em grupo, a partir do espaçamento entre estacas, apresentaram correlações mais convergentes. Para estacas em grupo, as correlações dos parâmetros $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$ apresentaram considerável convergência com valores de R^2 superiores a 0,89 (Figura 57 e Figura 62, respectivamente), o que aponta para a possibilidade de previsão desses parâmetros apenas em função da geometria do grupo de estacas e da tensão geostática inicial.

Especificamente para os parâmetros em estacas isoladas ($a_{i,t}$ e $a_{i,q}$) foi realizado previsões também baseadas nos parâmetros $M_{s,i}$ e $M_{b,i}$ medianos, obtidos dos estudos experimentais. Tendo em vista a baixa convergência das correlações dos parâmetros $a_{i,t}$ e $a_{i,q}$ com as variáveis de ensaios de campo, geometria e características geotécnicas do solo, somado ao fato que os parâmetros M_s e M_b apresentaram uma faixa de valores pequena, especificamente entre o 1º e 3º quartil. Foi observado, ainda, que as previsões em termos de $M_{s,i}$ e $M_{b,i}$ e dos parâmetros $b_{i,t}$ e $b_{i,q}$ estimados apresentaram maior convergência aos valores experimentais na maioria das estacas instrumentadas utilizadas na validação. Nas estacas não instrumentadas a concordância também foi observada.

No que se refere as previsões realizadas para os parâmetros “b” das curvas de transferência de carga em estacas isoladas e em grupo, em geral, observa-se boa aderência às correlações baseadas nas medidas de ensaios SPT e CPT, com valores de R^2 superiores a 0,90. A exceção ocorreu nas previsões dos parâmetros $b_{i,t}$ e $b_{g,q}$ baseados no N_{SPT} , cujas curvas de ajuste apresentaram R^2 da ordem de apenas 0,66 e 0,82, respectivamente.

Baseada na obtenção da curva carga-recalque, as validações das propostas realizadas para estacas isoladas, em geral, foram bastante concordantes com valores experimentais obtidos por provas de carga. Dessa forma, as curvas carga-recalque previstas e experimentais encontraram-se praticamente sobrepostas, principalmente nos trechos iniciais das curvas (para pequenos deslocamentos). Ademais, na maioria dos casos, as previsões baseadas no parâmetro q_c foram as estimativas que mais se aproximaram aos resultados experimentais.

Especificamente na validação da estaca isolada 8-1, não foi observada aderência à curva experimental, que foi atribuído ao efeito escala da estaca (relação L/d igual a 15), ao método executivo da estaca (escavada manualmente), a elevada amplitude de valores do parâmetro $M_{b,i}$ para estacas escavadas e a possíveis diferenças de energia de ensaio SPT no local de ensaio em comparação às energias obtidas na calibração do modelo.

Quanto às estacas em grupo não instrumentadas, a validação baseada nas curvas carga-recalque apontou, para a maioria dos casos, um superdimensionamento da capacidade de

carga do sistema solo-fundação, ou seja, cargas de ruptura previstas mais elevadas que às obtidas experimentalmente. Esse comportamento é notório, principalmente, para maiores valores de recalque, excetuando-se o grupo de estacas 2-3a, que apresentou valores convergentes com os valores experimentais. Além disso, em alguns grupos de estacas foi observada aderência da curva prevista aos valores experimentais para pequenos deslocamentos, indicando que apenas as previsões dos parâmetros $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$ apresentaram concordância suficientemente adequada.

6 PREVISÃO DAS CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA EM GRUPO DE ESTACAS A PARTIR DE ESTACAS ISOLADAS

De modo a prever o comportamento das curvas de transferência de carga de estacas em grupo, nesta etapa da pesquisa, objetiva-se obter parâmetros de curva hiperbólica “a” e “b”, buscando correlacionar esses parâmetros aos respectivos parâmetros de estacas isoladas.

Para tanto, foram efetuadas em um primeiro momento, correlações dos parâmetros das curvas hiperbólicas das estacas em grupo em função dos respectivos parâmetros para as estacas isoladas de referência, conforme relação apresentada no Quadro 5. A validação da metodologia proposta foi realizada através de provas de carga em grupos de estacas não instrumentados cujas estacas isoladas de referência possuem instrumentação, a saber, os grupos de estacas 2-3a, 3-3a, 7-2a e 7-3a.

Após isso, aplica-se essas correlações obtidas, que relacionam o comportamento de estacas em grupo a partir das estacas isoladas de referência (tópico 6.1), com curvas t-z e q-z das estacas isoladas também estimadas, conforme apresentado no tópico 5.1. Por fim, a metodologia para os grupos de estacas não utilizados na obtenção das correlações é validada. Vale mencionar que, os grupos de estacas utilizados na validação foram os da obra 8 de Melchior Filho, Bonan e Moura (2020), e os grupos 2-3a, 7-2a, 7-3a, 9-2a e 9-3a.

6.1 Correlações baseadas em resultados experimentais das respectivas estacas isoladas

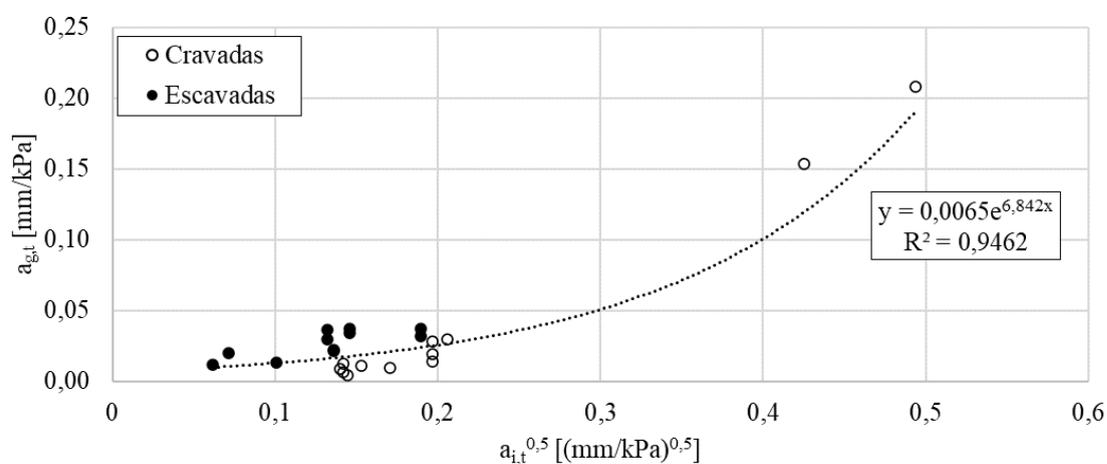
Utilizando as estacas em grupo instrumentadas, e que foram ensaiadas em provas de carga estáticas, foi feito a previsão dos parâmetros “a” e “b” das curvas de transferência de carga hiperbólicas em função dos respectivos parâmetros nas estacas isoladas de referência. Analogamente ao procedido no capítulo anterior, quando necessário, as correlações foram efetuadas com σ'_{v0} , relação r_{ij}/D e D .

Inicialmente, são realizadas correlações para os parâmetros da curva t-z, e posteriormente, para a curva q-z. Por fim, é realizada a validação das correlações obtidas comparando a curva carga-recalque prevista com os valores experimentais. Dessa forma, para validação, foram utilizados os grupos de estacas não instrumentados 2-3a, 3-3a, 7-2a e 7-3a, cujas estacas isoladas de referência possuem instrumentação.

6.1.1 Curvas t-z

A princípio, a correlação foi realizada diretamente entre o parâmetro $a_{g,t}$, da estaca em grupo e o correspondente parâmetro da estaca isolada de referência ($a_{i,t}$), conforme mostra a Figura 67. Neste caso, foi observada correlação, com coeficiente de determinação, R^2 , da ordem de 0,95, e, portanto, aderência à curva de ajuste, após a retirada de alguns pontos dispersos. Além disso, observa-se que as estacas, independentemente do procedimento executivo, seguem uma tendência única. Observa-se, ainda, que as estacas escavadas apresentam valores de $a_{g,t}$ discretamente superiores aos das estacas cravadas para um mesmo valor $a_{i,t}$ de referência.

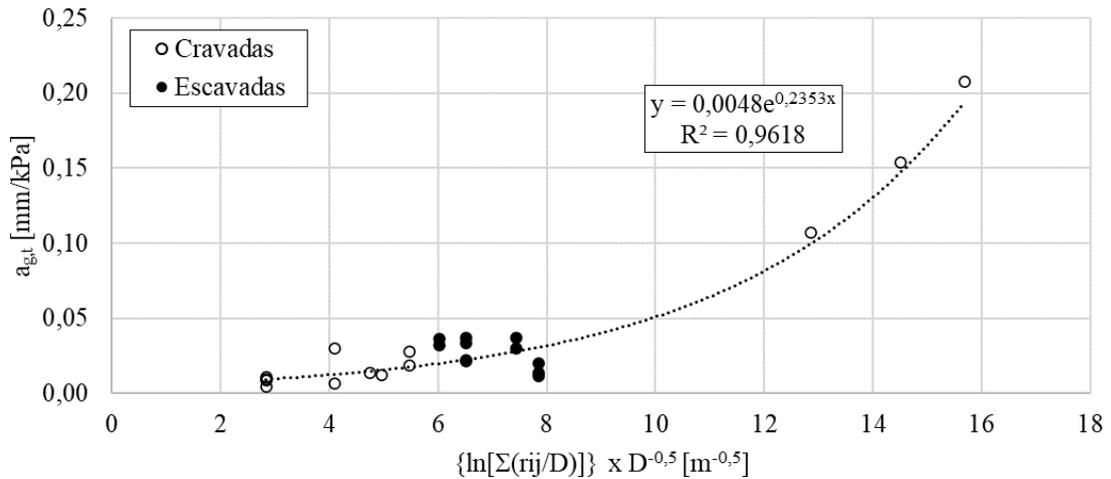
Figura 67 – Correlação do parâmetro $a_{g,t}$ com o parâmetro $a_{i,t}$



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na sequência, foram efetuadas correlações para a previsão do parâmetro $a_{g,t}$ a partir da geometria do grupo de estacas, incluindo os valores experimentais obtidos de Elsamny *et al.* (2017). Conforme apresentado na Figura 68, a correlação obtida apresentou boa aderência aos valores experimentais, com valor de R^2 da ordem de 0,96. Destaca-se ainda, que a tendência observada na correlação obtida foi única e não dependente do método executivo.

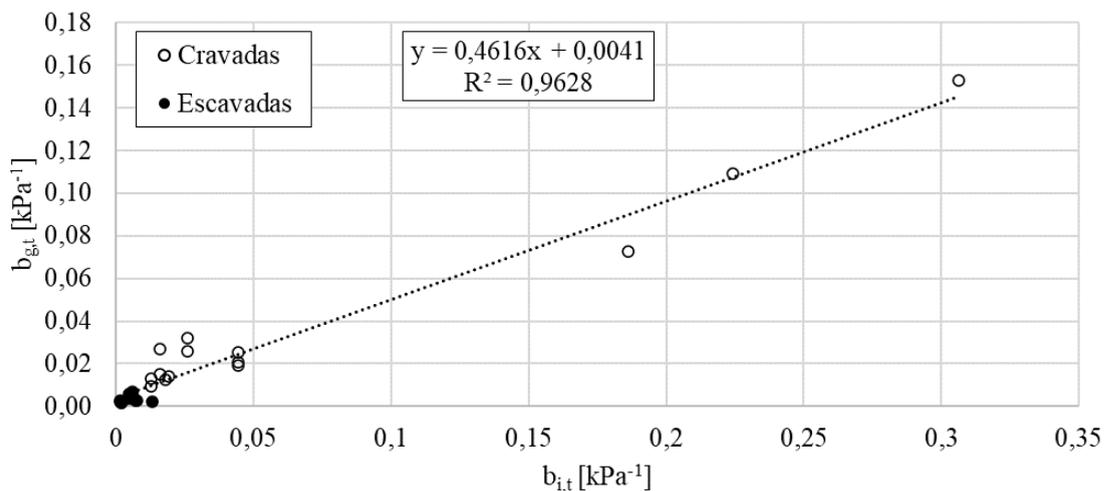
Figura 68 – Correlação do parâmetro $a_{g,t}$ com a relação r_{ij}/D e D



Fonte: Elaborado pelo Autor

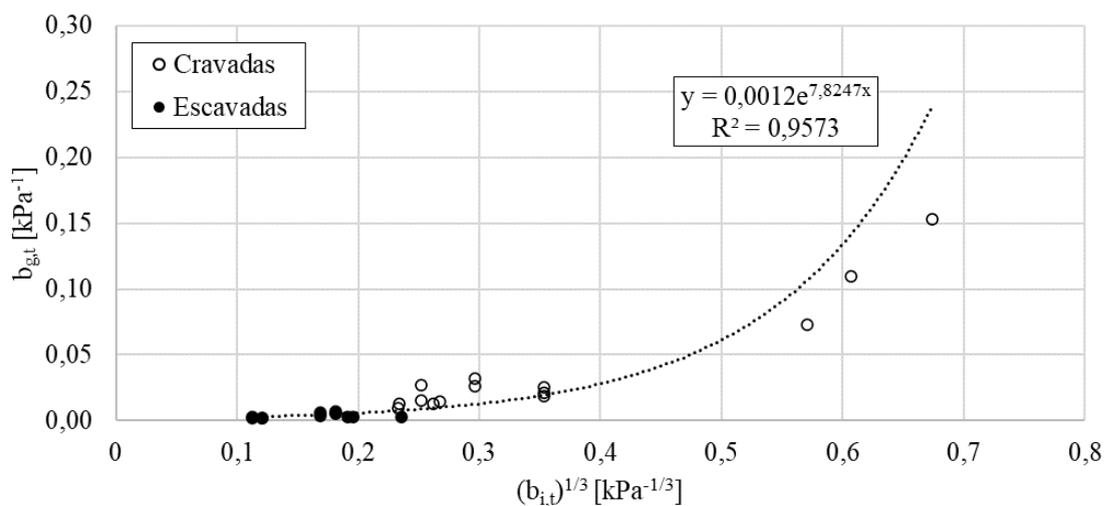
Quanto ao parâmetro $b_{g,t}$, observa-se, de modo geral, que as correlações indicaram elevada aderência aos valores experimentais, apresentando valores de R^2 superiores a 0,95. A princípio, foi efetuada uma correlação do parâmetro $b_{g,t}$ linear com o parâmetro $a_{i,t}$ (Figura 69), indicando que há correlação entre os parâmetros.

Figura 69 – Correlação do parâmetro $b_{g,t}$ linearmente proporcional a $b_{i,t}$



Fonte: Elaborado pelo Autor

De modo a melhor correlacionar o parâmetro $b_{g,t}$ com o $b_{i,t}$, foi efetuada, conforme Figura 70, a correlação de $b_{g,t}$ com $b_{i,t}^{1/3}$. Neste caso o valor de R^2 obtido também foi de 0,96, com tendência mais bem definida. Além disso, observa-se que a curva de ajuste foi unívoca e obtida considerando ambos os tipos de estacas, ou seja, estacas escavadas e cravadas.

Figura 70 – Correlação do parâmetro $b_{g,t}$ com o parâmetro $b_{i,t}$ 

Fonte: Elaborado pelo Autor

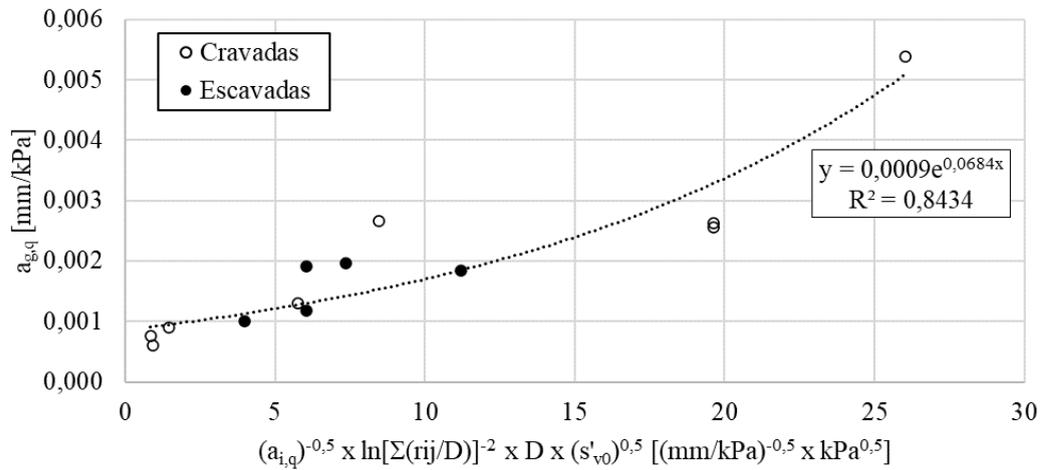
6.1.2 Curvas q-z

Para curvas q-z, inicialmente, obteve-se correlação do parâmetro $a_{g,q}$ com os parâmetros $a_{i,q}$ obtidos das respectivas estacas isoladas de referência, a qual apresentou R^2 de 0,10 da curva de correlação, indicando que não há correlação do parâmetro $a_{g,q}$ diretamente com o parâmetro $a_{i,q}$.

Devido à baixa aderência da curva prevista aos valores experimentais a partir do parâmetro $a_{i,t}$, foram buscadas novas correlações do parâmetro $a_{g,q}$, conforme apresentada na Figura 71. Vale ressaltar que, neste caso, foi retirado da análise um ponto referente à estaca em grupo 6-2a, pois apenas este se encontrava disperso em relação ao comportamento típico dos pontos utilizados na correlação.

Na Figura 71 apresenta-se a correlação em função de $a_{i,q}$, σ'_{v0} , relação r_{ij}/D e D e que, por sua vez, apresentou razoável correlação. Destaca-se ainda, que a correlação do parâmetro $a_{g,q}$ com σ'_{v0} , relação r_{ij}/D e D , conforme mostrada no tópico 5.2.2 (Figura 62), apresentou-se para a melhor correlação do parâmetro $a_{g,q}$, o valor de R^2 de 0,89, que é superior ao valor de R^2 obtido e mostrado na Figura 71.

Figura 71 – Correlação do parâmetro $a_{g,q}$ com o parâmetro $a_{i,q}$, σ'_{v0} , relação r_{ij}/D e D

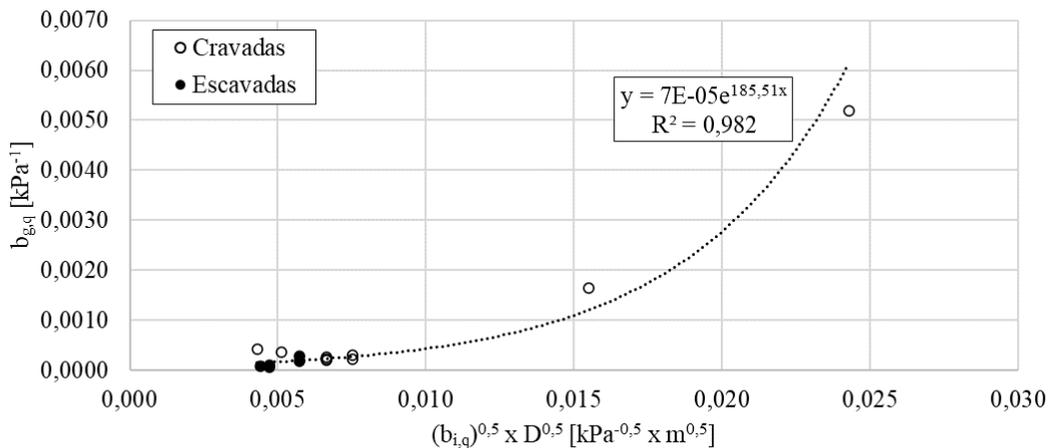


Fonte: Elaborado pelo Autor

Assim, conclui-se que o parâmetro $a_{g,q}$, portanto, não apresenta correlação unívoca com o parâmetro $a_{i,t}$, observando-se melhor correlação a partir de σ'_{v0} , relação r_{ij}/D e D , conforme mostrado na Figura 62.

Por fim, foram efetuadas correlações entre o parâmetro $b_{g,q}$ e o parâmetro $b_{i,t}$ das respectivas estacas isoladas de referência e o diâmetro da estaca, conforme mostrado na Figura 72. Neste caso, o R^2 obtido foi de 0,98, que indica correlação entre os mencionados parâmetros.

Figura 72 – Correlação do parâmetro $b_{g,q}$ com o parâmetro $b_{i,q}$ e D



Fonte: Elaborado pelo Autor

Quanto a correlação do parâmetro $b_{g,q}$ e o parâmetro $b_{i,t}$, usando funções lineares, observou-se, de modo geral, baixa aderência aos valores experimentais. Na correlação de $b_{g,t}$ com $b_{i,t}$ e D , observou-se aderência à curva de ajuste, com correlação não dependente do tipo de execução da estaca.

6.1.3 Validação

A validação das correlações obtidas foi baseada nas estimativas dos parâmetros $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$ realizadas conforme Figura 68 e Figura 62, respectivamente, e que foram as que apresentaram as maiores aderências às curvas de ajuste, sendo estabelecidas em função da geometria do grupo de estacas e tensões geostáticas iniciais no solo. As estimativas dos parâmetros $b_{g,t}$ e $b_{g,q}$, das curvas de transferência hiperbólica em função dos respectivos parâmetros das estacas isoladas de referência, foram realizadas utilizando as Figura 70 e Figura 72, respectivamente. Para esta configuração, denominou-se a previsão da curva carga-recalque como correlação 1.

Além deste caso, conforme também realizado no tópico 5.1.3, foi estimado os parâmetros “a” em função do parâmetro “b” estimado e parâmetro M definido no capítulo 4, conforme apresentado na Equação 52 para o parâmetro $a_{g,t}$. Denomina-se esta metodologia como correlação 2 ou correlação com o parâmetro de deformação M. O Quadro 7 apresenta um resumo das metodologias utilizadas na determinação dos parâmetros “a”.

$$a_{g,t} = M_{s,g} b_{g,t} D \quad (52)$$

Quadro 7 – Metodologias empregadas na definição dos parâmetros $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$

Parâmetros das curvas hiperbólicas	Previsão – correlação 1	Previsão – correlação 2
$a_{g,t}$	Função de r_{ij}/D e D	Função de $b_{g,t}$ estimado (Figura 70) e $M_{s,g}$
$a_{g,q}$	Função de σ'_{v0} , r_{ij}/D e D	Função de $b_{g,q}$ estimado (Figura 72) e $M_{b,g}$

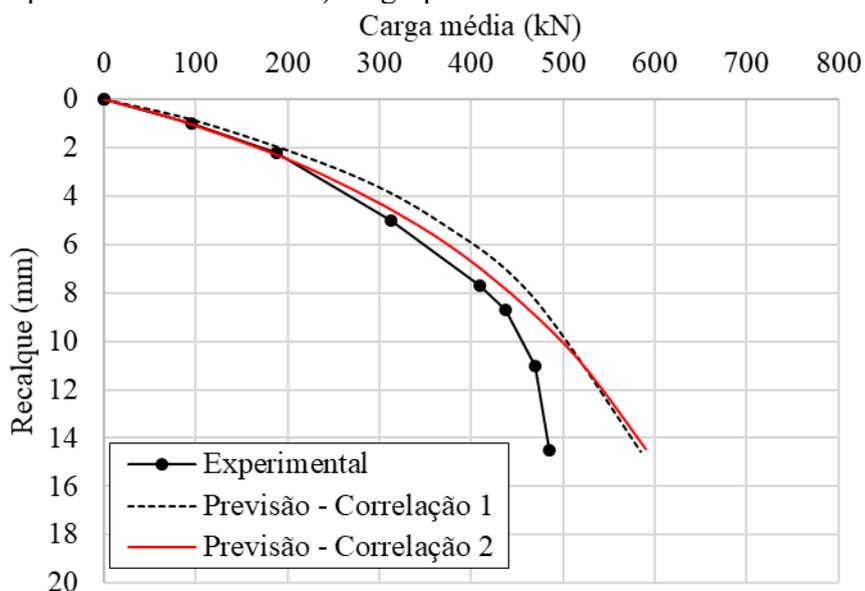
Fonte: Elaborado pelo Autor

Para tanto, utilizou-se de grupos de estacas não instrumentados, cujas estacas isoladas de referência possuem instrumentação, a saber, os grupos 2-3a, 3-3a, 7-2a e 7-3a. Deste modo, foi possível realizar a validação para estes grupos de estacas com base apenas nos resultados da curva carga-recalque, dado, em geral, em termos de carga média por estaca no grupo e o recalque correspondente.

Para o grupo de estacas 2-3a de AbdIrahem e El Naggar (2020), conforme apresentado na Figura 73, observa-se de que as previsões apresentaram aderência à curva experimental, principalmente no trecho inicial, de carregamentos menores, e cujas maiores diferenças ocorreram para deslocamentos superiores a 10 mm. Destaca-se ainda, em relação às previsões realizadas anteriormente para o grupo de estacas 2-3a, que a metodologia proposta

no presente item apresentou maior aderência aos valores experimentais em comparação com a metodologia adotada em função do N_{SPT} . Comparando as correlações propostas 1 e 2, observa-se que as correlações baseadas no parâmetro M apresenta-se mais convergente aos resultados experimentais para deslocamentos de até 11 mm.

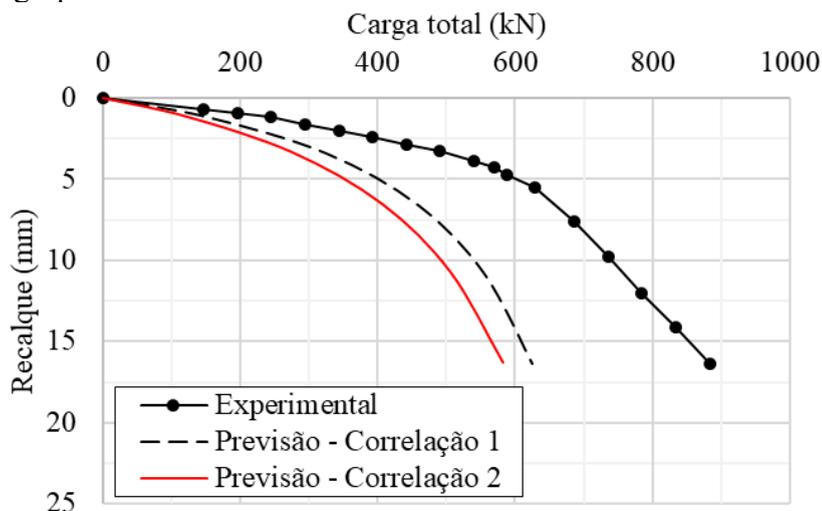
Figura 73 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimental e estimadas) do grupo 2-3a



Fonte: Elaborado pelo Autor

Quanto a aderência da curva prevista no grupo de estacas 3-3a de Ismael (2001), em termos de carga total e deslocamento (Figura 74), observa-se que não houve aderência à curva experimental. Observa-se que as previsões por meio das correlações 1 e 2 foram convergentes entre si, mas divergentes aos valores experimentais, principalmente para a correlação 2. Vale ressaltar ainda, que os resultados divergentes obtidos são atribuídos a correlações que superdimensionaram os parâmetros “b”.

Figura 74 – Curvas carga total x recalque (experimental e estimadas) do grupo de estacas 3-3a

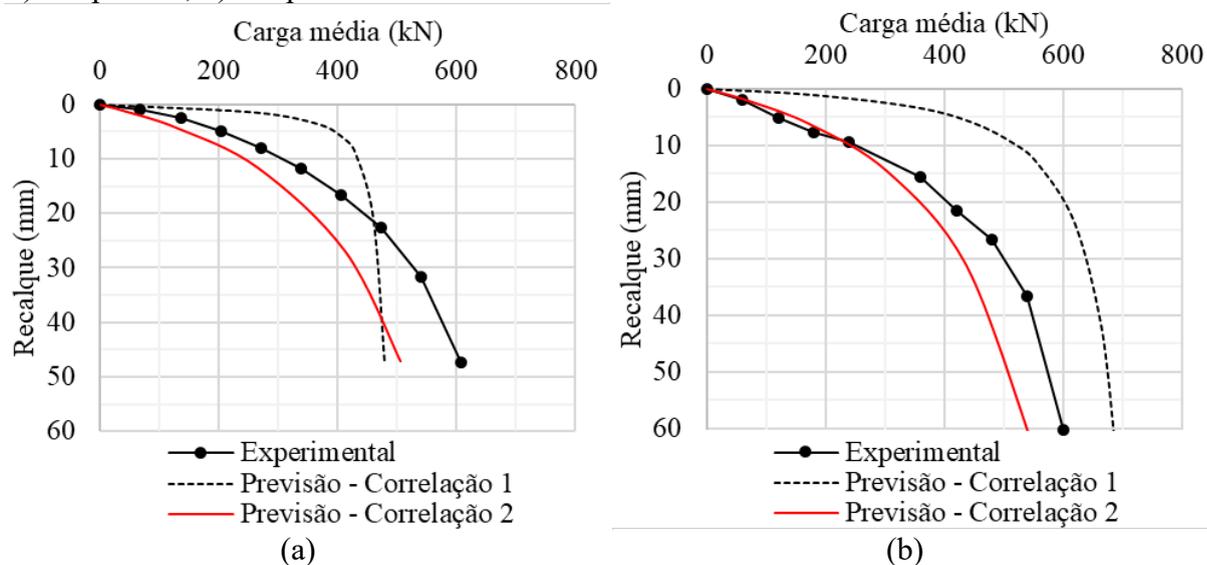


Fonte: Elaborado pelo Autor

Por fim, para os grupos de estacas de Soares, Coutinho e Cunha (2021), 7-2a e 7-3a, observa-se que as previsões realizadas apresentaram boa aderência aos resultados experimentais apenas para correlação 2, e de forma mais destacada para deslocamentos inferiores a 15 mm para o grupo de estacas 7-3a, conforme pode ser observado na Figura 75. Além disso, comparando as previsões obtidas na Figura 75 com as previsões realizadas anteriormente em função do N_{SPT} (Figura 66), as cargas últimas previstas apresentaram valores mais convergentes aos valores experimentais, pressupondo deste modo, que houve uma melhor previsão dos parâmetros $b_{g,t}$ e $b_{g,q}$.

Quanto às curvas carga-recalque previstas com a correlação 1, estas conduziram a maiores rigidezes iniciais que os valores experimentais. Da mesma forma ocorreram com as previsões obtidas utilizando correlações em função do N_{SPT} para os mesmos grupos de estacas. Deste modo, conclui-se que as previsões dos parâmetros $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$ forneceram estimativas consideravelmente abaixo dos valores reais ajustados.

Figura 75 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimentais e estimadas):
a) Grupo 7-2a; b) Grupo 7-3a



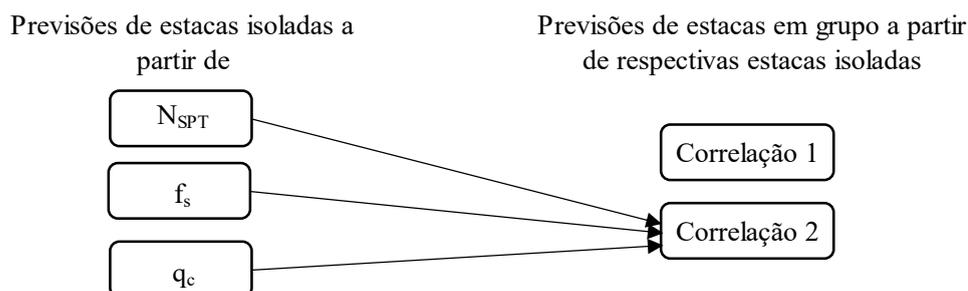
Fonte: Elaborado pelo Autor

6.2 Previsão de comportamento em grupo de estacas a partir das correlações de estaca isolada

A partir das previsões do comportamento de estacas isoladas, obtidas por meio de medidas de ensaios de campo, N_{SPT} , f_s e q_c (capítulo 5), e as previsões do comportamento de estacas em grupo a partir de respectivas estacas isoladas de referência, conforme apresentada neste capítulo, sugere-se a sobreposição de ambas as propostas a fim de prever o comportamento de transferência de carga em grupo de estacas.

Os Quadro 6 e Quadro 7 apresentam as metodologias empregadas no cálculo das previsões. A primeira proposta de previsão das estacas em grupo, correlação 1, não apresentou convergência às curvas carga-recalque experimentais e, por isso, não será utilizada no desenvolvimento da presente proposta. A Figura 76 apresenta um esquema da proposta sugerida.

Figura 76 – Proposta para previsão do comportamento de estacas em grupo



Fonte: Elaborado pelo Autor

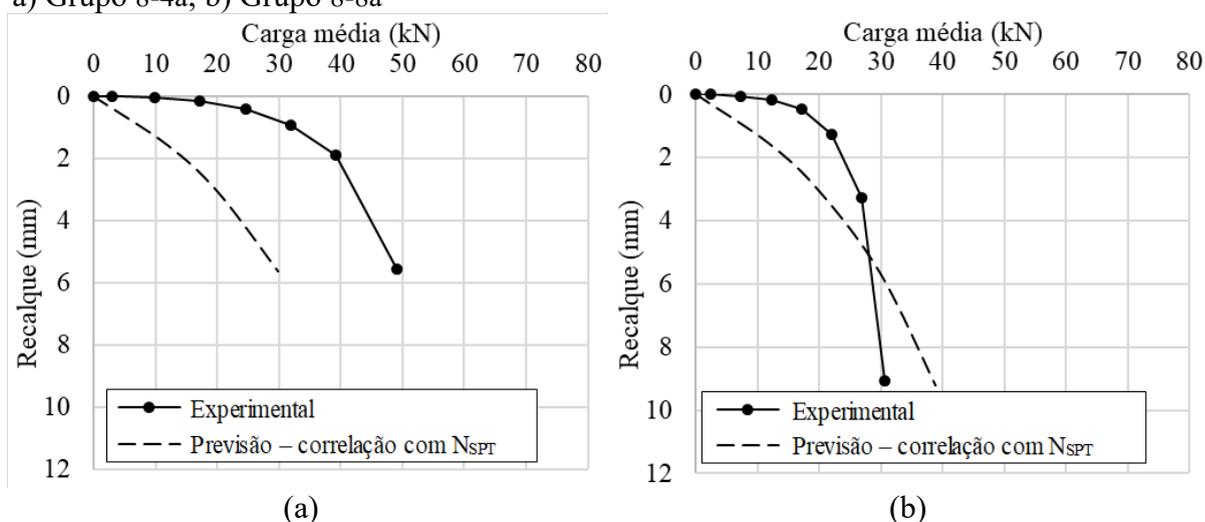
6.2.1 Validação

A validação das propostas apresentadas foi procedida a partir da previsão das curvas carga-recalque de grupo de estacas não instrumentados. Dessa forma, foram utilizados os grupos da obra 8 de Melchior Filho, Bonan e Moura (2020), e os grupos 2-3a, 7-2a, 7-3a, 9-2a e 9-3a.

A validação dos grupos de estacas da obra 8 é apresentada na Figura 77 para os grupos de estacas com espaçamento de 3 vezes o diâmetro. Nesta figura, observa-se claramente, que as estimativas dos parâmetros das curvas hiperbólicas efetuadas com o N_{SPT} não proporcionaram previsões concordantes das curvas carga-recalque, com indicação da rigidez inicial e de ruptura discordantes para a maioria dos grupos de estacas. Da mesma forma ocorreu para os demais 6 grupos de estacas de Melchior Filho, Bonan e Moura (2020).

Ressalta-se que, em comparação com as estimativas obtidas diretamente através de correlações com medidas de ensaios de campo, apresentadas no capítulo 5, as indicações observadas de carga última (Q_{ult}) nas curvas carga-recalque do presente capítulo encontram-se mais convergentes aos obtidos por prova de carga. Associado a esses resultados, a previsão divergente quanto à rigidez inicial nas curvas carga-recalque é atribuída a previsões superestimadas dos parâmetros $a_{g,t}$ e/ou $a_{g,q}$.

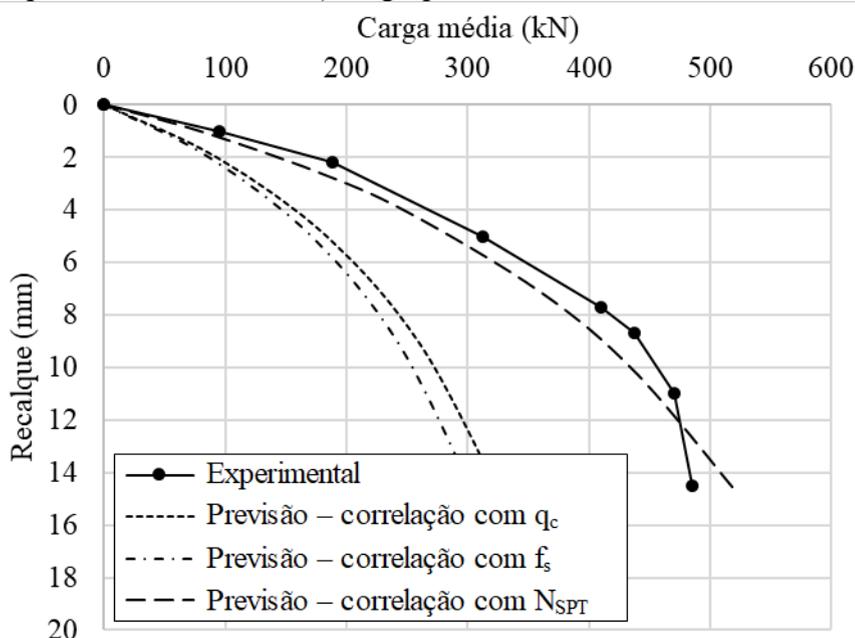
Figura 77 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimentais e estimadas): a) Grupo 8-4a; b) Grupo 8-8a



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 78 mostra a validação das previsões efetuadas a partir de q_c , f_s e N_{SPT} para o grupo de estacas 2-3a. Na figura observa-se que as estimativas baseadas em medidas do ensaio CPT apresentaram-se divergentes em relação aos resultados experimentais. Por outro lado, a previsão a partir do N_{SPT} proporcionou aderência à curva experimental ao longo de todo o trecho de carregamento.

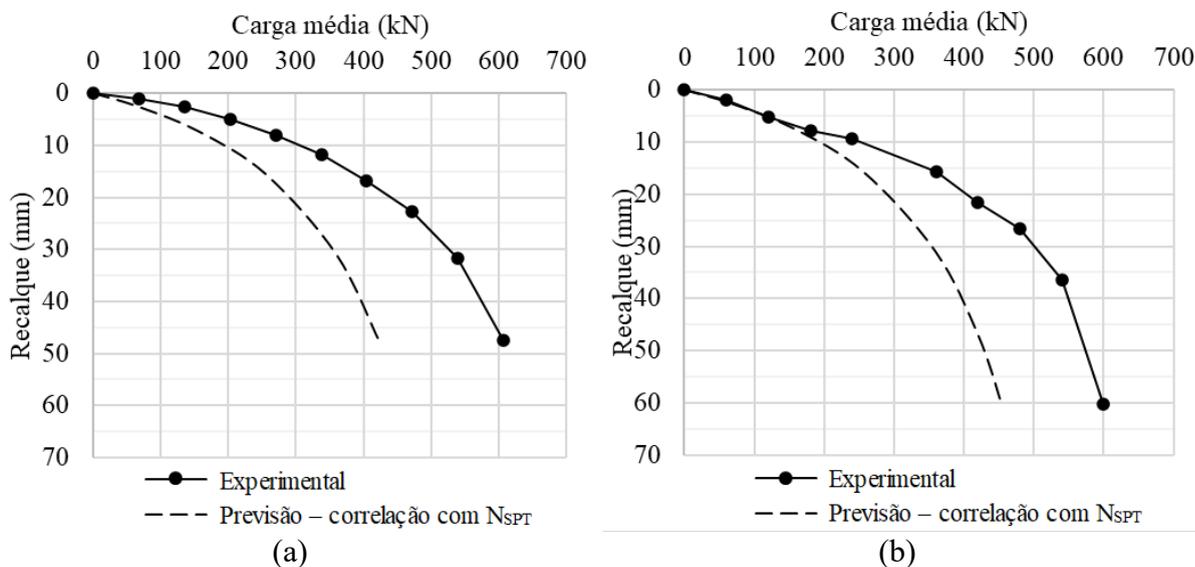
Figura 78 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimental e estimadas) do grupo de estacas 2-3a



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para os grupos de estacas de Soares, Coutinho e Cunha (2021), 7-2a e 7-3a, observa-se que as previsões realizadas não apresentaram aderências aos resultados experimentais, exceto para recalques inferiores a 8 mm no grupo de estacas 7-3a, conforme pode ser observado na Figura 79. Destaca-se, ainda, que para maiores deslocamentos, acima de 20 mm, as curvas experimentais e previstas apresentaram discordância bastante acentuada. Atribui-se o resultado obtido a previsões dos parâmetros “b”, das curvas de transferência de carga, superdimensionados. Ressalta-se ainda, que as previsões apresentadas na Figura 79 são mais concordantes com os valores experimentais que as previsões obtidas em função de N_{SPT} , conforme apresentado no capítulo 5.

Figura 79 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimentais e estimadas):
a) Grupo 7-2a; b) Grupo 7-3a

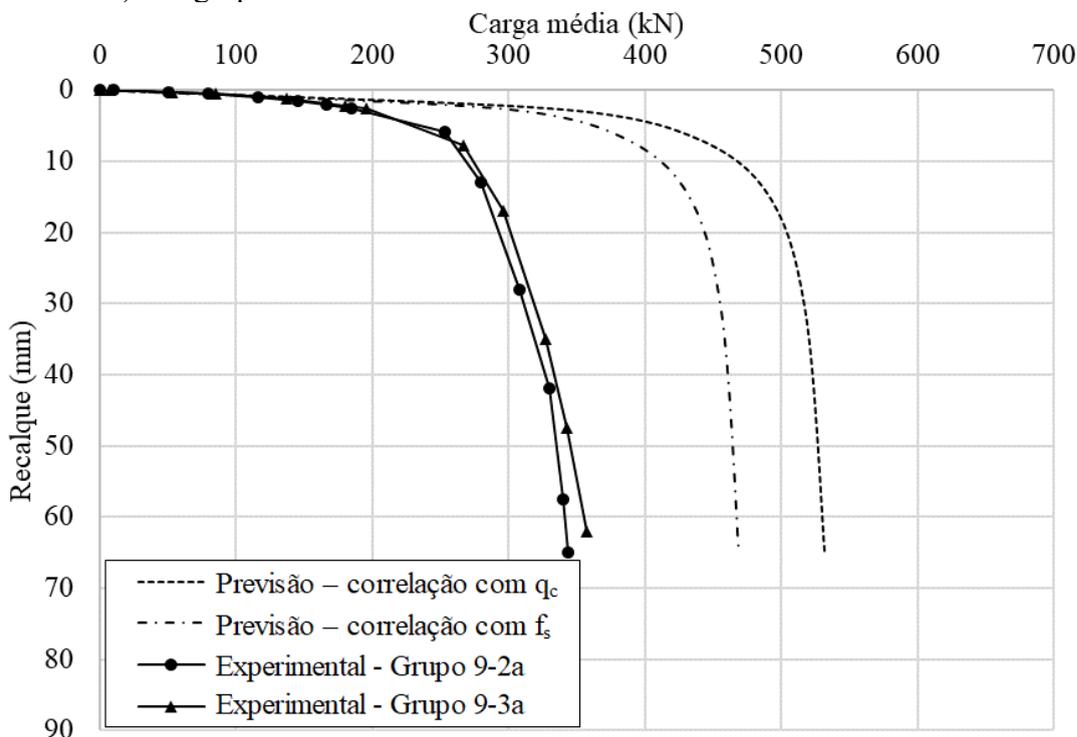


Fonte: Elaborado pelo Autor

Por fim, foram efetuadas previsões das curvas carga-recalque dos grupos de estacas 9-2a e 9-3a de Foglia *et al.* (2021), baseadas no q_c e f_s . Como o perfil de ensaio CPT foi tomado como equivalentes para ambos os grupos de estacas, as previsões das curvas carga-recalque foram as mesmas, as quais são apresentadas na Figura 80.

Observa-se, de modo geral, que há convergência das curvas prevista pelo presente estudo, apenas no trecho correspondente ao comportamento elástico, ou seja, para cargas de até 200 kN. Destaca-se ainda que as indicações das cargas de ruptura observadas nas curvas previstas são relativamente mais elevadas que os valores experimentais, apontando que os parâmetros $b_{g,t}$ e/ou $b_{g,q}$ nestes grupos de estacas foram subdimensionados. Ademais, observa-se que as curvas experimentais e previstas são praticamente paralelas para deslocamentos superiores a 10 mm. Dessa forma, as rigidezes iniciais obtidas foram semelhantes para ambas as previsões, de modo que as previsões realizadas para os $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$ são consideradas, pelo presente autor, convergentes aos valores experimentais.

Figura 80 – Comparação entre as curvas carga média x recalque (experimentais e estimadas) dos grupos de estacas 9-2a e 9-3a



Fonte: Elaborado pelo Autor

6.3 Conclusões parciais

Quanto às previsões realizadas para estacas em grupo baseadas nas respectivas estacas isoladas de referência, observou-se de modo geral, com base na validação efetuada, previsões convergentes para alguns grupos de estacas, diferentemente da metodologia empregada no capítulo anterior, cujas previsões foram efetuadas em função de medidas de ensaios de campo (N_{SPT} , q_c e f_s).

Quanto ao parâmetro $a_{g,t}$, observou-se que este apresentou aderência a correlação com o parâmetro $a_{i,t}$. Por outro lado, a correlação do parâmetro $a_{g,t}$ com a relação r_{ij}/D e D apresentou maior aderência da curva de ajuste, com R^2 igual a 0,96. Quanto às curvas q-z, observou-se que não houve correlação entre os parâmetros $a_{g,q}$ e $a_{i,q}$. No entanto, a correlação do parâmetro $a_{g,q}$ com σ'_{v0} , relação r_{ij}/D e D , conforme apresentado no capítulo 5, apresentou convergência da curva de ajuste, com R^2 igual a 0,89.

No que se refere às previsões realizadas para os parâmetros $b_{g,t}$ e $b_{g,q}$, observa-se boa aderência às curvas de ajuste baseada nos parâmetros $b_{i,t}$ e $b_{i,q}$, respectivamente, com valores de R^2 superiores a 0,95. Destaca-se ainda que os parâmetros $b_{g,t}$ e $b_{g,q}$ são diretamente proporcionais aos parâmetros $b_{i,t}$ e $b_{i,q}$, respectivamente, indicando que acréscimos no valor do

parâmetro “b” para estacas isoladas refletem em maiores valores do respectivo parâmetro para estacas em grupo.

De modo geral, as previsões dos parâmetros se mostraram independentes do tipo de estaca. A validação da primeira metodologia (correlação 1) indicou divergência em relação aos resultados experimentais. Por outro lado, a correlação 2 apresentou-se convergente para a maioria dos grupos de estacas, não convergindo aos valores experimentais apenas para o grupo de estacas 3-3a. Atribui-se esse resultado a imprecisão obtida na previsão dos parâmetros $b_{g,t}$ e/ou $b_{g,q}$.

Uma vez que as previsões de estacas em grupo a partir de estacas isoladas requer resultados experimentais de estacas isoladas instrumentadas propõe-se, em um segundo momento, que estes parâmetros em estacas isoladas sejam estimados a partir de medidas de ensaios de campo, conforme apresentado no capítulo 5, somado a utilização da correlação 2 para estimativa do comportamento de estacas em grupo.

A validação da mencionada proposta se deu a partir das curvas carga-recalque de grupos de estacas não instrumentados que possuem resultados de ensaios SPT e/ou CPT. Para os grupos de estacas da obra 8, as previsões realizadas apresentaram divergência com os resultados experimentais, principalmente em relação a rigidez inicial, indicando que os parâmetros $a_{g,t}$ e/ou $a_{g,q}$ encontravam-se superestimados. Quanto aos demais resultados experimentais observaram-se, na maioria dos grupos de estacas, que houve boa aderência das previsões aos valores experimentais apenas nos trechos iniciais das curvas, ou seja, para pequenos deslocamentos, destacando a dificuldade na modelagem completa das curvas de transferência de carga (comportamento não linear), especialmente no que tange a ruptura do sistema solo-fundação.

Para o grupo de estacas 2-3a foram observadas melhores previsões para as correlações baseadas no N_{SPT} . Para os grupos de estacas da obra 7, observou-se estimativas mais convergentes para o grupo com 4 estacas (7-3a). Para os grupos de estacas da obra 9, observou-se que as correlações com o f_s apresentaram-se mais convergentes que as correlações em função de q_c .

Para a maioria dos grupos de estacas utilizados na validação, as estimativas do comportamento dos grupos apresentadas neste capítulo apresentaram-se mais convergentes aos valores experimentais que as propostas em função de N_{SPT} , q_c e f_s , apresentada no capítulo anterior (tópico 5.2), as quais apresentaram-se divergentes para a maioria dos casos. As estimativas realizadas a partir de estacas isoladas de referência (tópico 6.1) apresentaram-se mais convergentes que as estimativas realizadas a partir de correlações de estacas isoladas,

conforme tópico 6.2. Vale ressaltar que apenas para a primeira proposta, denominada como a correlação 2, foi possível prever de forma satisfatória as curvas carga-recalque, inclusive para maiores deslocamentos.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, associando-os aos objetivos alcançados. Em seguida, foram apresentadas as recomendações para pesquisas futuras, a fim de dar prosseguimento à pesquisa realizada.

7.1 Conclusões

As conclusões da presente pesquisa são as seguintes:

- As funções hiperbólicas apresentaram aderência às curvas de transferência de carga em estacas isoladas e em grupo de estacas, apresentando R^2 -ajustado médio de 0,96. Esse resultado está em consonância com os estudos de Fleming (1992), Liu *et al.* (2004), Zhang e Zhang (2012), Zhang *et al.* (2014) e Bohn, Santos e Frank (2016) para estacas isoladas. Dessa forma, verifica-se, na presente pesquisa, que as curvas de transferência de carga em grupo de estacas podem ser representadas por funções hiperbólicas;
- O parâmetro M , de modo geral, é uma variável que está associada, por definição, à rigidez inicial e à resistência mobilizada última e, portanto, é um parâmetro que tem uma tendência natural de apresentar uma alta variabilidade por estar acoplada a duas outras variáveis;
- Quanto aos parâmetros de deformação $M_{s,i}$ e $M_{b,i}$, os valores obtidos foram relativamente superiores aos propostos por Bohn, Santos e Frank (2016) em estacas executadas nos perfis de solos granulares investigados. Ademais, destaca-se que o parâmetro $M_{b,i}$ de estacas escavadas apresentou uma ampla faixa de valores no intervalo interquartil e distante, significativamente, do valor de referência proposto por Bohn, Santos e Frank (2016). Na validação dos parâmetros $M_{s,i}$ e $M_{b,i}$ foram observadas, ainda, diferenças percentuais, entre valores propostos e os valores obtidos de ajustes de curvas experimentais, que variaram entre -6% a 69%. Além disso, em todas as análises, os valores propostos na presente pesquisa apresentaram-se mais convergentes aos valores obtidos de ajustes do que utilizando os valores propostos por Bohn, Santos e Frank (2016);

- Para grupo de estacas, observou-se, preliminarmente, que os valores dos parâmetros M propostos são superiores aos respectivos parâmetros em estacas isoladas, com exceção do parâmetro $M_{s,g}$ para estacas cravadas. Além disso, observa-se que esses parâmetros em grupo de estacas variam em uma faixa mais ampla de valores do que nas análises realizadas para estacas isoladas. Comparando o parâmetro M de estacas em grupo em relação ao respectivo parâmetro para a estaca isolada, obteve-se que o parâmetro M de estacas em grupo é, em geral, 0,64 a 4,2 vezes o respectivo parâmetro para estaca isolada, e que a diferença de valores entre estacas em grupo e isoladas é maior para estacas escavadas e para estacas com menores espaçamentos entre estacas (relação s/D), os quais estão associados o efeito de grupo. Por fim, para grupos de estacas observa-se, preliminarmente, que os parâmetros $M_{s,g}$ e $M_{b,g}$ propostos são menos convergentes aos valores obtidos experimentalmente, do que em análises de estacas isoladas.

As conclusões acerca das propostas para obtenção das curvas de transferência de carga baseadas em medidas de ensaios de campo (N_{SPT} , q_c e f_s) são:

- Para todas as correlações realizadas, observou-se que as estacas cravadas e escavadas apresentaram tendência única indicando, dessa forma, a possibilidade de previsões a partir de uma mesma curva. Essa tendência foi observada com maior ênfase nas estacas isoladas, que é a situação de maior quantidade de dados experimentais.
- Quanto aos parâmetros “b” das curvas de transferência, em geral, observa-se boa aderência às correlações baseadas nas medidas de ensaios SPT e CPT, com valores de R^2 superiores a 0,90. A exceção ocorreu nas previsões dos parâmetros $b_{i,t}$ e $b_{g,q}$ baseados no N_{SPT} , cujas curvas de ajuste apresentaram R^2 entre 0,66 e 0,82.
- Quanto aos parâmetros “a” das curvas de transferência de carga, tanto em estacas isoladas quanto em grupo de estacas, observou-se que estes não apresentam aderência às correlações diretas com as medidas de ensaios de campo. Por outro lado, previsões baseadas no diâmetro da estaca, tensão geostática inicial e, para estacas em grupo, a partir do espaçamento entre estacas, apresentaram correlações mais convergentes. Especificamente para estacas em grupo, as correlações dos parâmetros $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$ apresentaram convergência à curva de

correlação, com valores de R^2 superiores a 0,89, de modo que, foi possível realizar a previsão desses parâmetros apenas em função da geometria do grupo de estacas e da tensão geostática inicial.

- Tendo em vista a baixa convergência das correlações diretas dos parâmetros $a_{i,t}$ e $a_{i,q}$, foi realizado também previsões destes parâmetros baseados nos parâmetros $M_{s,i}$ e $M_{b,i}$ medianos, obtidos dos estudos experimentais e, dos parâmetros $b_{i,t}$ e $b_{i,q}$ estimados a partir de correlações de medidas de ensaios de campo. Foi observado que as previsões efetuadas com essas correlações, apresentaram maior convergência aos valores experimentais, na maioria das estacas instrumentadas utilizadas na validação, obtendo-se concordância também na validação das estacas não instrumentadas.
- Na validação das propostas realizadas para estacas isoladas foram obtidas, de maneira geral, curvas carga-recalque previstas e experimentais praticamente sobrepostas, principalmente para pequenos deslocamentos. Ademais, na maioria dos casos, as previsões baseadas no parâmetro q_c foram as estimativas que mais se aproximaram aos resultados experimentais. Vale ressaltar que, especificamente na estaca 8-1 não se observou aderência à curva experimental, a qual atribui-se essa diferença, principalmente, ao efeito escala da estaca (L/d igual a 15), método executivo (estaca escavada manualmente) e a elevada amplitude de valores do parâmetro $M_{b,i}$ para estacas escavadas.
- A validação das propostas realizadas para estacas em grupo apontou, para a maioria dos casos, cargas de ruptura previstas superiores aos valores obtidos experimentalmente, apresentando convergência apenas para o grupo 2-3a. Além disso, em alguns grupos de estacas, foi observada aderência da curva prevista aos valores experimentais para pequenos deslocamentos, indicando que apenas as previsões dos parâmetros $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$ apresentaram concordância suficientemente adequada.

As conclusões acerca das propostas para obtenção das curvas de transferência de carga de estacas em grupo a partir das referidas curvas em estacas isoladas são:

- Quanto aos parâmetros $a_{g,t}$ e $a_{g,q}$, observou-se que correlações com σ'_{v0} , relação r_{ij}/D e D , apresentaram maior convergência da curva de ajuste do que correlacionando com os respectivos parâmetros em estacas isoladas, $a_{i,t}$ e $a_{i,q}$, fornecendo valores de R^2 superiores a 0,89. Por outro lado, as correlações dos

parâmetros $b_{g,t}$ e $b_{g,q}$ baseadas nos parâmetros $b_{i,t}$ e $b_{i,q}$, respectivamente, apresentaram aderência às curvas de ajuste, com valores de R^2 superiores a 0,95. Destaca-se, ainda, que os parâmetros $b_{g,t}$ e $b_{g,q}$ são diretamente proporcionais aos parâmetros $b_{i,t}$ e $b_{i,q}$, respectivamente.

- De modo geral, as previsões dos parâmetros se mostraram independentes do tipo de estaca. A validação da correlação 1 (parâmetro “a” obtido por correlação direta) indicou divergência em relação aos resultados experimentais. Por outro lado, a correlação 2 (parâmetro “a” obtido a partir do parâmetro M e “b” estimado) proporcionou resultados convergentes para a maioria dos grupos de estacas avaliados.
- Em seguida, foi efetuada a previsão dos parâmetros de curva hiperbólica de estacas em grupo a partir de estacas isoladas, concomitantemente com a previsão dos parâmetros das respectivas estacas isoladas. De maneira geral, a validação dessa proposta apontou, para a maioria dos grupos de estacas, que houve aderência das previsões aos valores experimentais apenas nos trechos iniciais das curvas carga-recalque, ou seja, para pequenos deslocamentos. Ademais, na maioria dos casos, houve maior convergência aos resultados experimentais para as previsões realizadas com o N_{SPT} e para grupos com 4 estacas.
- De maneira geral, as estimativas dos parâmetros de curva de transferência de carga em grupo de estacas, apresentaram-se mais convergentes aos valores experimentais que as propostas diretamente em função de N_{SPT} , q_c e f_s . As estimativas realizadas a partir de estacas isoladas de referência apresentaram-se mais convergentes que as estimativas realizadas a partir de correlações de estacas isoladas. Vale ressaltar que apenas para a primeira proposta, denominada como a correlação 2, foram obtidas previsões satisfatórias das curvas carga-recalque em grupo de estacas, inclusive para maiores deslocamentos.

7.2 Sugestões para pesquisas futuras

A fim de aprimorar e continuar o trabalho realizado na presente pesquisa, é sugerido para pesquisas futuras:

- Avaliar aderência de curvas de transferência de carga de solos argilosos, siltosos e solos multicamadas (heterogêneos) a modelos hiperbólicos, para estacas

isoladas e em grupo de estacas. Obtendo os valores dos parâmetros de deformação M e confrontando com os valores propostos por Bohn, Santos e Frank (2016);

- Avaliar o efeito das diferentes tecnologias existentes de execução de estacas escavadas (manualmente, hélice contínua, estaca raiz, entre outras) no parâmetro M_b , uma vez que há uma grande dispersão destes valores, em comparação com os demais;
- Utilizar outras medidas obtidas de ensaios de campo em profundidade, como resultados de sondagens à percussão corrigidos em função da eficiência e resultados obtidos de ensaios de cone (como a resistência de ponta corrigida para efeitos de poropressão, q_t , do ensaio CPT), pressiométricos (PMT) e dilatométricos (DMT), a fim de correlacionar com os parâmetros do modelo hiperbólico de curvas de transferência de carga;
- Aplicar redes neurais artificiais (RNA) para obtenção dos parâmetros “a” e “b” de curvas de transferência de carga em estacas isoladas e em grupo de estacas.

REFERÊNCIAS

- ABDLRAHEM, M. A.; EL NAGGAR, M. H. Axial performance of micropile groups in cohesionless soil from full-scale tests. **Canadian Geotechnical Journal**, v 57, n.7, p. 1006-1024, Apr. 2020.
- API. **Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms - working stress design**. 21 ed. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122**: projeto e execução de fundações. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484**: Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- BALDI, G.; BELLOTTI, R.; GHIONNA, V. N.; JAMIOLKOWSKI, M.; LO PRESTI, D. C. F. Modulus of sands from CPT's and DMT's. *In*: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1., 1989, Rio de Janeiro, **Proceedings...** Rio de Janeiro, v. 1, p. 165-170, 1989.
- BEZERRA, P. H. L.; MOURA, A. S.; SILVA FILHO, F. C.; FILHO, F. V. C. G.; CERQUEIRA JUNIOR, E. Settlement's Prediction of Piles in Tropical Soil. **Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA**, v. 52, n. 2, p. 48-55, June 2021.
- BOHN, C.; SANTOS, A. L.; FRANK, R. Development of axial pile load transfer curves based on instrumented load tests. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 143, n. 1, 04016081, July 2016.
- BONAN, V. H. F. **Estudo experimental do efeito de grupo de estacas escavadas em perfil de solo granular**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- BOWLES, J. E. **Foundation analysis and Design**. 5 ed. Singapura: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
- BRADSHAW A. S.; BAXTER, C. D. P. **Design and construction of driven pile foundations—lessons learned on the Central Artery/Tunnel project**. No. FHWAHRT-05-159, McLean, Virginia: Federal Highway Administration, 2006.
- BRIAUD J. L.; TUCKER L. M.; NG, E. Axially loaded 5 pile group and single pile in sand. *In*: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12., 1989, Rio de Janeiro, **Proceedings...** Rio de Janeiro, v. 2, p. 1121-1124, 1989.
- CAMBEFORT, H. Essai sur le comportement en terrain homogène des pieux isolés et des groupes de pieux. *In*: Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, **Annales...** Paris, p. 1479-1518, 1964.
- CASTELLI, F.; MAUGERI, M. Simplified nonlinear analysis for settlement prediction of pile

groups. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.128, n. 1, p. 76-84, Jan. 2002.

CHAN. R. K. S. **Foundation design and construction**. Geo Publication, n. 1, Homantin (Hong Kong): Geotechnical Engineering Office, 2006.

CLOUGH, G. W.; DUNCAN J. M. Finite element analysis of retaining wall behavior. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 97, n. 12, p. 1657–1673, Dec. 1971.

COYLE, H. M.; REESE, L. C. Load transfer for axially loaded piles in clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 92, n. 2, p. 1–26, 1966.

DAI, G.; SALGADO, R.; GONG, W.; ZHANG, Y. Load tests on full-scale bored pile groups. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 49, n. 11, p. 1293-1308, Nov. 2012.

DE MELLO, V. F. B. Foundations of buildings in clay. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 7., State-of-the-Art Report, 1969, México, **Proceedings...** México, v. 1, p. 49–136, 1969.

ELSAMNY, M. K.; IBRAHIM, M. A.; GAD, S. A.; ABD-MAGEED, M. F. Experimental evaluation of bearing capacity and behaviour of single pile and pile group in cohesionless soil. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, Cairo, v. 6, n.5, p. 695–704, May 2017.

FAHEY, M.; CARTER, J. P. A finite element study of the pressuremeter test in sand using a nonlinear elastic plastic model. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 30, n. 2, p. 348–362, Apr. 1993.

FELLENIOUS B. H.; BRUSEY W. G.; PEPE F. Soil set-up, variable concrete modulus, and residual load for tapered instrumented piles in sand. *In*: ASCE Specialty Conference on Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities, 2000, Amherst, **Proceedings...** Amherst, p. 98–114, 2000.

FIROOZ FAR, A.; ROSTAMI, A.; GHADERI, H.; ZAMANI, H.; RHOSTAMKANI, A. Assessing the effects of length, slope and distance between piles on the bearing capacity of a pile group under axial loading in granular soil. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 7, n. 5, p. 1894-1899, 2017.

FLEMING, W. G. K. A new method for single pile settlement prediction and analysis. **Géotechnique**, v. 42, n. 3, p. 411–425, Sept. 1992.

FOGLIA A.; ABDEL-RAHMAN, K.; WISOTZKI, E.; QUIROZ, T.; ACHMUS, M. Large-scale model tests of a single pile and two-pile groups for an offshore platform in sand. **Canadian Geotechnical Journal**, Hannover, v. 58, n. 12, p. 1825-1838, Feb. 2021.

GAVIN, K. G.; O'KELLY, B. C. Effect of friction fatigue on piles capacity in dense sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 1, p. 63-71, Jan. 2007.

GAVIN, K. G.; CADOGAN, D.; CASEY, P. Shaft capacity of continuous flight auger piles in sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 6, p. 790-

798, June 2009.

GAVIN, K.; DOHERTY, P.; TOLOOIYAN, A. Field investigation of the axial resistance of helical piles in dense sand. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 51, n. 11, p. 1343–1354, June 2014.

GOMES FILHO, F. V. C.; MOURA, A. S. Proposal for considering the group effect in the prediction of settlements in pile groups through load transfer methods. **Soils and Rocks**, v. 44, n. 2, e2021061320, Apr./June 2021.

GREGERSEN, O. S.; AAS, G.; DIBIAGIO, E. Load tests on friction piles in loose sand. In: Proc. 8th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 8., 1973, Moscow, **Proceedings...** Moscow, v. 2, p. 109-117, 1973.

ISMAEL, N. F. Axial load tests on bored piles and pile groups in cemented sands. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 9, p. 766–773, Sept. 2001.

KEZDI, A. Bearing capacity of piles and piles groups. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 4., 1957, London, **Proceedings...** London, v. 2, p. 46-51, 1957.

KOIZUMI, Y.; ITO, K. Field tests with regard to pile driving and bearing capacity of piled foundations. **Soils and Foundations**, v. 7, n. 3, p. 30–53, 1967.

KRAFT, L. M.; RAY, R. P.; KAGAWA, T. Theoretical $t-z$ curves. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 107, n. 11, 1543–1561, Nov. 1981.

KRASÍŃSKI, A. Advanced field investigations of screw piles and columns. **Archives of Civil Engineering**, v. 57, n. 1, p. 45–57, 2011.

KRASINSKI, A. Badania terenowe przemieszczeniowych pali i kolumn wkręcanych typu SDP i SDC. **Drogi i Mosty**, Nr 1-2, 2011a.

KRASÍŃSKI, A. Proposal for calculating the bearing capacity of screw displacement piles in non-cohesive soils based on CPT results. **Studia Geotechnica et Mechanica**, v. 34, n. 4, p. 41–51, 2012.

LEE, J.; SALGADO, R.; PAIK, K. Estimation of load capacity of pipe piles in sand based on cone penetration test results. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 6, p. 391–403, May 2003.

LE KOUBY, A.; DUPLA, J. C.; CANOU, J.; FRANCIS, R. The effects of installation order on the response of a pile group in silica sand. **Soils and Foundations**, v. 56, n. 2, p. 174-188, Apr. 2016.

LIU, J.; XIAO, H. B.; TANG, J.; LI, Q. S. Analysis of load-transfer of single pile in layered soil. **Computers and Geotechnics**, v. 31, n. 2, p. 127-135, Jan. 2004.

LONG, P. D. **Footings with settlement-reducing piles in non-cohesive soil**. Report 43. Linköping: Swedish Geotechnical Institute, 1993.

MASSAD, F. Sobre a interpretação de provas de carga em estacas, considerando as cargas

residuais na ponta e a reversão do atrito lateral. Parte I: solos relativamente homogêneos, **Solos e Rochas**, v. 15, n. 2, p. 103-115, 1992.

MEYERHOF, G. G. Compaction of sands and bearing capacity of piles. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 85, n. 6, p. 1-29, June 1959.

MAYNE, P. W.; HARRIS, D. E. **Axial load-displacement behavior of drilled shaft foundations in Piedmont residium**. Report prepared for FHWA, McLean, Virginia: Federal Highway Administration, 1993.

MAYNE, P. W. Evaluation of foundation response by G/Gmax degradation relationships in soils. **National Science Council of ROC and NSF of U.S.**, Taipei, Taiwan, p. 136–148, 1995.

MELCHIOR FILHO, J.; BONAN, V. H. F.; MOURA, A. S. Experimental study of the group effect on the bearing capacity of bored piles in sandy soil. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 43, n. 1, p. 11-20, Jan./Mar. 2020.

MYLONAKIS G.; GAZETAS G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil. **Géotechnique**, v. 48, n. 1, p. 55-72, Feb. 1998.

NANDA, S.; PATRA, N. R. Theoretical load-transfer curves along piles considering soil nonlinearity. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 140, n. 1, p. 91-101, Jan. 2014.

NORKUS, A.; MARTINKUS, V. Experimental study on bearing resistance of short displacement pile groups in dense sands. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 25, n. 6, p. 551-558, Apr. 2019.

NOTTINGHAM, L. C. **Use of quasi-static friction cone penetrometer data to predict load capacity of displacement piles**. 1975. Ph.D. thesis, University of Florida, 1975.

O'NEILL, M. W.; HAWKINS, R. A.; MAHAR L. J. Load transfer mechanisms in piles and pile groups, **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 108, n. 12, p. 1605-1623, Dec. 1982.

PAIK, K.; SALGADO, R.; LEE, J.; KIM, B. Behavior of open- and closed-ended piles driven into sands. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 4, p. 296–306, Apr. 2003.

PAN, D. D.; ZHANG, Q. Q.; LIU, S. W.; ZHANG, S. M. Analysis on response prediction of a single pile and pile groups based on the Runge-Kutta method. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, p. 92-100, Jan. 2018.

POULOS, H. G. Analysis of the settlement of pile groups. **Géotechnique**, v. 18, n. 4, v. 449–471, Dec. 1968.

POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Pile Foundation Analysis and Design**. New York: John Wiley & Sons, 1980.

POULOS H. G.; MATTES N. S. Settlement and load distribution analysis of pile groups. **Australian Geomechanics Journal**, G1, p. 18–28, 1971.

POULOS, H. G. Pile behaviour - theory and application. **Géotechnique**, v. 39, n. 3, p. 365-415, Sept. 1989.

RANDOLPH, M. F.; WROTH, C. P. Analysis of deformation of vertically loaded pile. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 104, n. 12, p. 1465–1488, Dec. 1978.

RANDOLPH, M. F.; WROTH, C. P. An analysis of the vertical deformation of pile groups. **Geotechnique**, v. 29, n. 4, p. 423-439, Dec. 1979.

SAFFERI, M. R.; TATE, A. P. K. Model tests on pile groups in a clay soil with particular reference to the behaviour of the group when it is loaded eccentrically. *In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 5., 1961, Paris, Proceedings...* Paris, 1961. v. 2, p. 129-134, 1961.

SALES, M. M.; PREZI, M.; SALGADO, R.; CHOI, Y. S.; LEE, J. Load-settlement behaviour of model pile groups in sand under vertical load. **Journal of Civil Engineering and Management**, v.23, n.8, p. 1148-1163, Oct. 2017.

SKEMPTON, A. W Piles and pile foundations, Discussion. *In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3., 1953, Zurich, Proceedings...* Zurich, v. 3, p. 172, 1953.

SOARES, W. C.; COUTINHO, R. Q.; CUNHA, R. P. Behaviour of instrumented hollow auger pile groups in sandy soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 39, p. 5599-5618, May 2021.

SOWERS, G. F.; MARTIN, C. B.; WILSON, L. L.; FAULSOLD, M. The bearing capacity of friction pile groups in homogeneous clay from model studies. *In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 5., 1961, Paris, Proceedings...* Paris, 1961. v. 2, p. 155-159, 1961.

TAVENAS, F. A. Load tests results on friction piles in sand. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 8, n. 1, p. 7-22, Feb. 1971.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. Análise, projeto e execução de fundações rasas. *In: HACHICH, W. et al. Fundações: teoria e prática.* São Paulo: Pini, 1996.

TUCKER, L. M.; BRIAUD, J. L. **Analysis of the pile load test program at the Lock and Dam 26 replacement project.** Final Report. St. Louis (MO): US Army Corps of Engineers, 1988.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VESIC, A. S. **Design of pile foundations.** Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board, National Research Council. Washington: Transportation Research Board, 1977.

WHITAKER, T. Experiments with model piles in groups. **Géotechnique**, v. 7, n. 4, p. 147-167, Dec. 1957.

YANG, J.; THAM, L. G.; LEE, P. K. K.; CHAN, S. T.; YU, F. Behaviour of jacked and driven piles in sandy soil. **Géotechnique**, v. 56, n. 4, p. 245-259, May 2006.

ZHANG, L.; TANG, W. H.; NG, C. W. W. Reliability of axially loaded driven pile groups. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 12, p. 1051–1060, Dec. 2001.

ZHANG, Q. Q.; ZHANG, Z. M. Simplified calculation approach for settlement of single pile and pile groups. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 26, n. 6, p. 750–758, Nov./Dec. 2012.

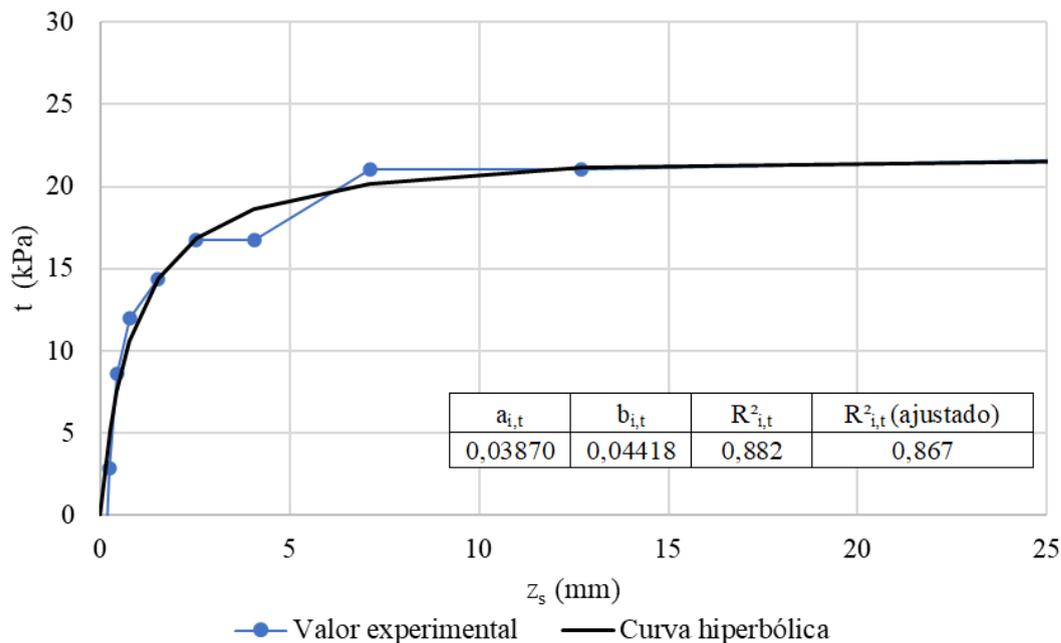
ZHANG, Q. Q.; LI, S. C.; LIANG, F. Y.; YANG, M.; ZHANG, Q. Simplified method for settlement prediction of single pile and pile group using a hyperbolic model. **International Journal of Civil Engineering**, v. 12, n. 2, p. 146-159, Apr. 2014.

ZHANG, Q. Q.; LIU, S. W.; ZHANG, S. M.; WANG, K. Simplified non-linear approaches for response of a single pile and pile groups considering progressive deformation of pile-soil system. **Soils and Foundations**, v. 56, n. 3, p. 473-484, June 2016.

ZHU, H.; CHANG, M. F. Load transfer curves along bored piles considering modulus degradation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 9, p. 764-774, Sept. 2002.

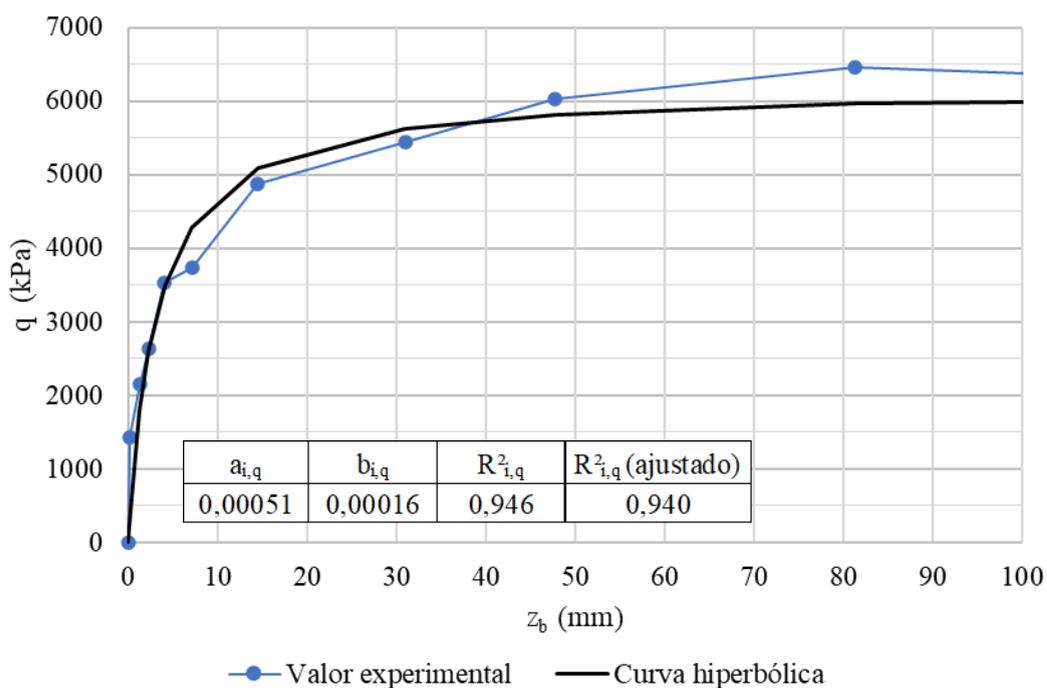
APÊNDICE A – CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA EXPERIMENTAIS E HIPERBÓLICAS

Figura A.1 – Curvas t-z experimental e hiperbólica da estaca isolada 1-1 de Briaud, Tucker e Ng (1989)



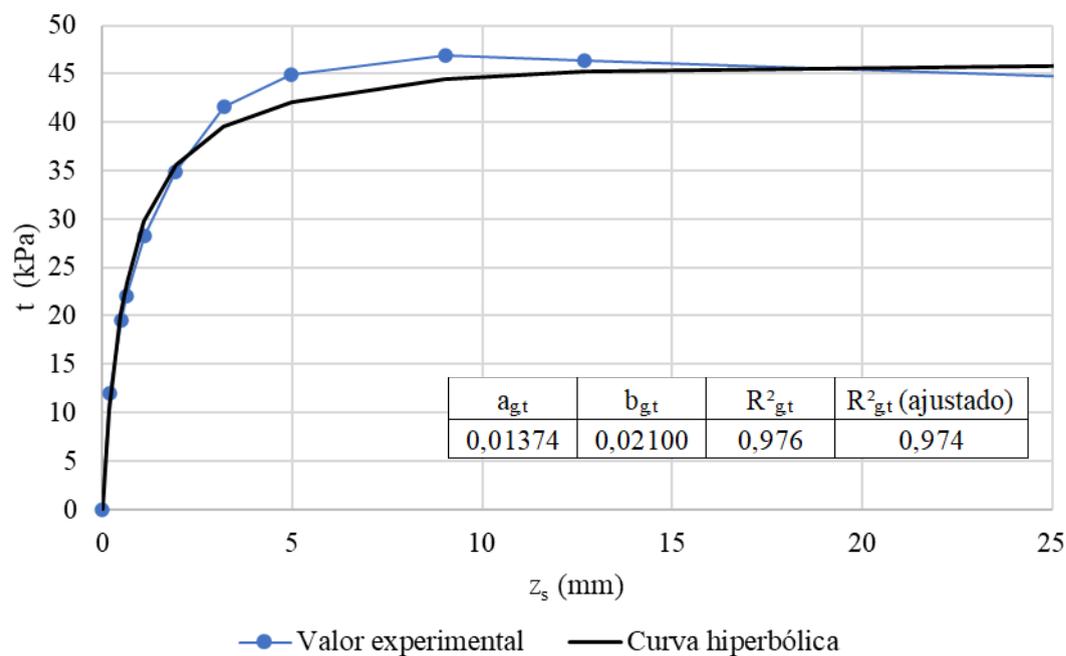
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.2 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca isolada 1-1 de Briaud, Tucker e Ng (1989)



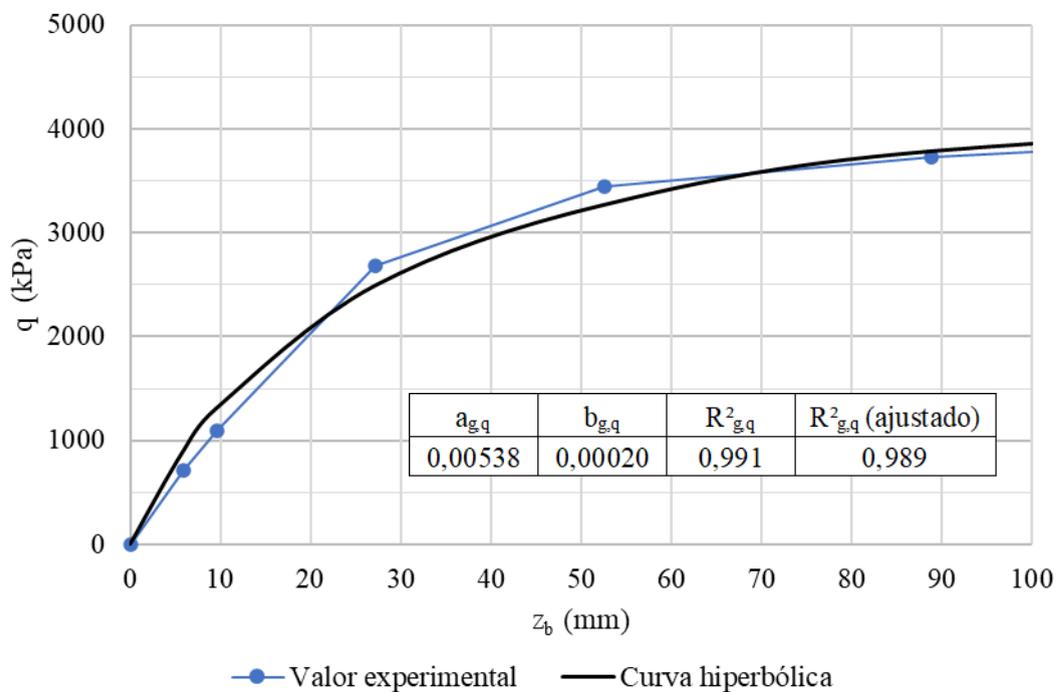
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.3 – Curvas t-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 1-2A de Briaud, Tucker e Ng (1989)



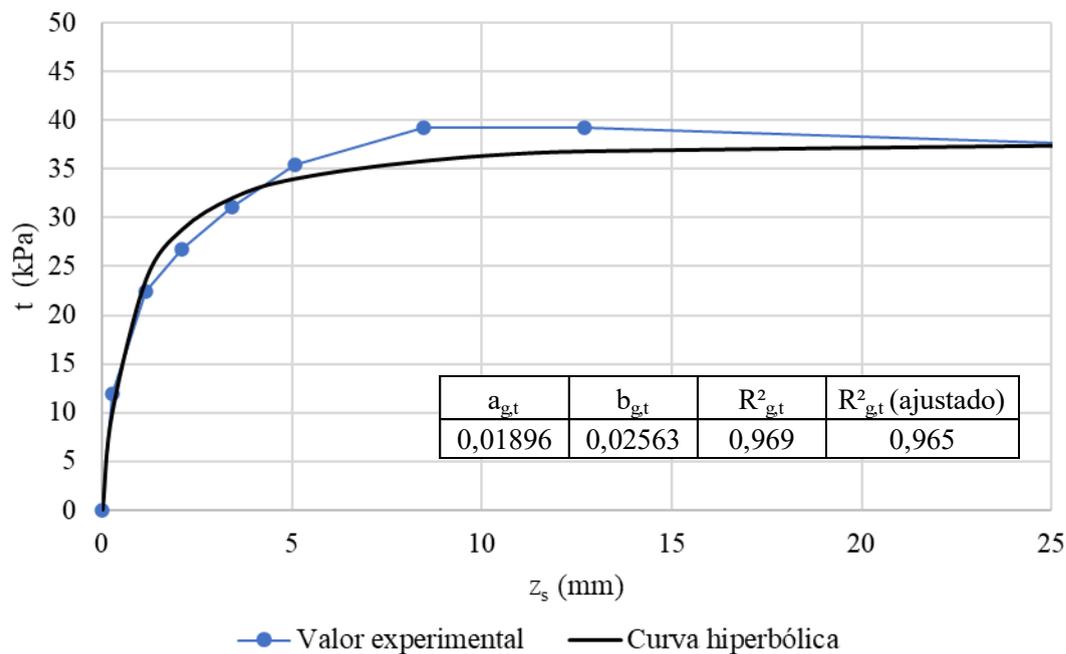
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.4 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 1-2A de Briaud, Tucker e Ng (1989)



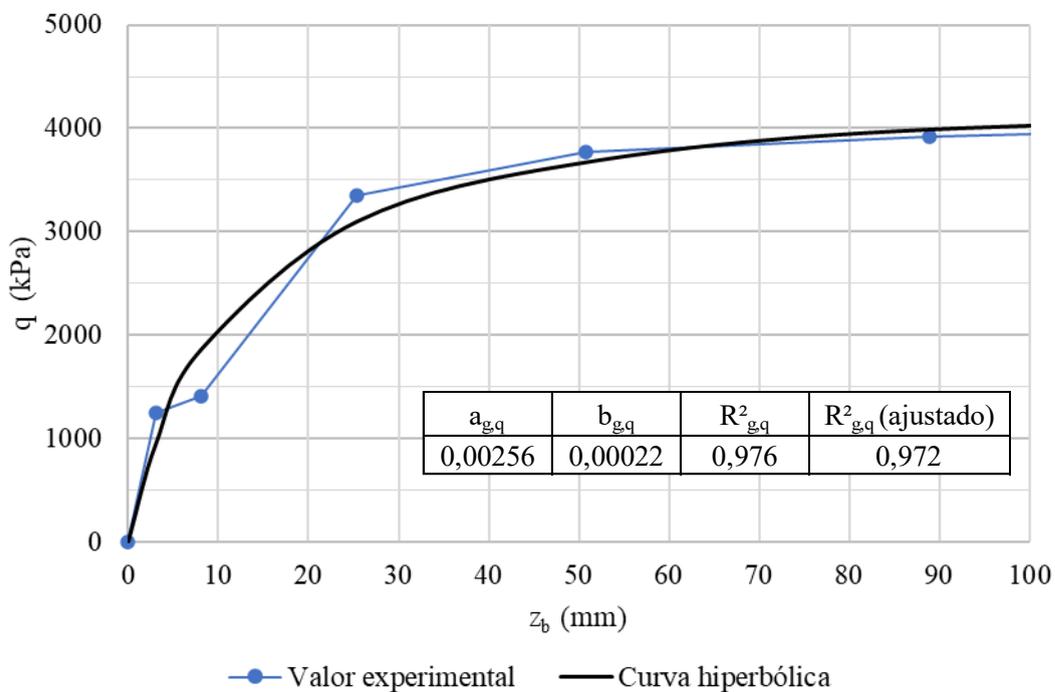
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.5 – Curvas t-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 1-2B de Briaud, Tucker e Ng (1989)



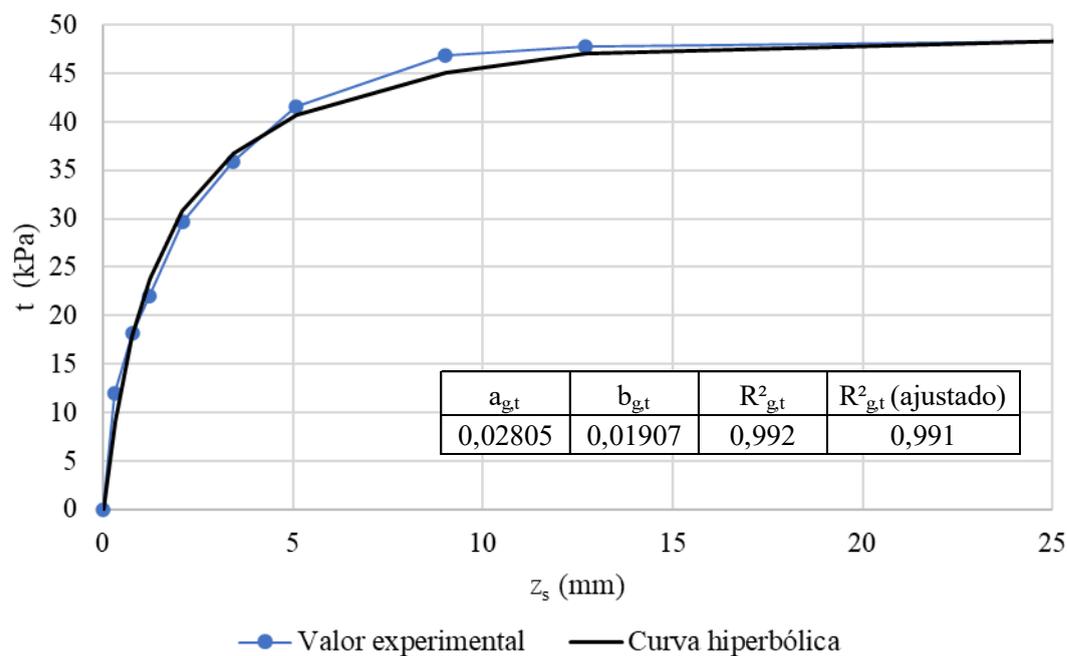
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.6 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 1-2B de Briaud, Tucker e Ng (1989)



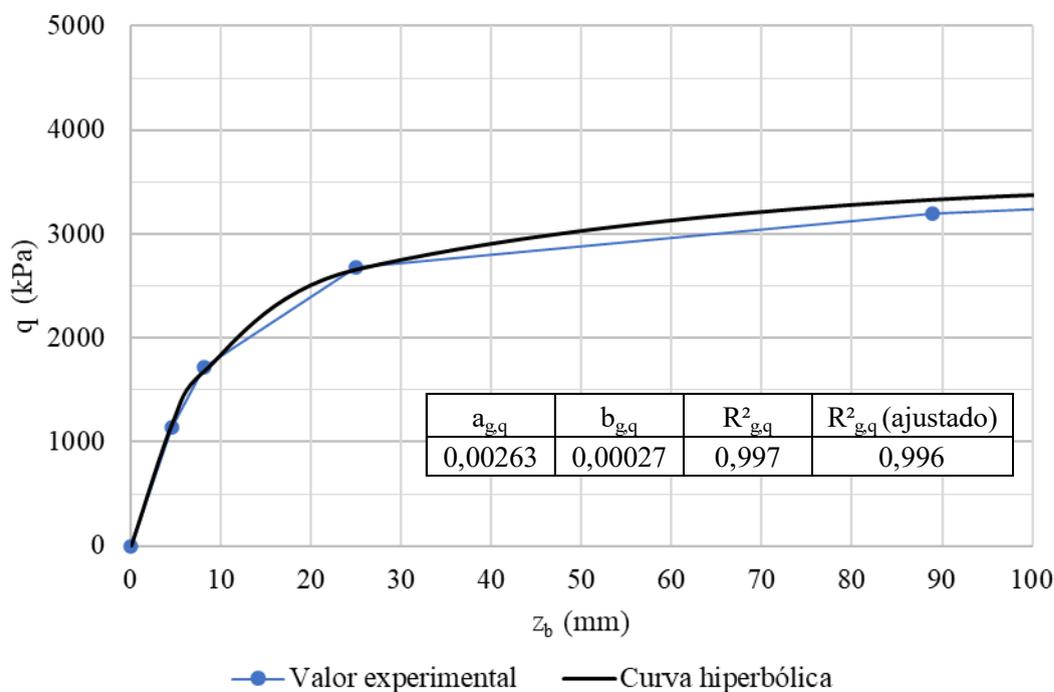
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.7 – Curvas t-z experimental e hiperbólico da estaca em grupo 1-2C de Briaud, Tucker e Ng (1989)



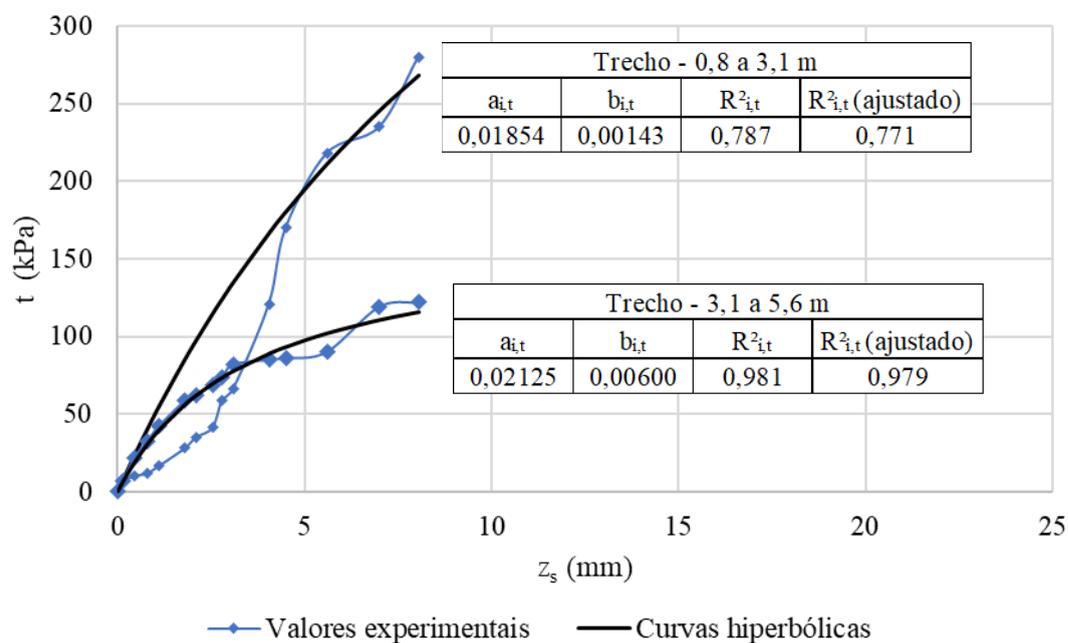
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.8 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 1-2C de Briaud, Tucker e Ng (1989)



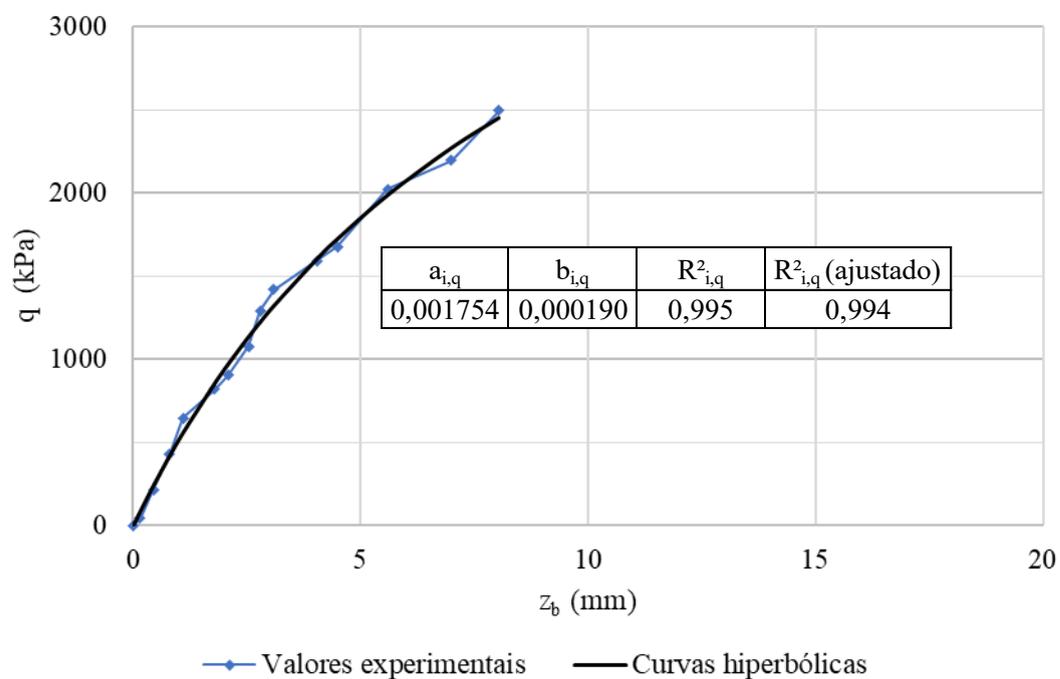
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.9 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 2-1 de Abdllrahem e El Naggar (2020)



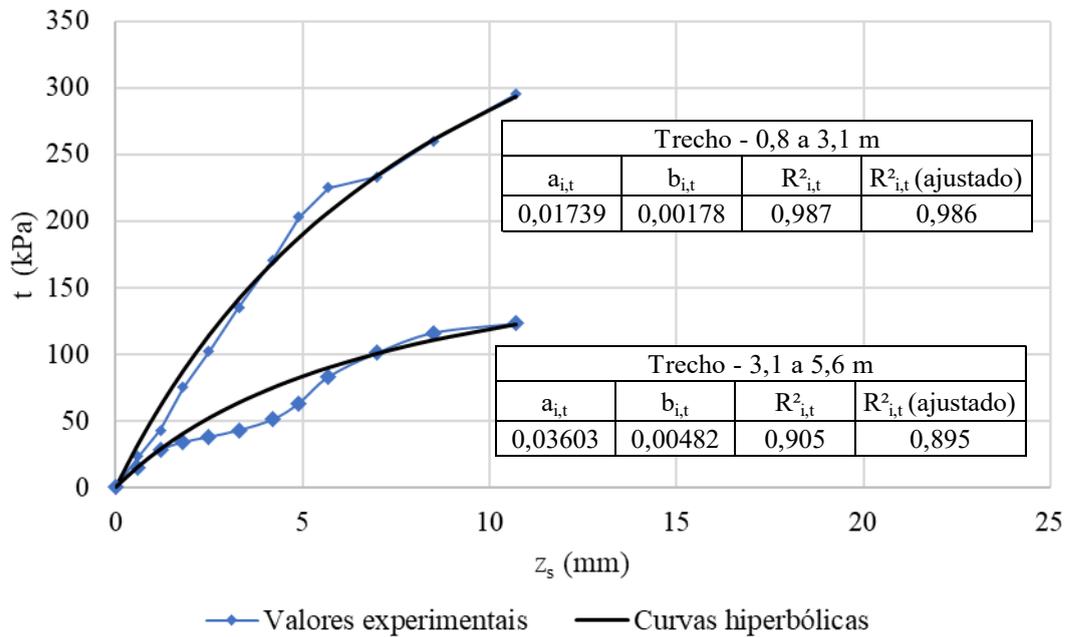
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.10 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca isolada 2-1 de Abdllrahem e El Naggar (2020)



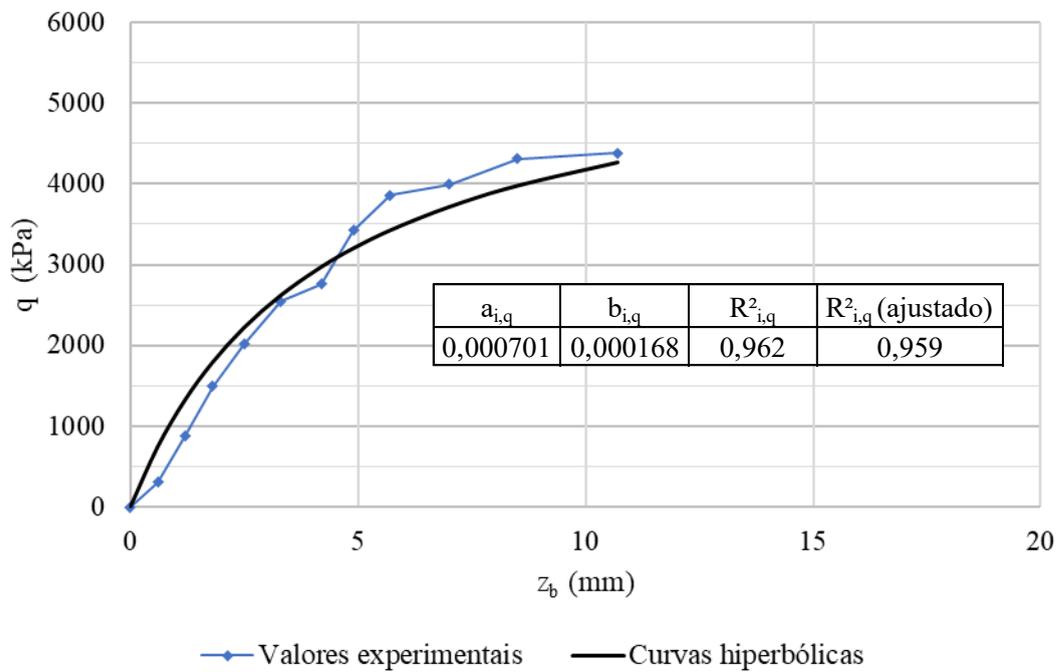
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.11 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 2-2 de Abdllrahem e El Naggar (2020)



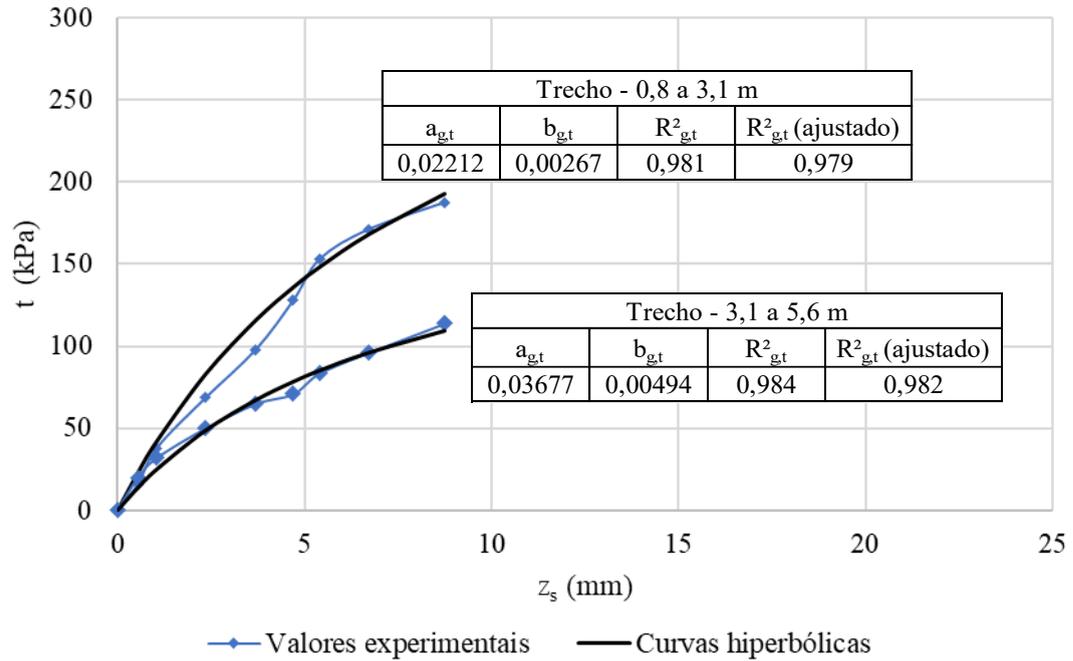
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.12 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca isolada 2-2 de Abdllrahem e El Naggar (2020)



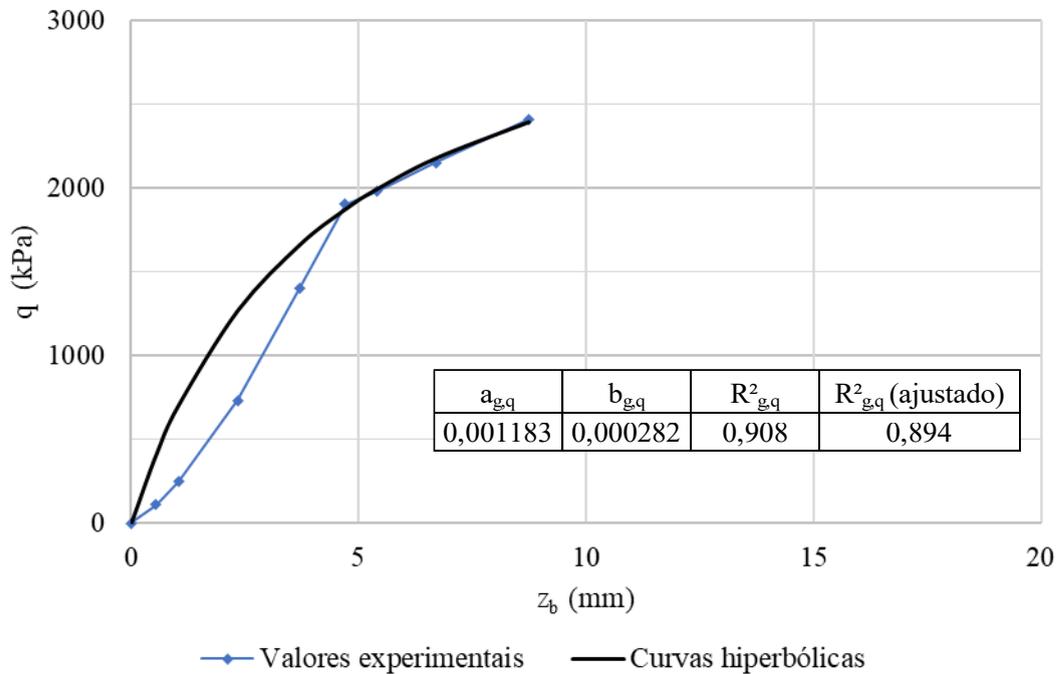
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.13 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca em grupo 2-4A de Abdrahem e El Naggar (2020)



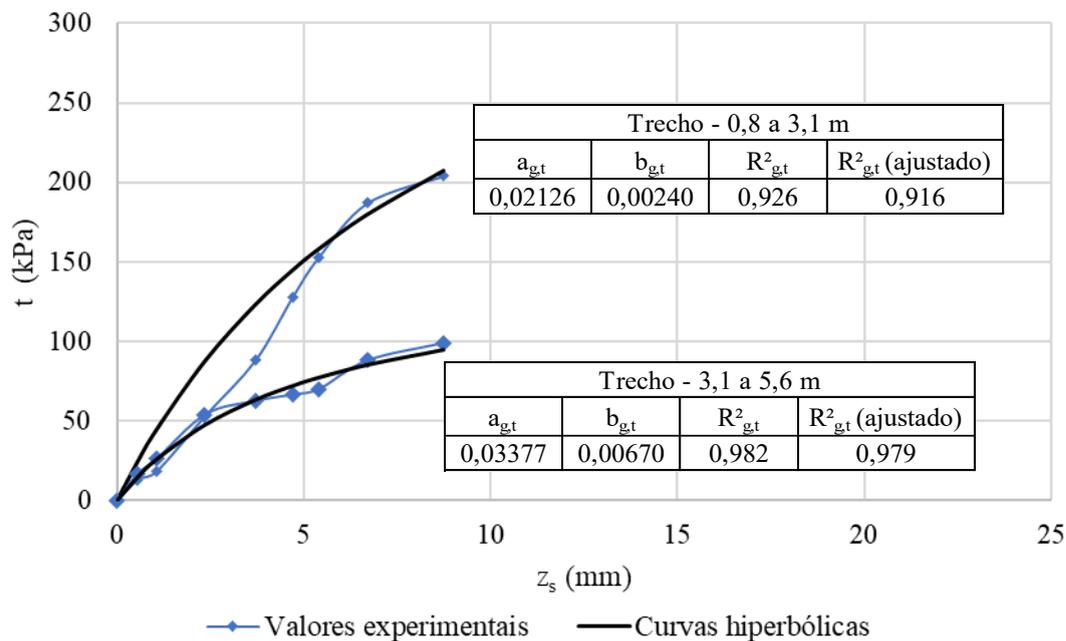
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.14 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 2-4A de Abdrahem e El Naggar (2020)



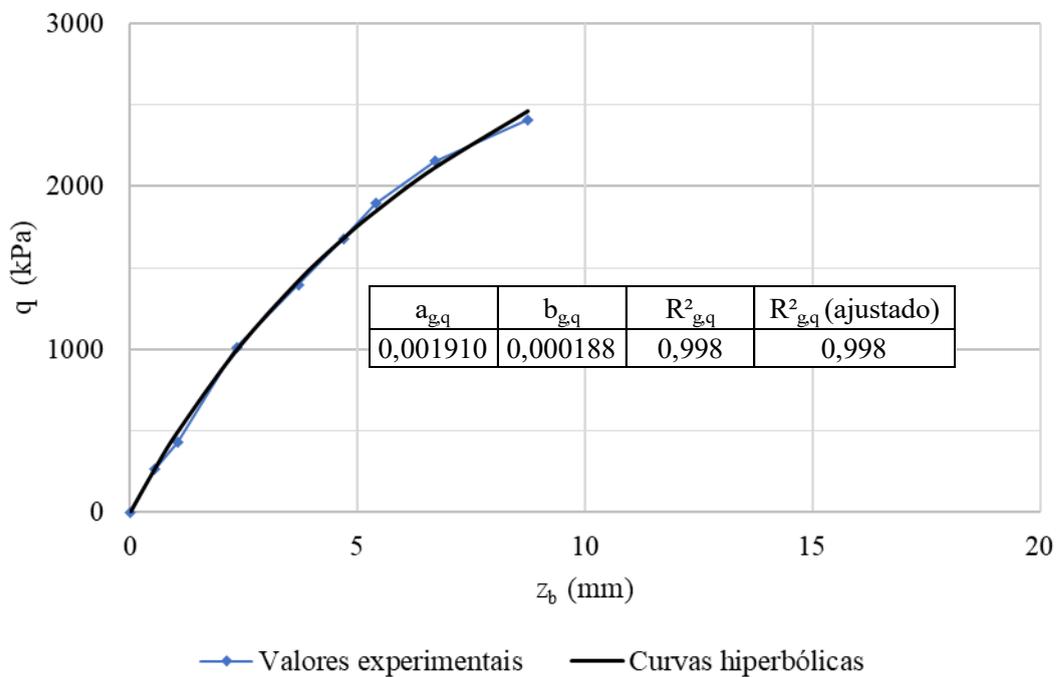
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.15 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca em grupo 2-4B de Abdrahem e El Naggar (2020)



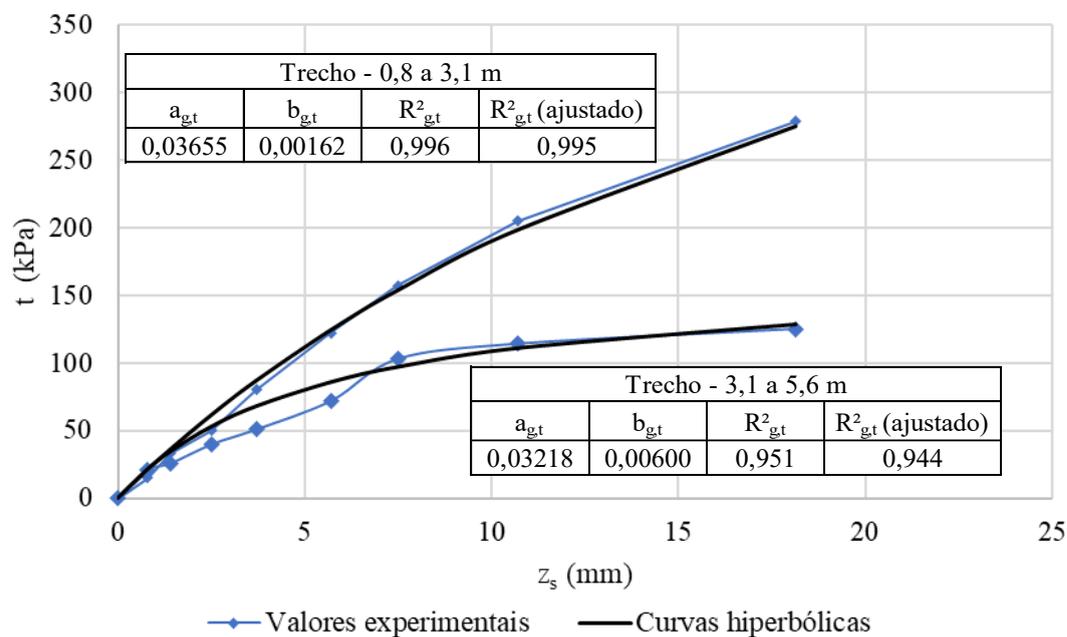
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.16 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 2-4B de Abdrahem e El Naggar (2020)



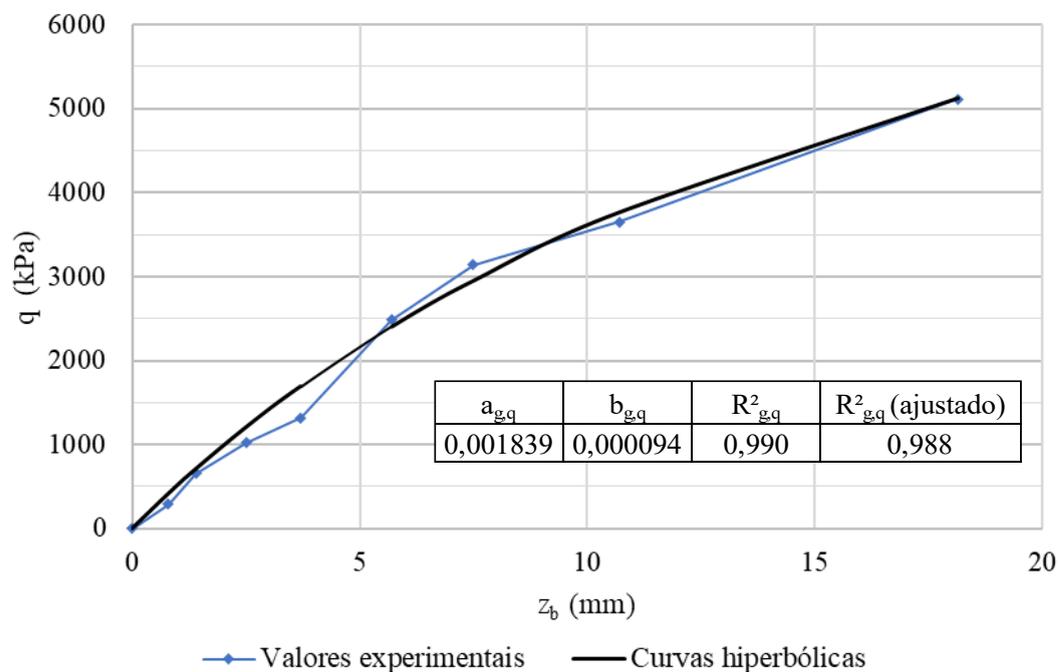
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.17 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca em grupo 2-5A de Abdrahem e El Naggar (2020)



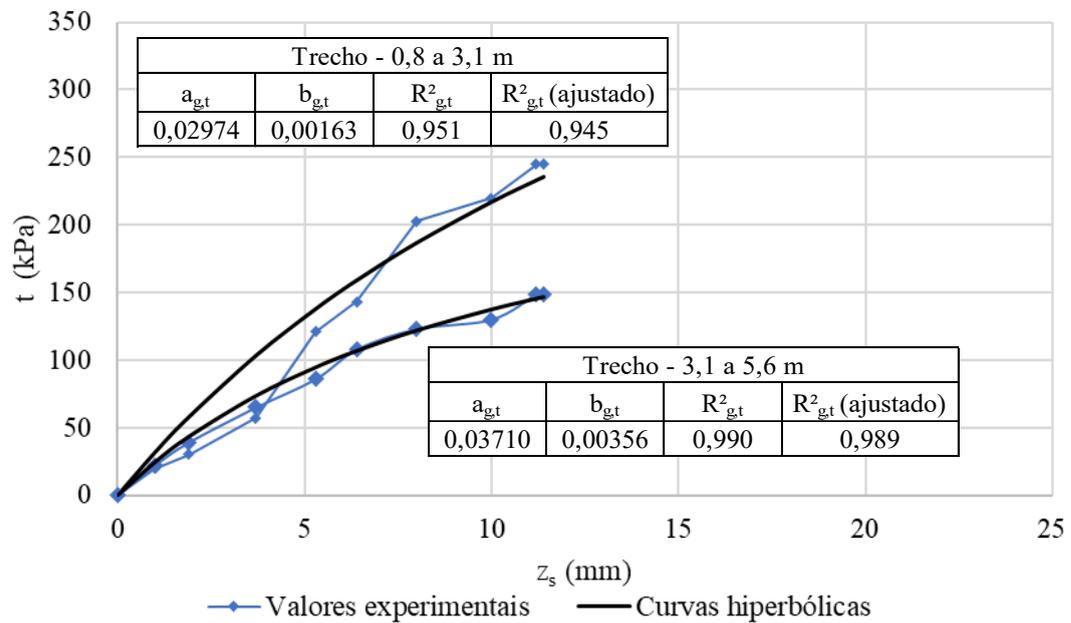
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.18 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 2-5A de Abdrahem e El Naggar (2020)



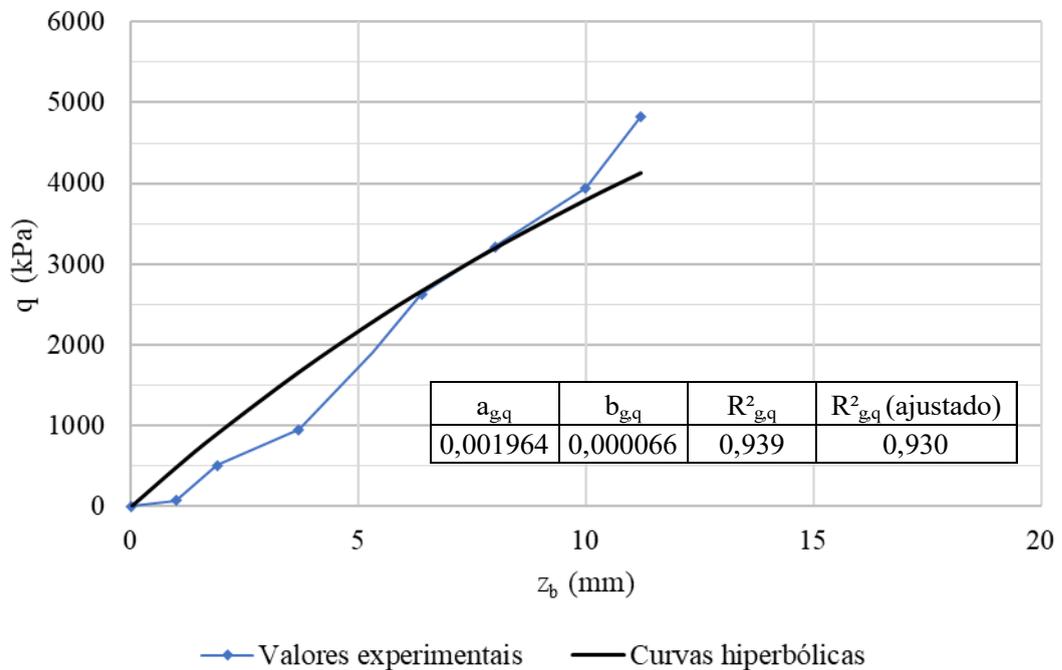
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.19 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca em grupo 2-6A de Abdllrahem e El Naggar (2020)



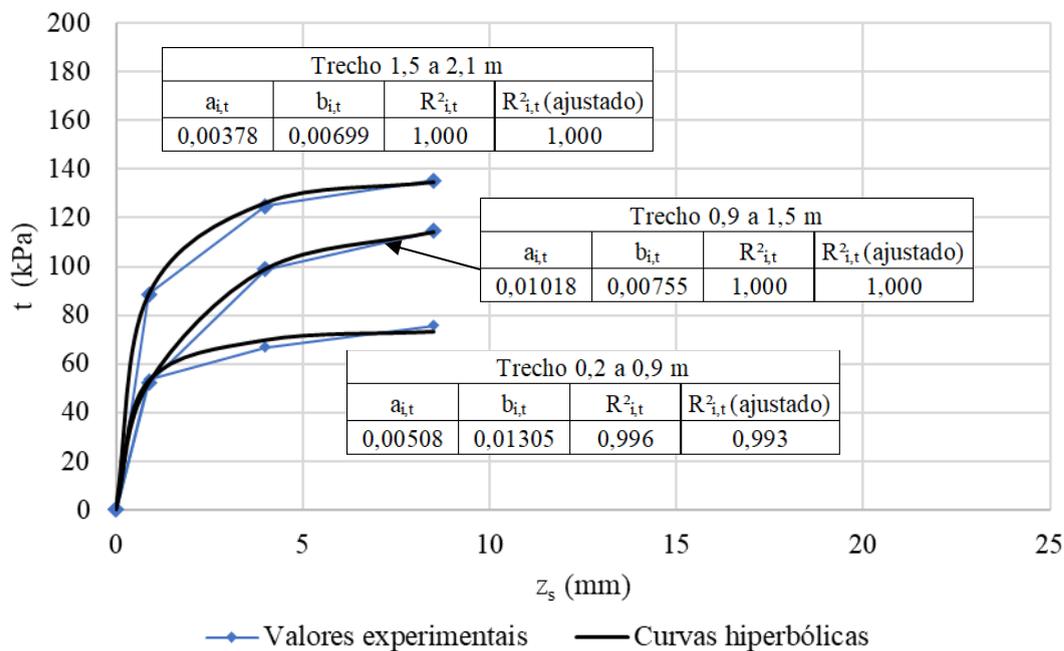
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.20 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 2-6A de Abdllrahem e El Naggar (2020)



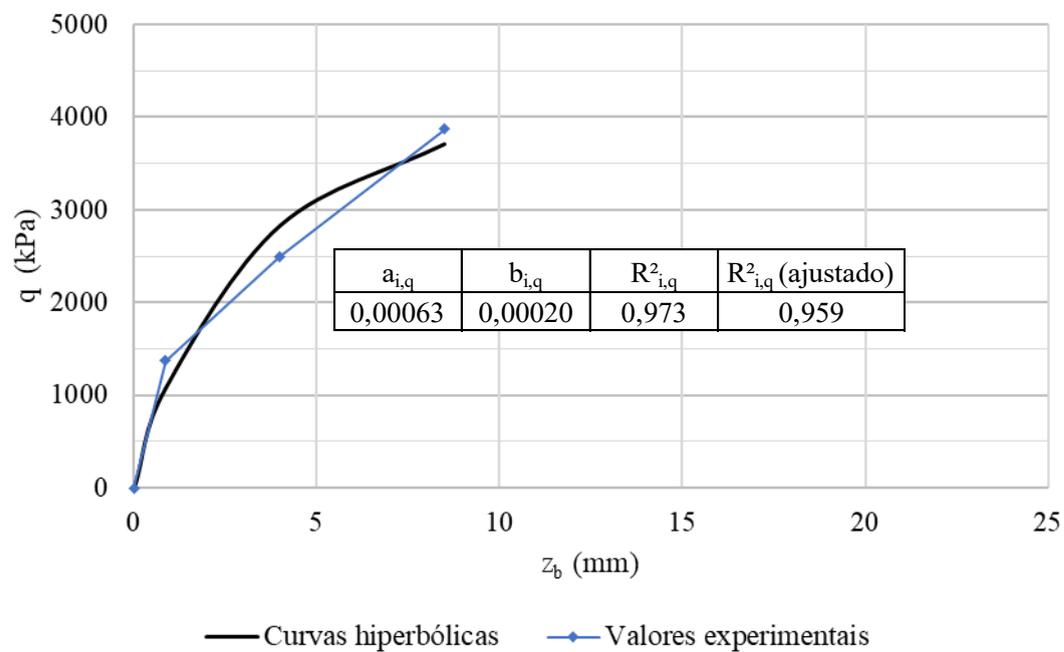
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.21 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 3-1 de Ismael (2001)



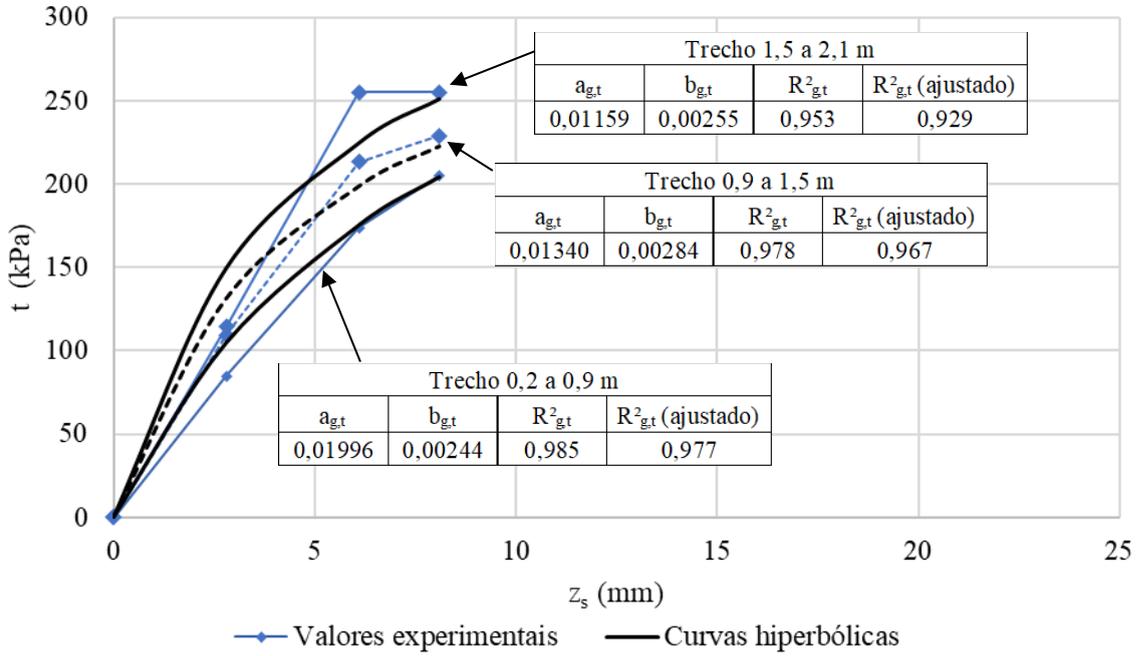
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.22 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca isolada 3-1 de Ismael (2001)



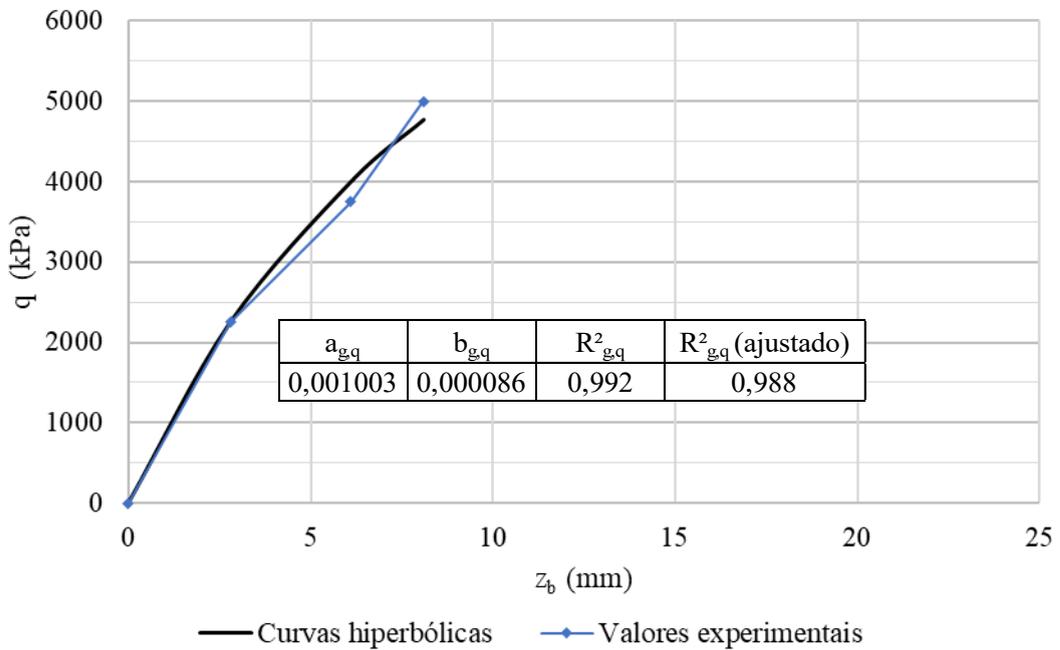
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.23 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca em grupo 3-2A de Ismael (2001)



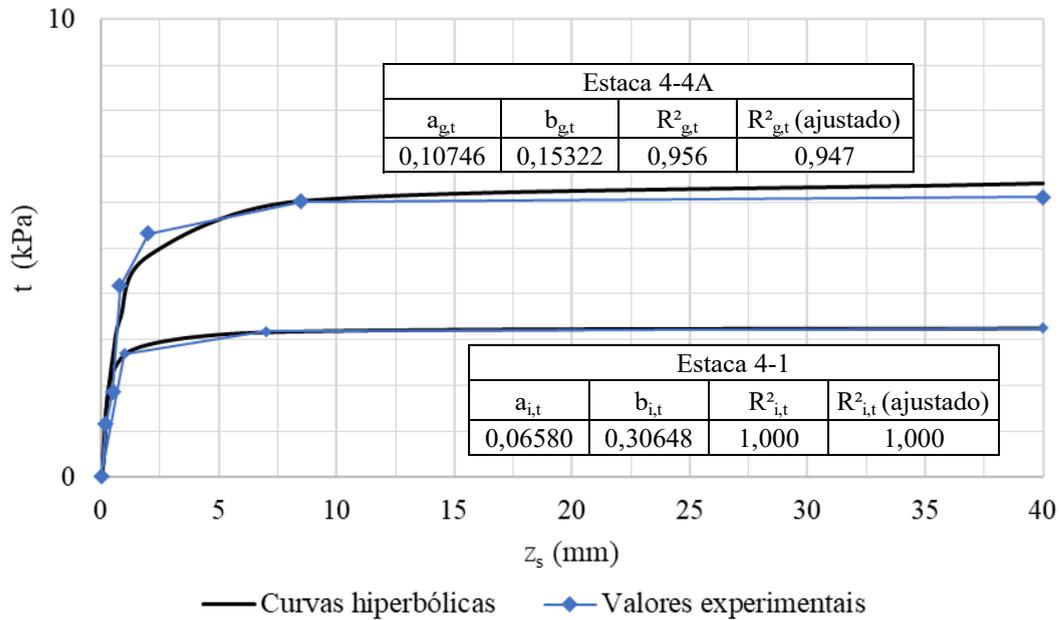
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.24 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 3-2A de Ismael (2001)



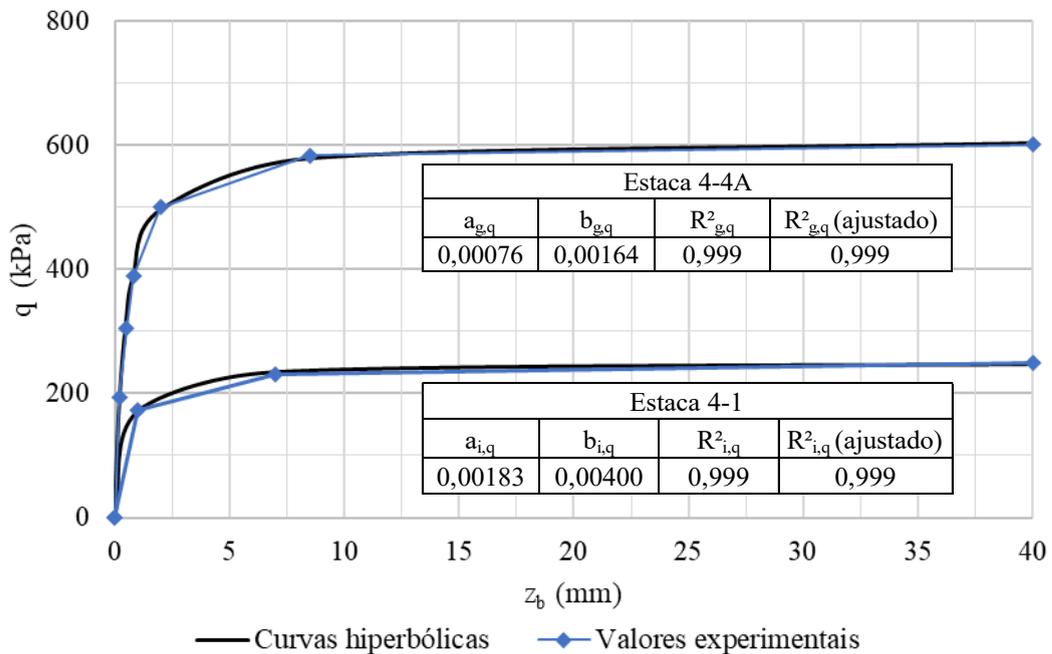
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.25 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 4-1 e da estaca em grupo 4-4A de Long (1993)



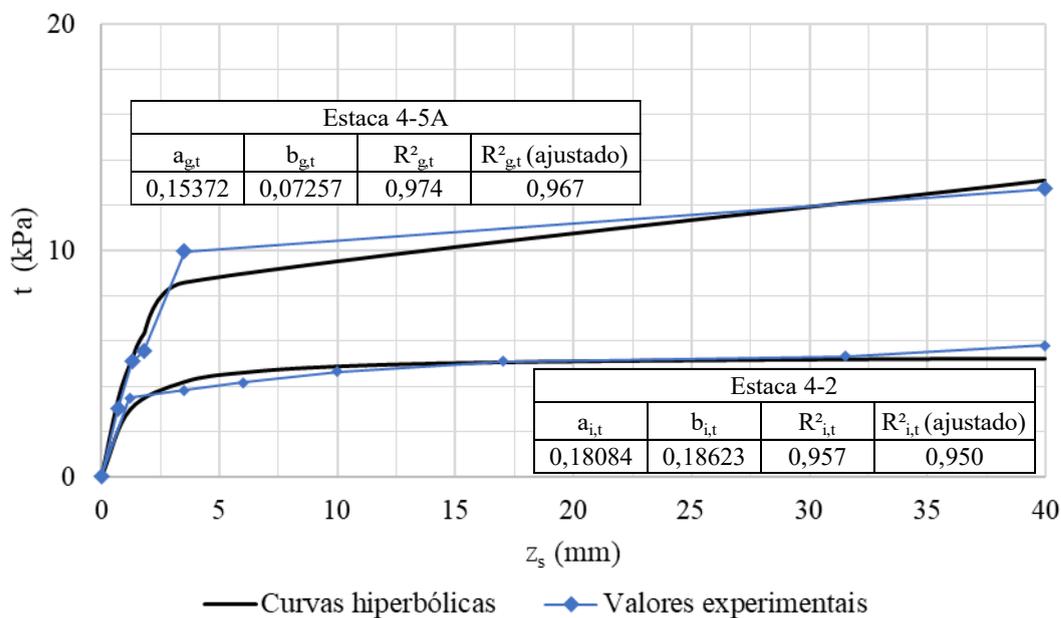
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.26 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 4-1 e da estaca em grupo 4-4A de Long (1993)



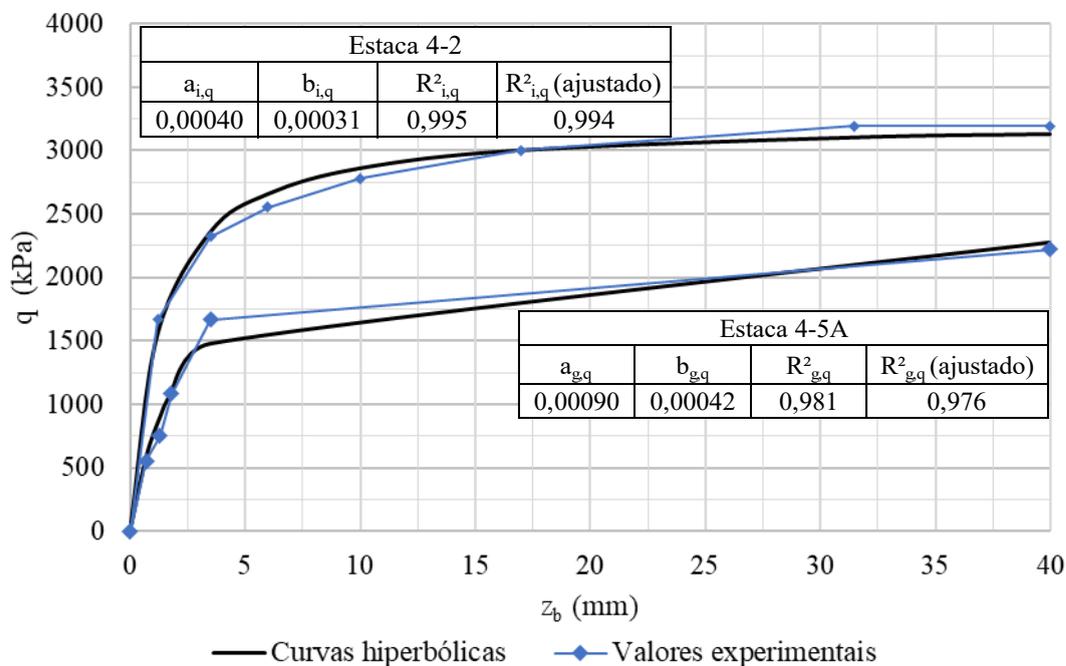
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.27 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 4-2 e da estaca em grupo 4-5A de Long (1993)



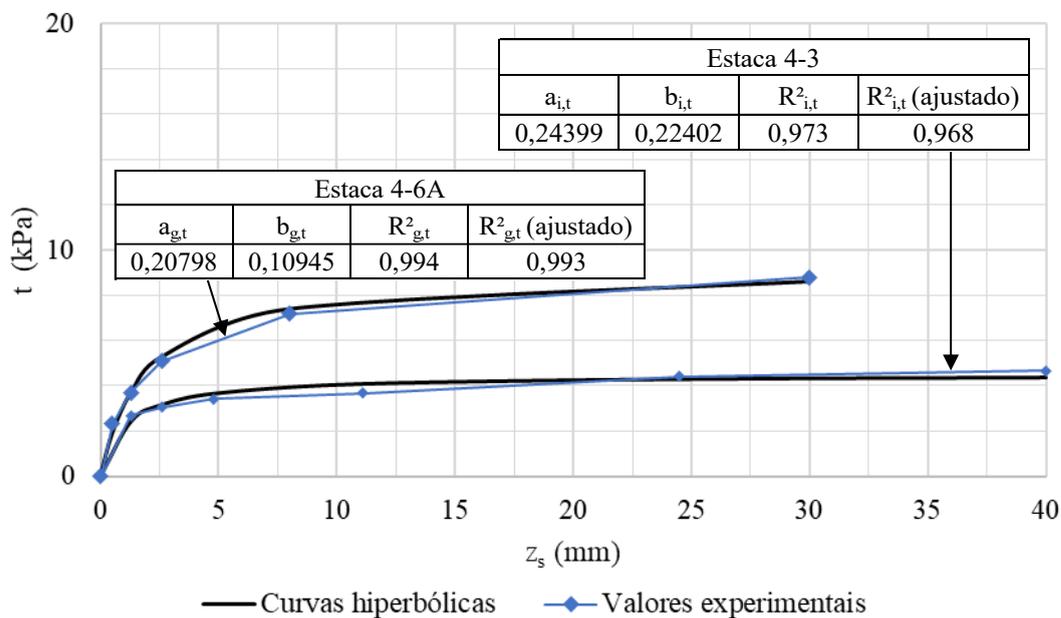
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.28 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 4-2 e da estaca em grupo 4-5A de Long (1993)



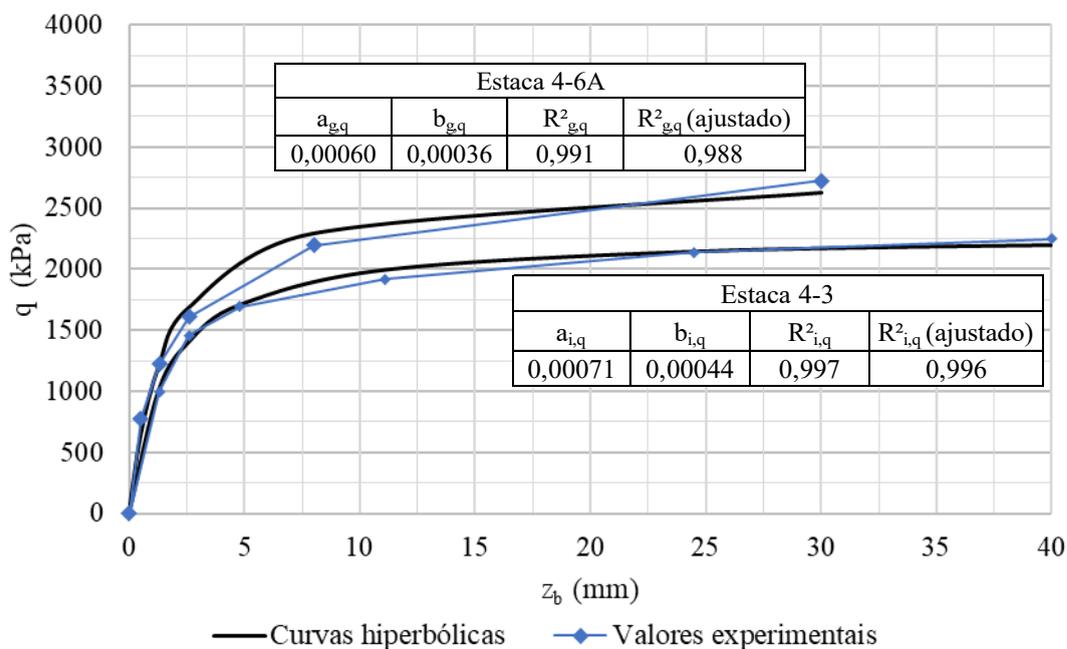
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.29 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 4-3 e da estaca em grupo 4-6A de Long (1993)



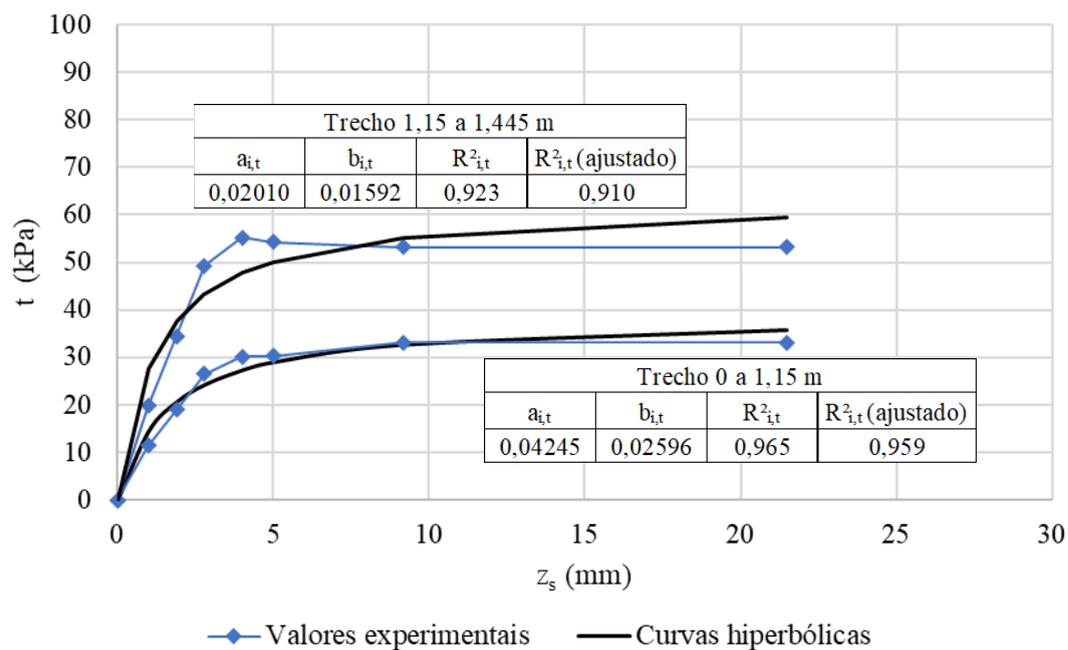
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.30 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 4-3 e da estaca em grupo 4-6A de Long (1993)



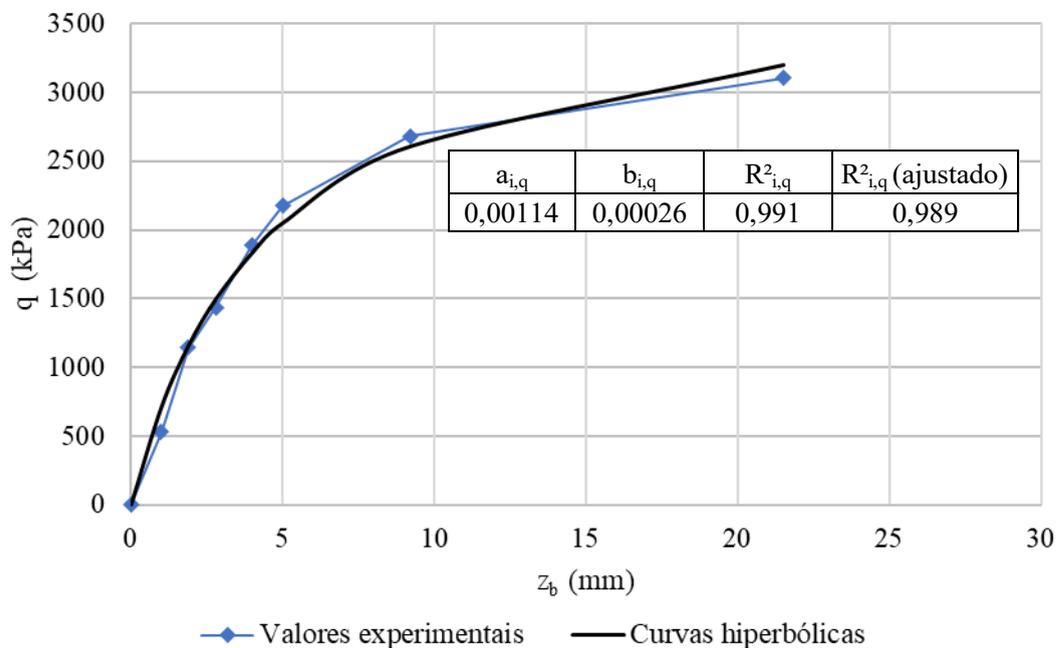
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.31 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 5-1 de Norkus e Martinkus (2019)



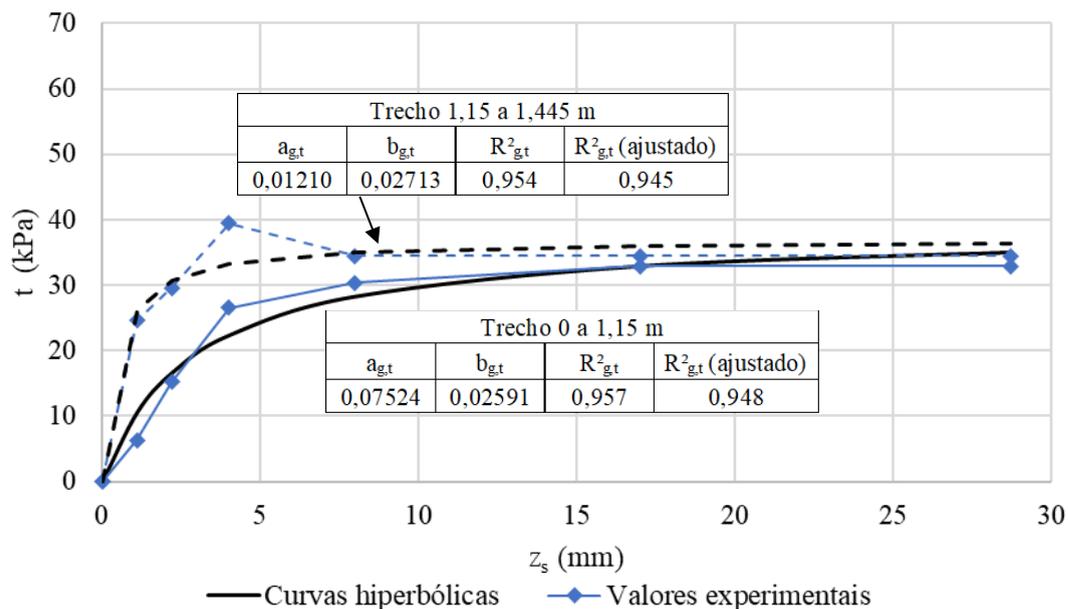
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.32 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca isolada 5-1 de Norkus e Martinkus (2019)



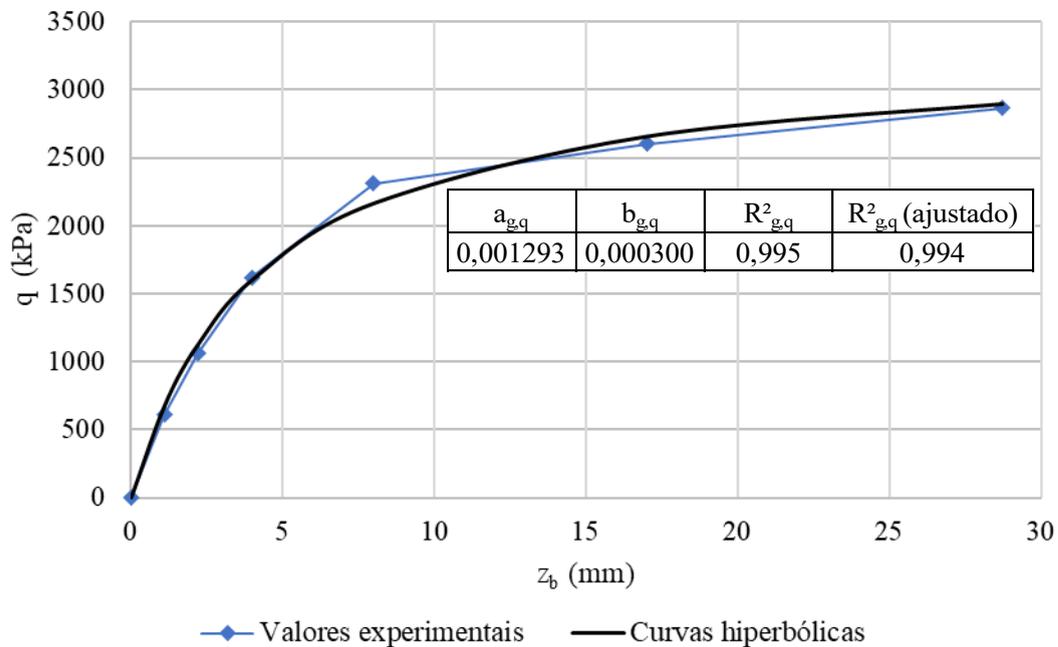
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.33 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 5-2A de Norkus e Martinkus (2019)



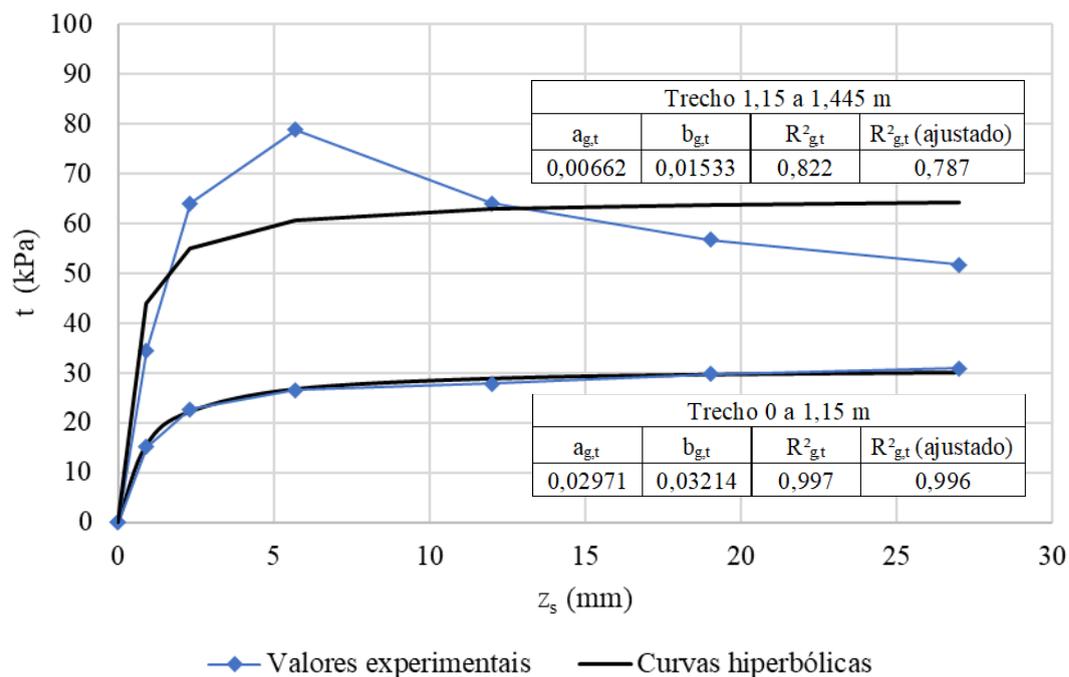
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.34 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 5-2A de Norkus e Martinkus (2019)



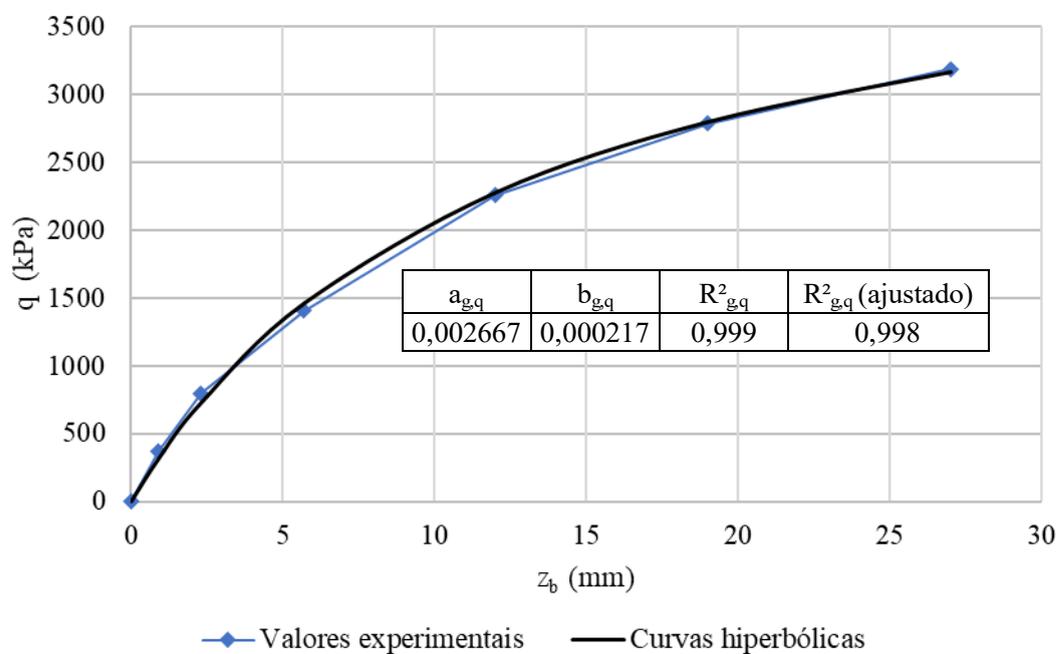
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.35 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 5-3A de Norkus e Martinkus (2019)



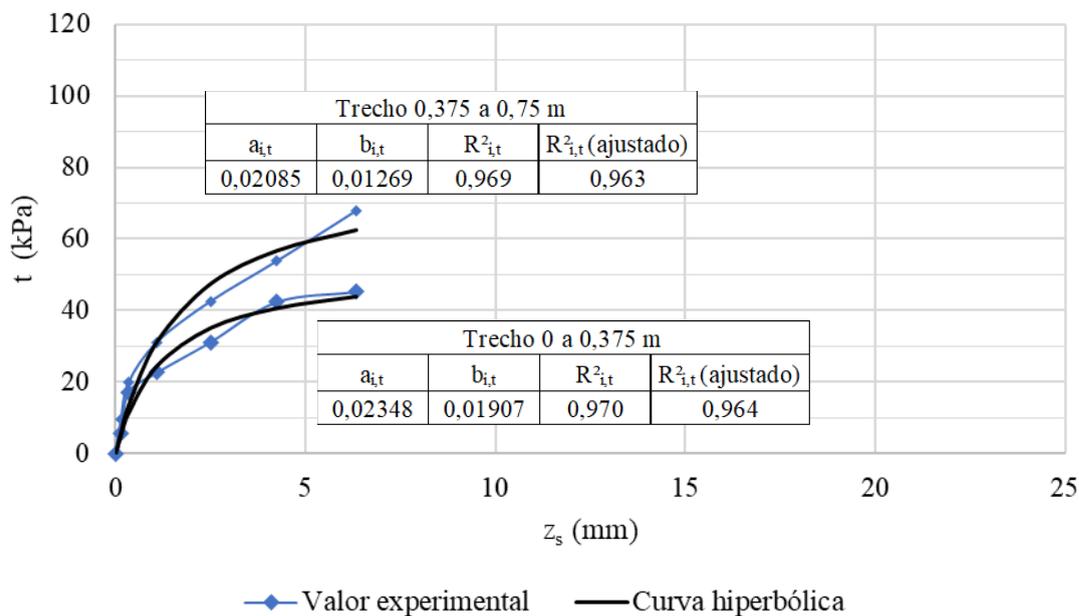
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.36 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 5-3A de Norkus e Martinkus (2019)



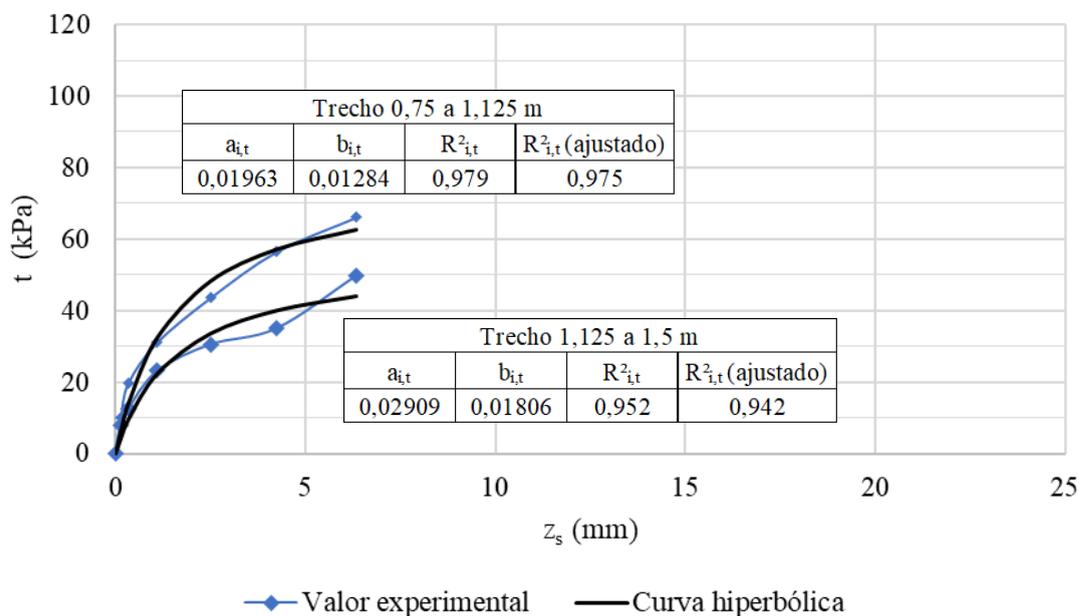
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.37 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 6-1 (Trechos até 0,75 m) de Elsamny *et al.* (2017)



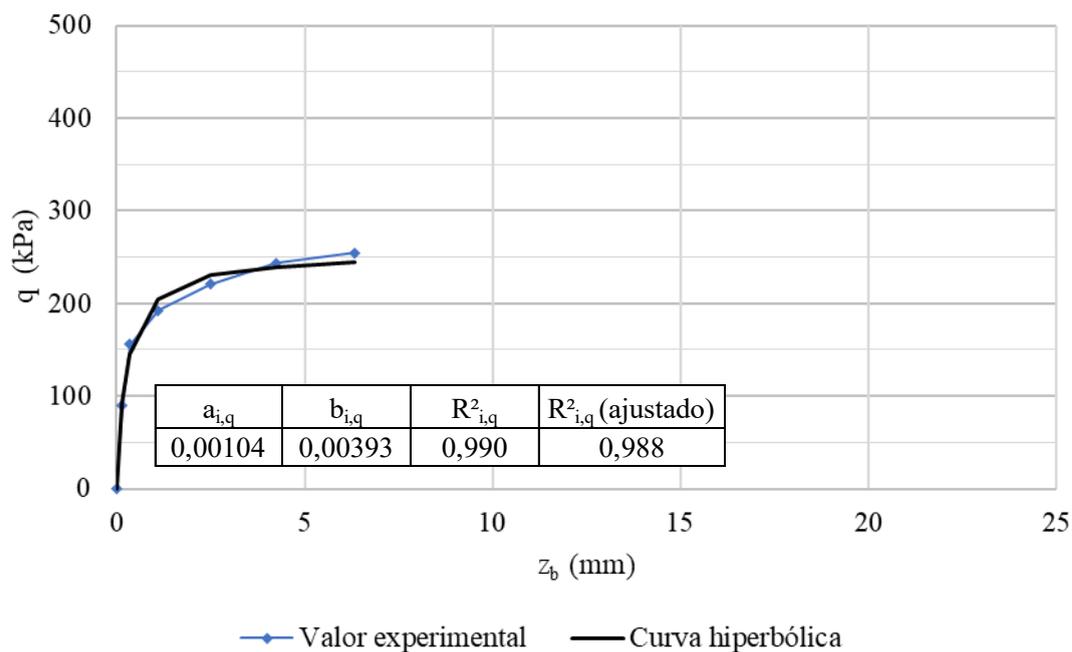
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.38 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca isolada 6-1 (Trechos de 0,75 a 1,5 m) de Elsamny *et al.* (2017)



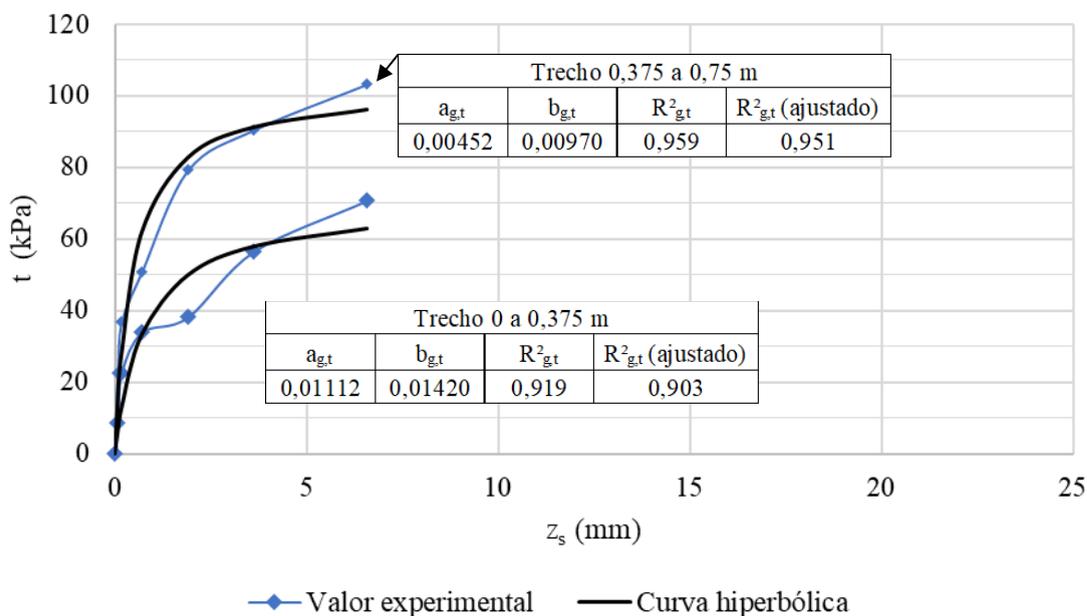
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.39 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca isolada 6-1 de Elsamny *et al.* (2017)



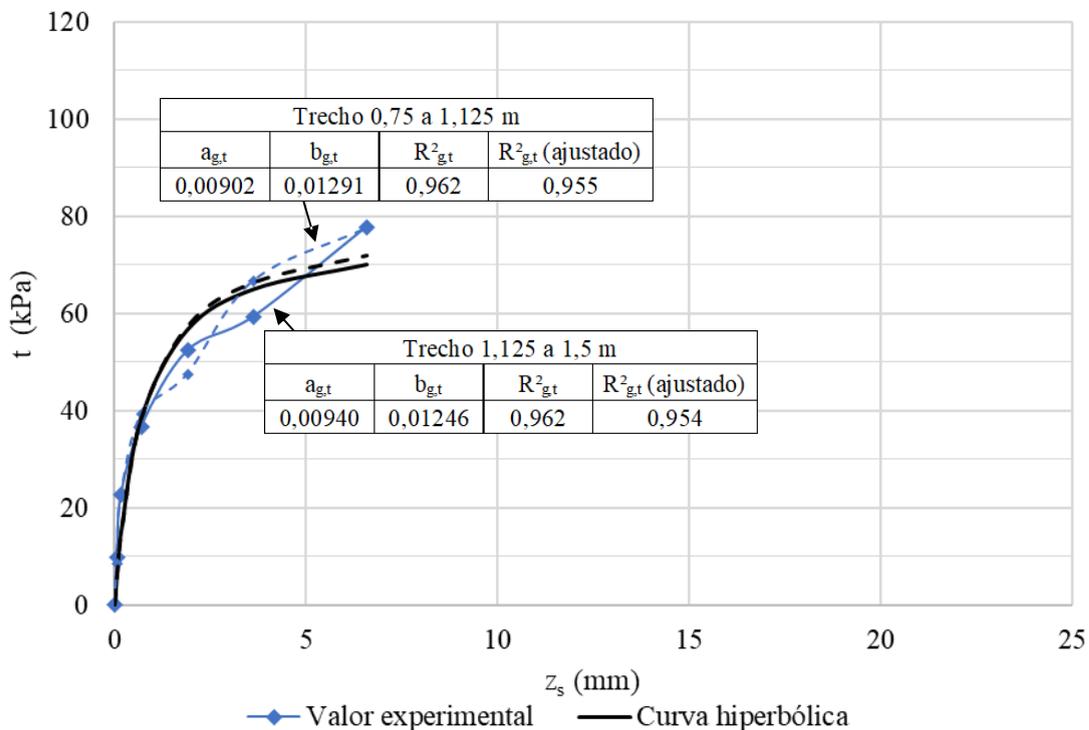
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.40 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca em grupo 6-2A (Trechos até 0,75 m) de Elsamny *et al.* (2017)



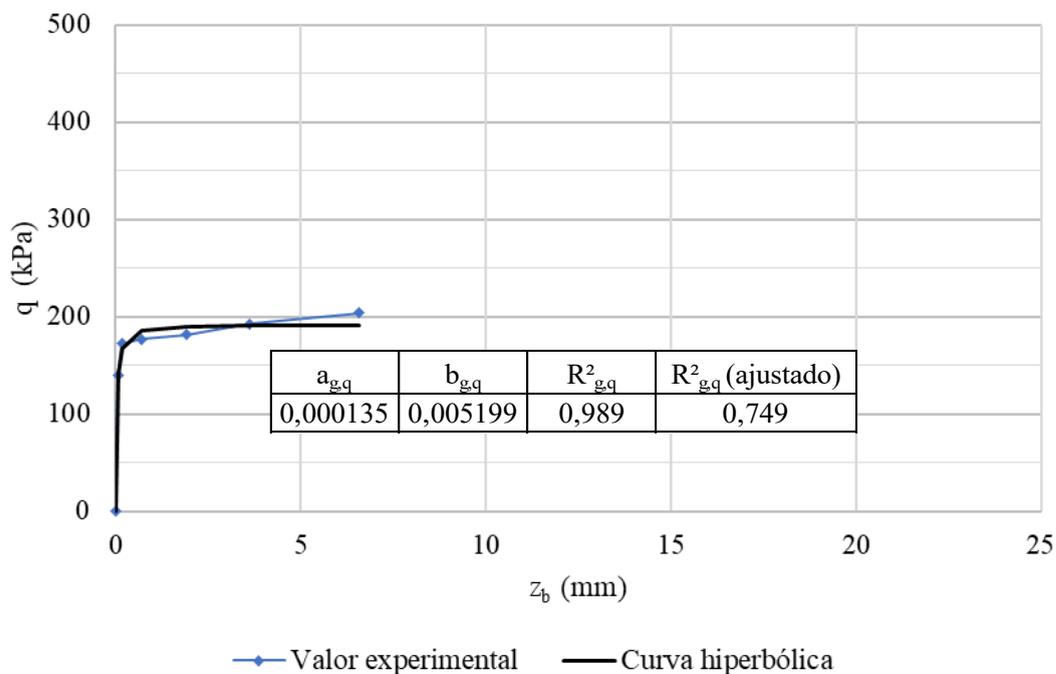
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.41 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca em grupo 6-2A (Trechos de 0,75 a 1,5 m) de Elsamny *et al.* (2017)



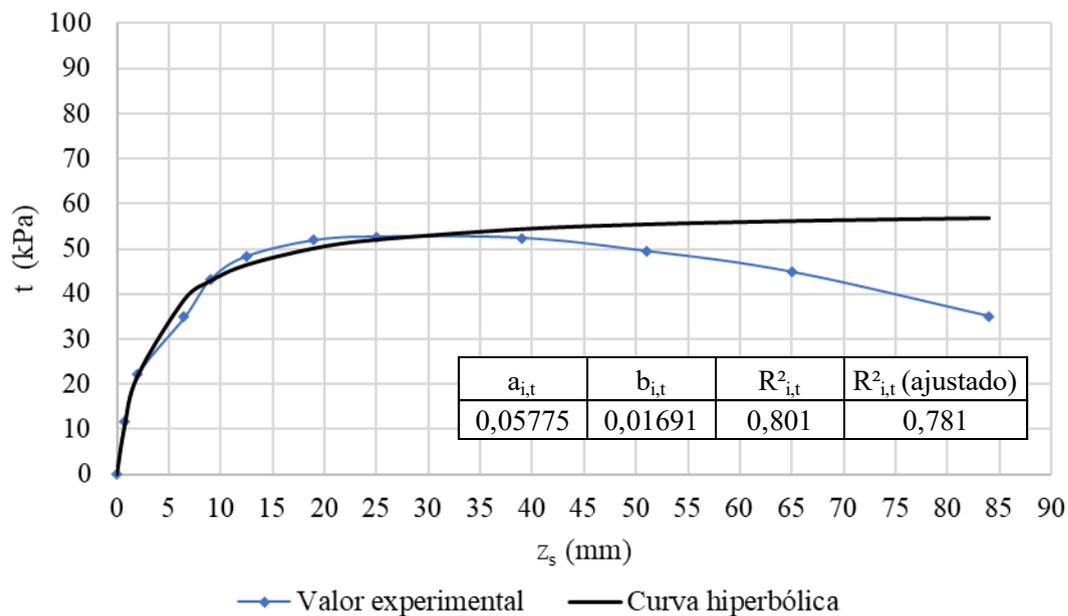
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.42 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca em grupo 6-2A de Elsamny *et al.* (2017)



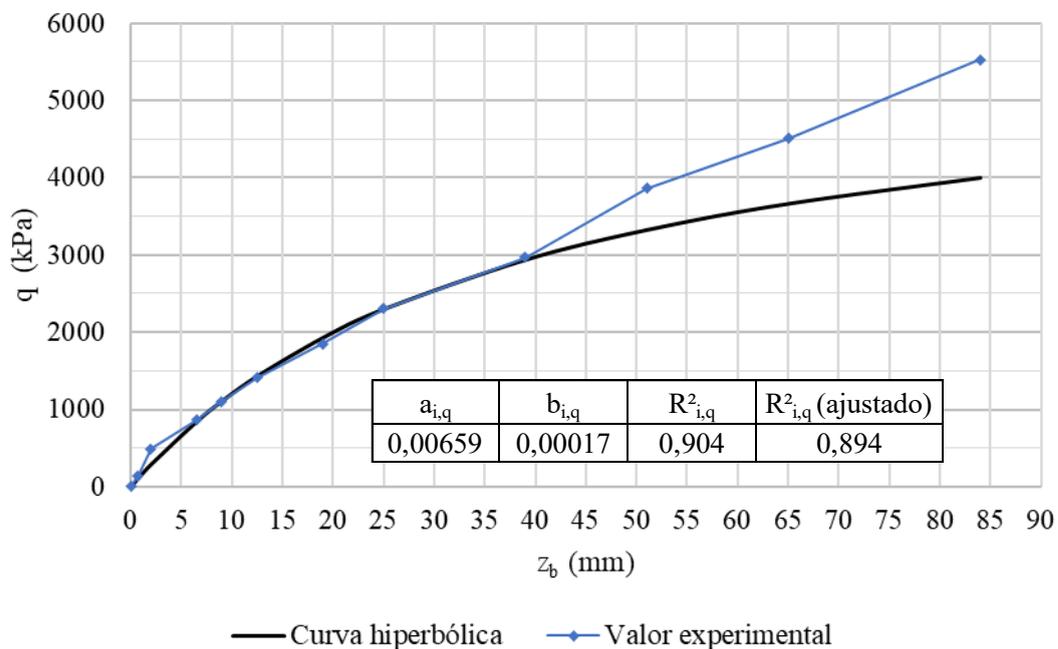
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.43 – Curvas t-z experimental e hiperbólica da estaca isolada 7-1 de Soares, Coutinho e Cunha (2021)



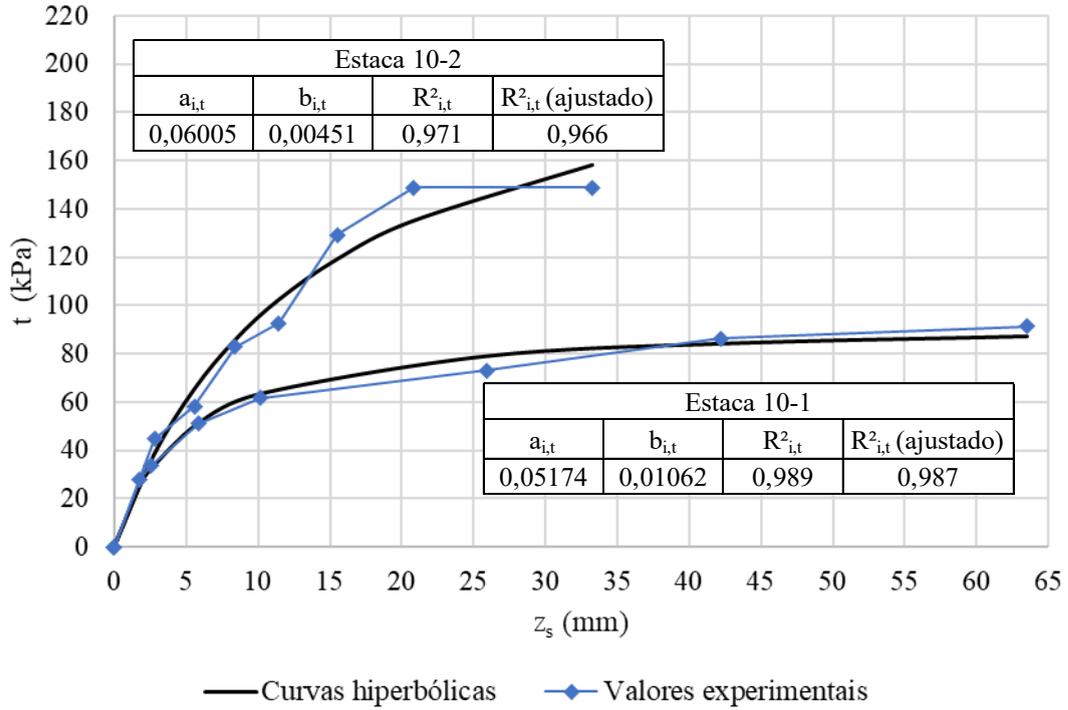
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.44 – Curvas q-z experimental e hiperbólica da estaca isolada 7-1 de Soares, Coutinho e Cunha (2021)



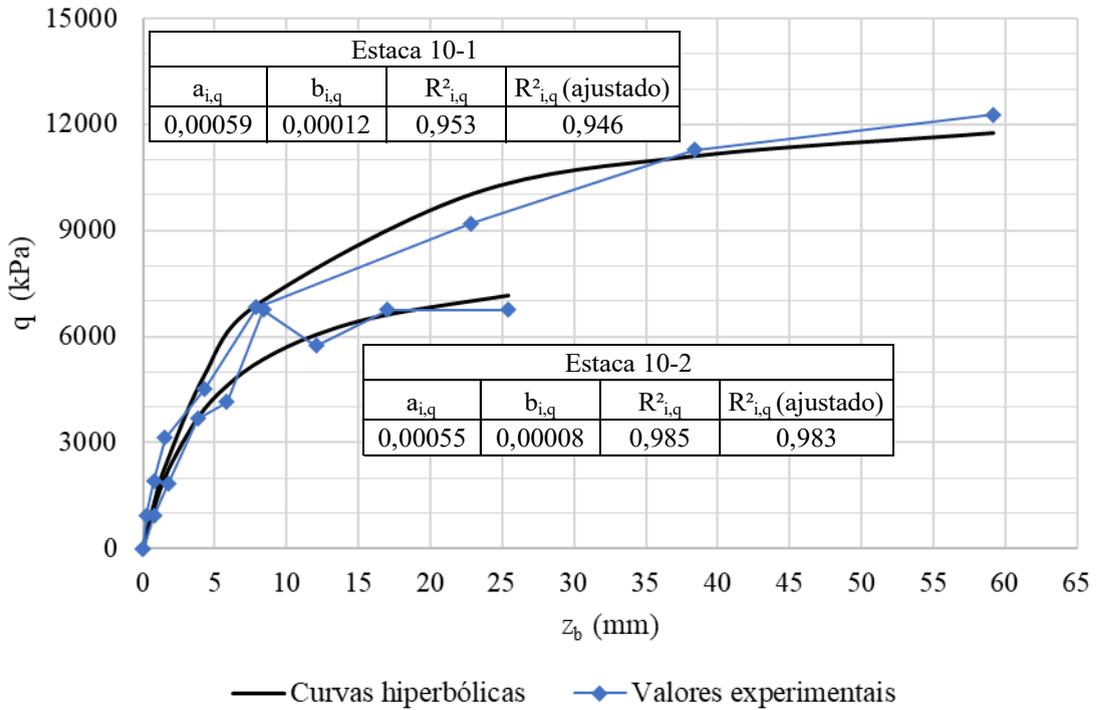
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.45 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 10-1 e 10-2 de Tucker e Briaud (1988)



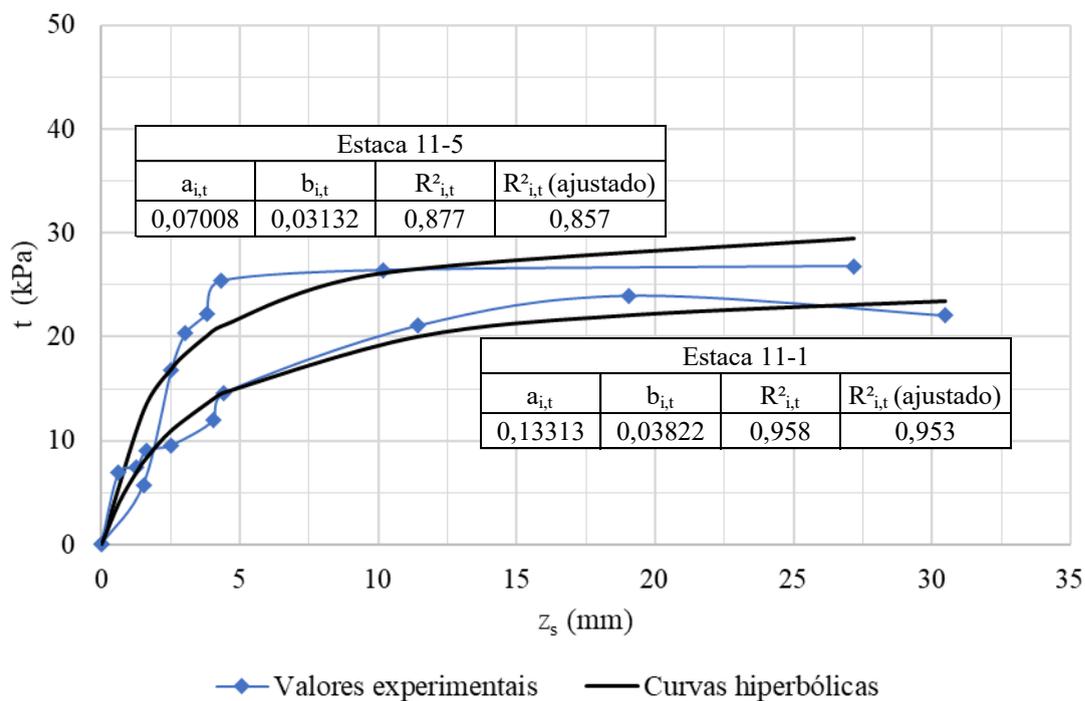
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.46 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 10-1 e 10-2 de Tucker e Briaud (1988)



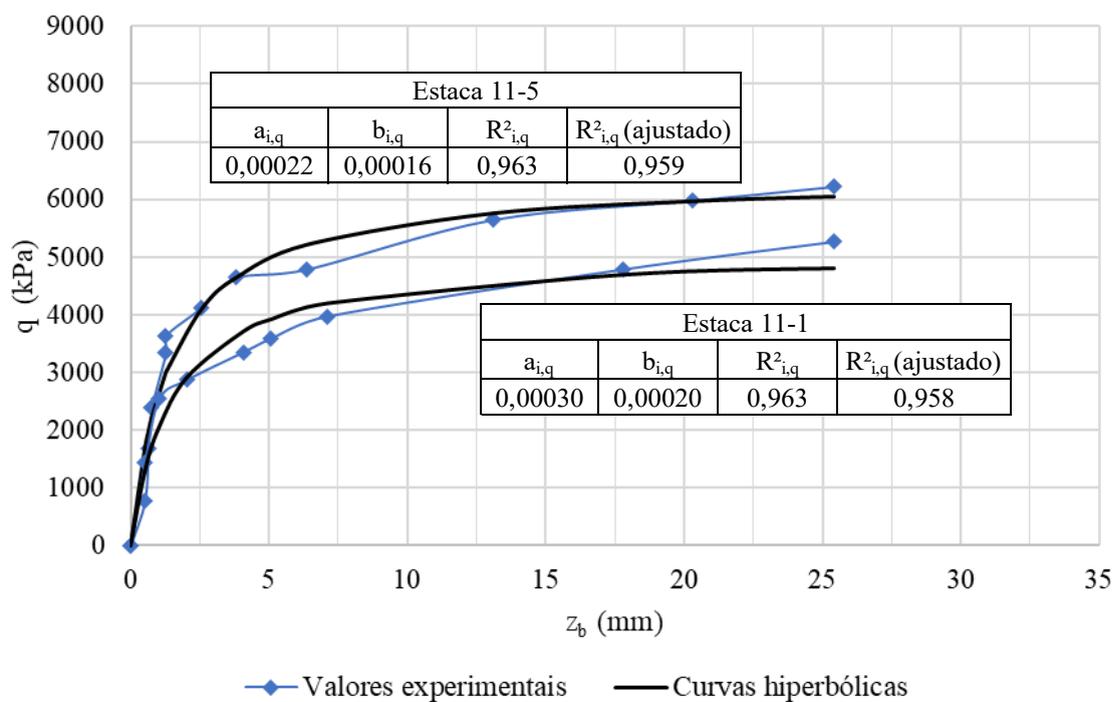
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.47 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 11-1 e 11-5 de Tavenas (1971)



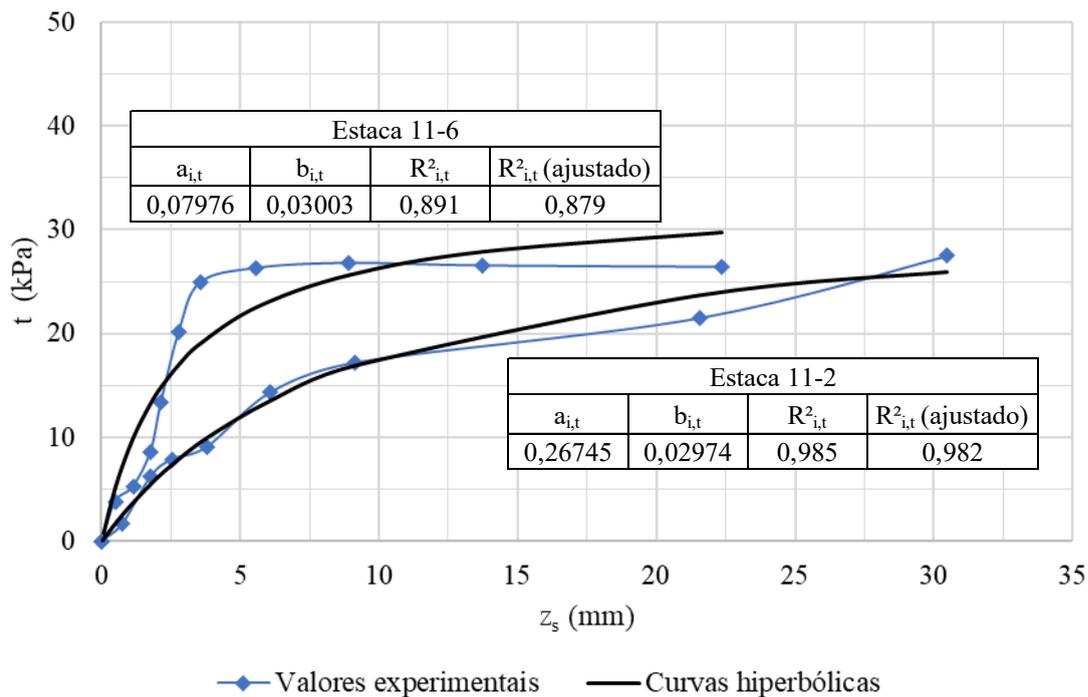
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.48 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 11-1 e 11-5 de Tavenas (1971)



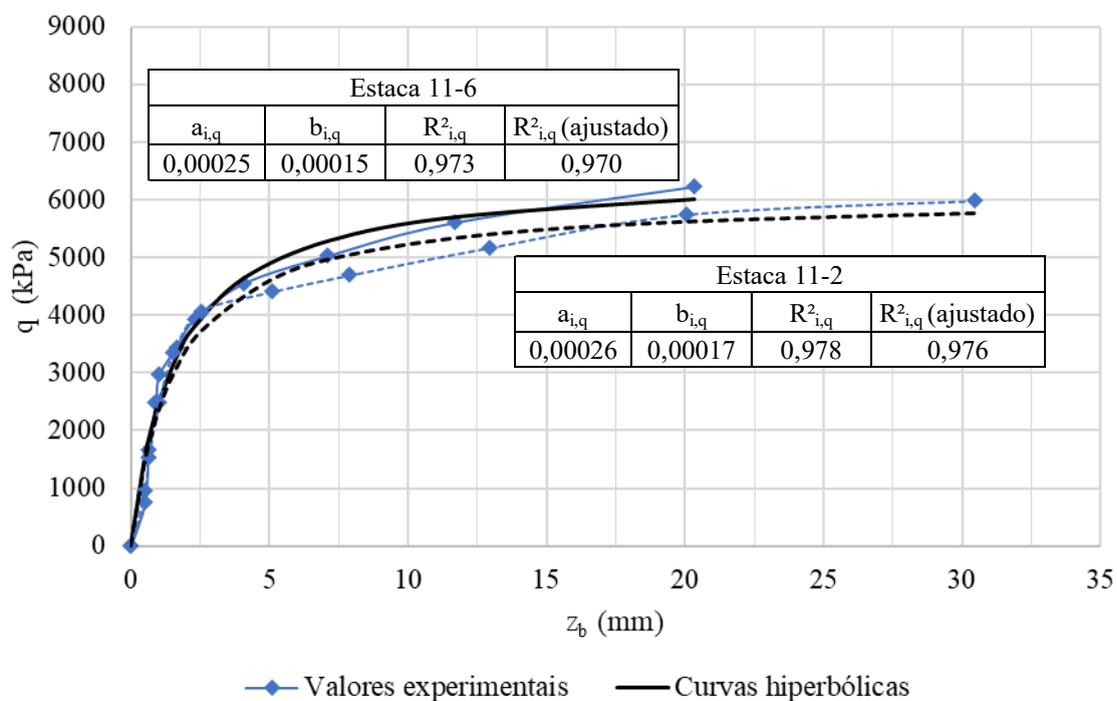
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.49 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 11-2 e 11-6 de Tavenas (1971)



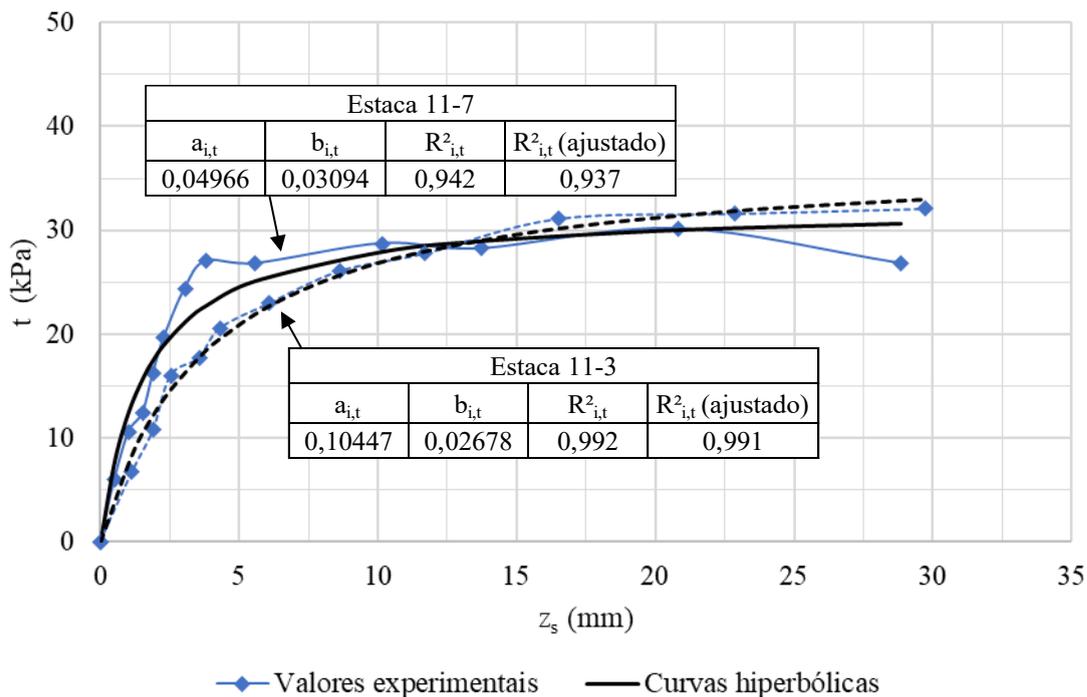
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.50 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 11-2 e 11-6 de Tavenas (1971)



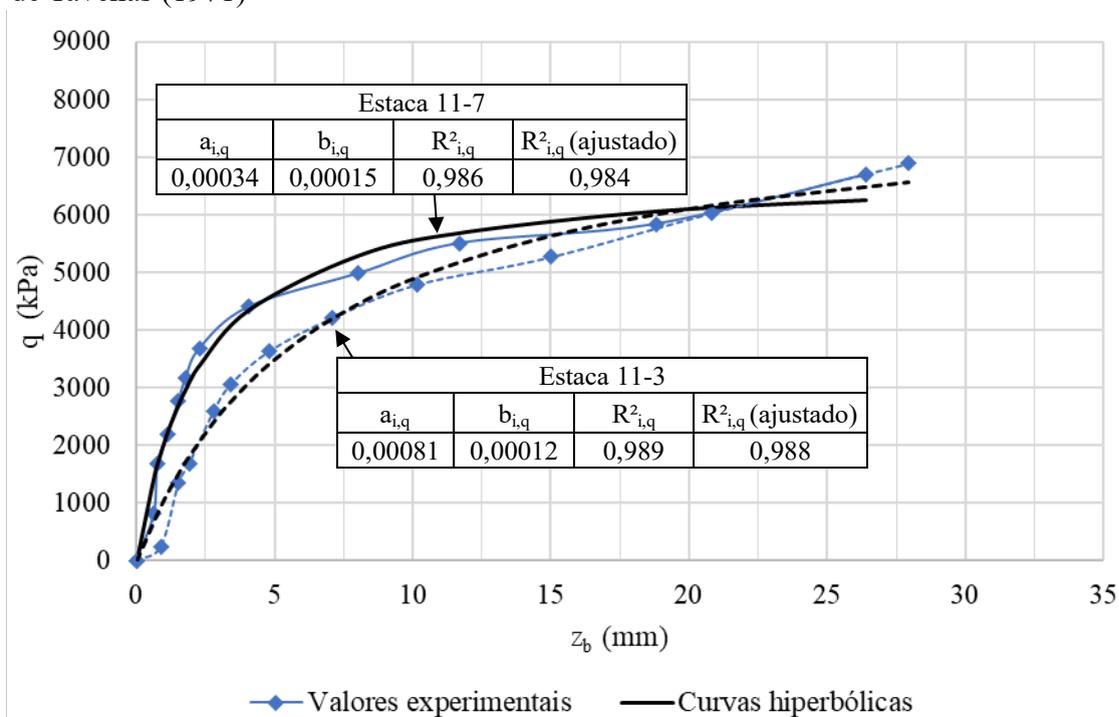
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.51 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 11-3 e 11-7 de Tavenas (1971)



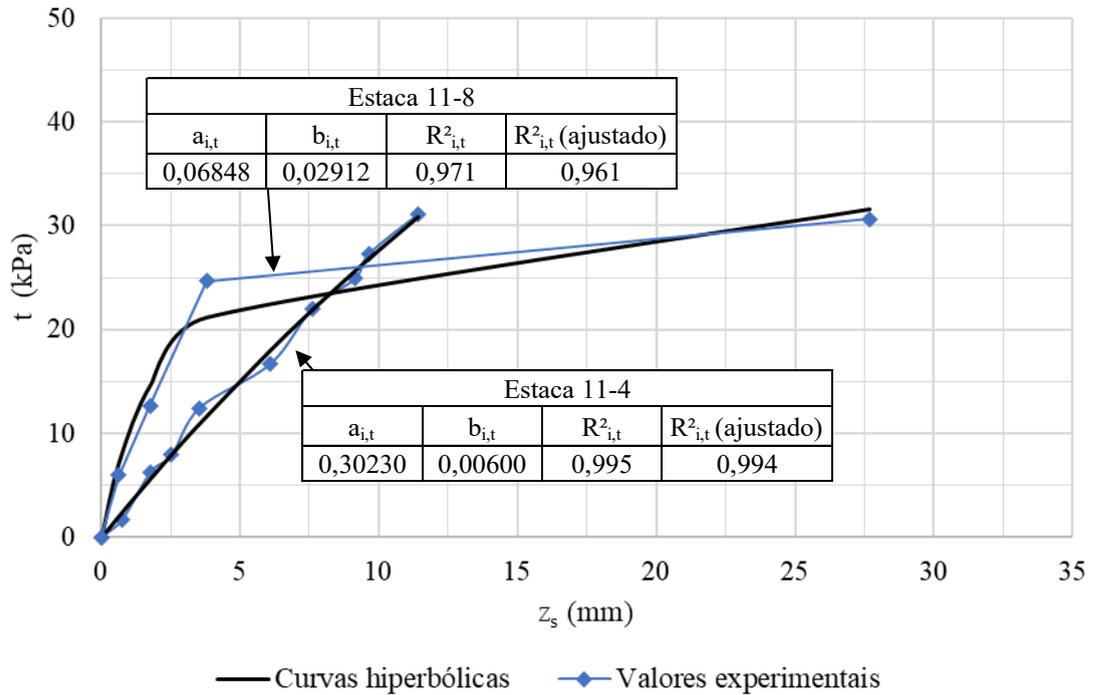
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.52 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 11-3 e 11-7 de Tavenas (1971)



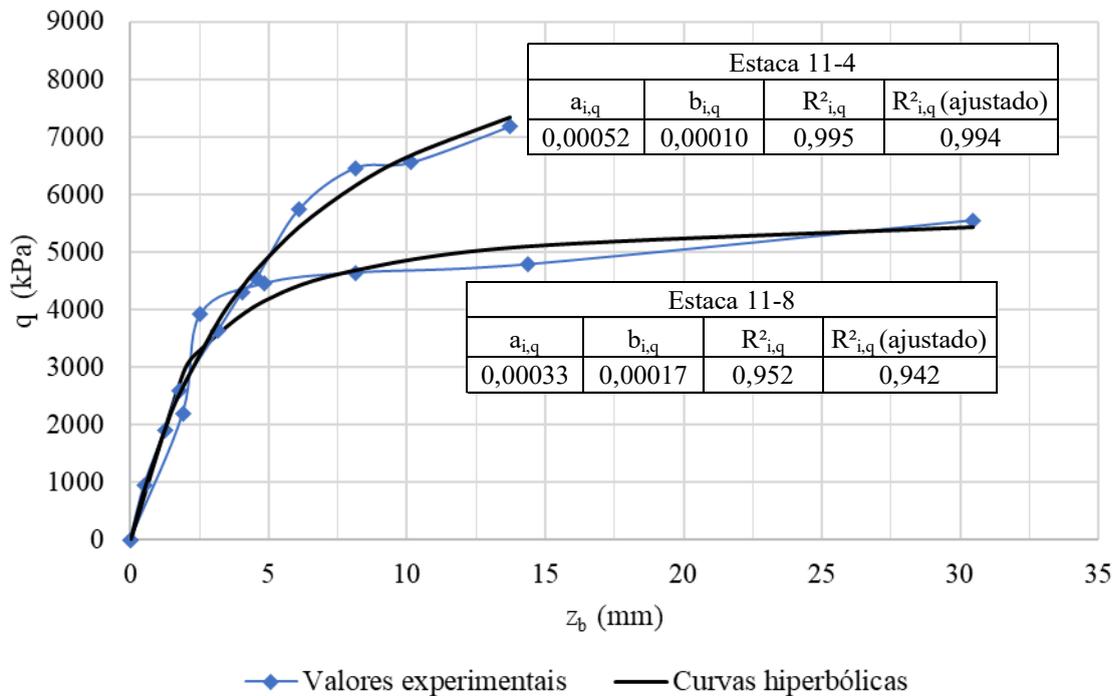
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.53 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 11-4 e 11-8 de Tavenas (1971)



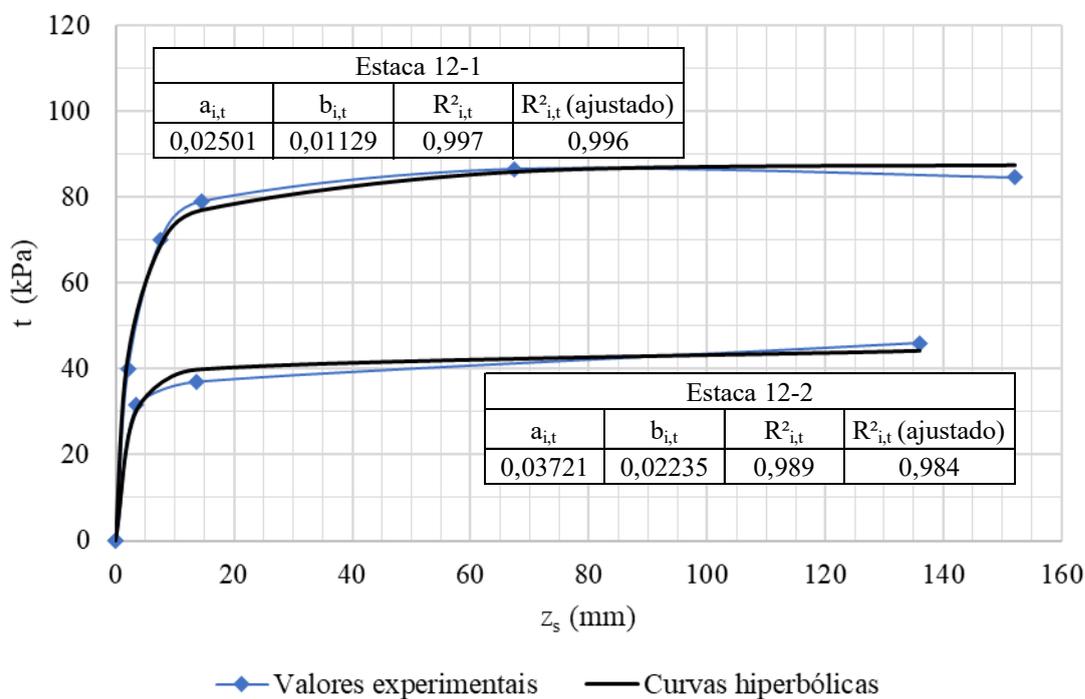
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.54 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 11-4 e 11-8 de Tavenas (1971)



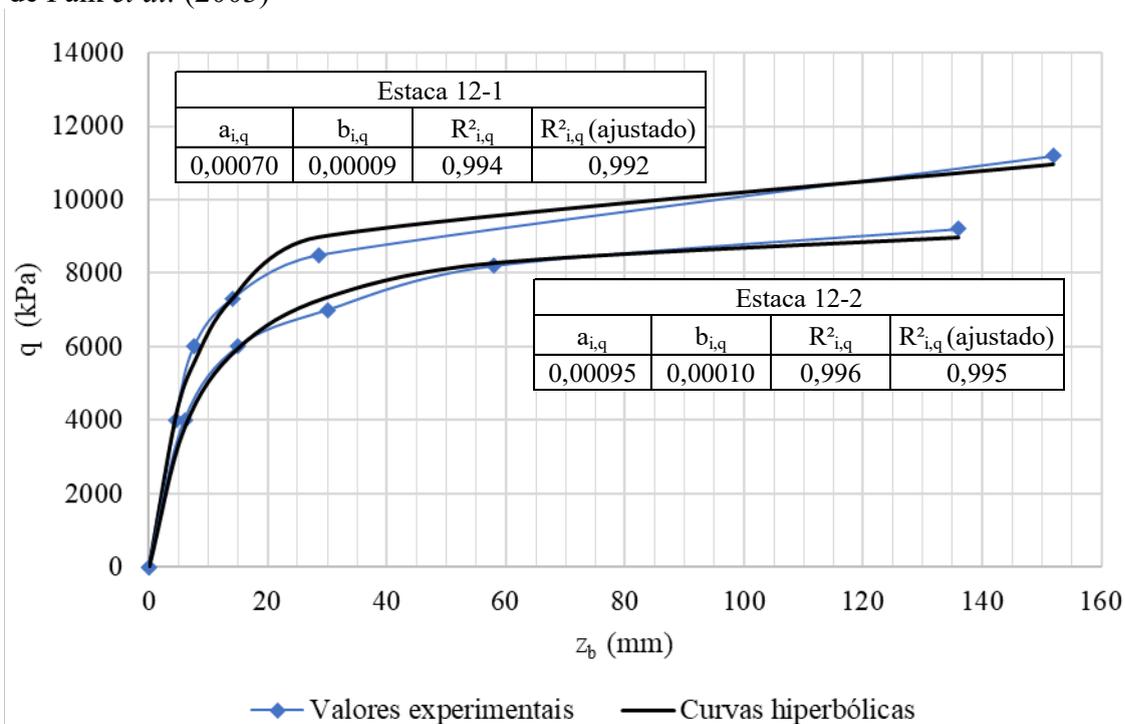
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.55 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 12-1 e 12-2 de Paik *et al.* (2003)



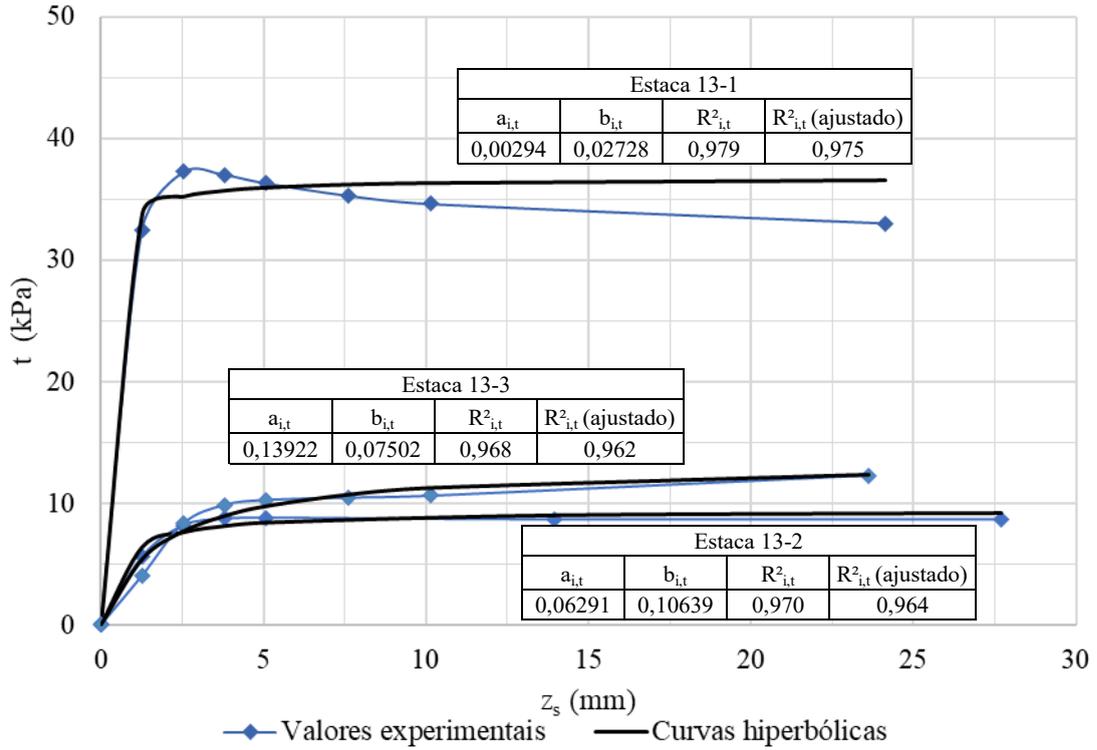
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.56 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas isoladas 12-1 e 12-2 de Paik *et al.* (2003)



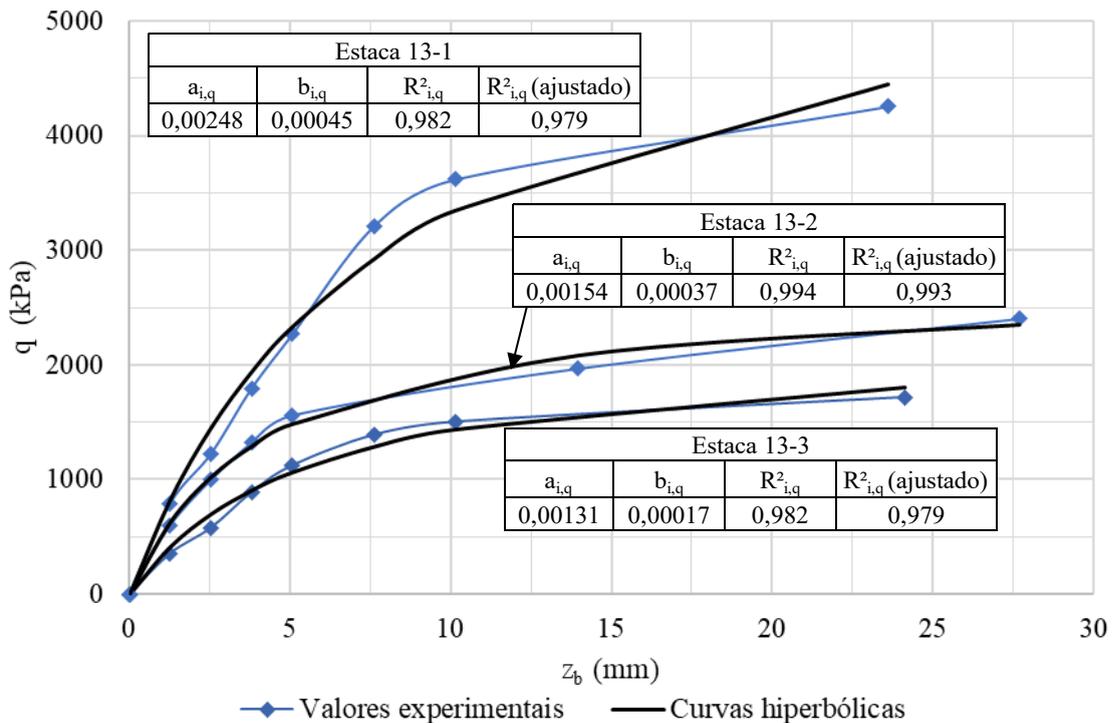
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.57 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-1, 13-2 e 13-3 de Nottingham (1975)



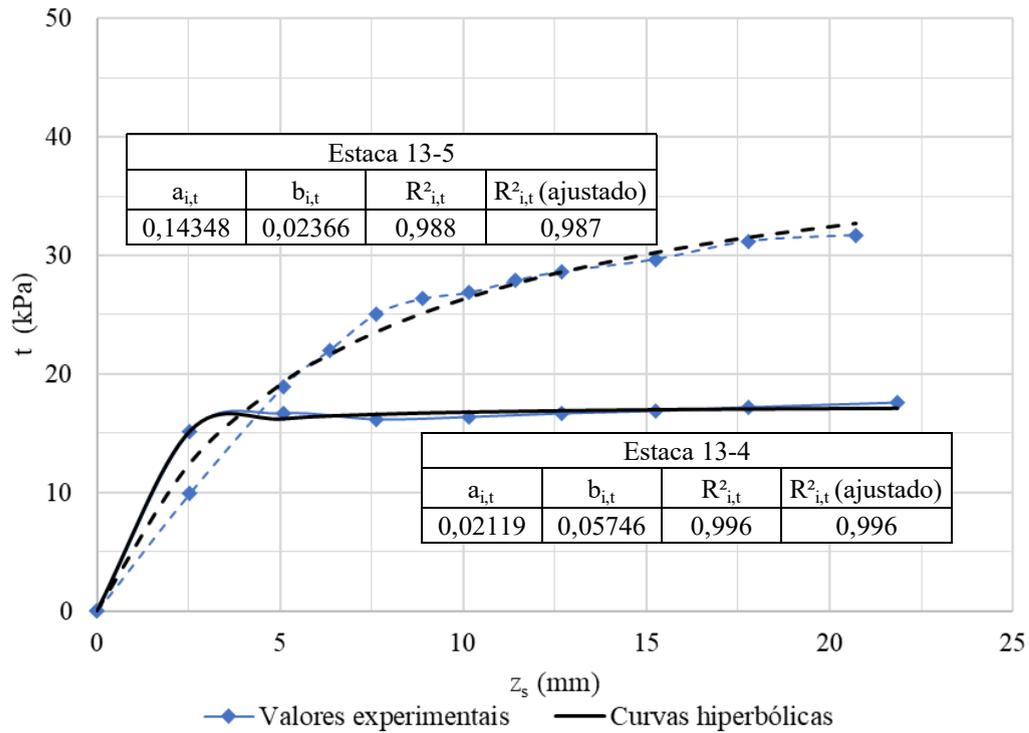
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.58 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-1, 13-2 e 13-3 de Nottingham (1975)



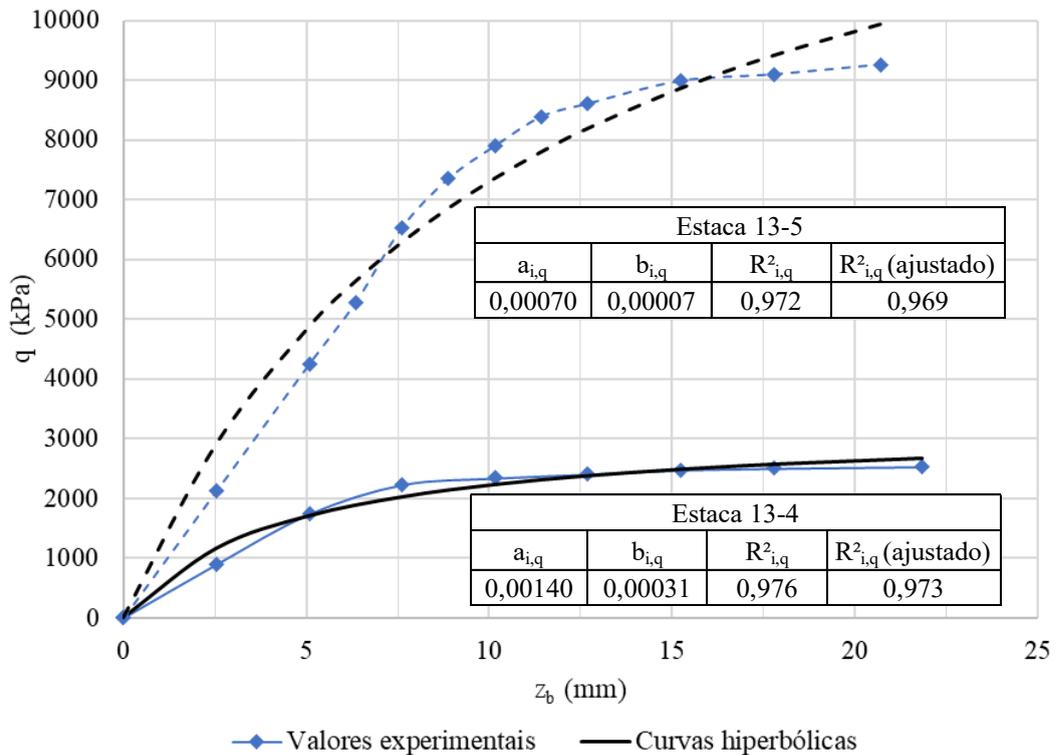
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.59 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-4 e 13-5 de Nottingham (1975)



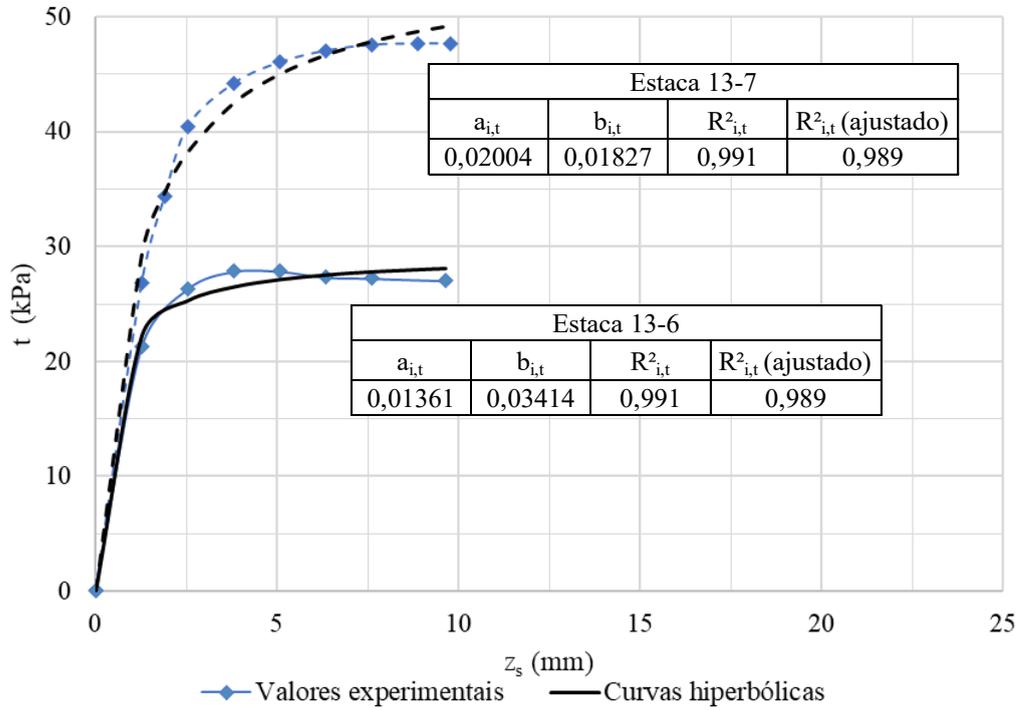
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.60 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-4 e 13-5 de Nottingham (1975)



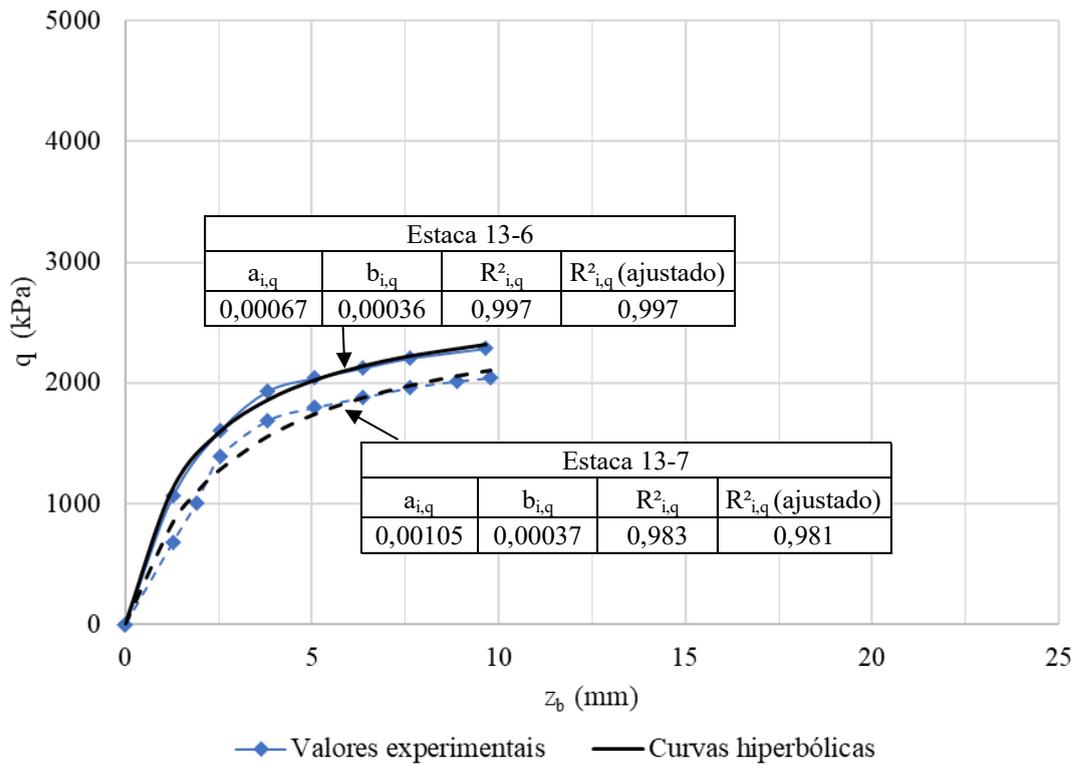
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.61 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-6 e 13-7 de Nottingham (1975)



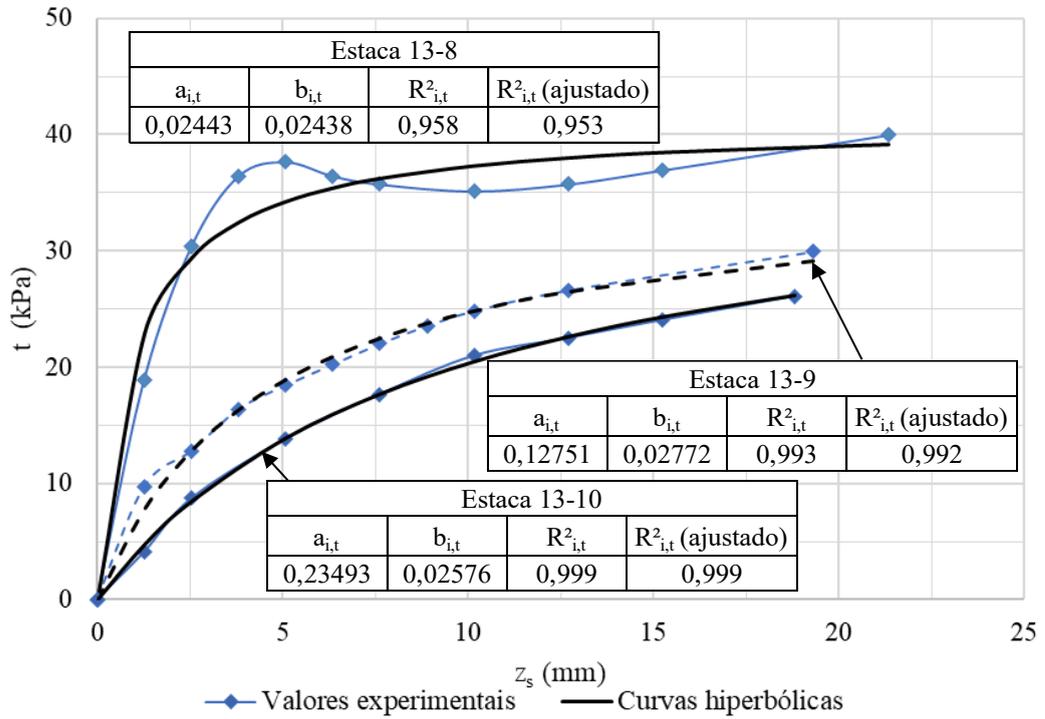
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.62 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-6 e 13-7 de Nottingham (1975)



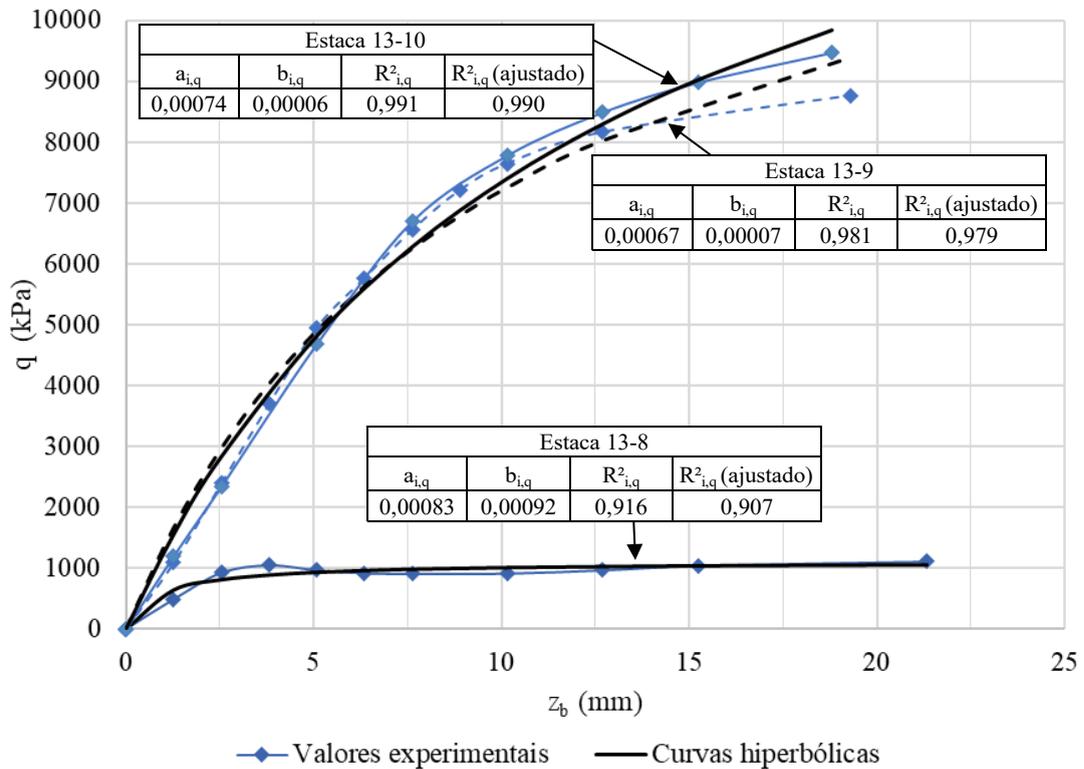
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.63 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-8, 13-9 e 13-10 de Nottingham (1975)



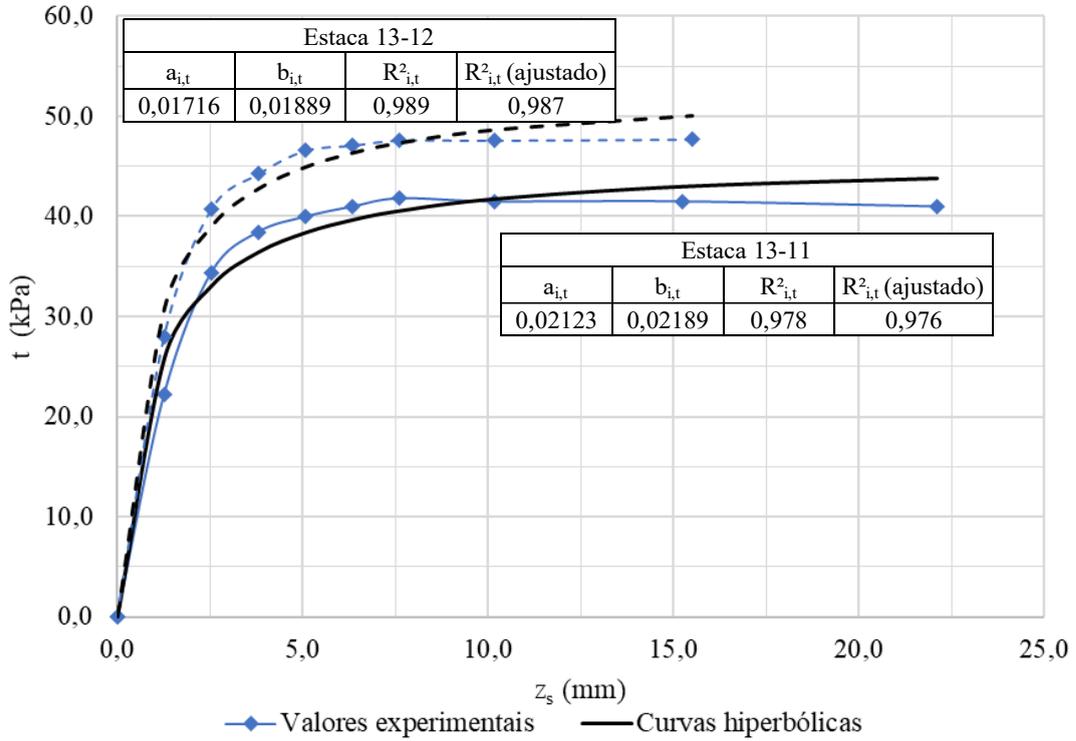
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.64 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-8, 13-9 e 13-10 de Nottingham (1975)



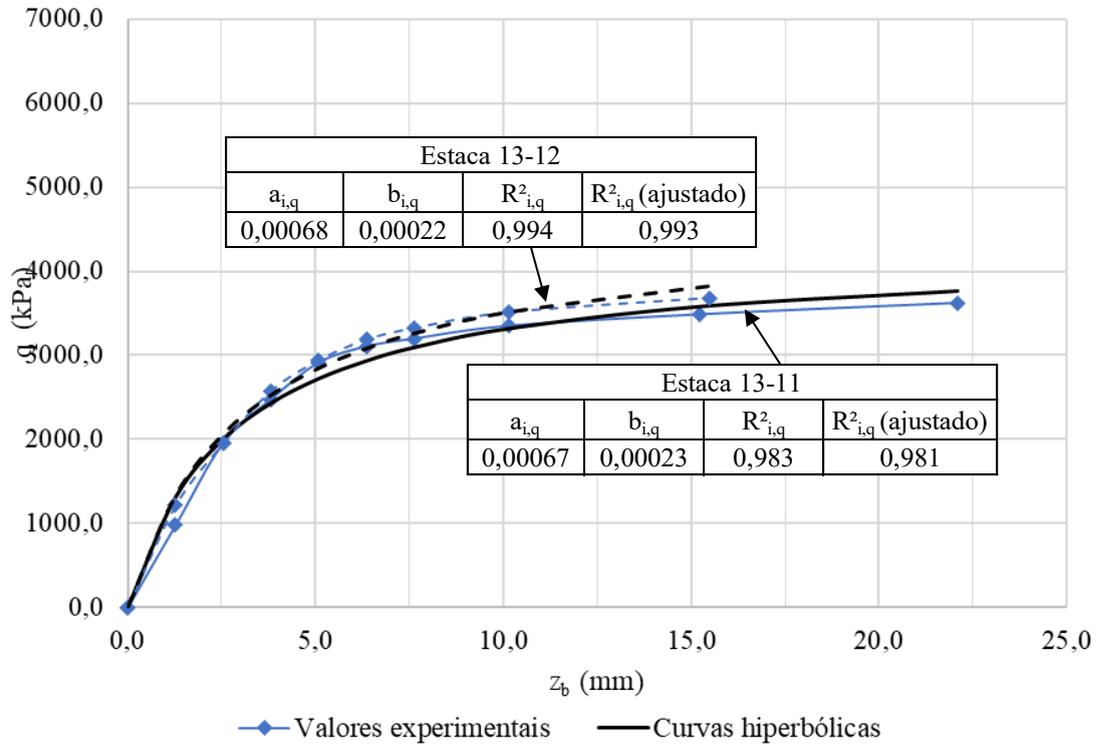
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.65 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-11 e 13-12 de Nottingham (1975)



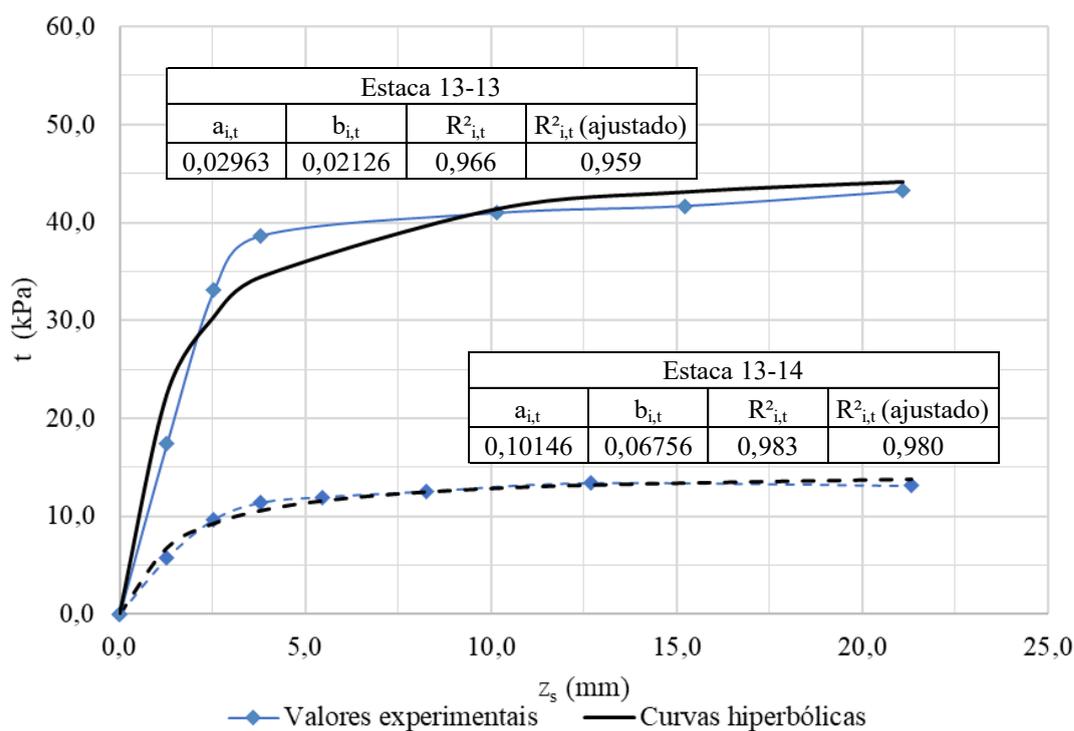
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.66 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-11 e 13-12 de Nottingham (1975)



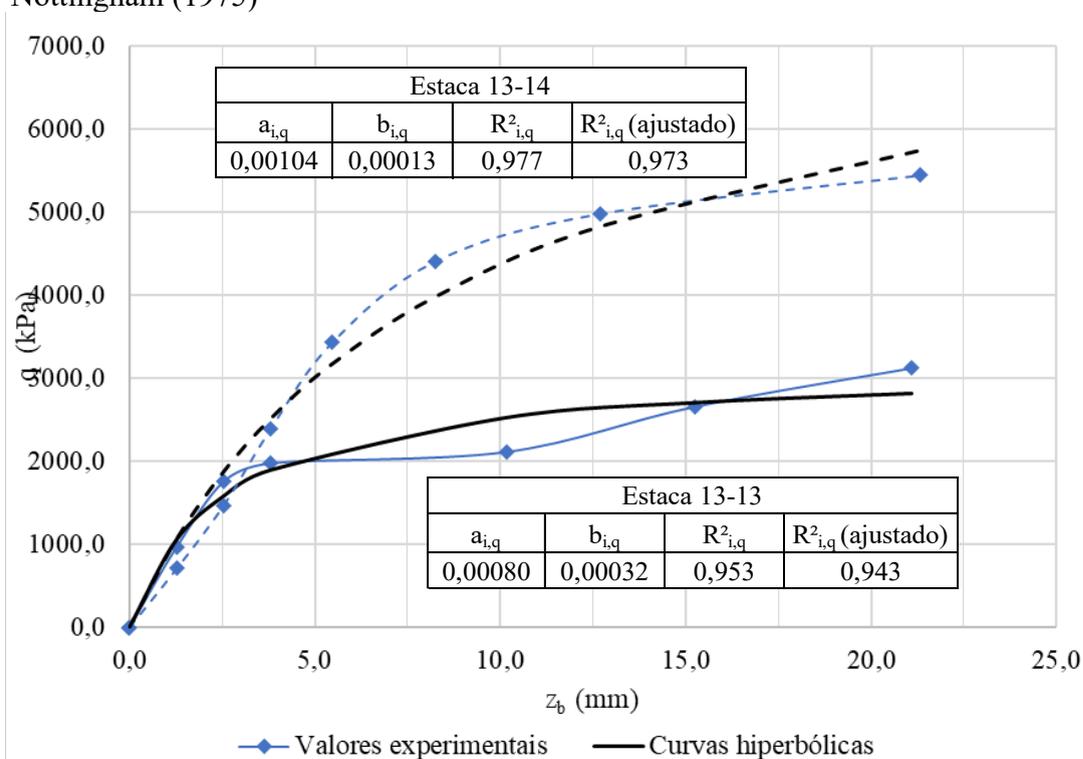
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.67 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-13 e 13-14 de Nottingham (1975)



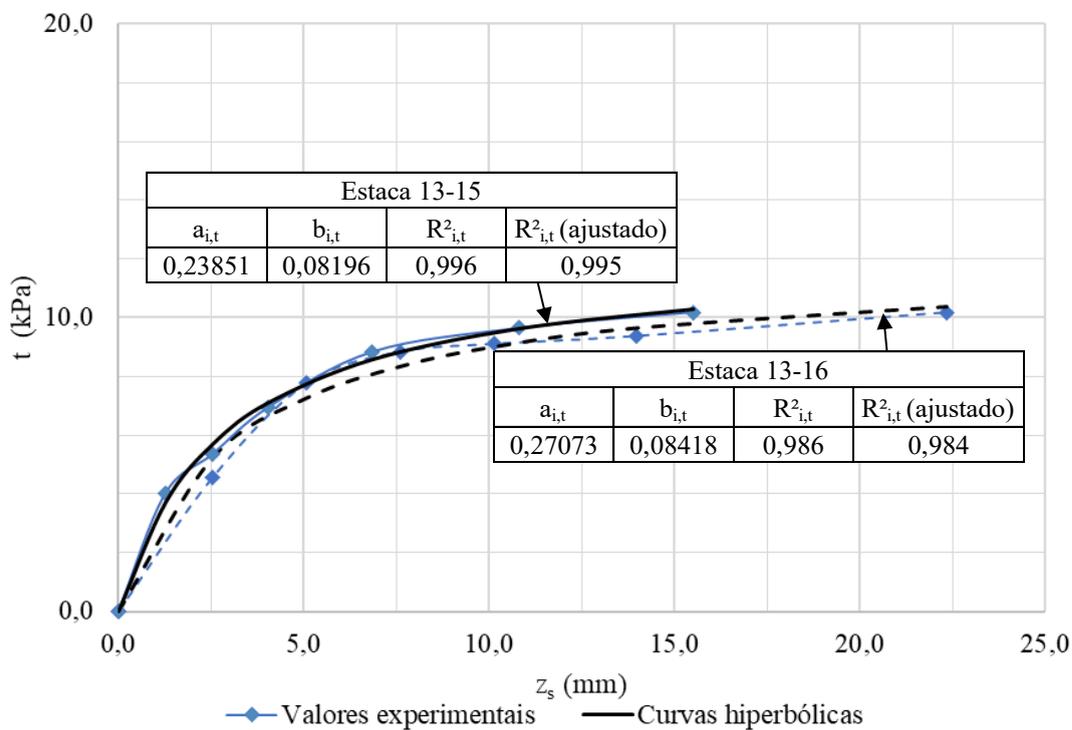
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.68 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-13 e 13-14 de Nottingham (1975)



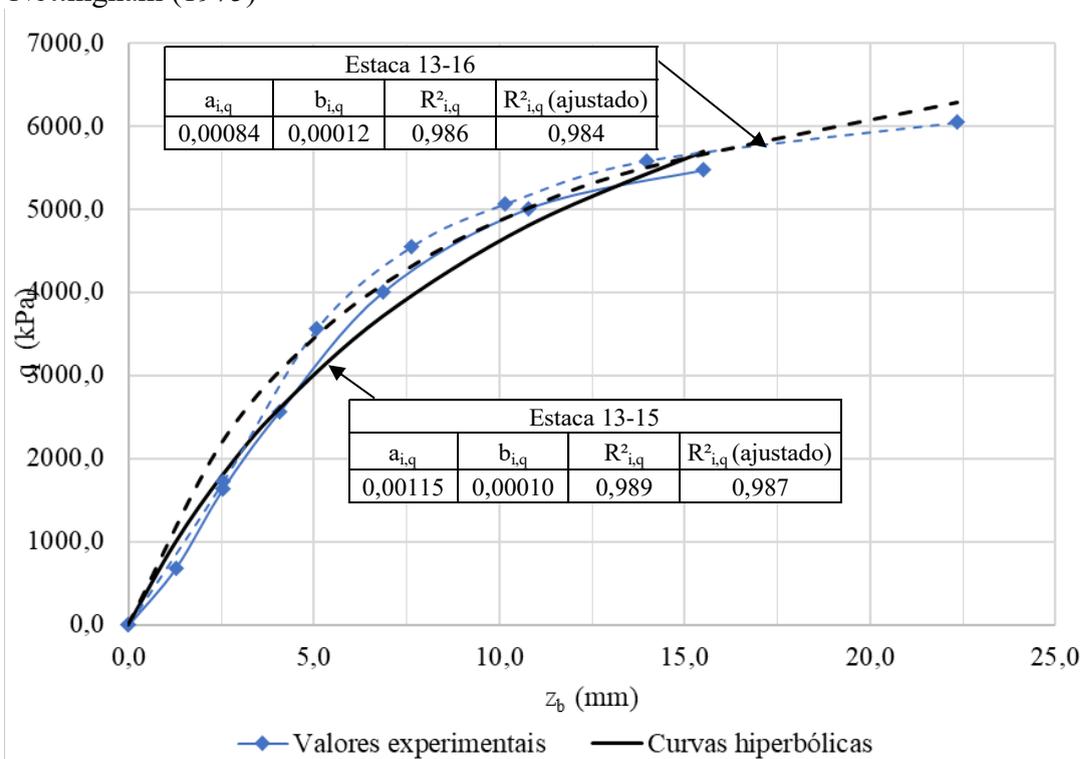
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.69 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-15 e 13-16 de Nottingham (1975)



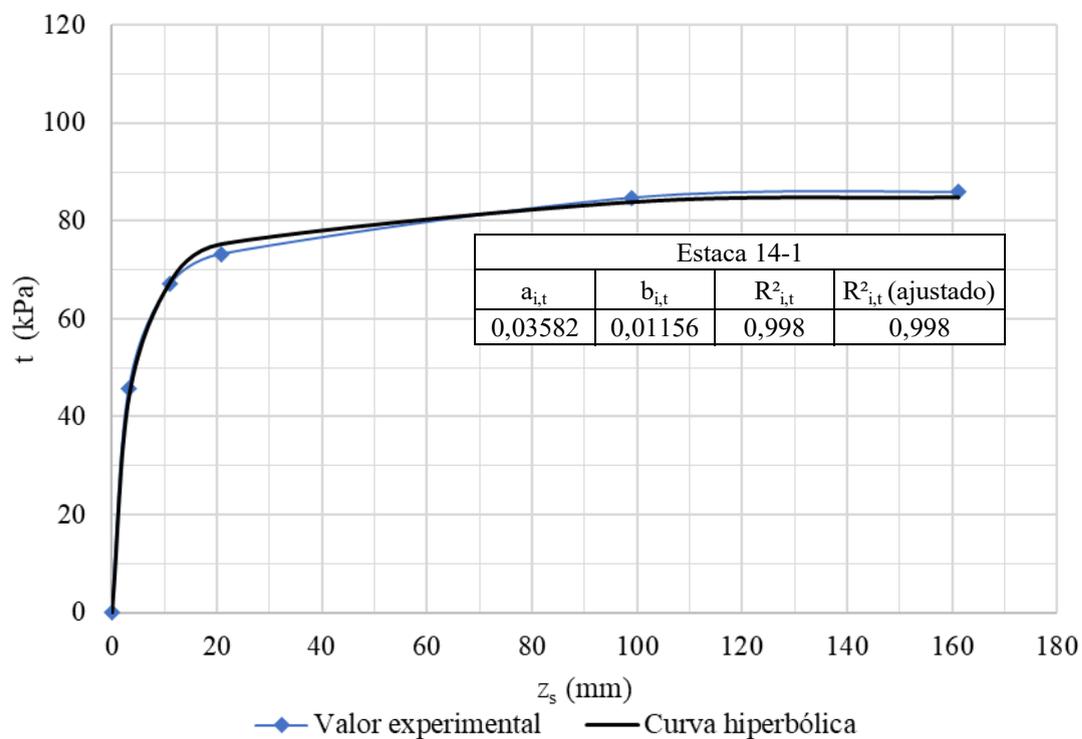
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.70 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 13-15 e 13-16 de Nottingham (1975)



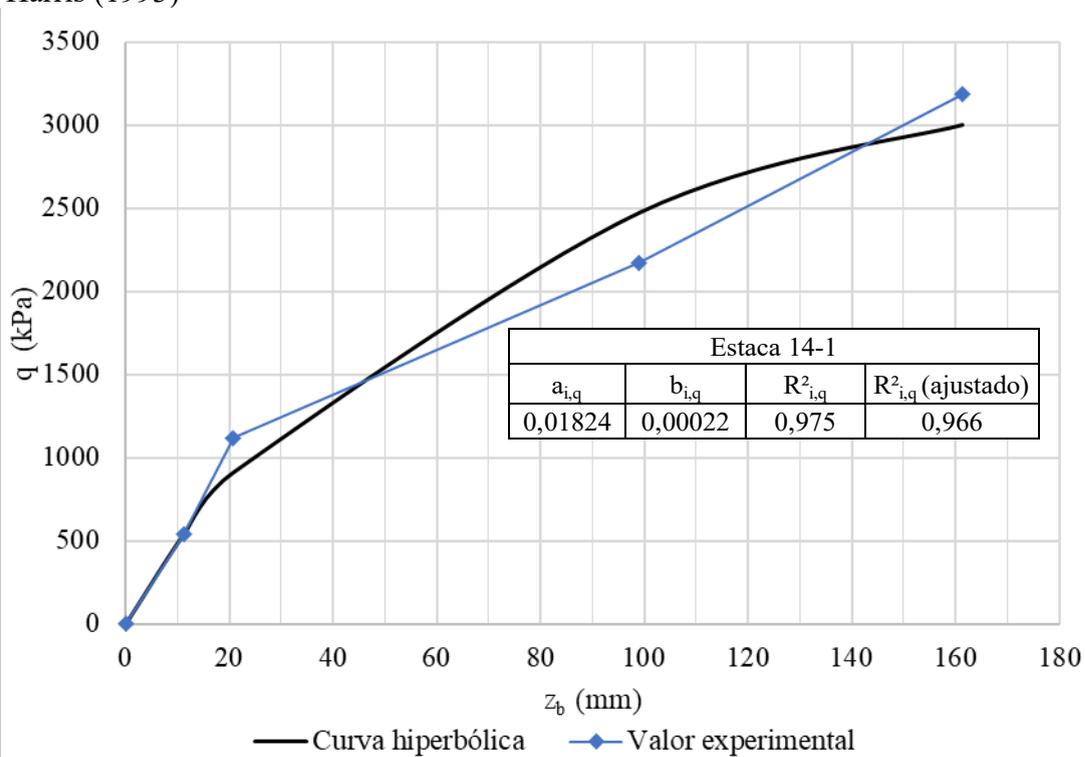
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.71 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca 14-1 de Mayne e Harris (1993)



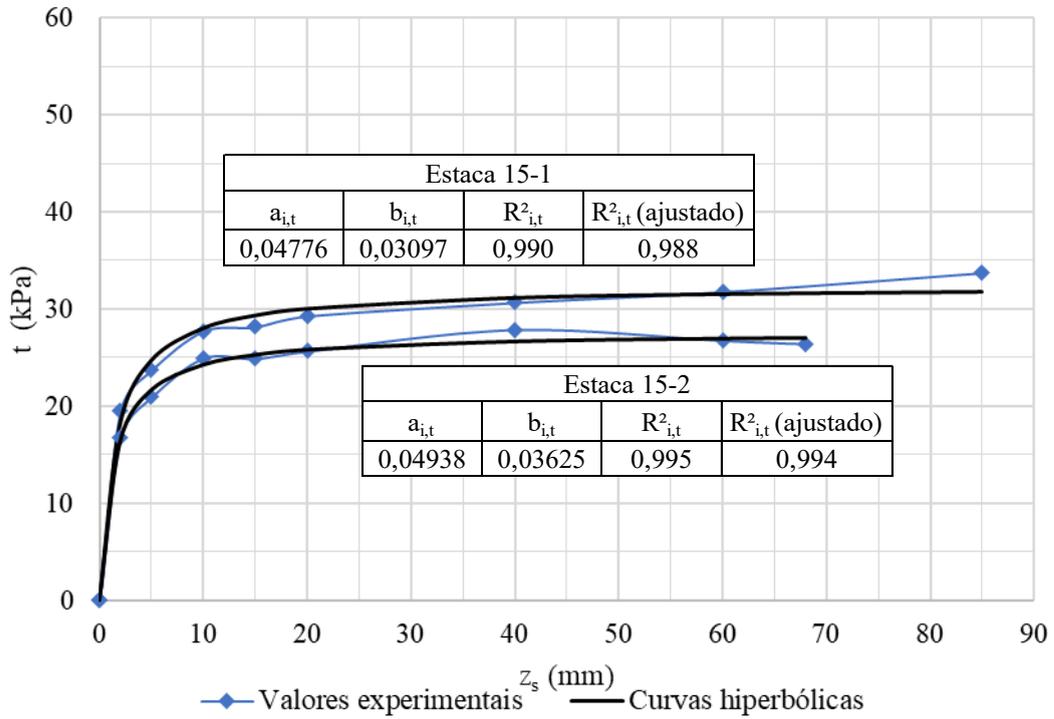
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.72 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas da estaca 14-1 de Mayne e Harris (1993)



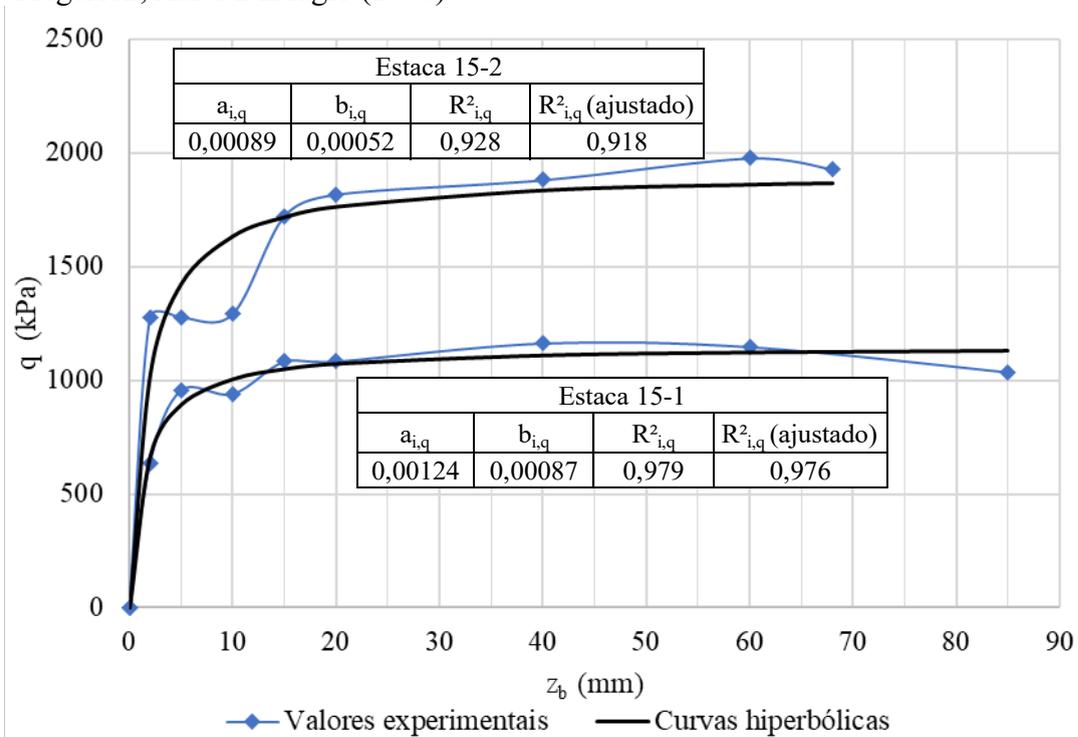
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.73 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 15-1 e 15-2 de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)



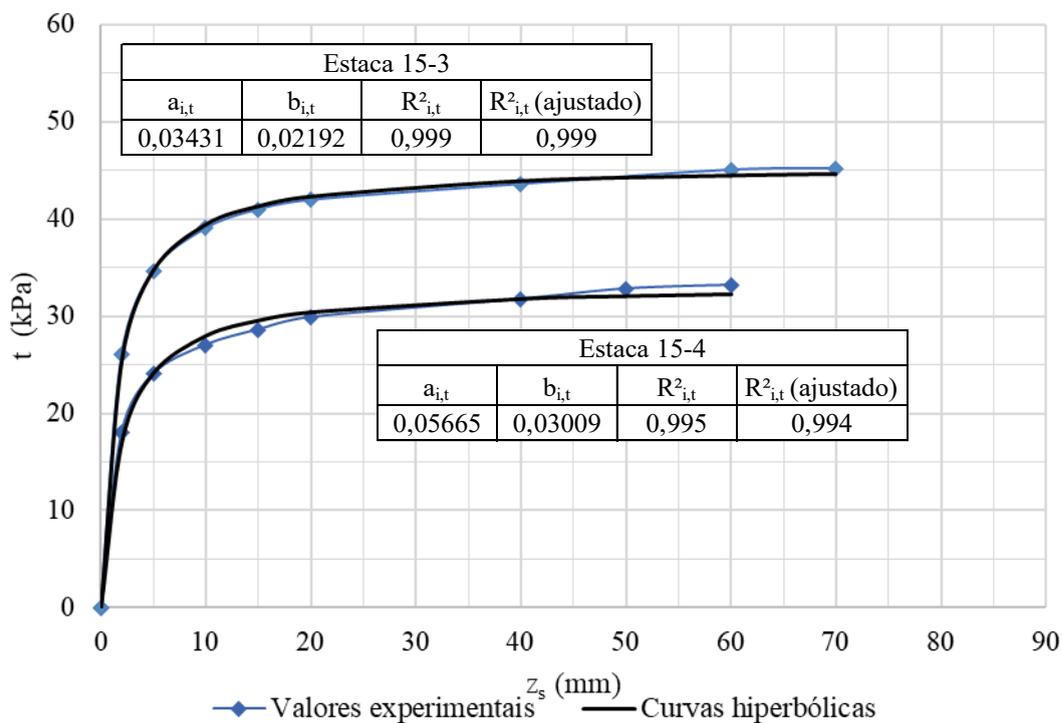
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.74 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 15-1 e 15-2 de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)



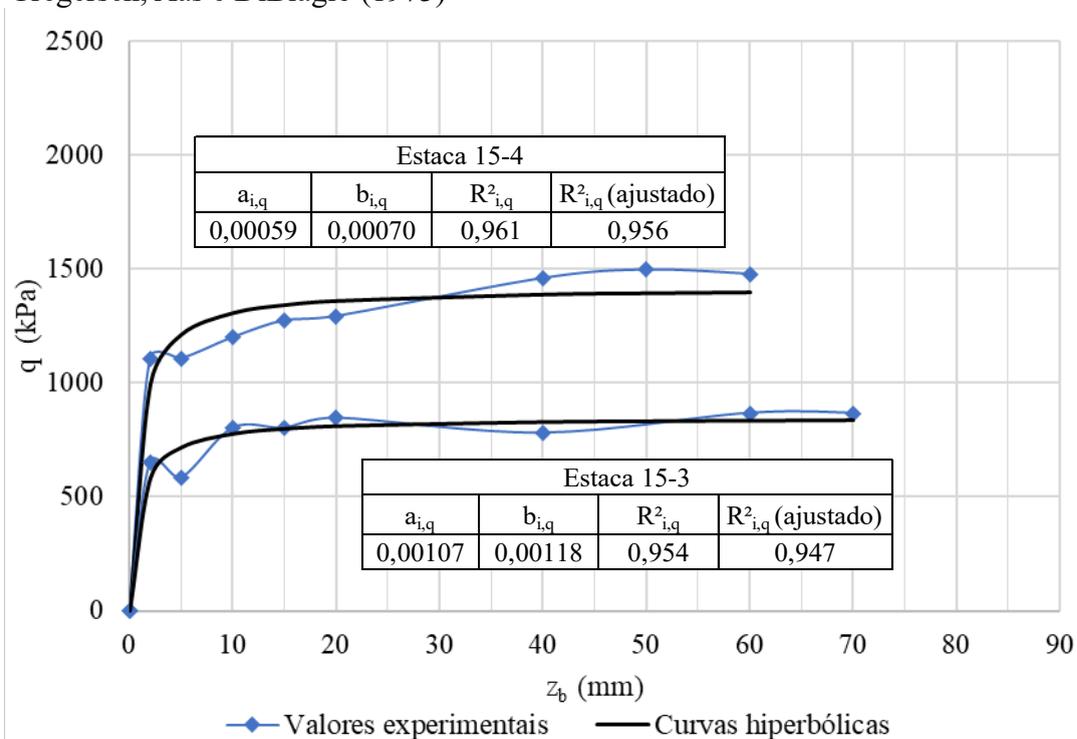
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.75 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 15-3 e 15-4 de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)



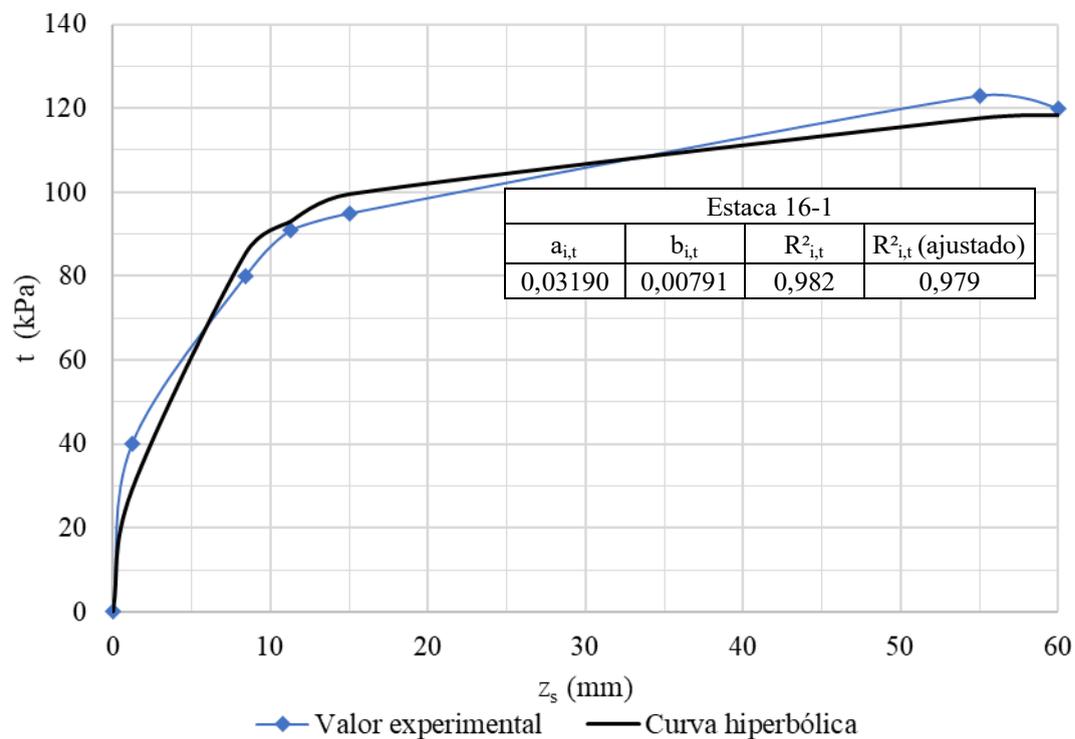
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.76 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 15-3 e 15-4 de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)



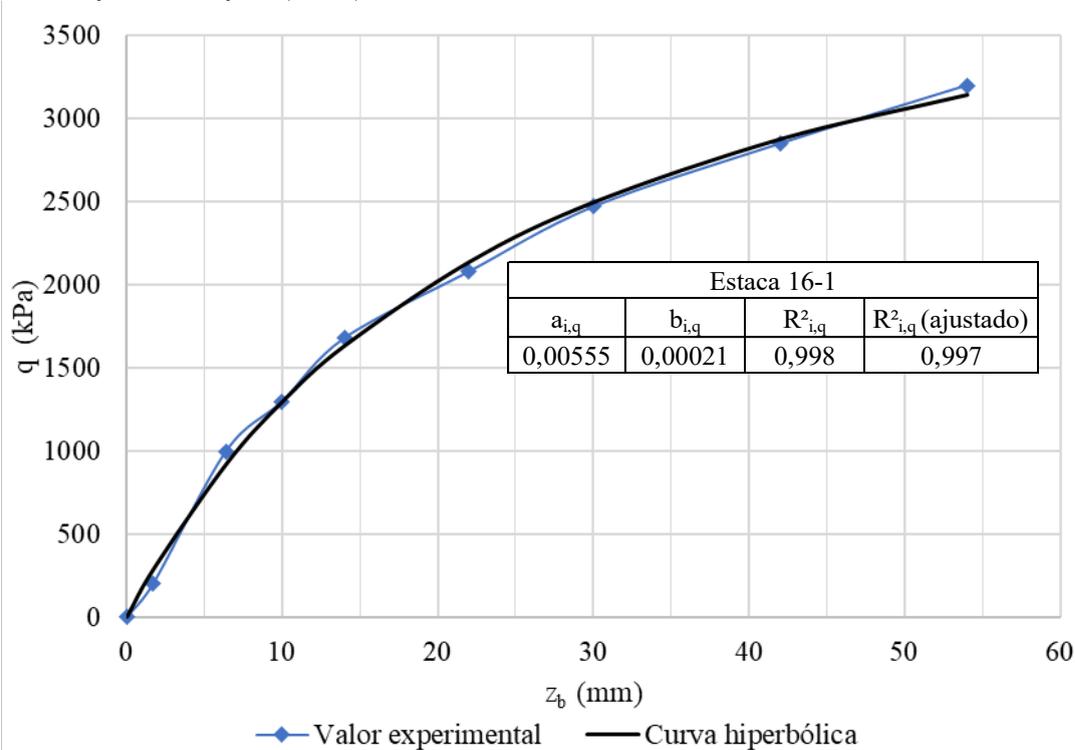
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.77 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca 16-1 de Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014)



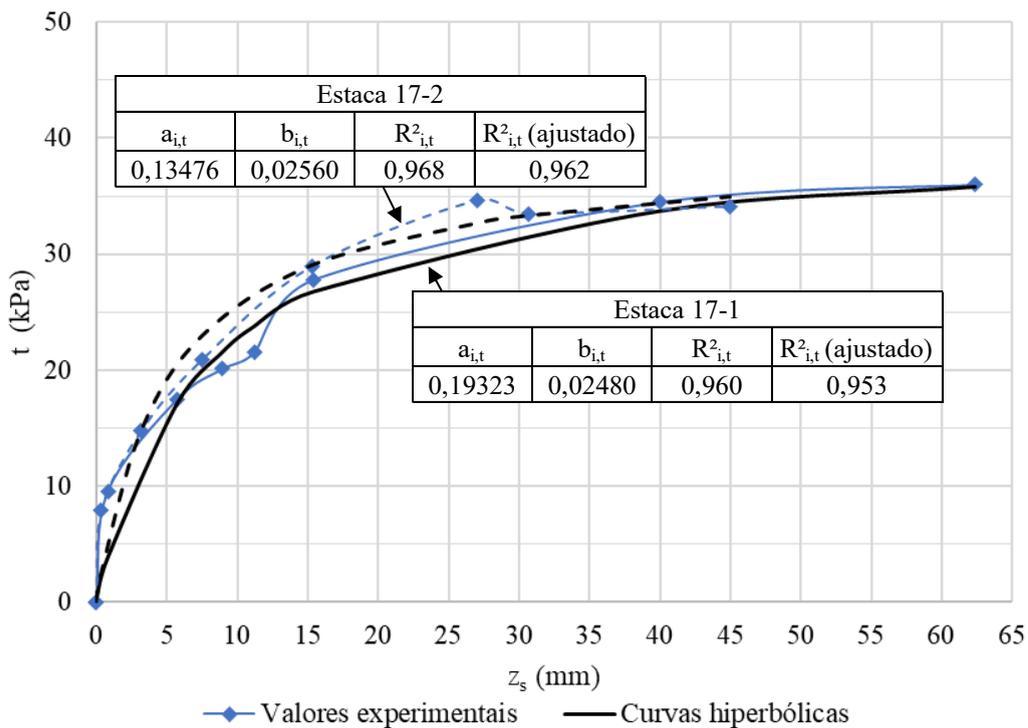
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.78 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas da estaca 16-1 de Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014)



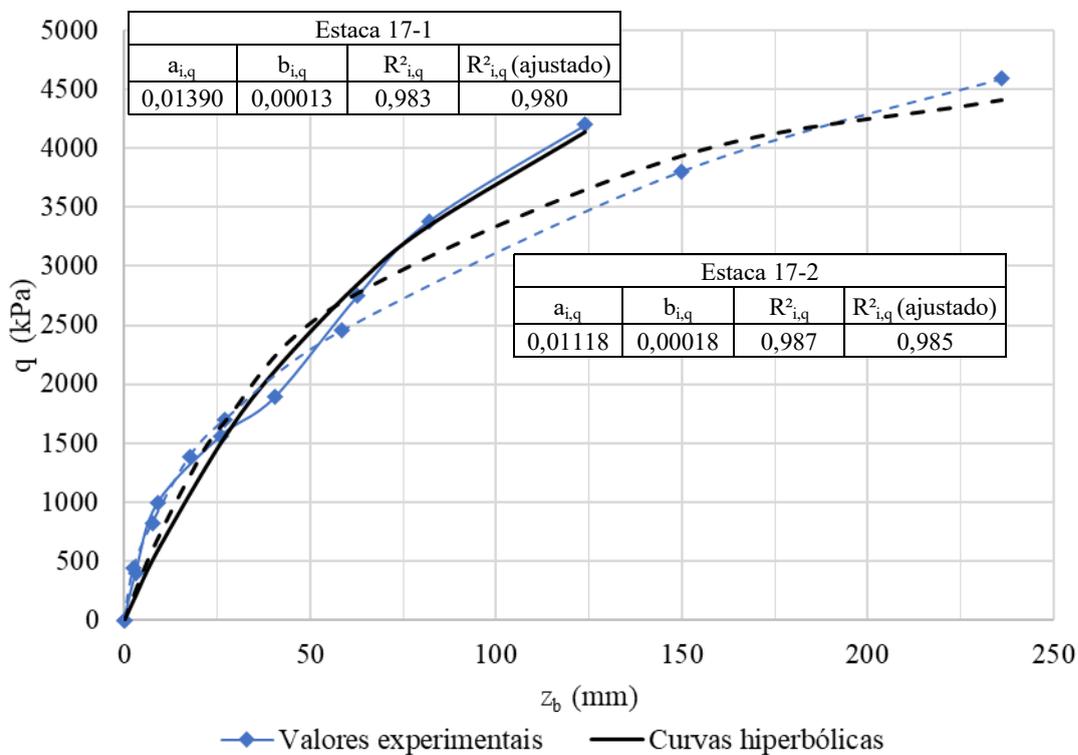
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.79 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 17-1 e 17-2 de Gavin, Cadogan e Casey (2009)



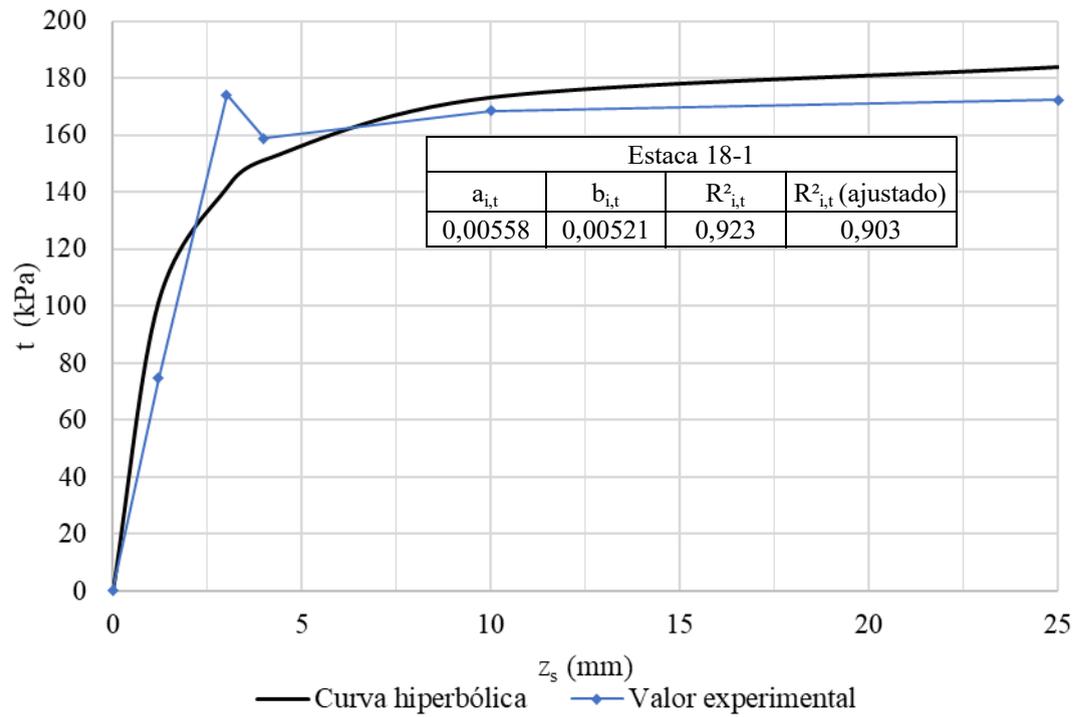
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.80 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 17-1 e 17-2 de Gavin, Cadogan e Casey (2009)



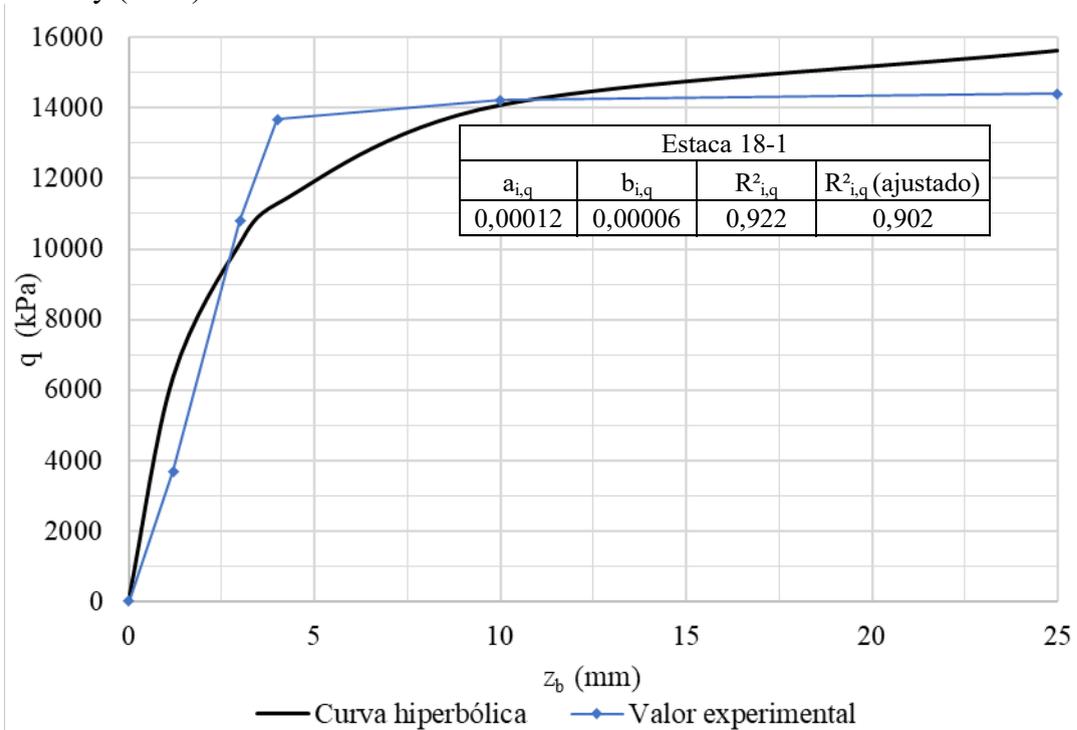
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.81 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca 18-1 de Gavin e O'Kelly (2007)



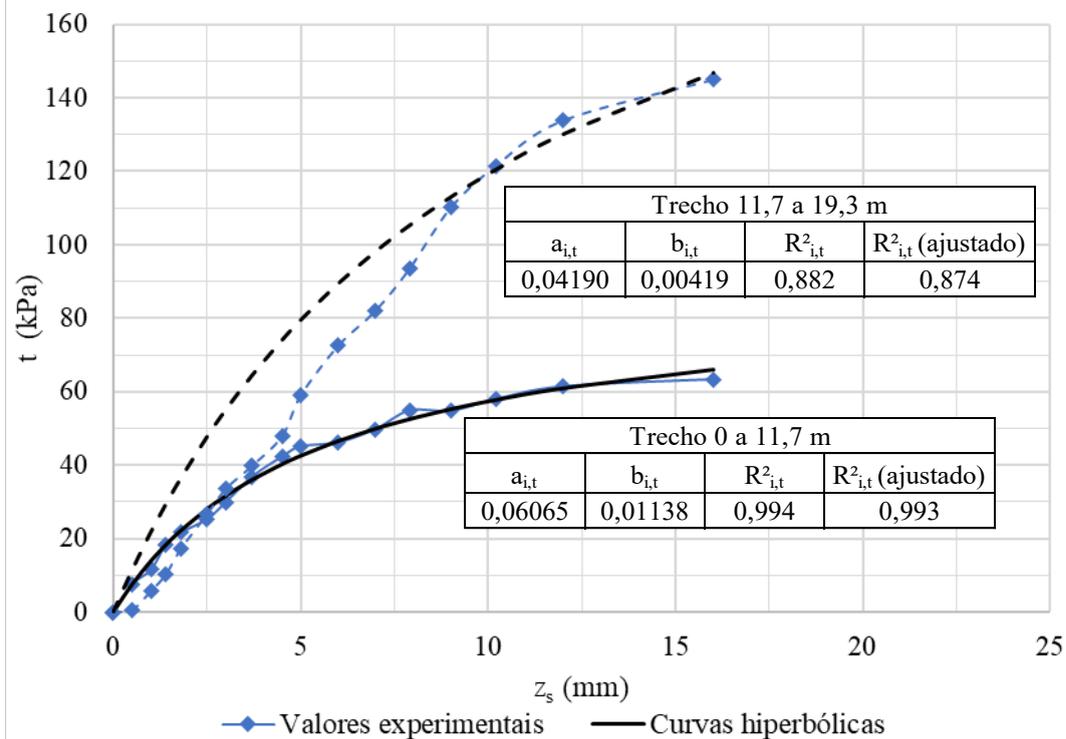
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.82 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas da estaca 18-1 de Gavin e O'Kelly (2007)



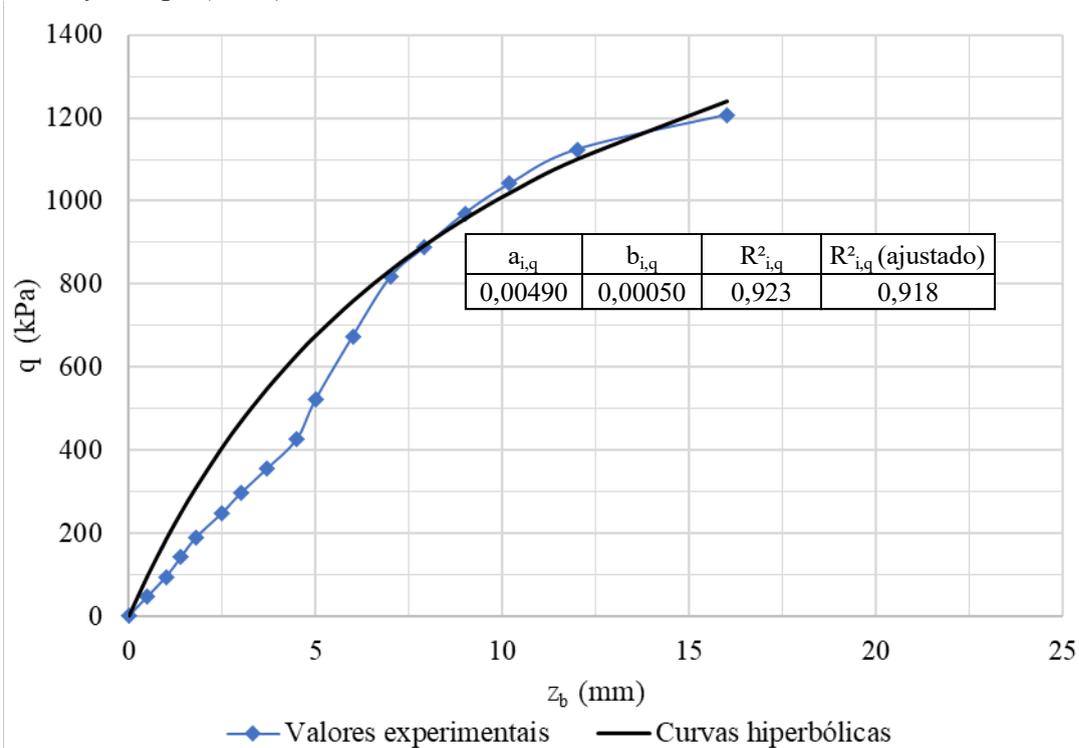
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.83 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca 19-1 de Fellenius, Brusey e Pepe (2000)



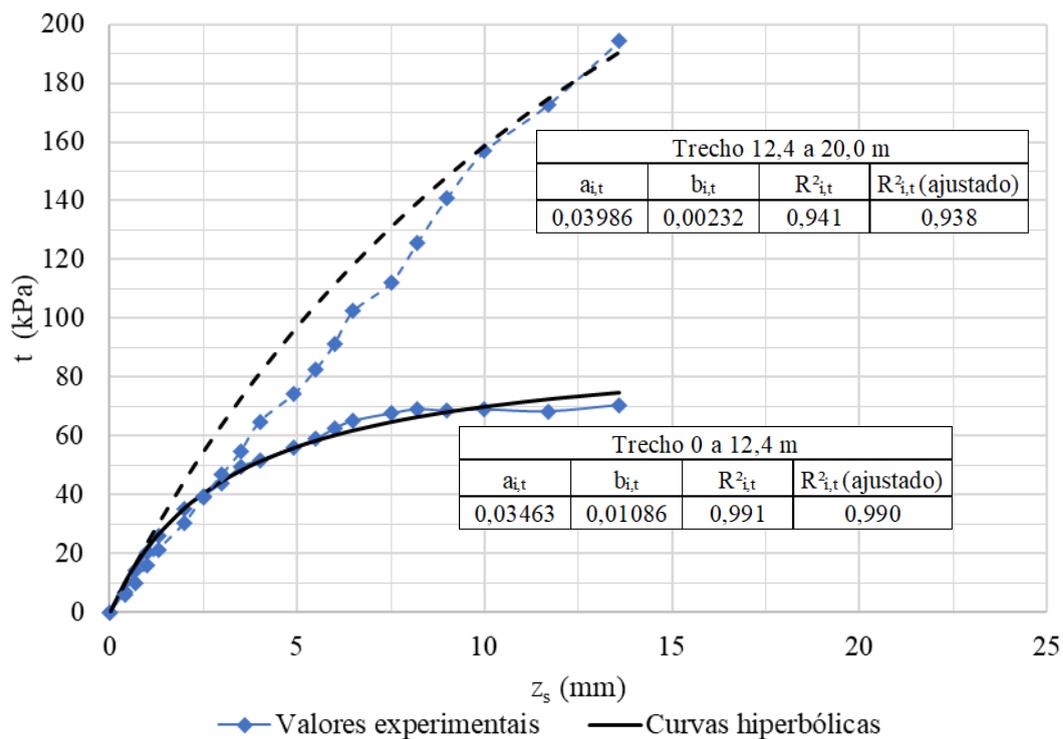
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.84 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas da estaca 19-1 de Fellenius, Brusey e Pepe (2000)



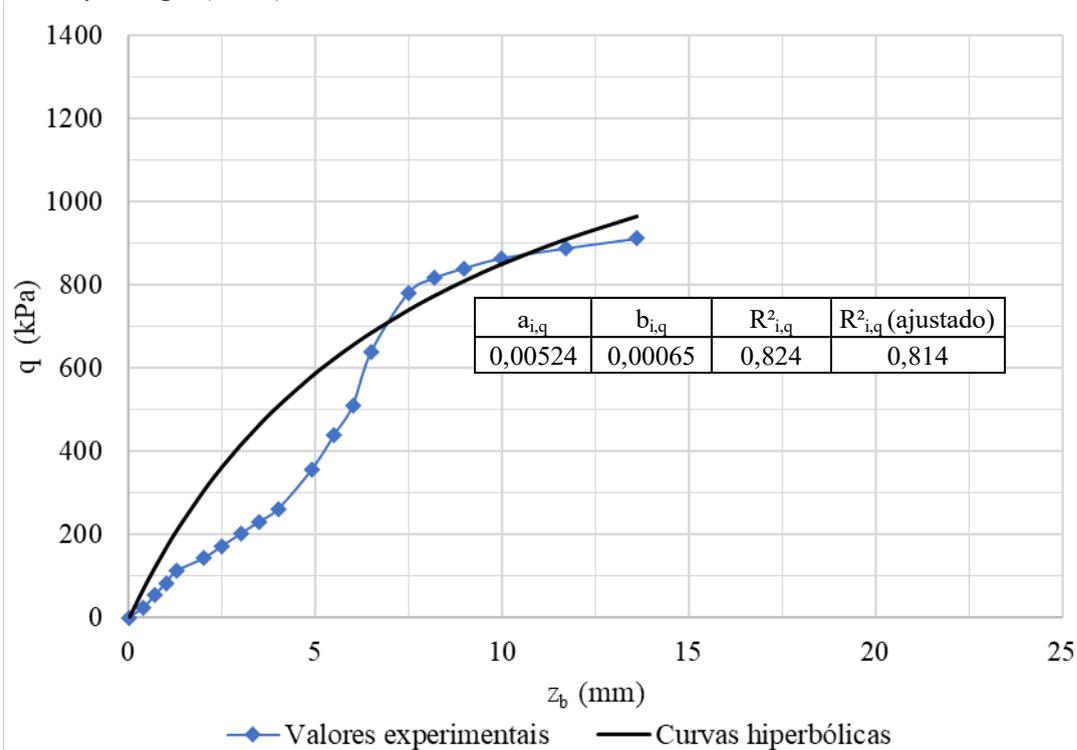
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.85 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca 19-2 de Fellenius, Brusey e Pepe (2000)



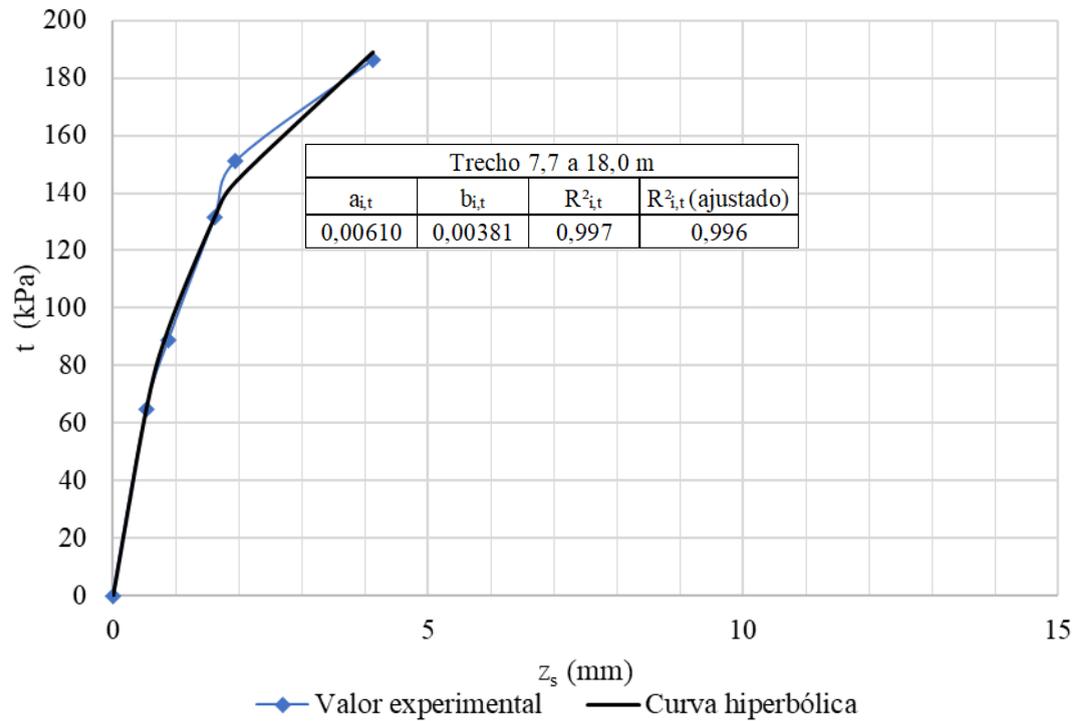
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.86 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas da estaca 19-2 de Fellenius, Brusey e Pepe (2000)



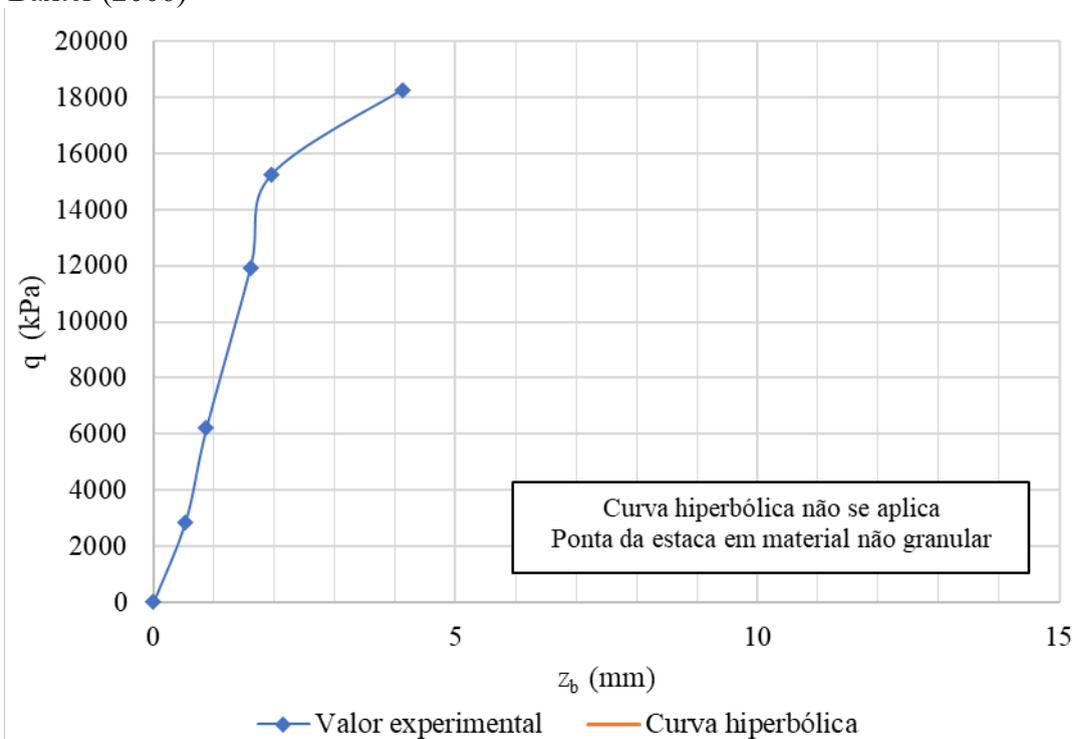
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.87 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas da estaca 20-1 de Bradshaw e Baxter (2006)



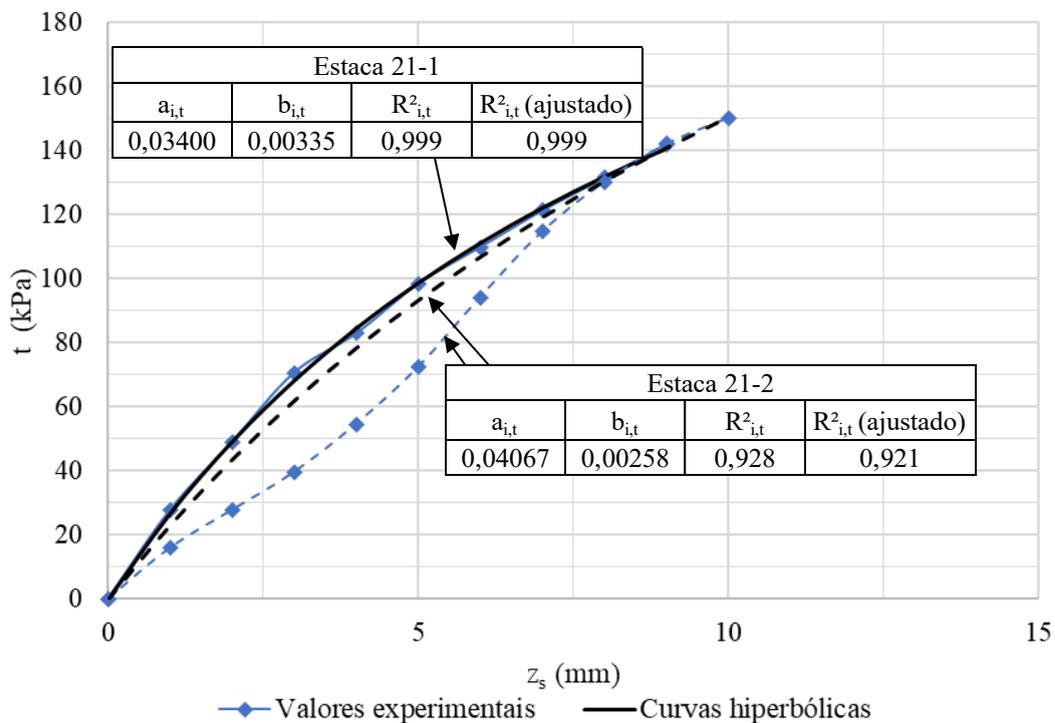
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.88 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas da estaca 20-1 de Bradshaw e Baxter (2006)



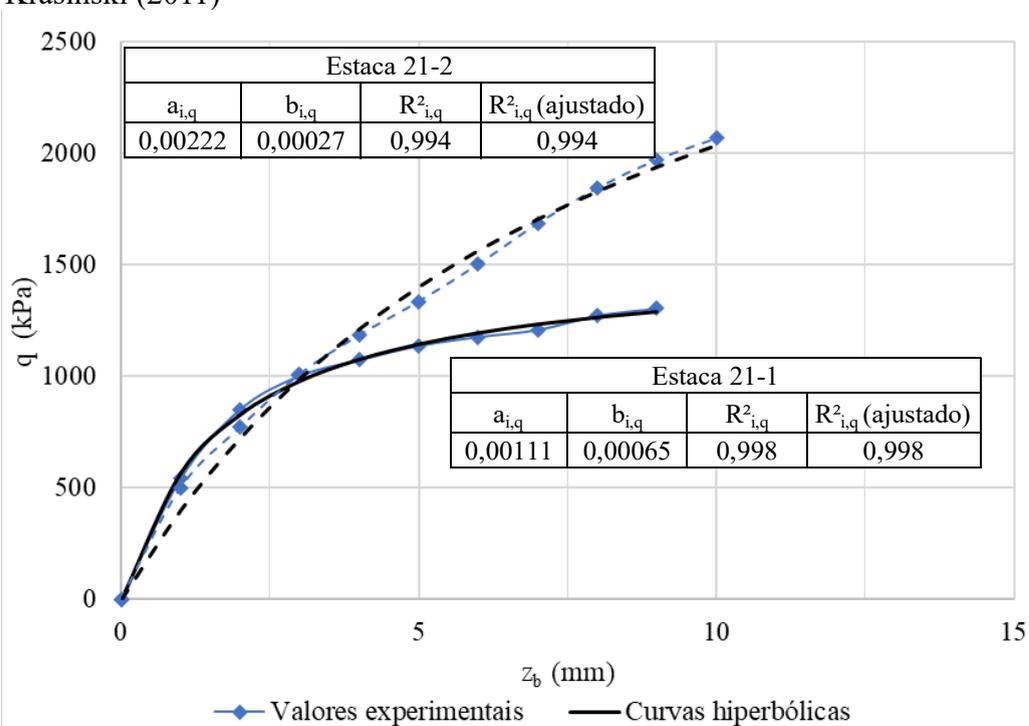
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.89 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 21-1 e 21-2 de Krasinski (2011)



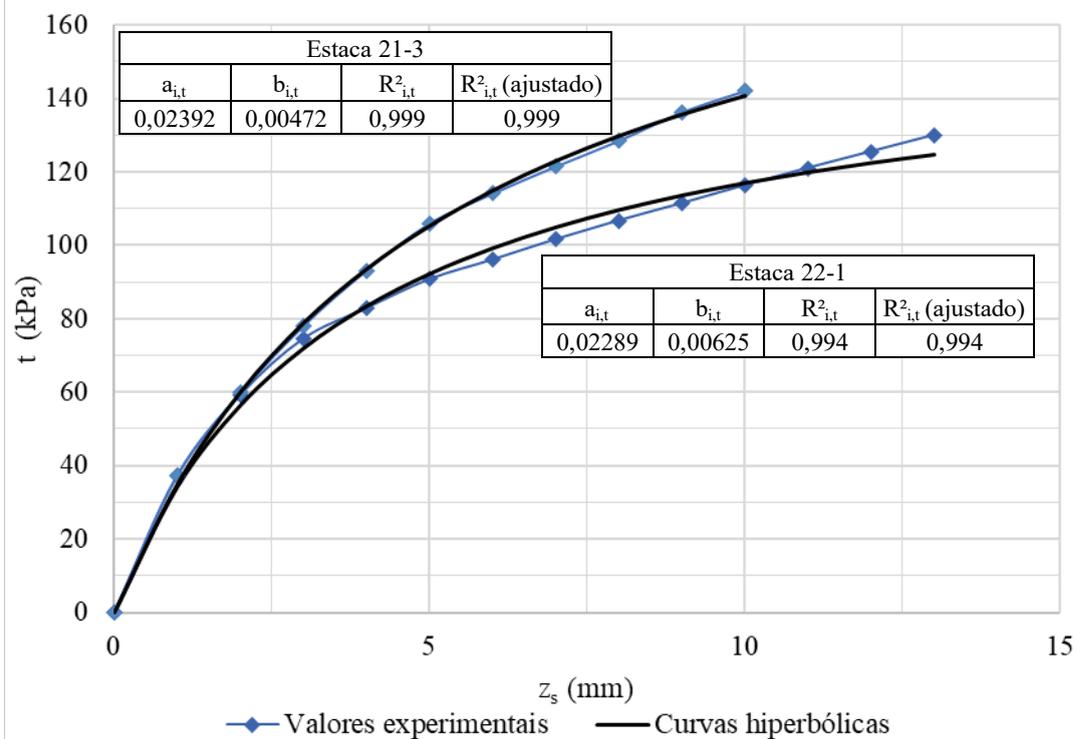
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.90 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 21-1 e 21-2 de Krasinski (2011)



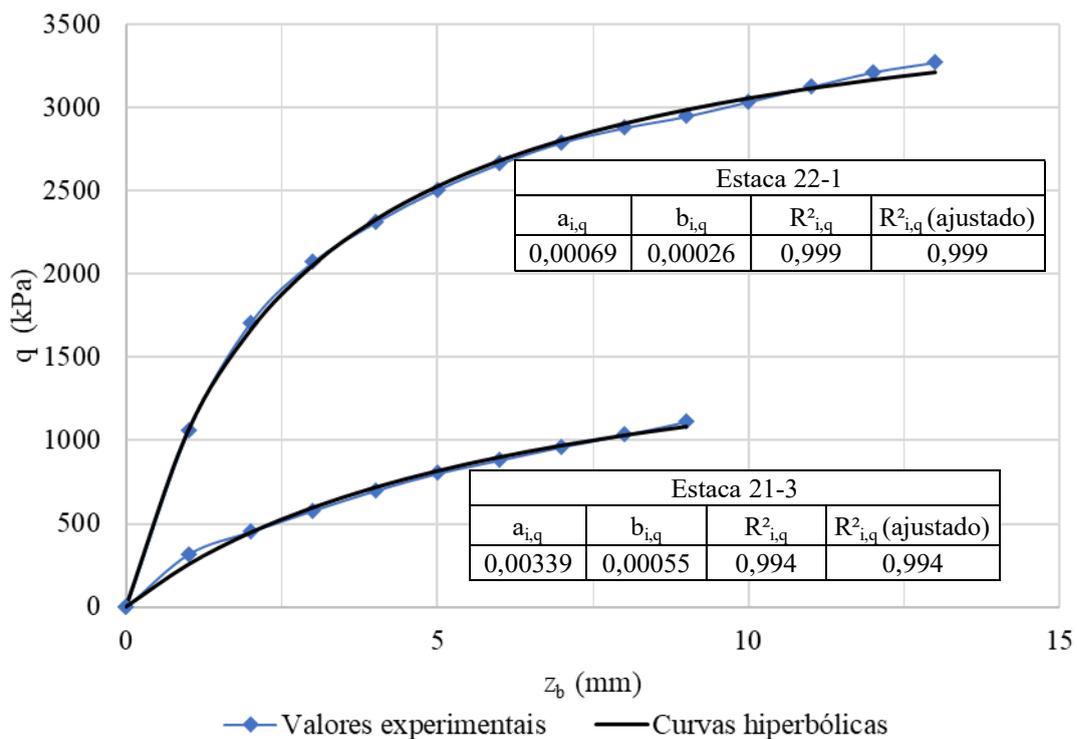
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura A.91 – Curvas t-z experimentais e hiperbólicas das estacas 21-3 de Krasinski (2011) e 22-1 de Krasinski (2012)



Fonte: Elaborado pelo Autor

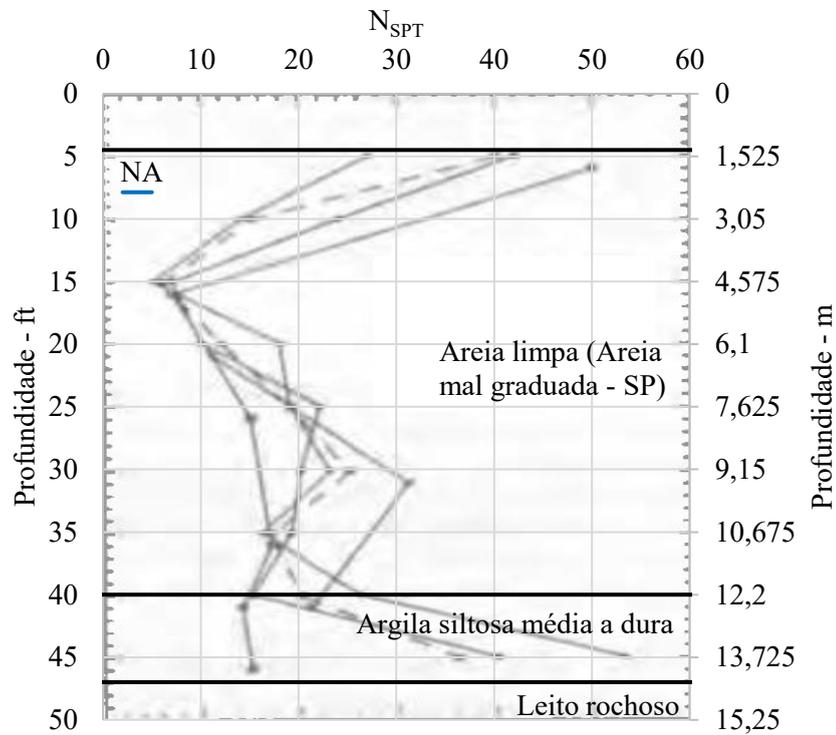
Figura A.92 – Curvas q-z experimentais e hiperbólicas das estacas 21-3 de Krasinski (2011) e 22-1 de Krasinski (2012)



Fonte: Elaborado pelo Autor

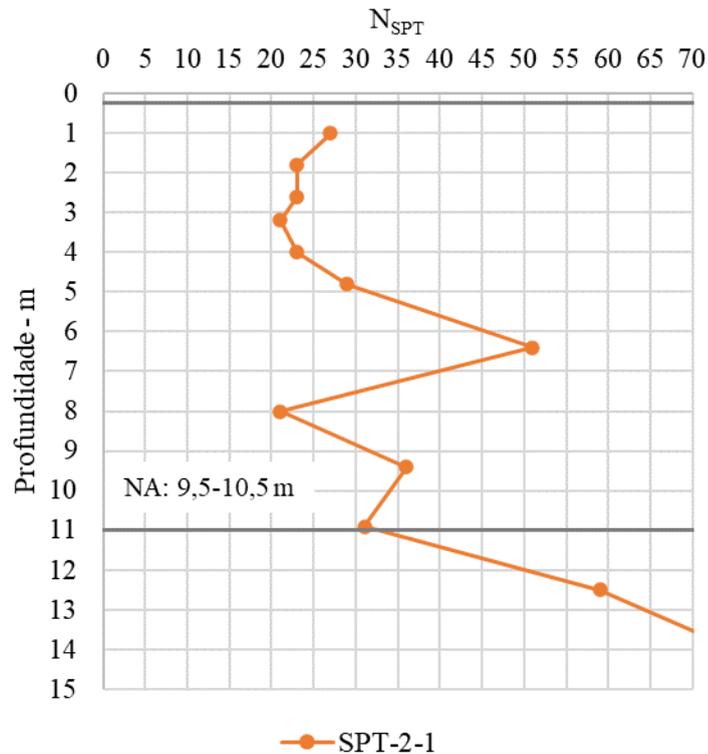
ANEXO A – SONDAGENS À PERCUSSÃO (SPT)

Figura A1 – Sondagens à percussão SPT-1



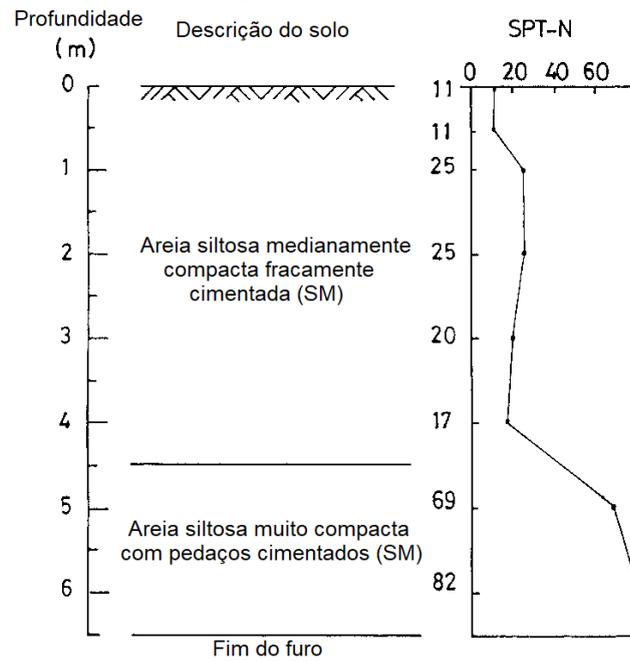
Fonte: Adaptado de Briaud, Tucker e Ng (1989)

Figura A2 – Sondagens à percussão SPT-2-1



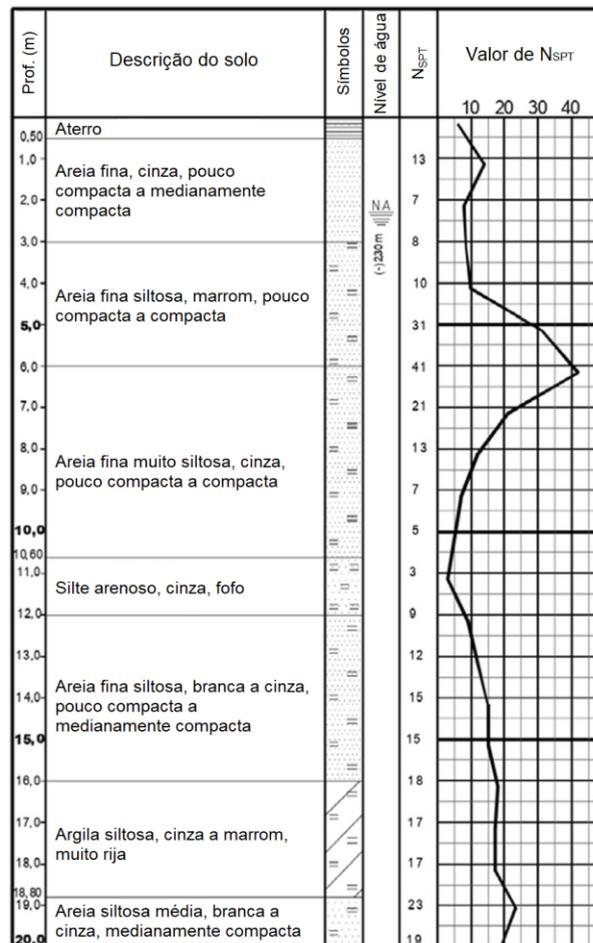
Fonte: Adaptado de Abdllrahem e El Naggari (2020)

Figura A3 – Sondagem à percussão SPT-3



Fonte: Ismael (2001)

Figura A4 – Sondagem à percussão SPT-7



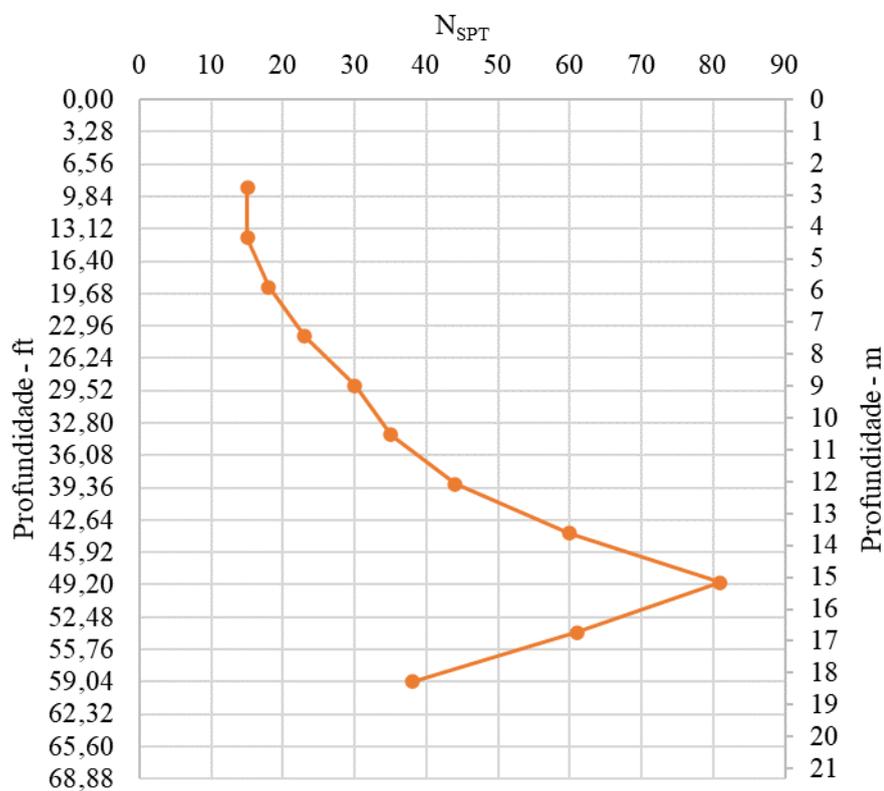
Fonte: Soares, Coutinho e Cunha (2021)

Figura A5 – Sondagem à percussão SPT-8

PROF. (m) DE ATÉ	GOLPES P/15 cm			N _{spt}	GOLPES P/30 cm			PROF. (m) 0,00	DESCRIÇÃO
	1ª	2ª	3ª		2ª + 3ª				
					10	20	30		
0.20 0.65	4	8	7	15					Areia fina siltosa, cor cinza, medianamente compacta.
1.00 1.45	5	5	7	12					1.40 Site arenoso, cor amarelo, medianamente compacto.
2.00 2.45	6	8	7	15					3.00
3.00 3.45	7	9	9	18					
4.00 4.45	7	9	9	18					Site arenoso, cor amarelo com pigmentação vermelha, pouco compacta a medianamente compacto.
5.00 5.45	2	3	2,7	5,7					6.00
6.00 6.45	1	1,9	1,5	3,4					
7.00 7.45	1,9	1,8	1,7	3,5					7.51 Site arenoso, cor variegado, fofo.

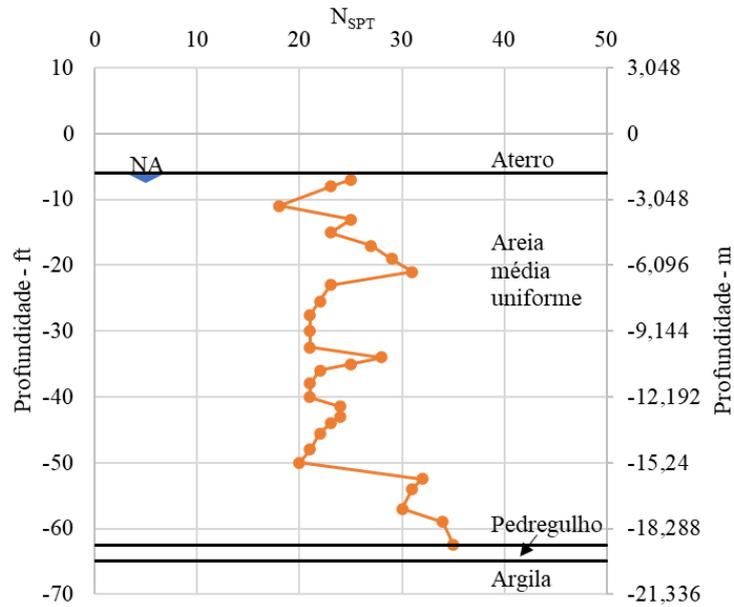
Fonte: Bonan (2017)

Figura A6 – Sondagem à percussão SPT-10



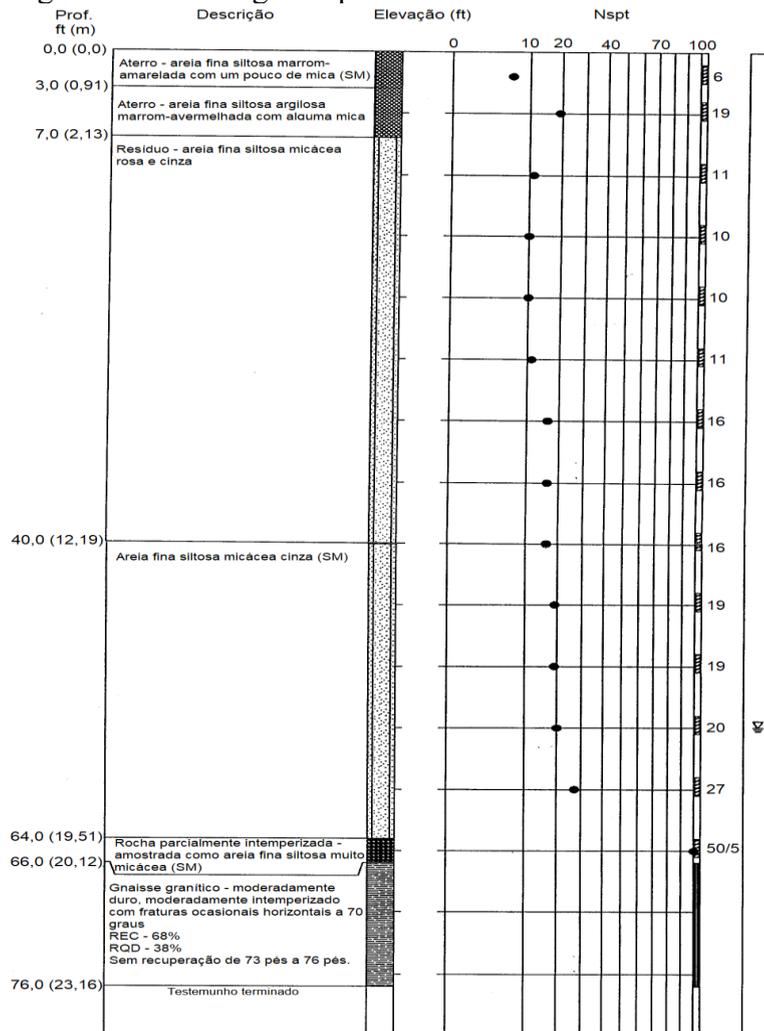
Fonte: Adaptado de Tucker e Briaud (1988)

Figura A7 – Sondagem à percussão SPT-11



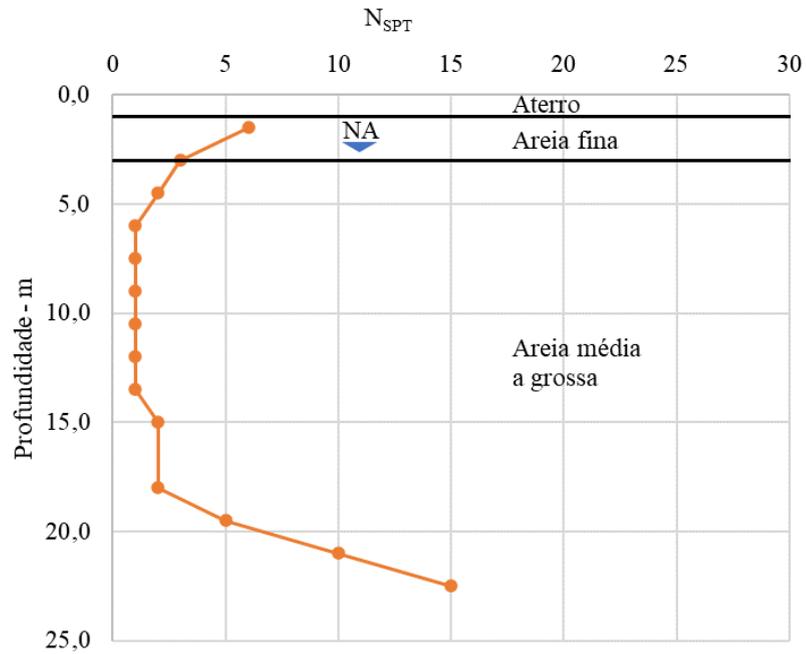
Fonte: Adaptado de Tavenas (1971)

Figura A8 – Sondagem à percussão SPT-14



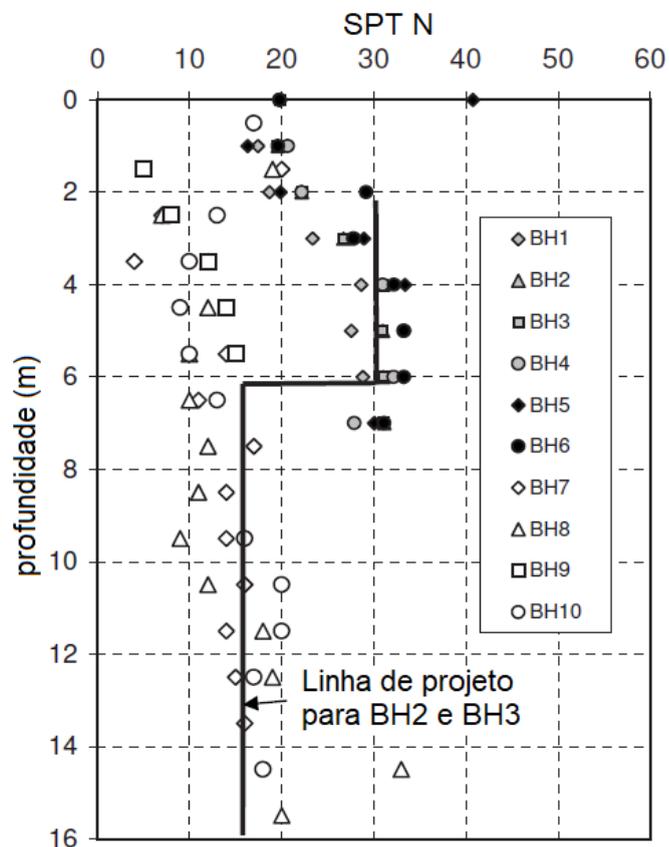
Fonte: Mayne e Harris (1993)

Figura A9 – Sondagem à percussão SPT-15



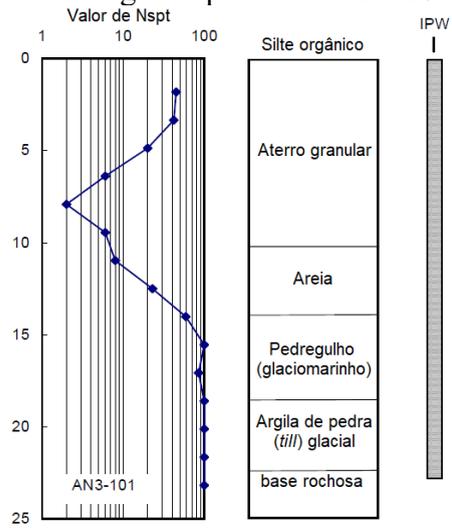
Fonte: Adaptado de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)

Figura A10 – Sondagem à percussão SPT-17 (média de BH2 e BH3)



Fonte: Gavin, Cadogan e Casey (2009)

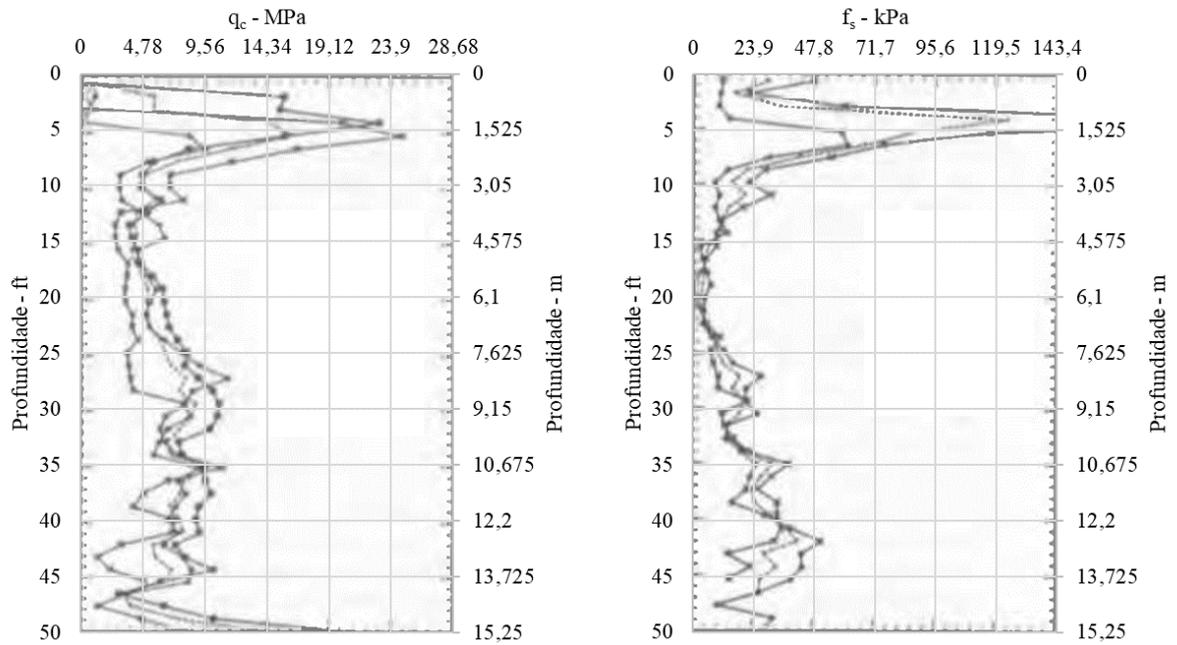
Figura A11 – Sondagem à percussão SPT-20



Fonte: Bradshaw e Baxter (2006)

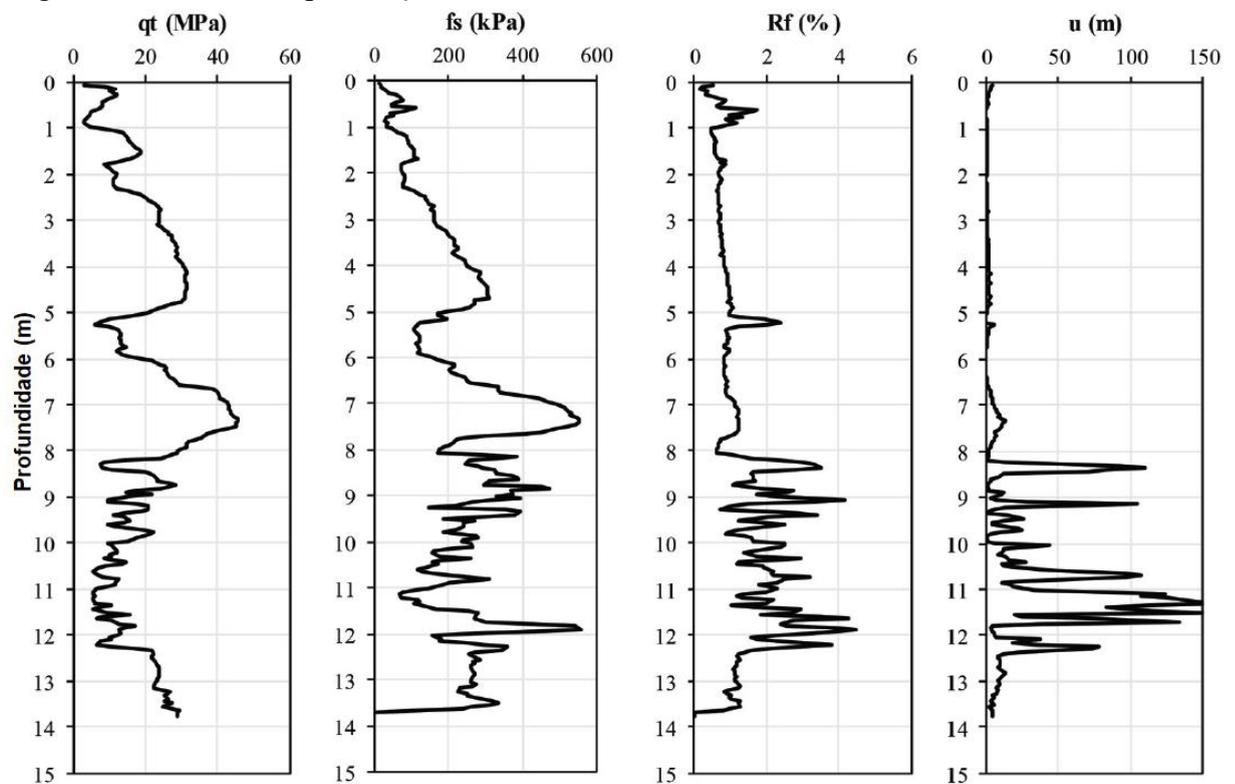
ANEXO B – ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DO CONE (CPT)

Figura B1 – Ensaio de penetração do cone CPT-1



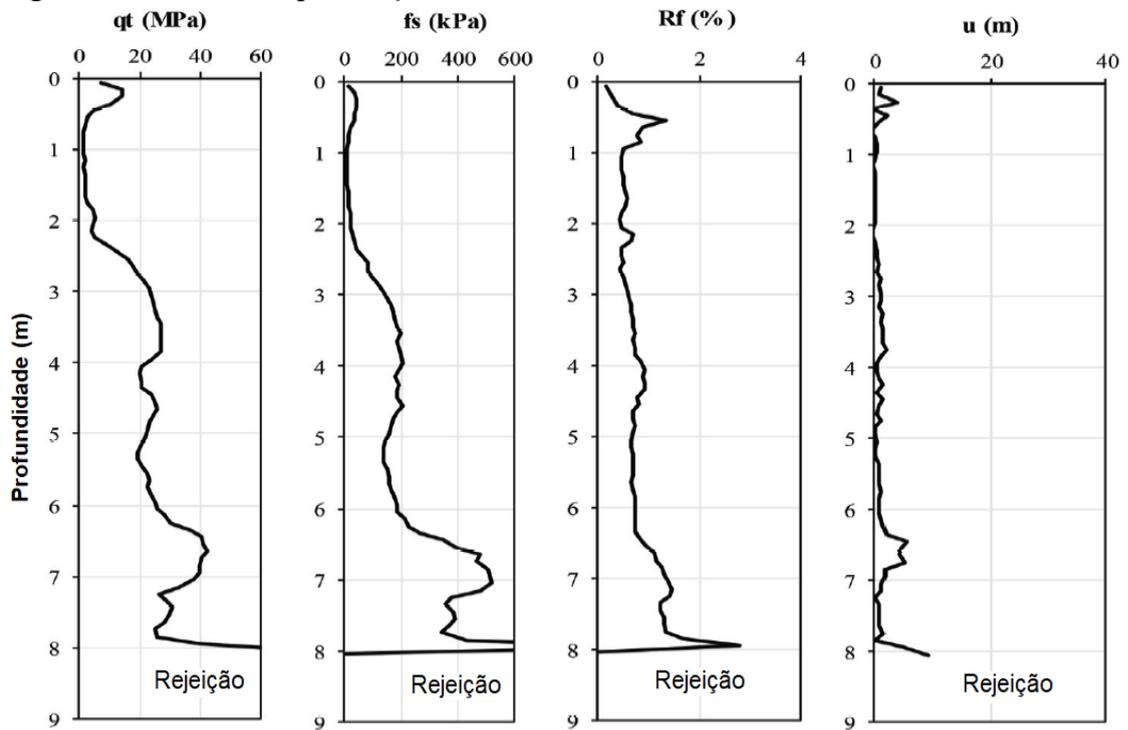
Fonte: Adaptado de Briaud, Tucker e Ng (1989)

Figura B2 – Ensaio de penetração do cone CPT-2-1



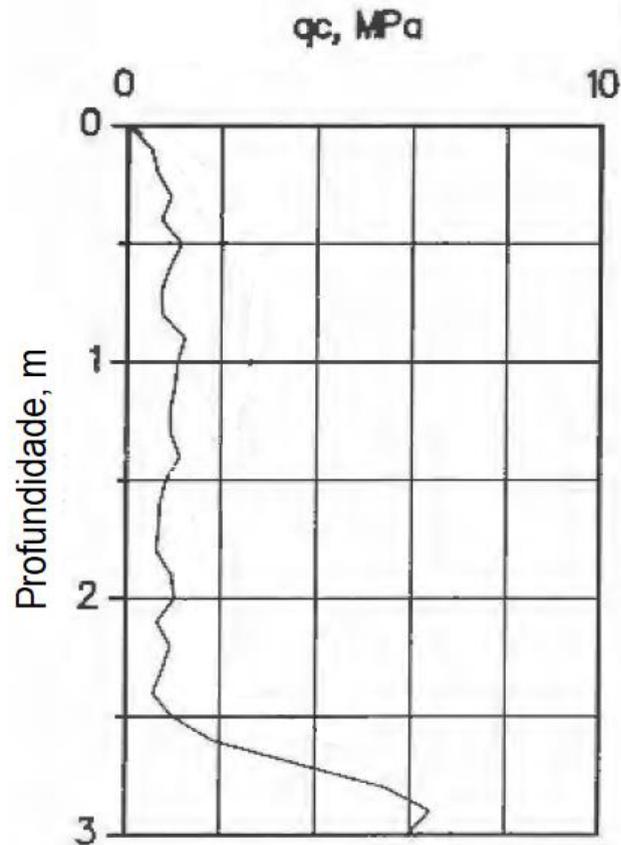
Fonte: Abdrahem e El Naggar (2020)

Figura B3 – Ensaio de penetração do cone CPT-2-2



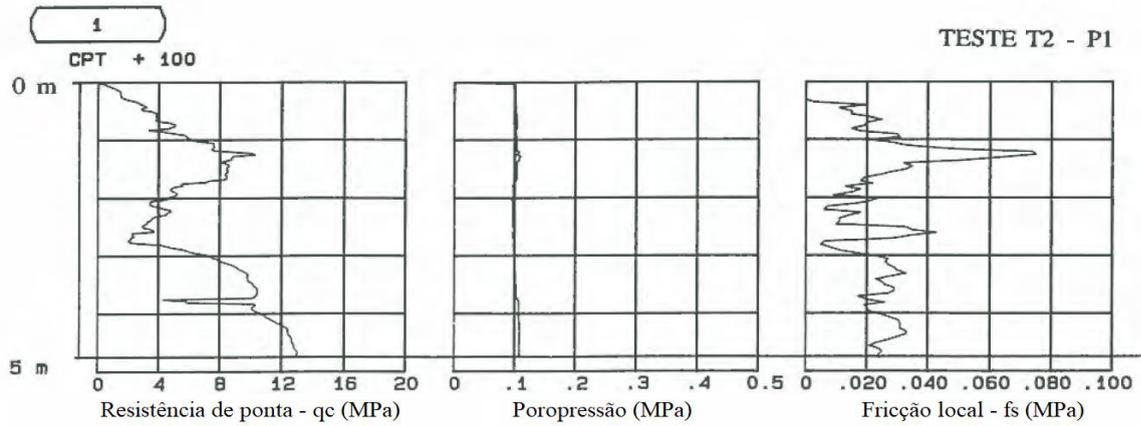
Fonte: Abdrahem e El Naggar (2020)

Figura B4 – Ensaio CPT mecânico CPT-4-1



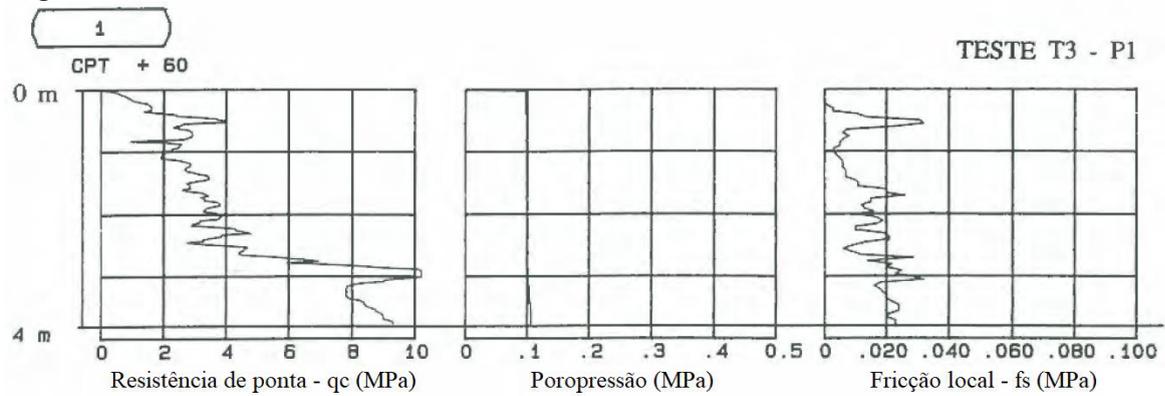
Fonte: Long (1993)

Figura B5 – Ensaio CPTu elétrico CPT-4-2



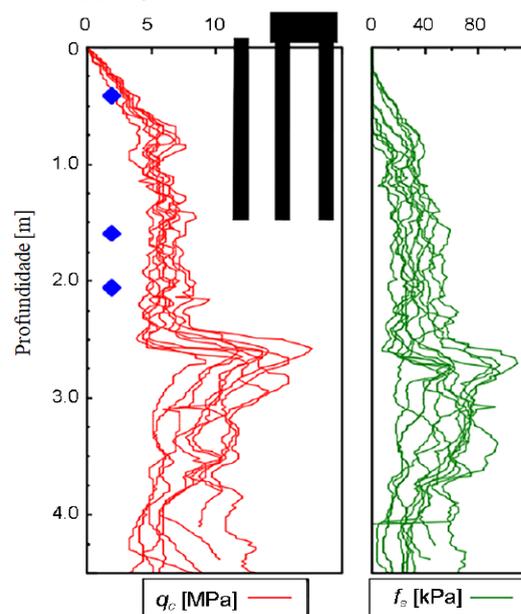
Fonte: Long (1993)

Figura B6 – Ensaio CPTu elétrico CPT-4-3



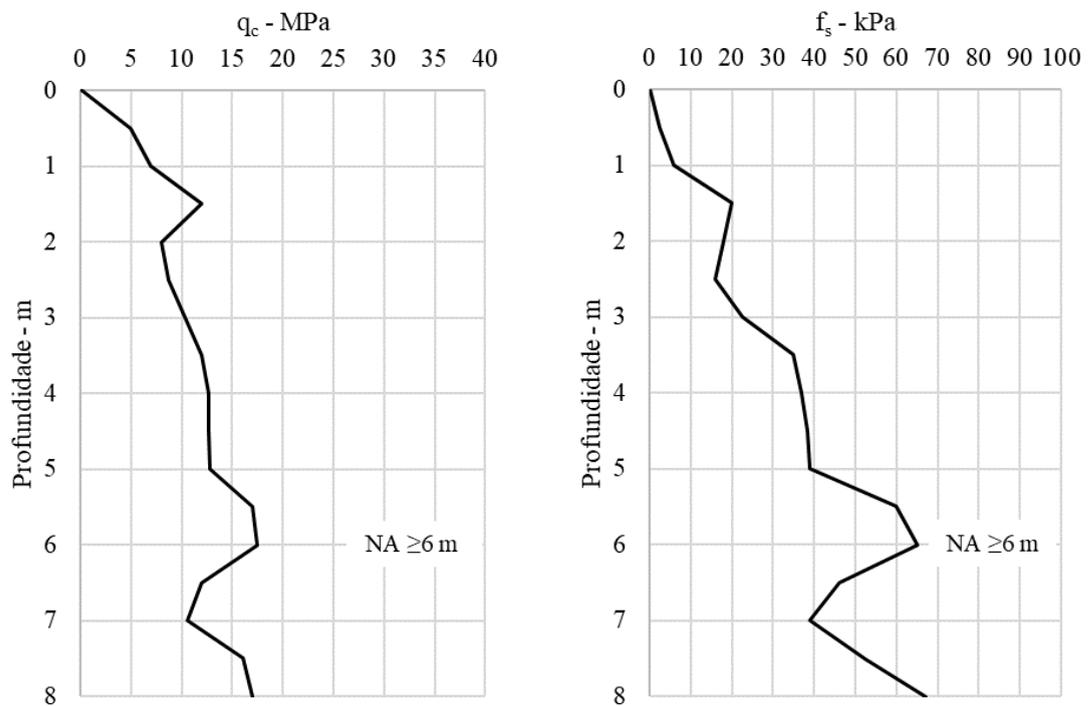
Fonte: Long (1993)

Figura B7 – Ensaios de penetração do cone CPT-5



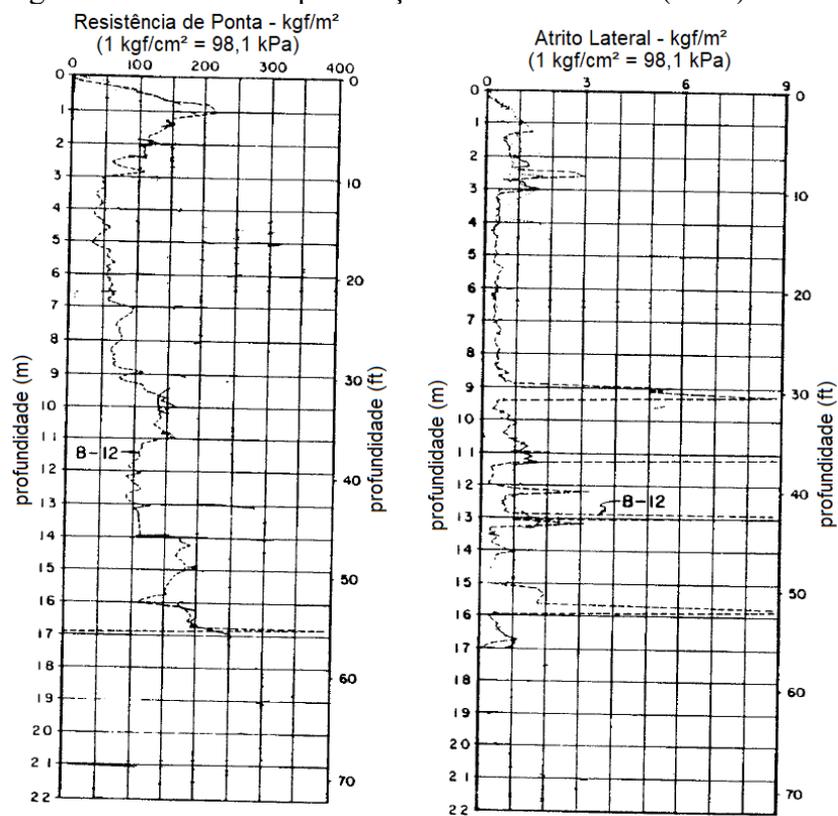
Fonte: Norkus e Martinkus (2019)

Figura B8 – Ensaio de penetração do cone CPT-9



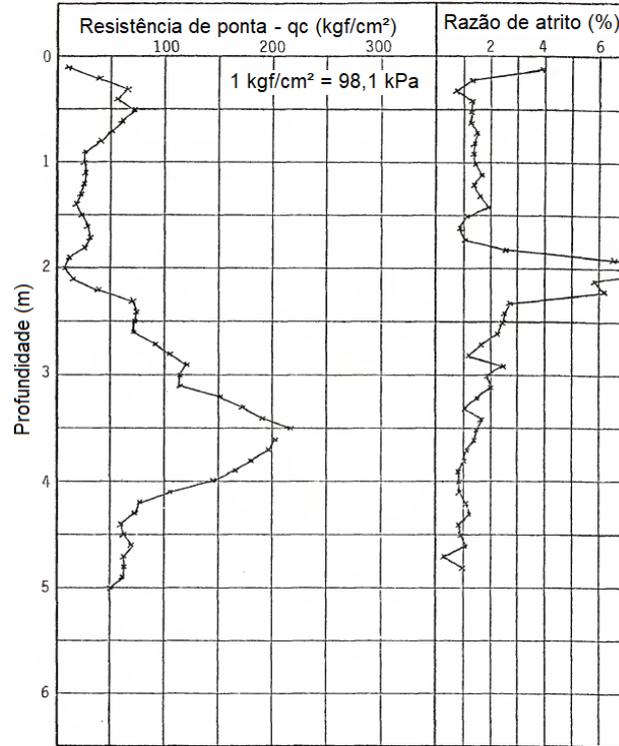
Fonte: Modificado de Foglia *et al.* (2021)

Figura B9 – Ensaio de penetração do cone CPT-10 (B-12)



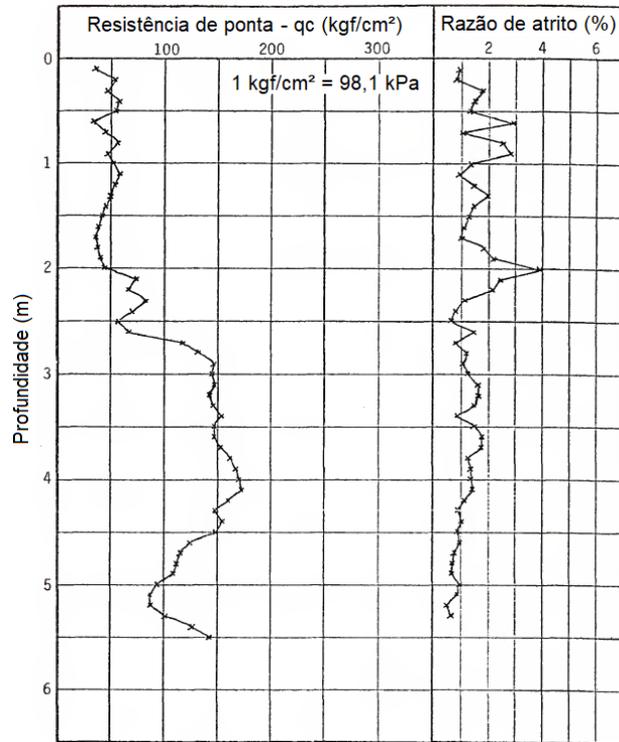
Fonte: Tucker e Briaud (1988)

Figura B10 – Ensaio de penetração do cone CPT-13-1



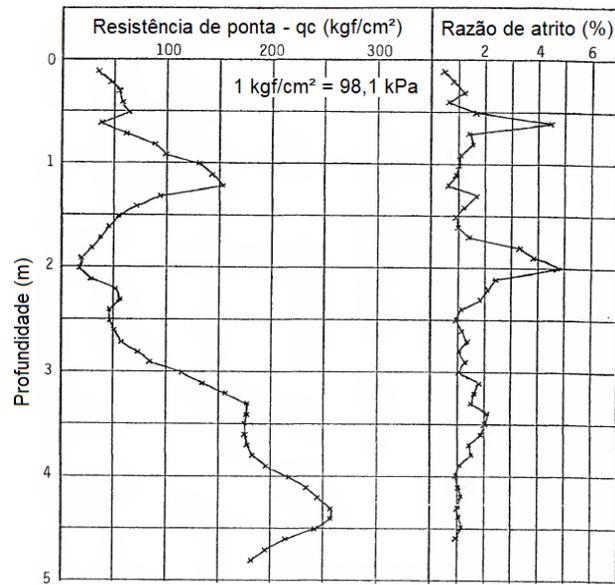
Fonte: Nottingham (1975)

Figura B11 – Ensaio de penetração do cone CPT-13-2



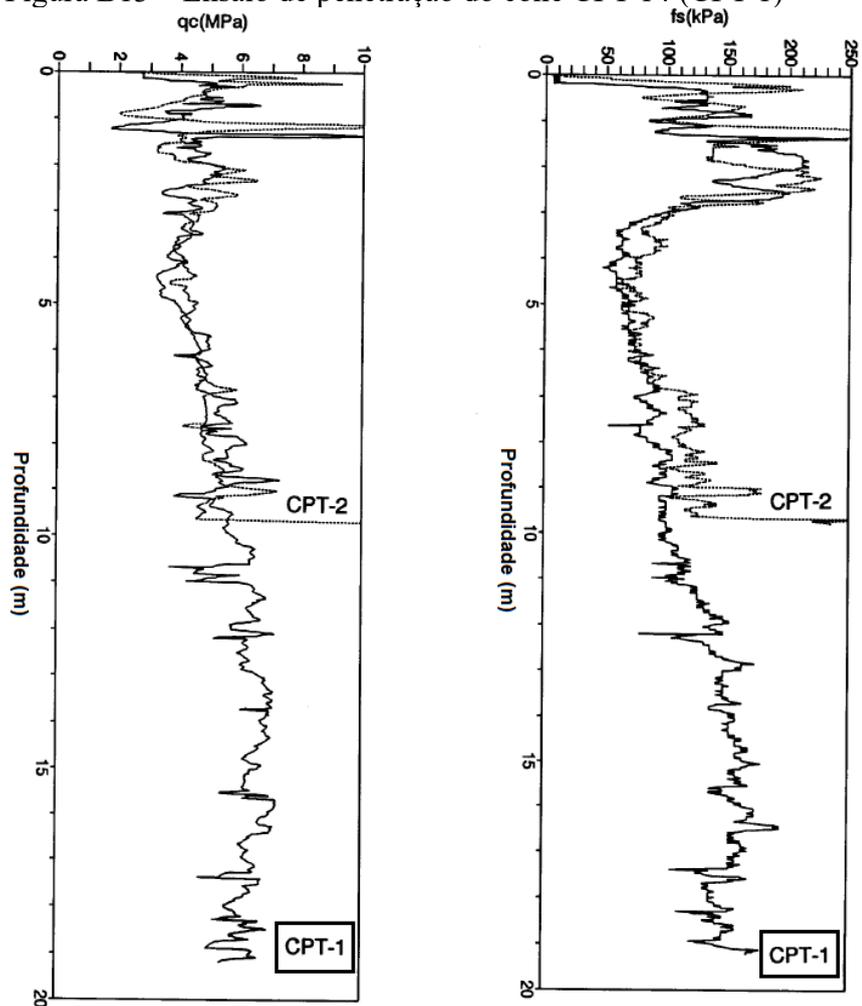
Fonte: Nottingham (1975)

Figura B12 – Ensaio de penetração do cone CPT-13-3



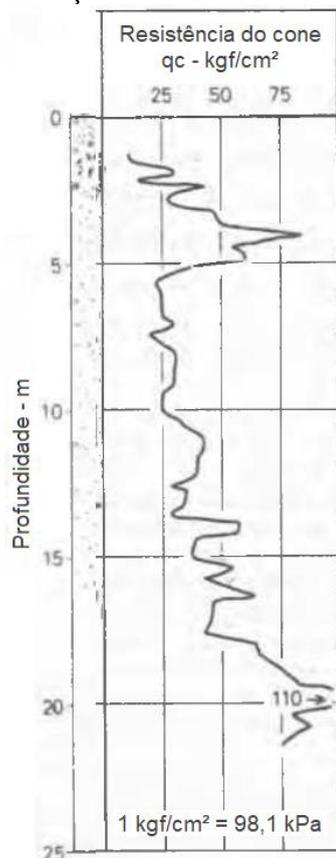
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura B13 – Ensaio de penetração do cone CPT-14 (CPT-1)



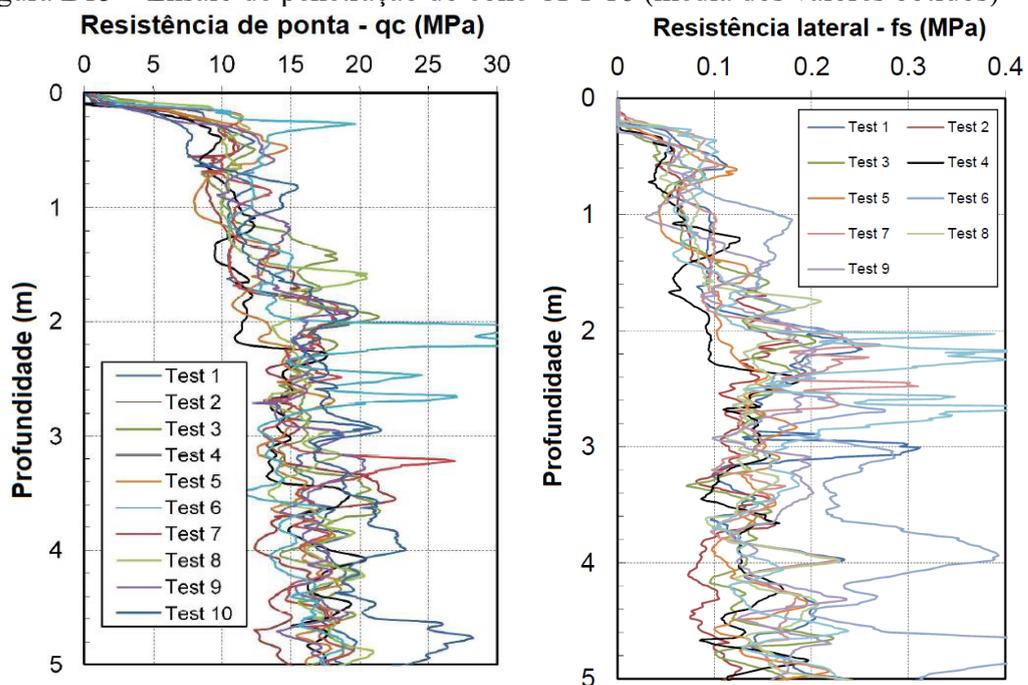
Fonte: Mayne e Harris (1993)

Figura B14 – Ensaio de penetração do cone CPT-15



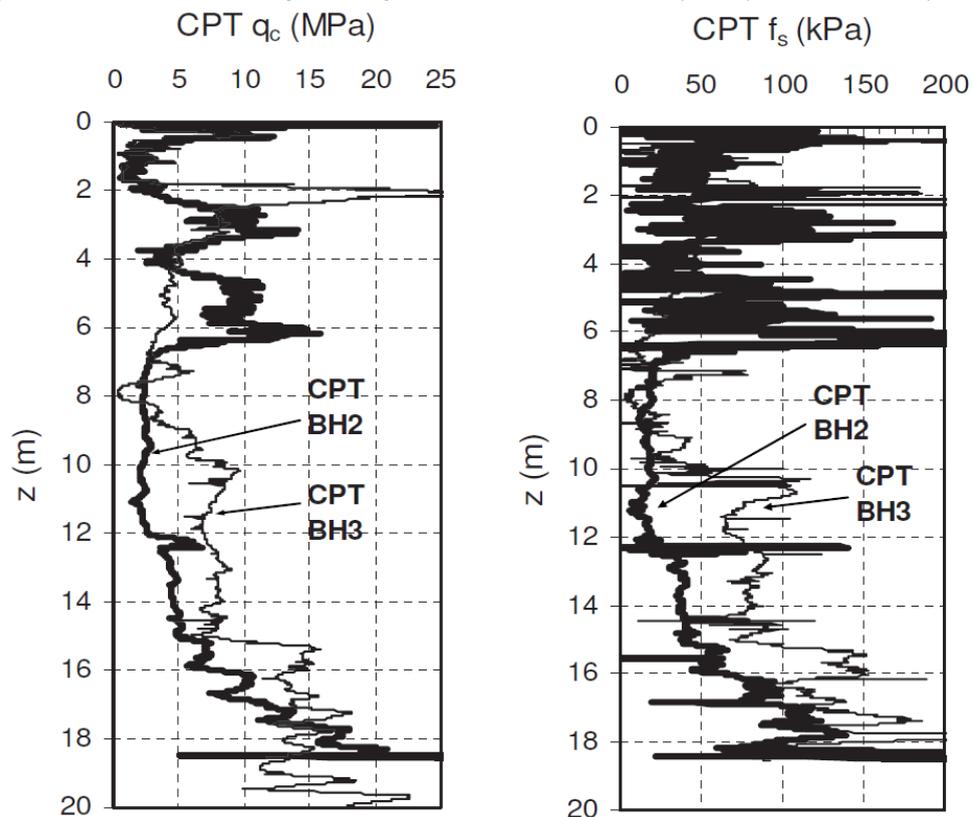
Fonte: Adaptado de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)

Figura B15 – Ensaio de penetração do cone CPT-16 (média dos valores obtidos)



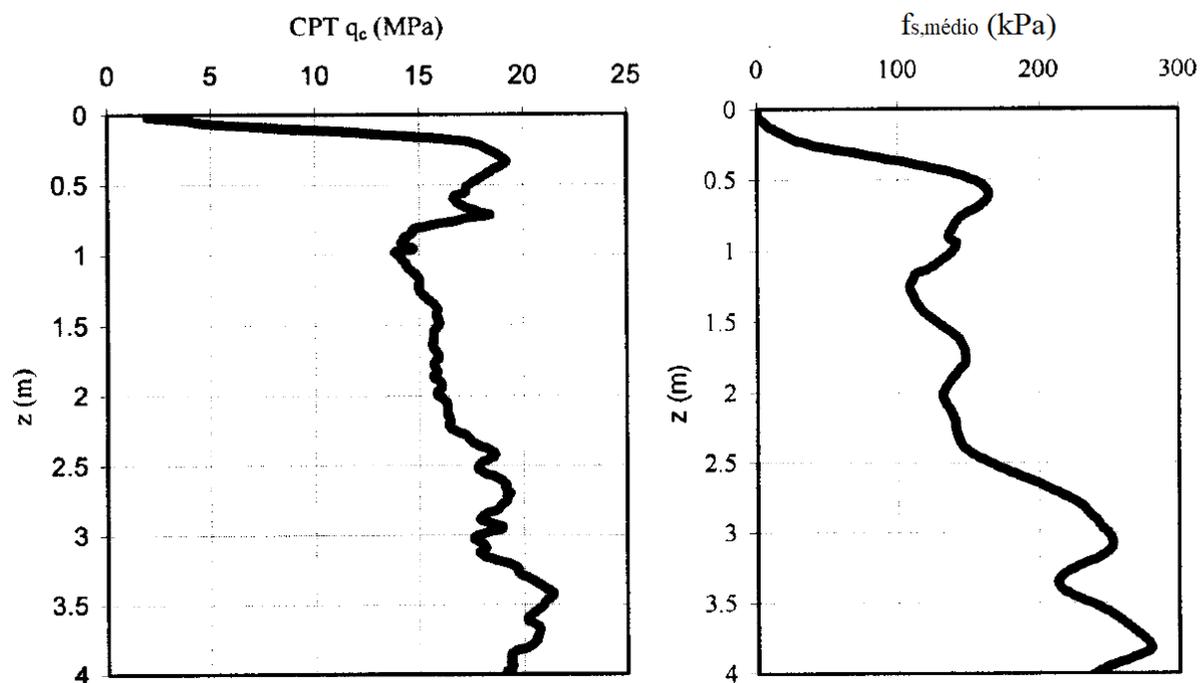
Fonte: Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014)

Figura B16 – Ensaio de penetração do cone CPT-17-1 (BH2) e CPT-17-2 (BH3)



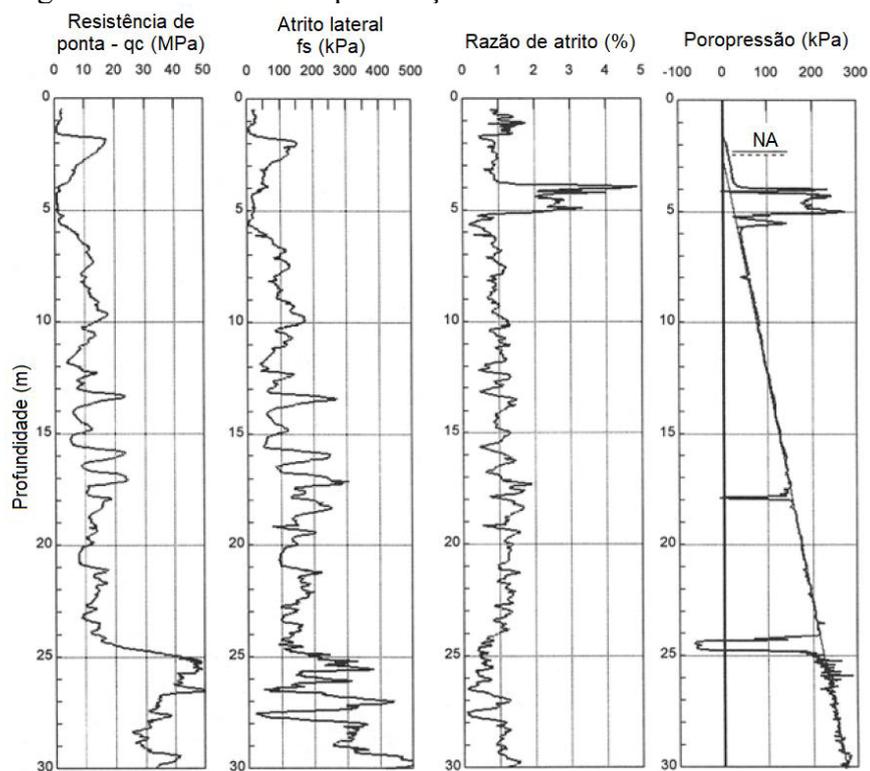
Fonte: Gavin, Cadogan e Casey (2009)

Figura B17 – Ensaio de penetração do cone CPT-18



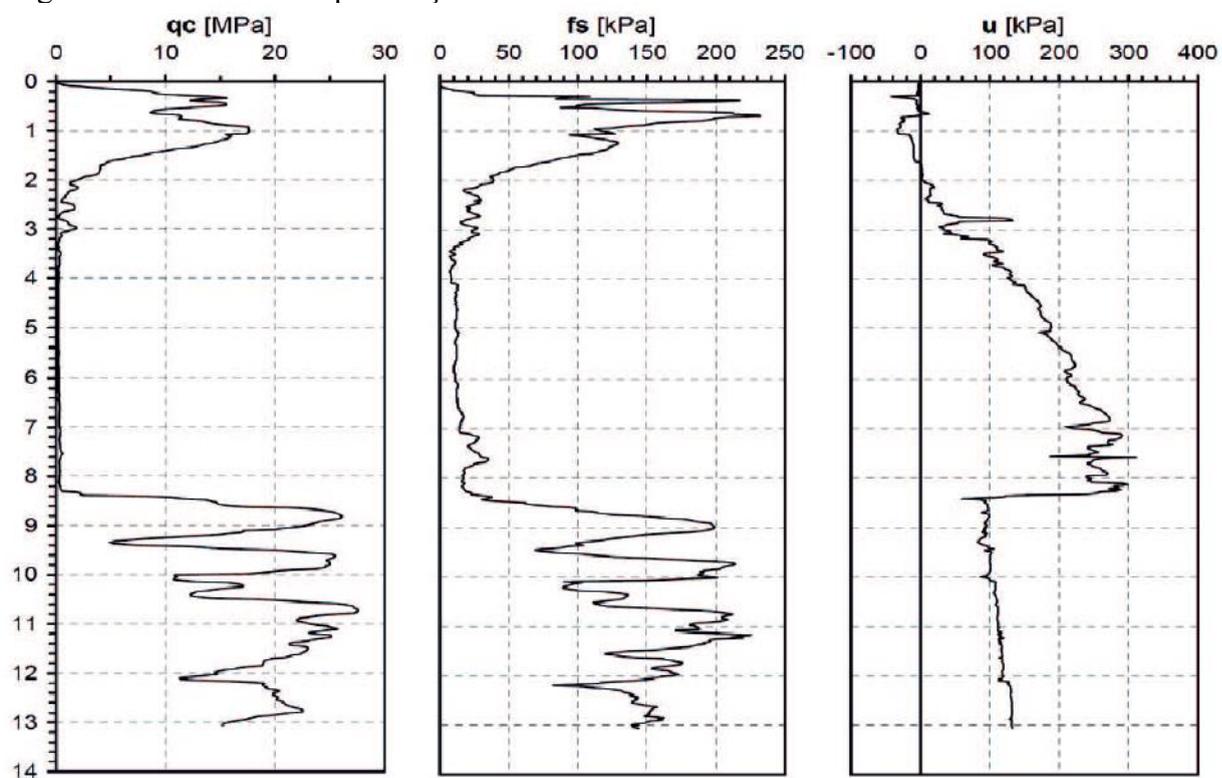
Fonte: Gavin e O'Kelly (2007)

Figura B18 – Ensaios de penetração do cone CPT-19



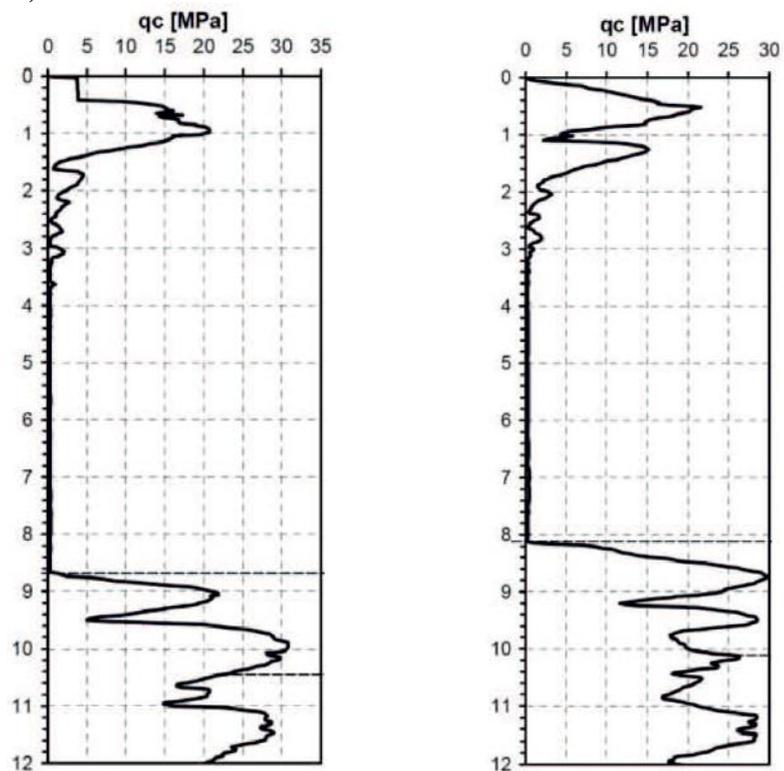
Fonte: Fellenius, Brusey e Pepe (2000)

Figura B19 – Ensaios de penetração do cone CPT-21-1



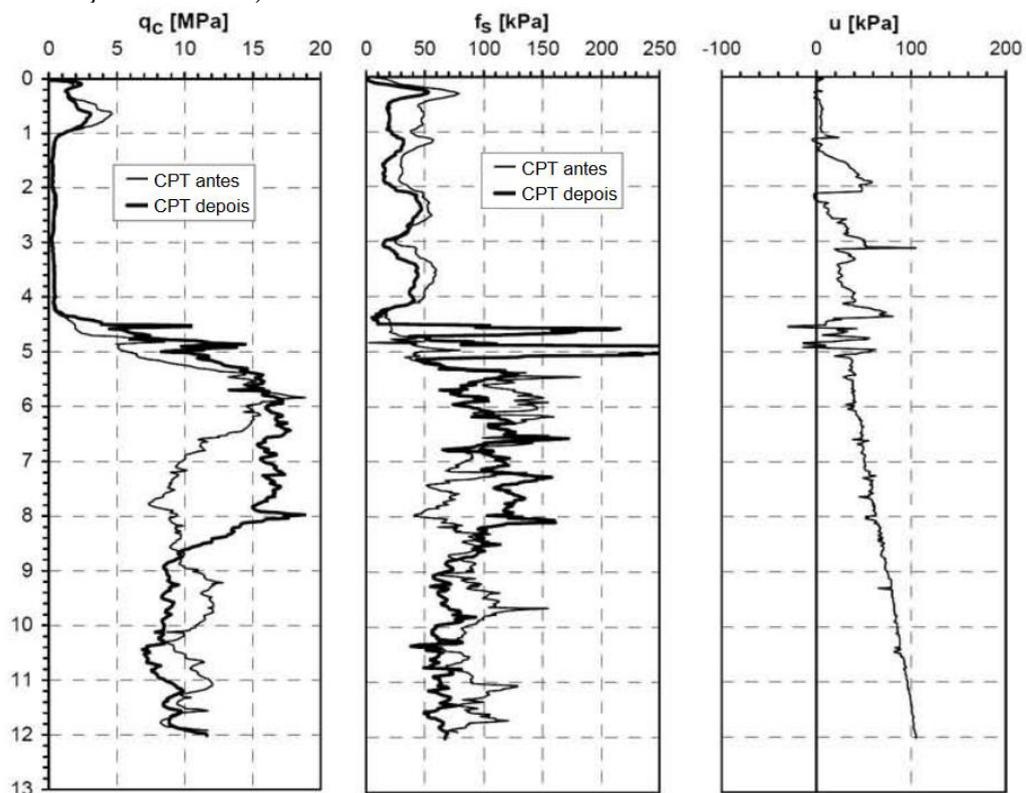
Fonte: Krasinski (2011)

Figura B20 – Ensaio de penetração do cone: a) CPT-21-2;
b) CPT-21-3



Fonte: Krasinski (2011)

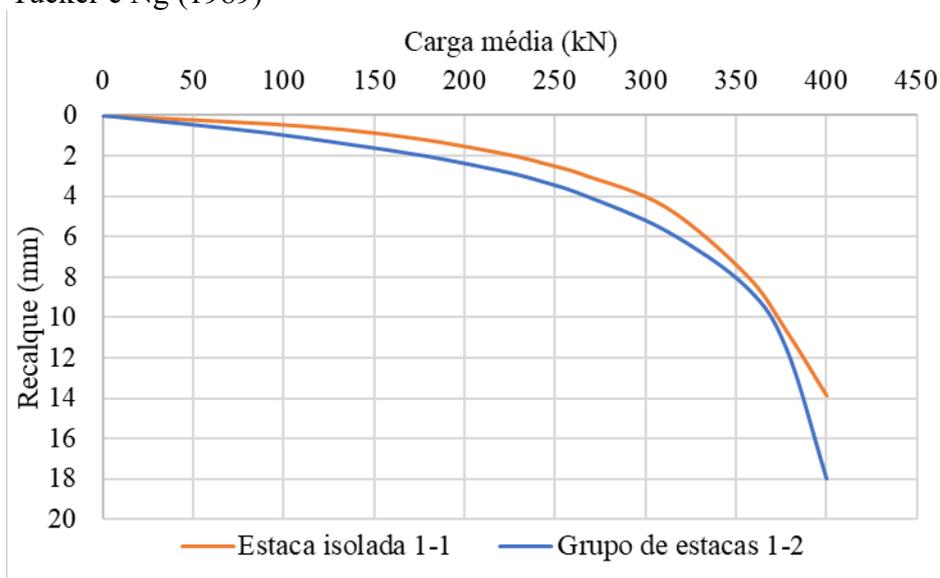
Figura B21 – Ensaio de penetração do cone CPT-22-1 (CPT antes da execução da estaca)



Fonte: Krasinski (2011a)

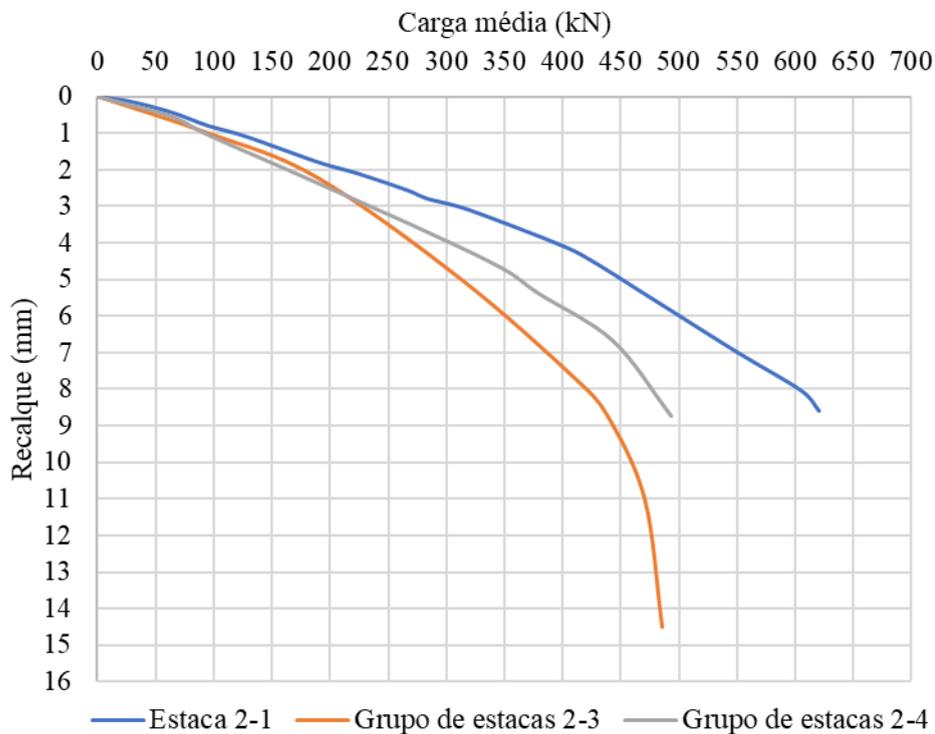
ANEXO C – PROVAS DE CARGAS

Figura C1 – Curvas carga média x recalque das provas de carga de Briaud, Tucker e Ng (1989)



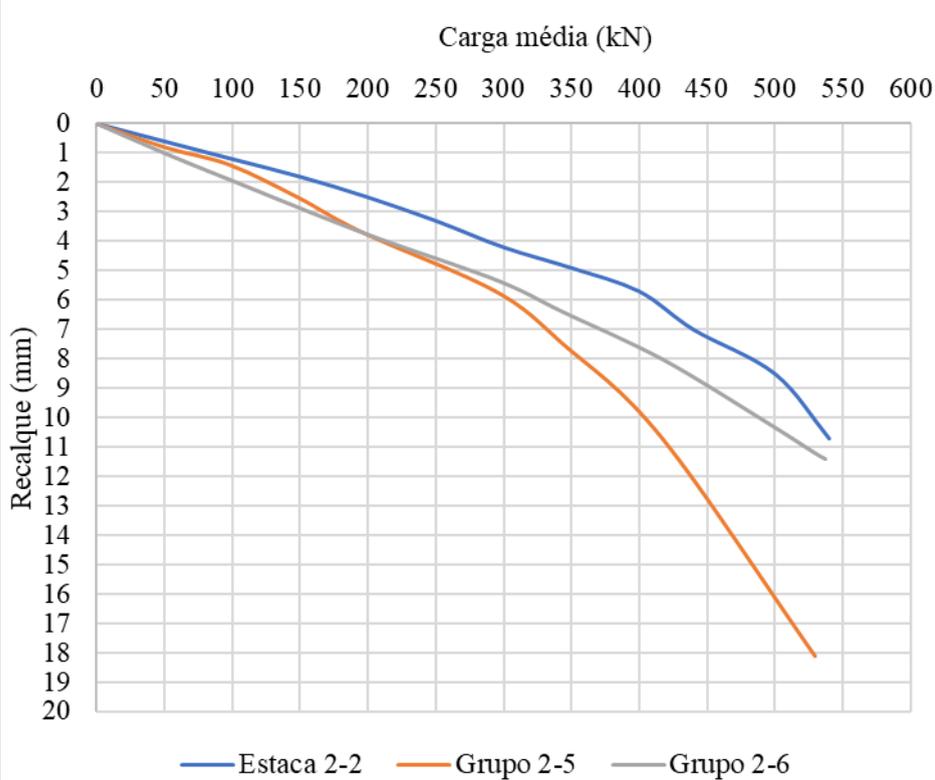
Fonte: Adaptado de Briaud, Tucker e Ng (1989)

Figura C2 – Curvas carga média x recalque da estaca 2-1 e grupos 2-3 e 2-4



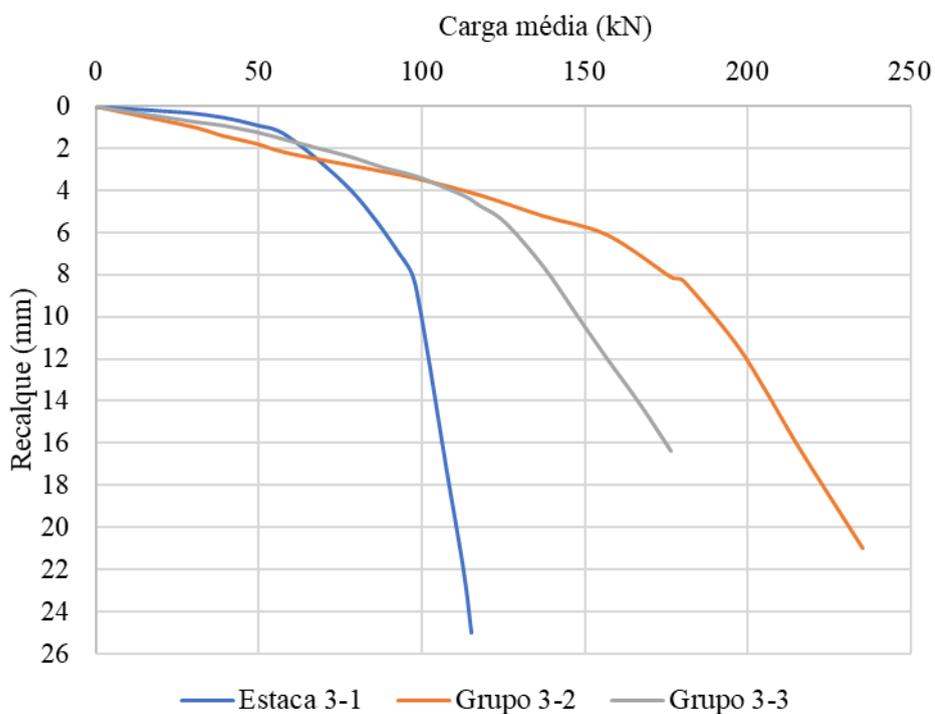
Fonte: Adaptado de Abdllahem e El Naggar (2020)

Figura C3 – Curvas carga média x recalque da estaca 2-2 e grupos 2-5 e 2-6



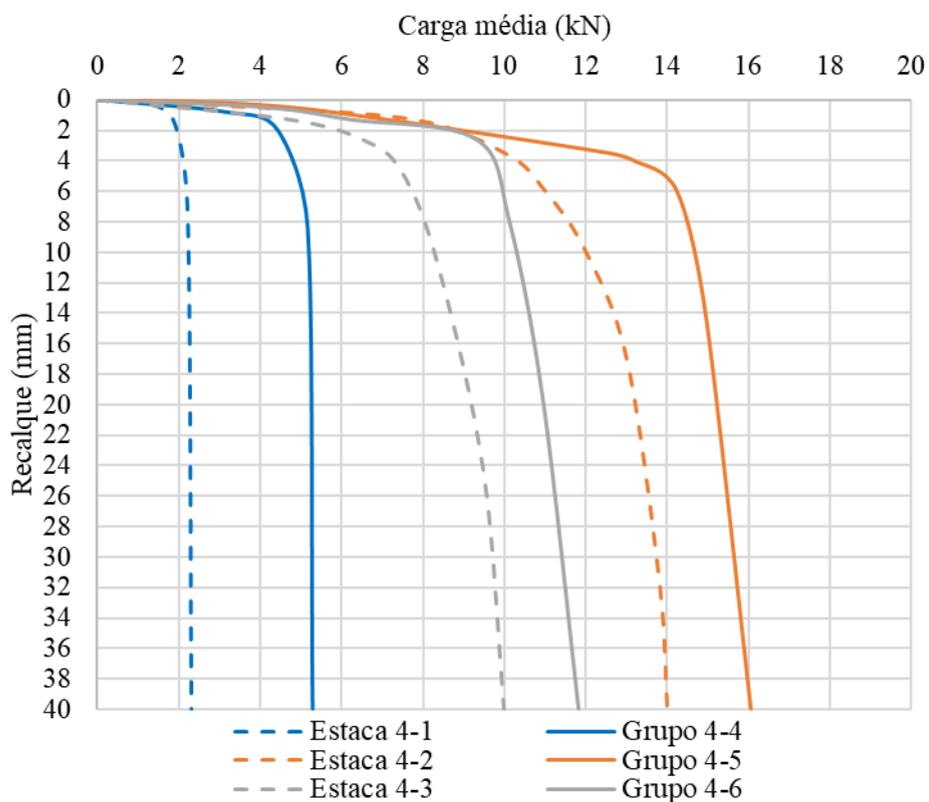
Fonte: Adaptado de Abdrahem e El Naggar (2020)

Figura C4 – Curvas carga média x recalque da estaca 3-1 e grupos 3-2 e 3-3



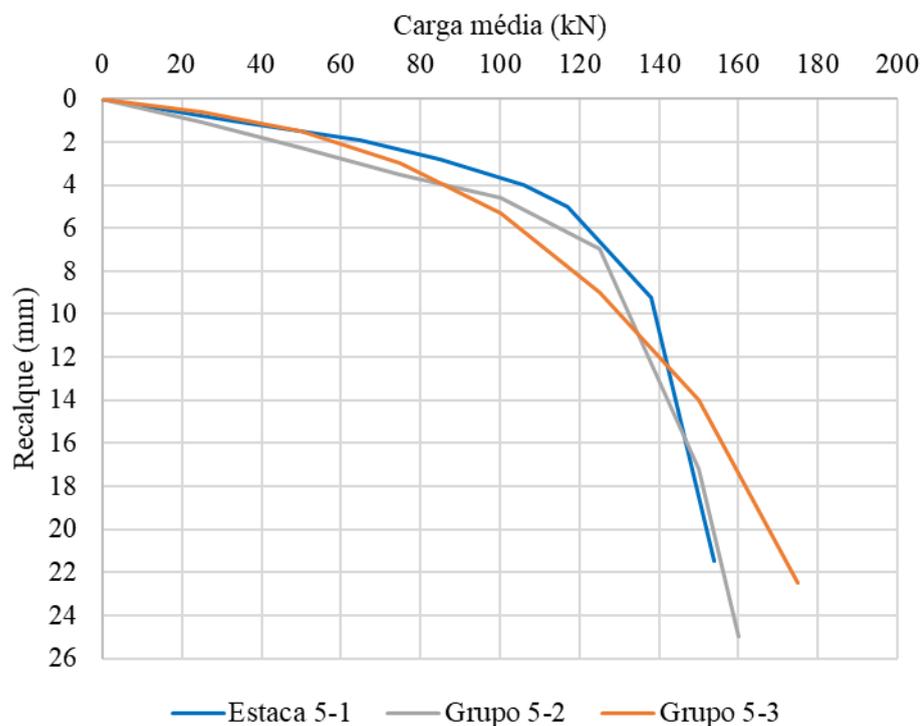
Fonte: Adaptado de Ismael (2001)

Figura C5 – Curvas carga média x recalque das estacas e grupo de estacas de Long (1993)



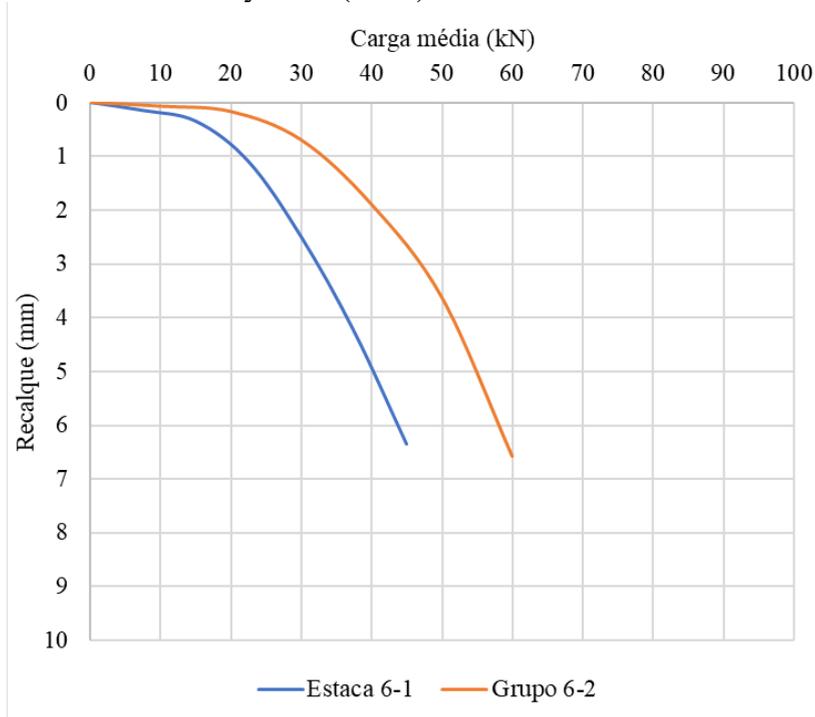
Fonte: Long (1993)

Figura C6 – Curvas carga média x recalque das estacas e grupo de estacas de Norkus e Martinkus (2019)



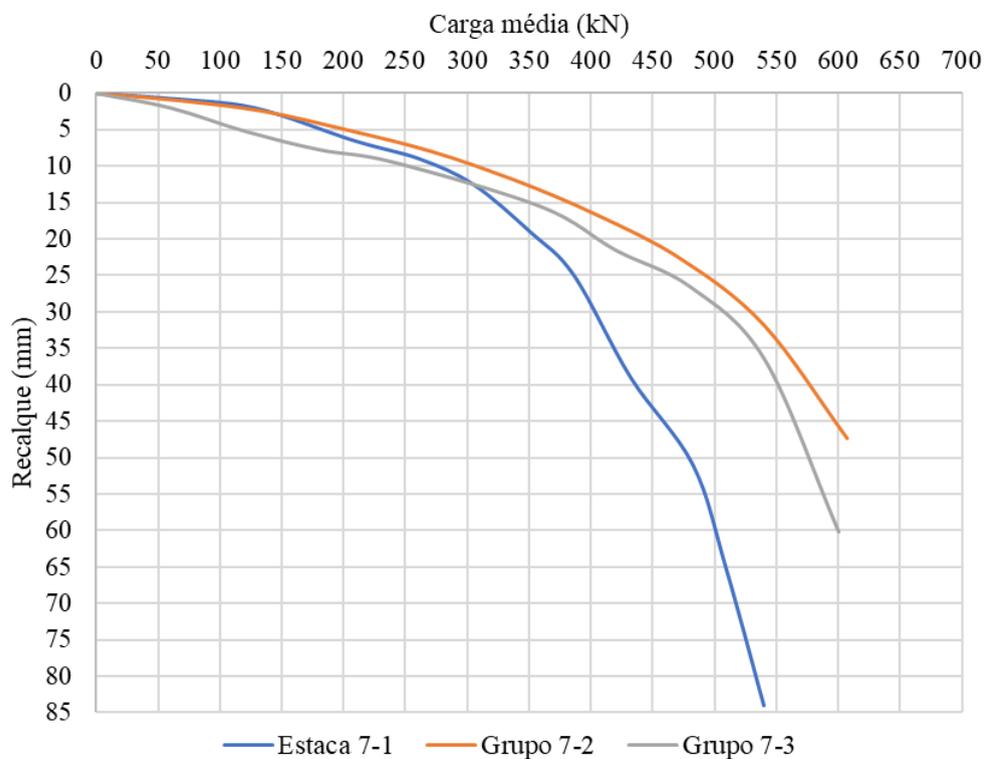
Fonte: Adaptado de Norkus e Martinkus (2019)

Figura C7 – Curvas carga média x recalque da estaca e grupo de estacas de Elsamny *et al.* (2017)



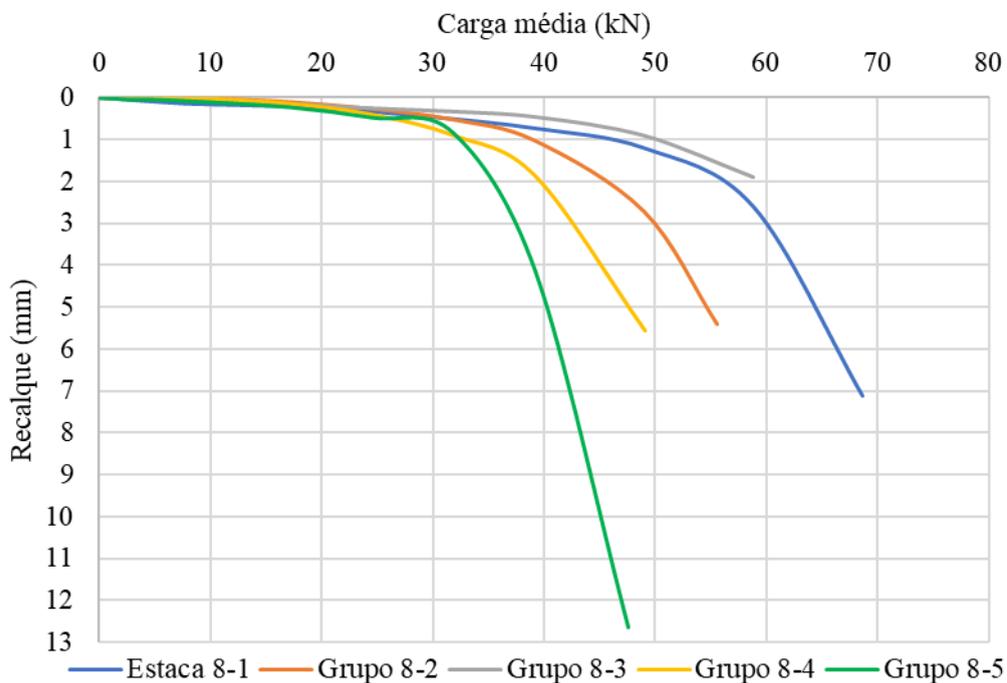
Fonte: Elsamny *et al.* (2017)

Figura C8 – Curvas carga média x recalque da estaca e grupos de estacas de Soares, Coutinho e Cunha (2021)



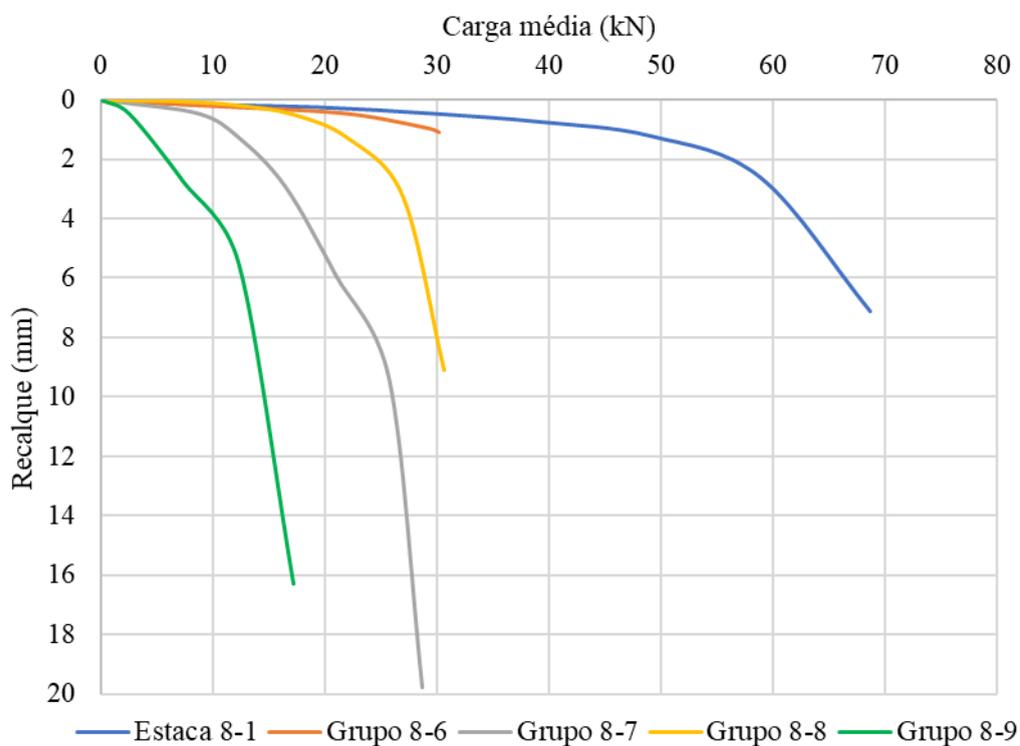
Fonte: Soares, Coutinho e Cunha (2021)

Figura C9 – Curvas carga média x recalque da estaca isolada e grupos de 2 estacas de Melchior Filho, Bonan e Moura (2020)



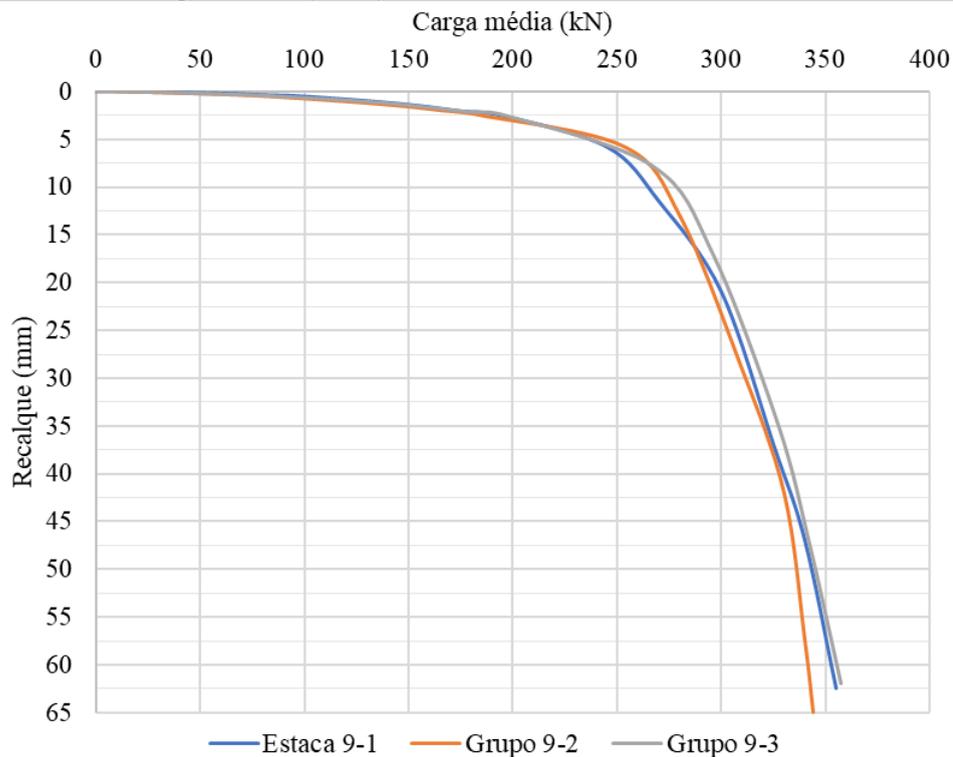
Fonte: Melchior Filho, Bonan e Moura (2020)

Figura C10 – Curvas carga média x recalque da estaca isolada e grupos de 4 estacas de Melchior Filho, Bonan e Moura (2020)



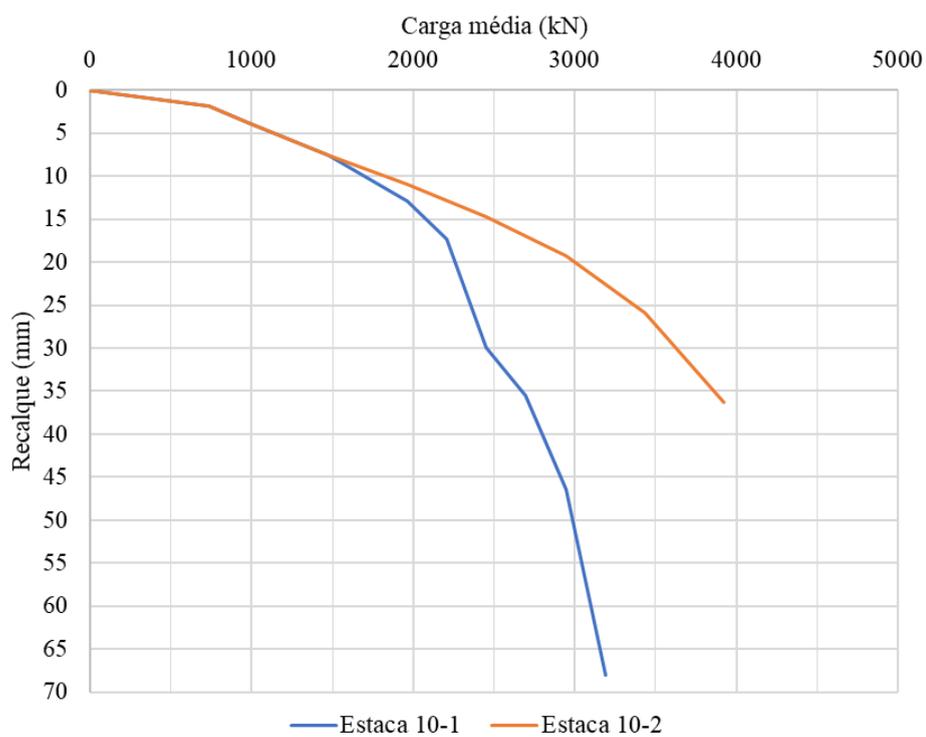
Fonte: Melchior Filho, Bonan e Moura (2020)

Figura C11 – Curvas carga média x recalque da estaca isolada e grupos de estacas de Foglia *et al.* (2021)



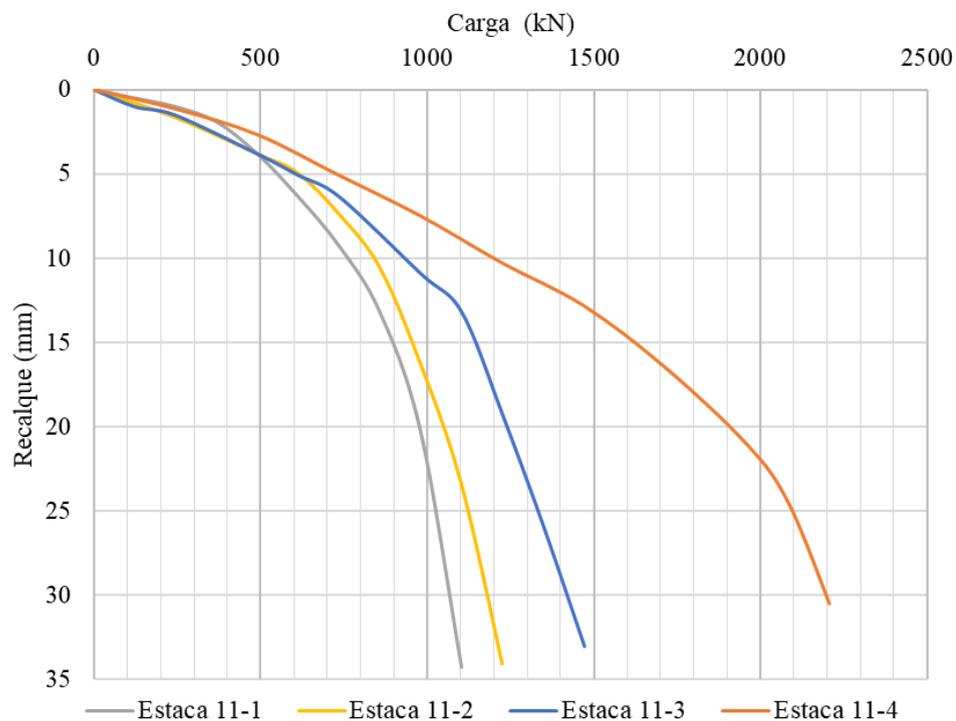
Fonte: Adaptado de Foglia *et al.* (2021)

Figura C12 – Curvas carga x recalque das estacas isoladas de Tucker e Briaud (1988)



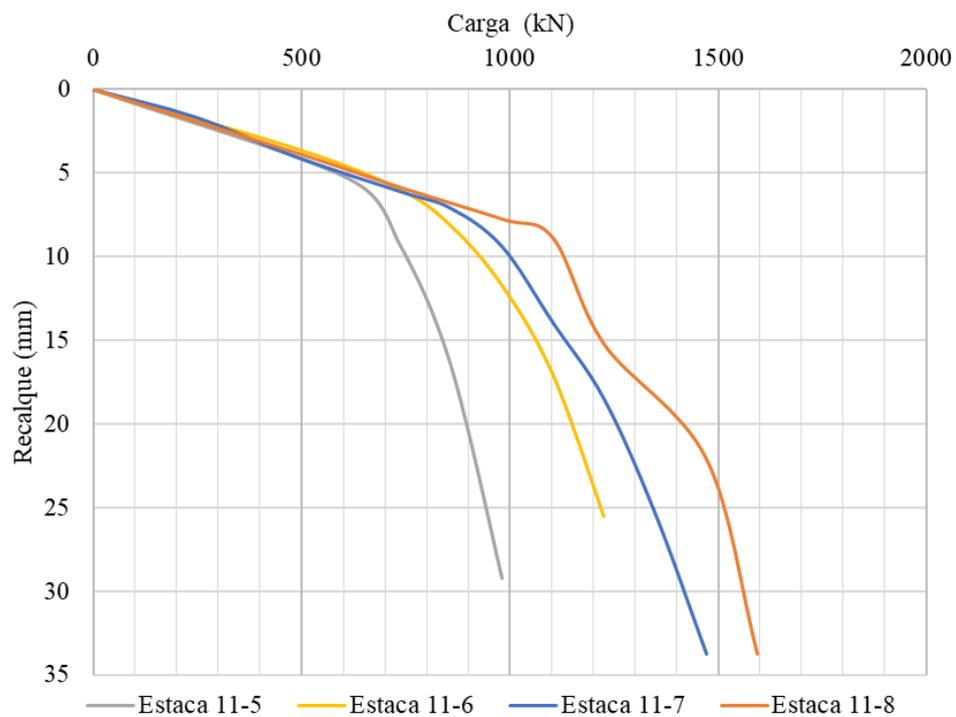
Fonte: Adaptado de Tucker e Briaud (1988)

Figura C13 – Curvas carga x recalque das estacas isoladas 11-1 a 11-4 de Tavenas (1971)



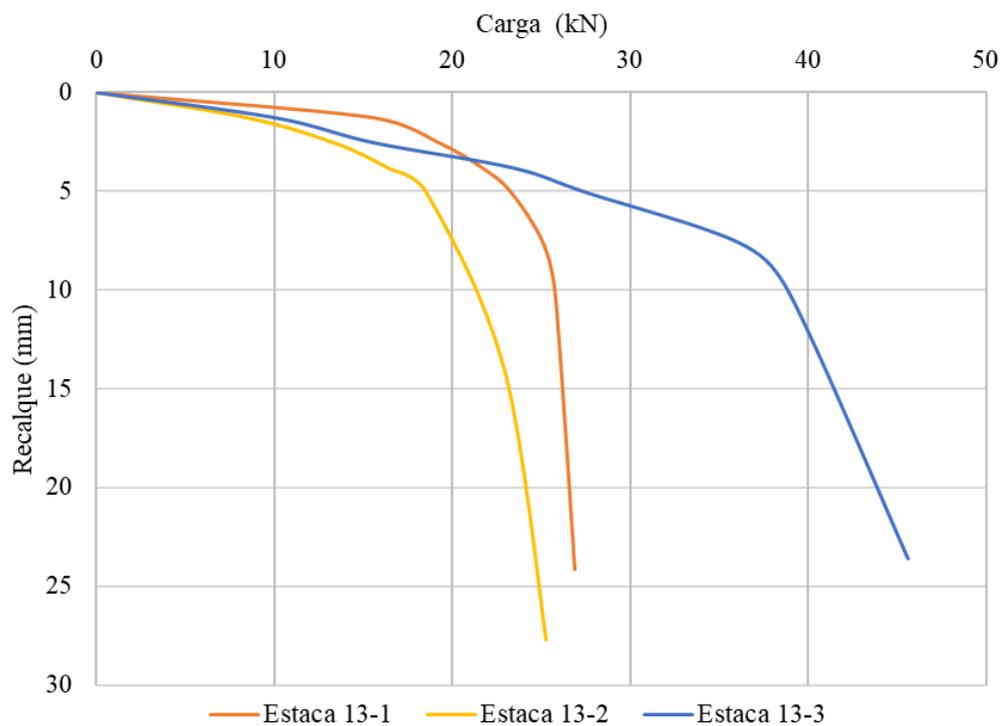
Fonte: Adaptado de Tavenas (1971)

Figura C14 – Curvas carga x recalque das estacas isoladas 11-5 a 11-8 de Tavenas (1971)



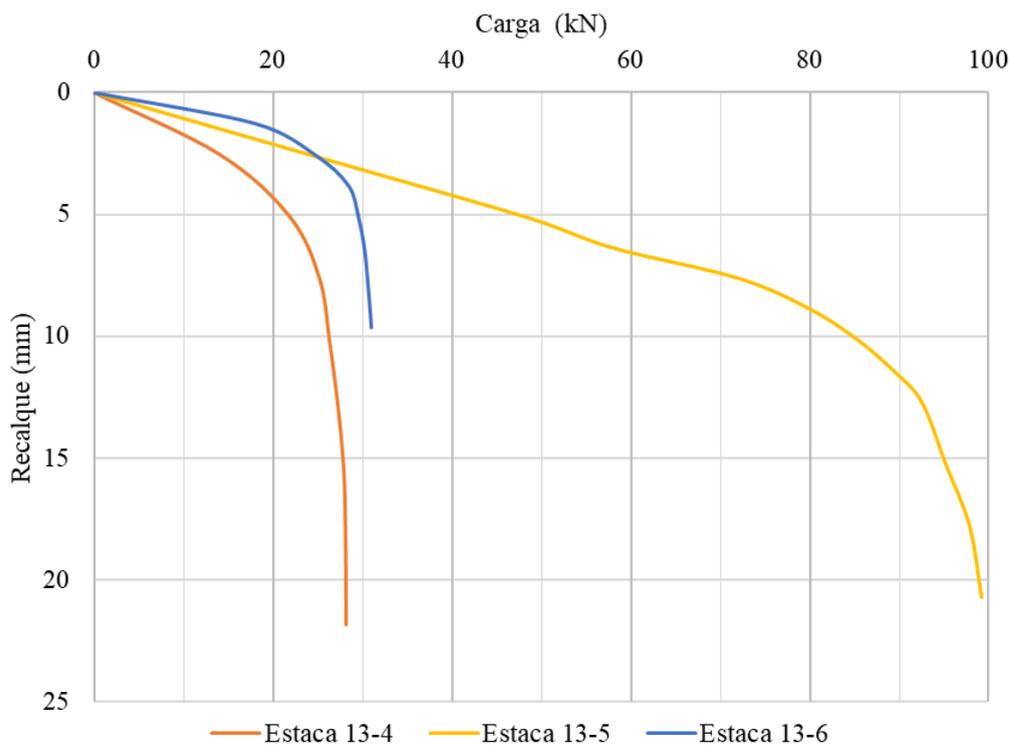
Fonte: Adaptado de Tavenas (1971)

Figura C15 – Curvas carga x recalque das estacas 13-1 a 13-3 de Nottingham (1975)



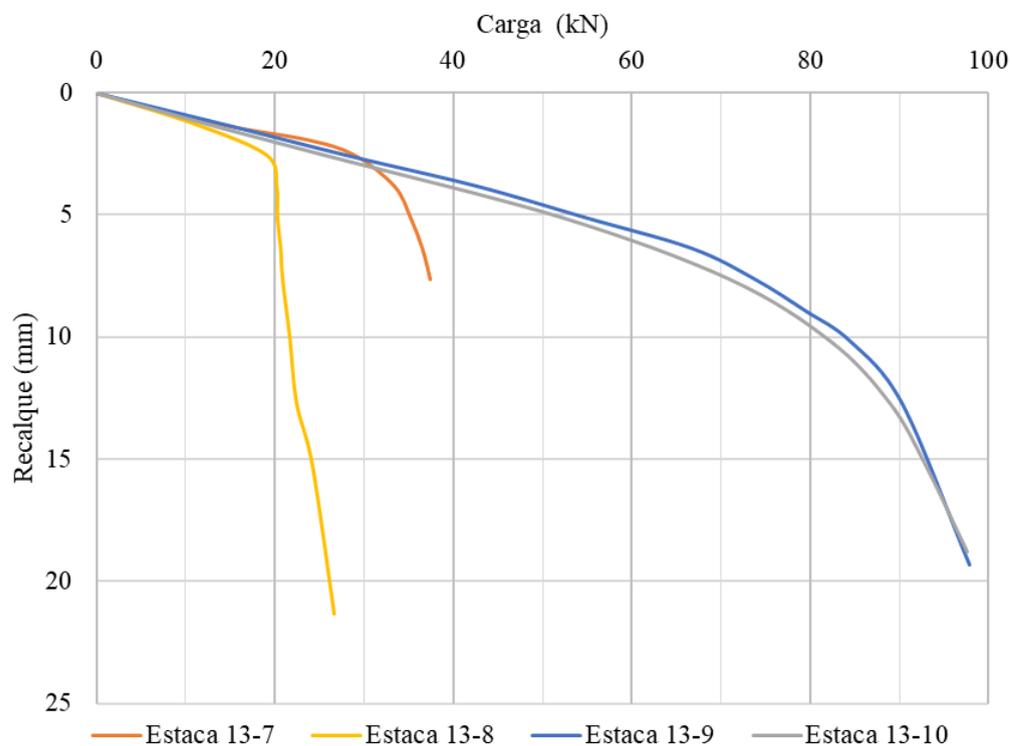
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura C16 – Curvas carga x recalque das estacas 13-4 a 13-6 de Nottingham (1975)



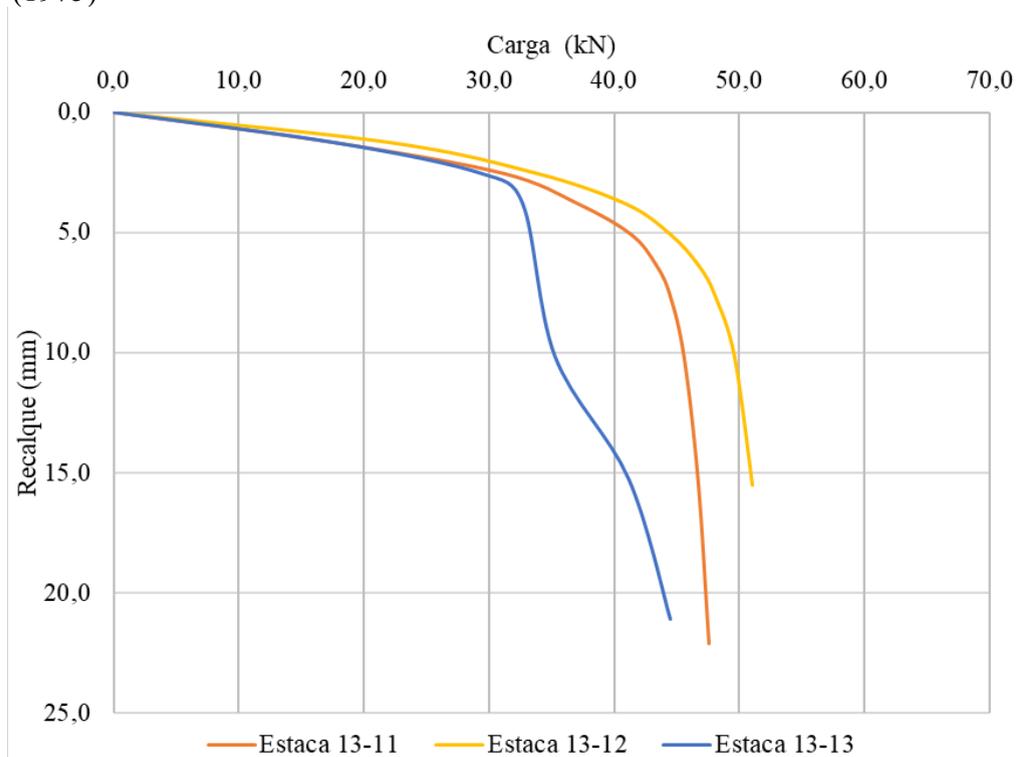
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura C17 – Curvas carga x recalque das estacas 13-7 a 13-10 de Nottingham (1975)



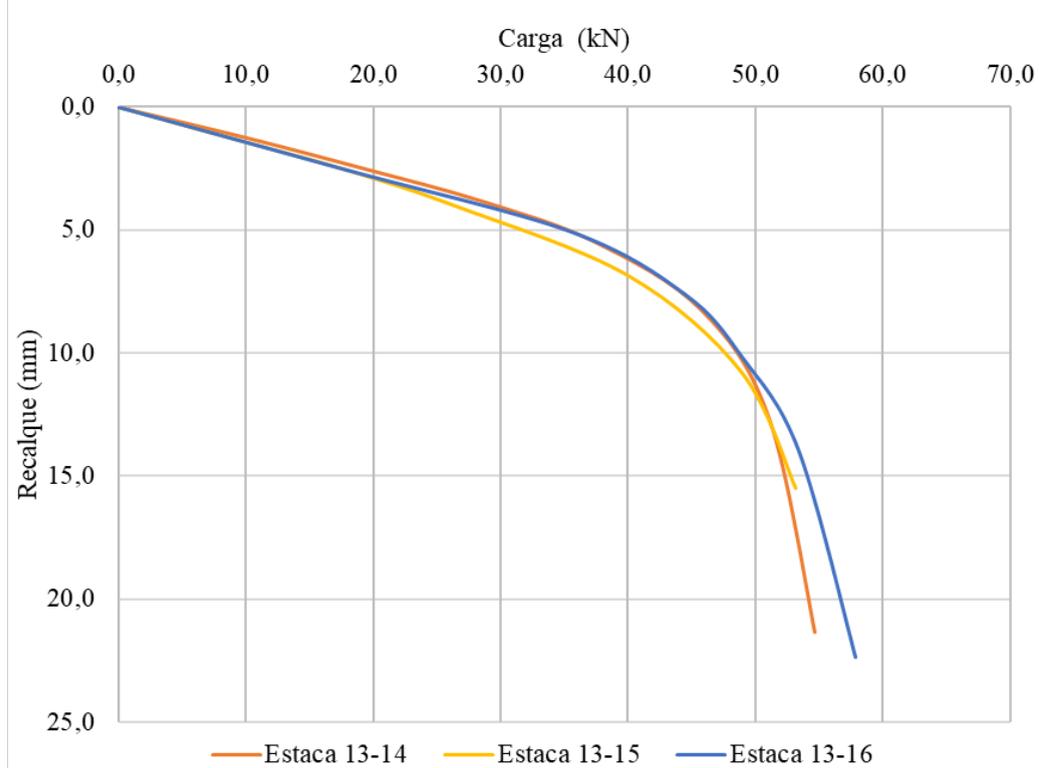
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura C18 – Curvas carga x recalque das estacas 13-11 a 13-13 de Nottingham (1975)



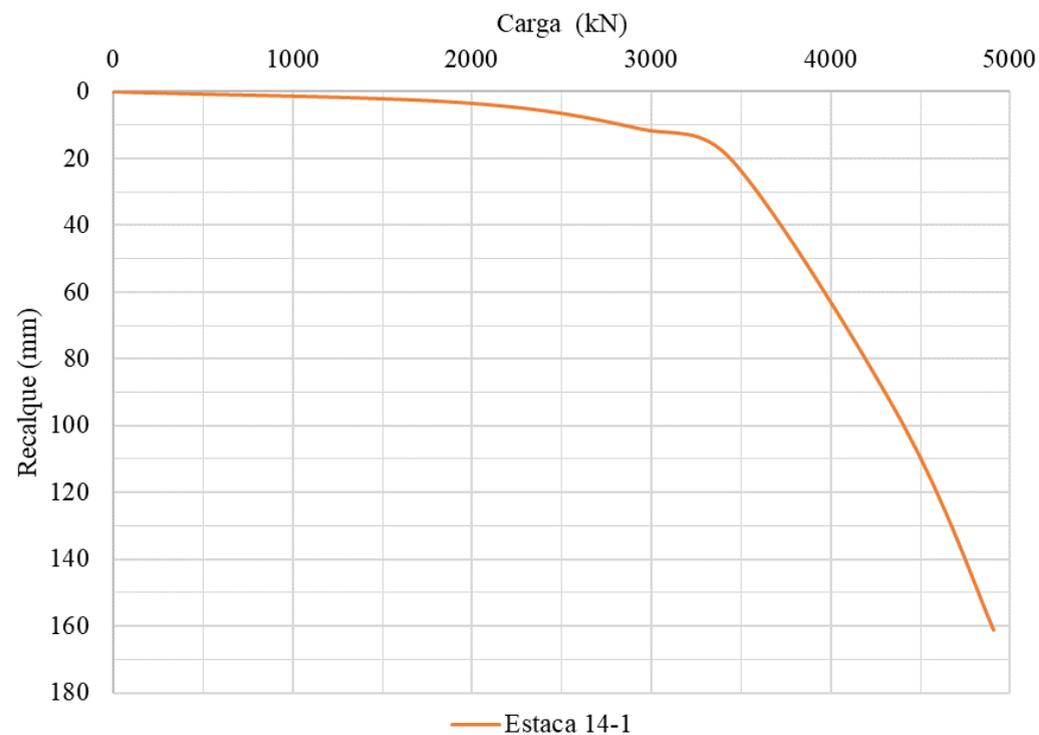
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura C19 – Curvas carga x recalque das estacas 13-14 a 13-16 de Nottingham (1975)



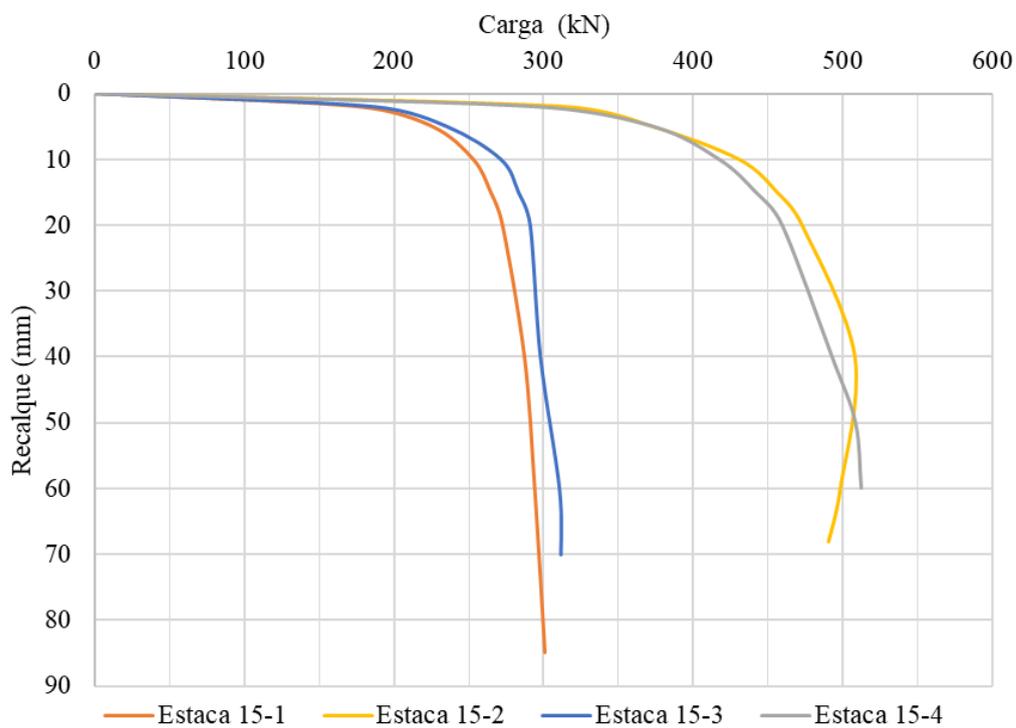
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura C20 – Curvas carga x recalque da estaca 14-1 de Mayne e Harris (1993)



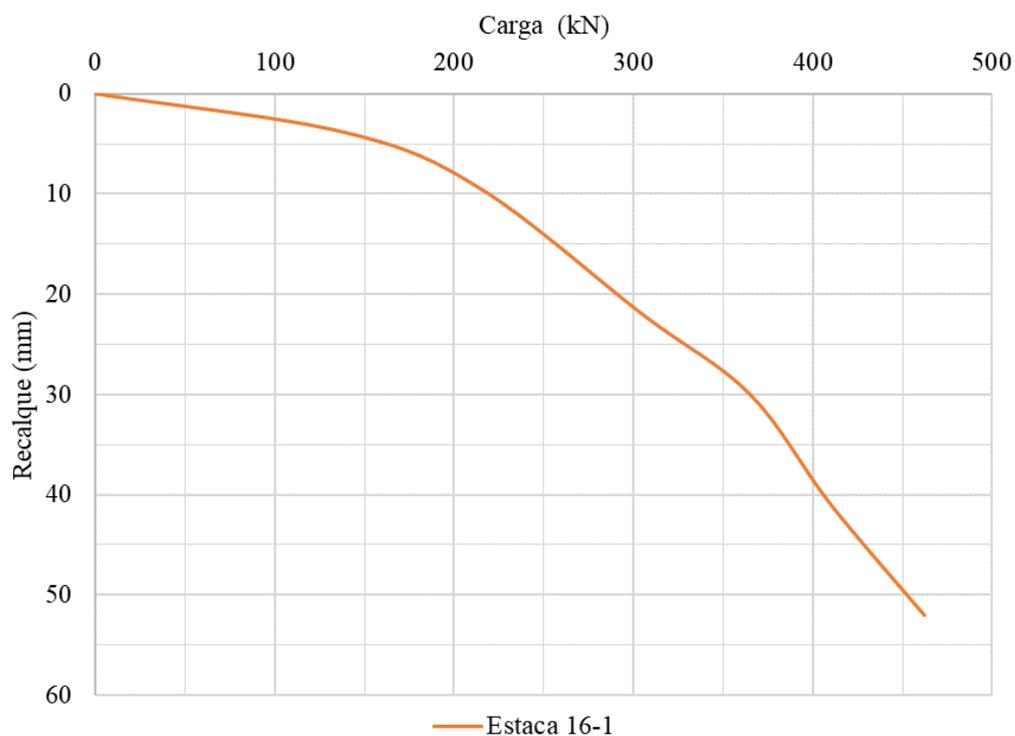
Fonte: Adaptado de Mayne e Harris (1993)

Figura C21 – Curvas carga x recalque das estacas isoladas de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)



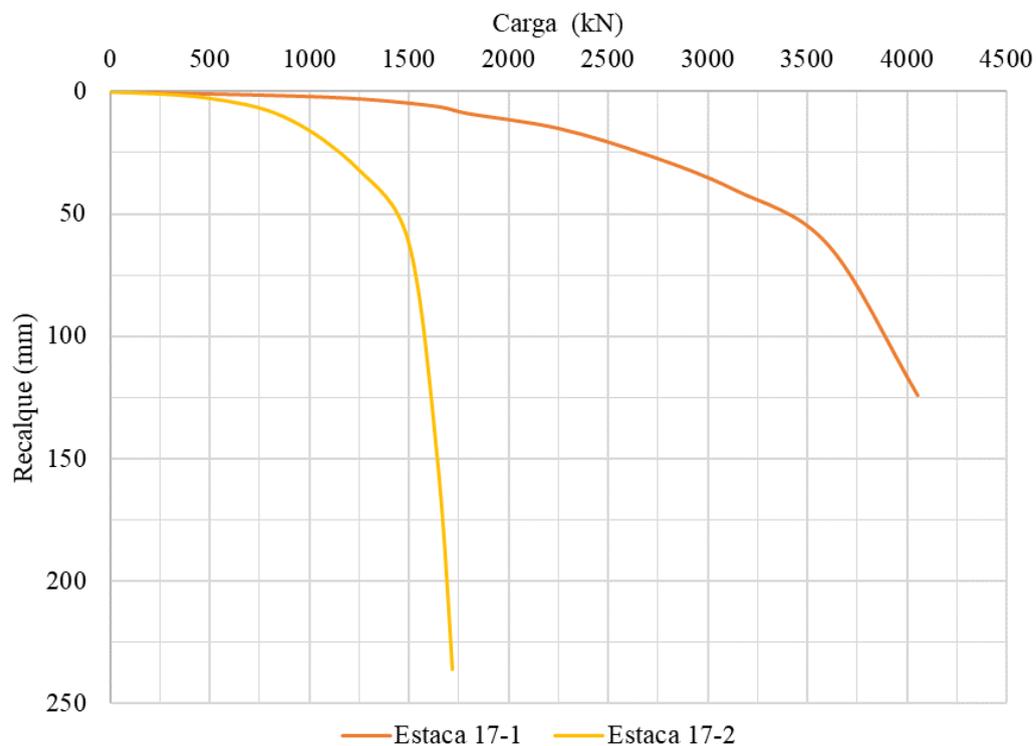
Fonte: Adaptado de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)

Figura C22 – Curva carga x recalque da estaca 16-1 de Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014)



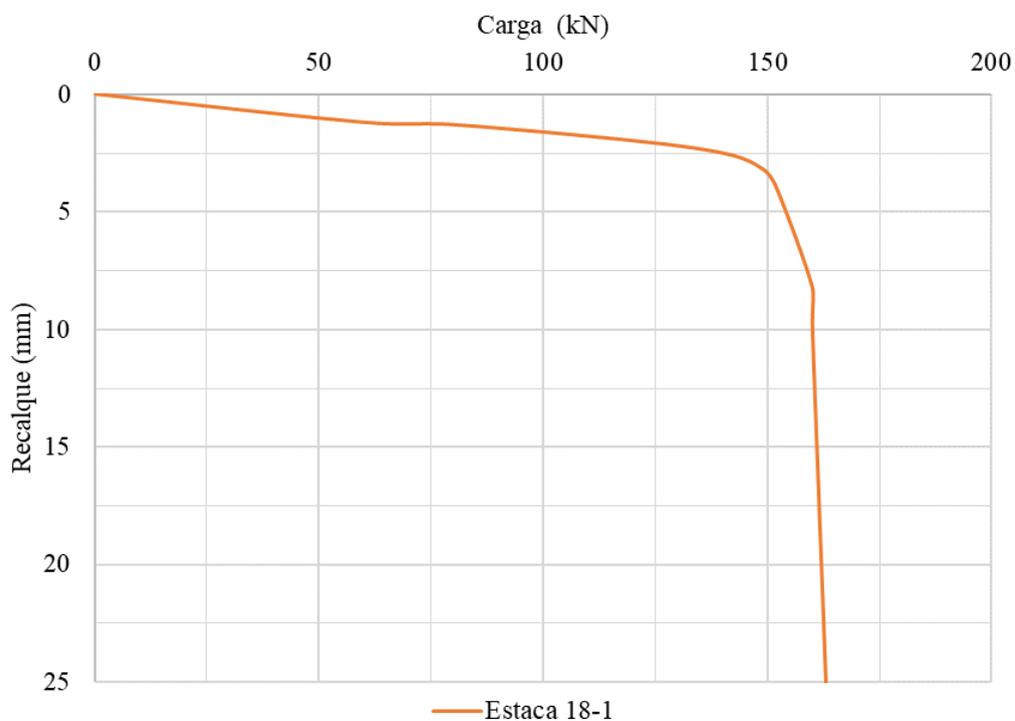
Fonte: Adaptado de Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014)

Figura C23 – Curvas carga x recalque das estacas isoladas de Gavin, Cadogan e Casey (2009)



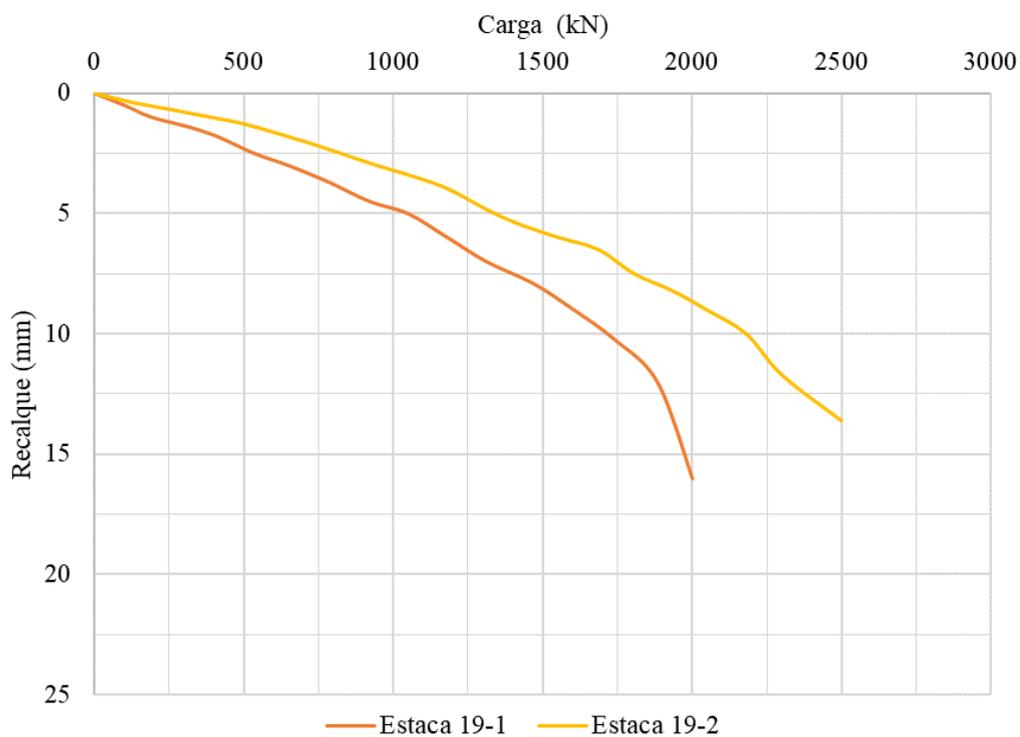
Fonte: Adaptado de Gavin, Cadogan e Casey (2009)

Figura C24 – Curvas carga x recalque da estaca 18-1 de Gavin e O'Kelly (2007)



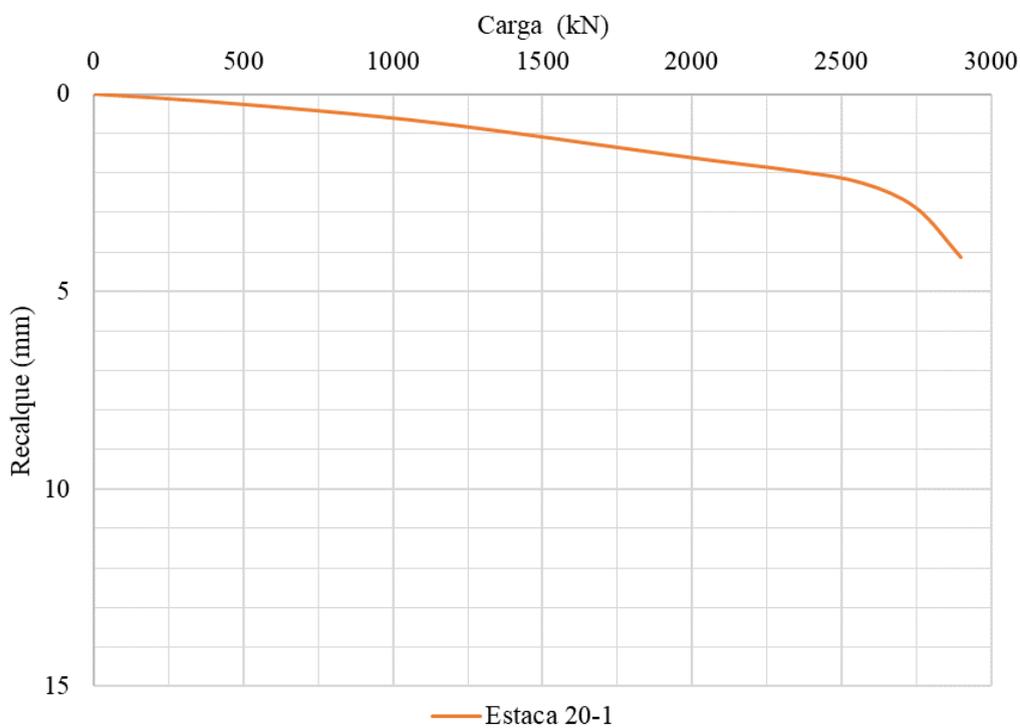
Fonte: Adaptado de Gavin e O'Kelly (2007)

Figura C25 – Curvas carga x recalque das estacas isoladas de Fellenius, Brusey e Pepe (2000)



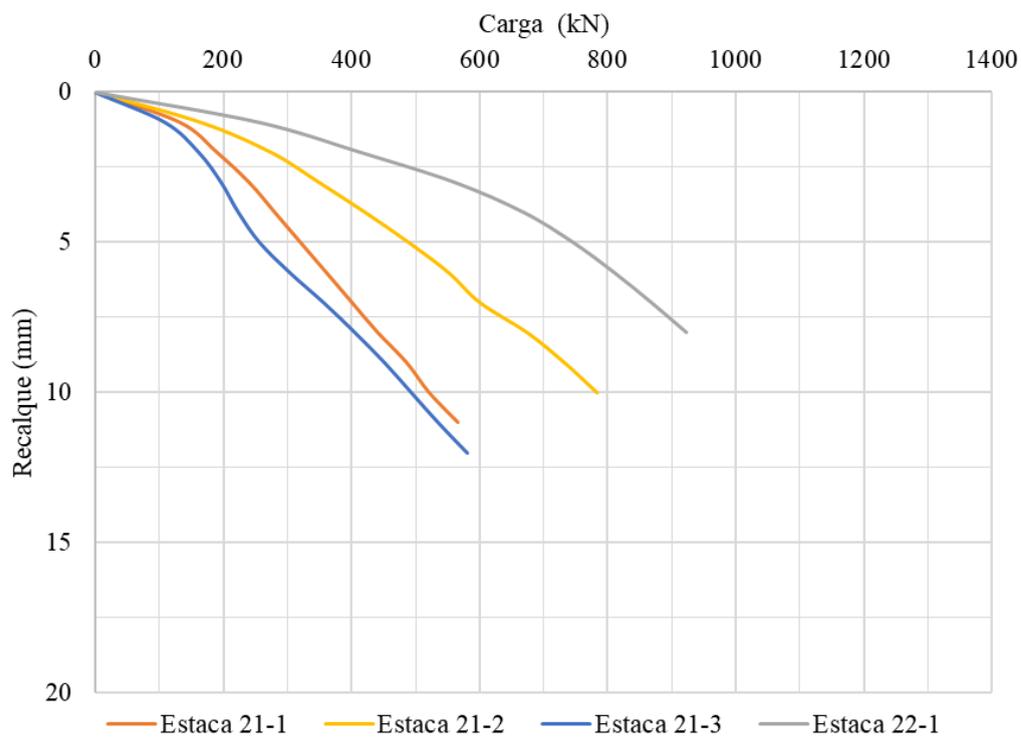
Fonte: Adaptado de Fellenius, Brusey e Pepe (2000)

Figura C26 – Curvas carga x recalque da estaca 20-1 de Bradshaw e Baxter (2006)



Fonte: Adaptado de Bradshaw e Baxter (2006)

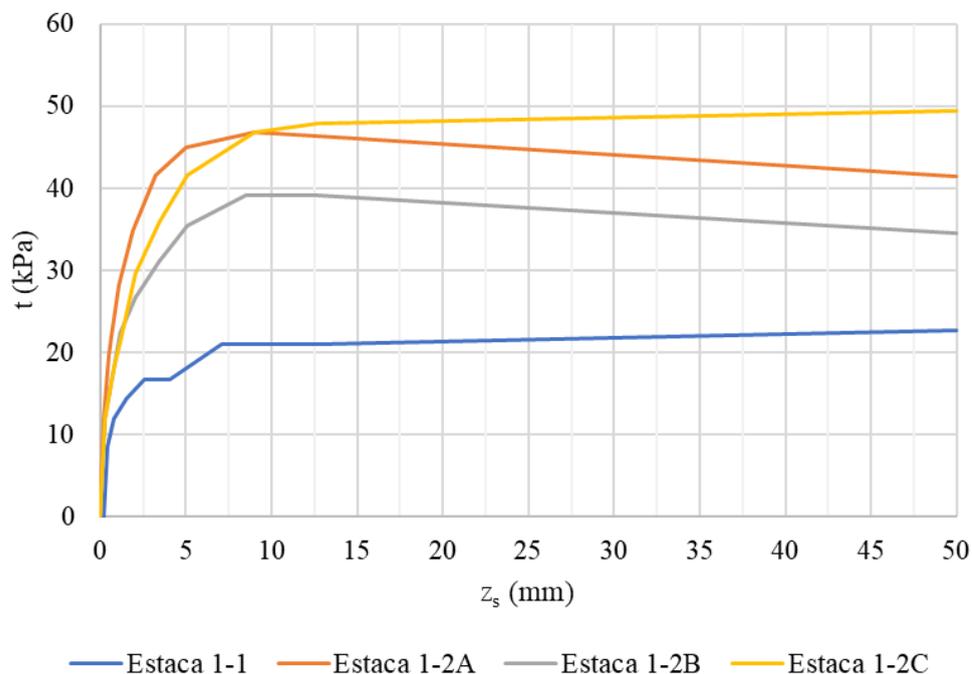
Figura C27 – Curvas carga x recalque das estacas isoladas de Krasinski (2011) e Krasinski (2012)



Fonte: Adaptado de Krasinski (2011) e Krasinski (2012)

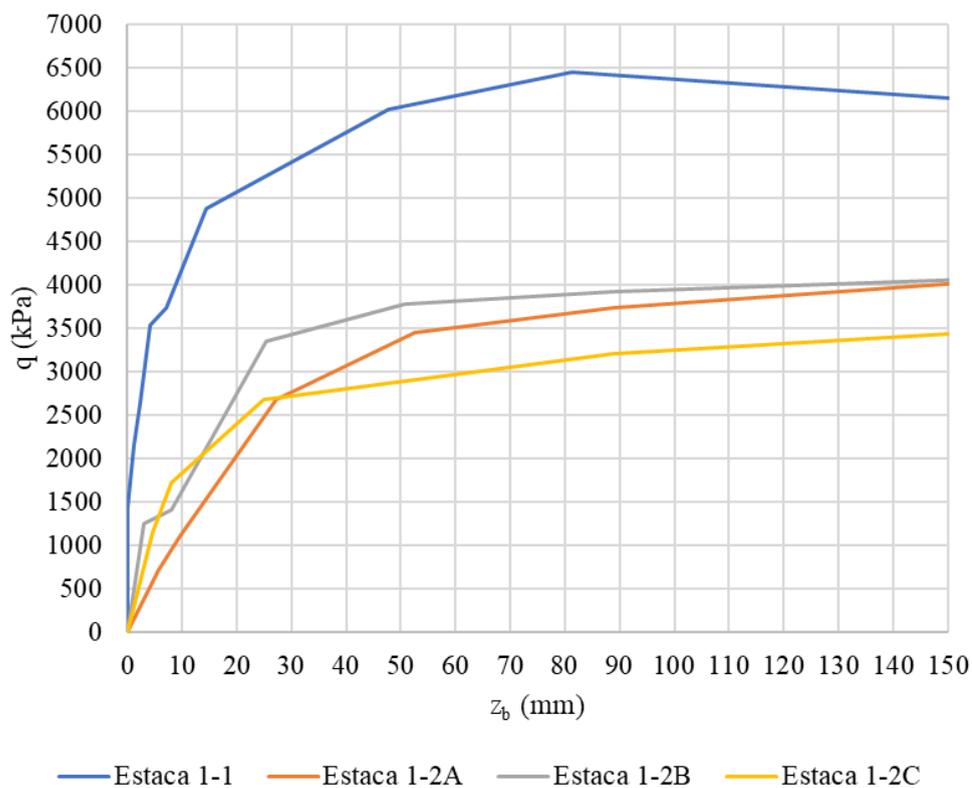
ANEXO D – CURVAS DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA EXPERIMENTAIS

Figura D1 – Curvas t-z experimentais de Briaud, Tucker e Ng (1989)



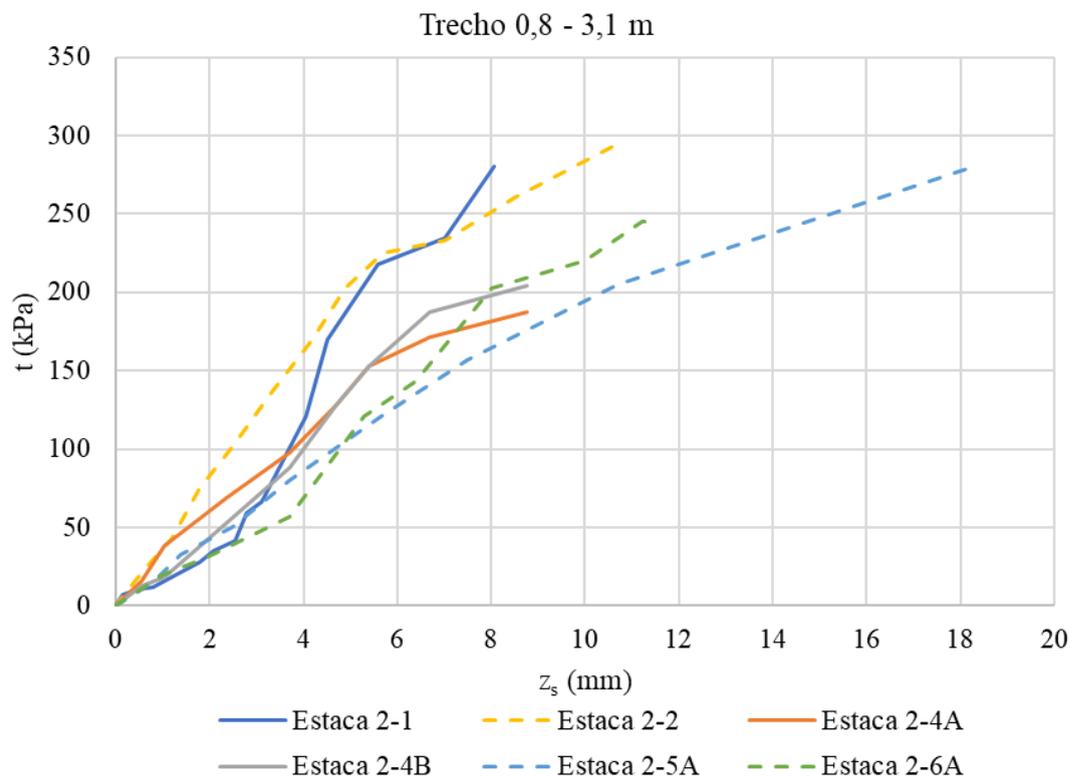
Fonte: Briaud, Tucker e Ng (1989)

Figura D2 – Curvas q-z experimentais de Briaud, Tucker e Ng (1989)



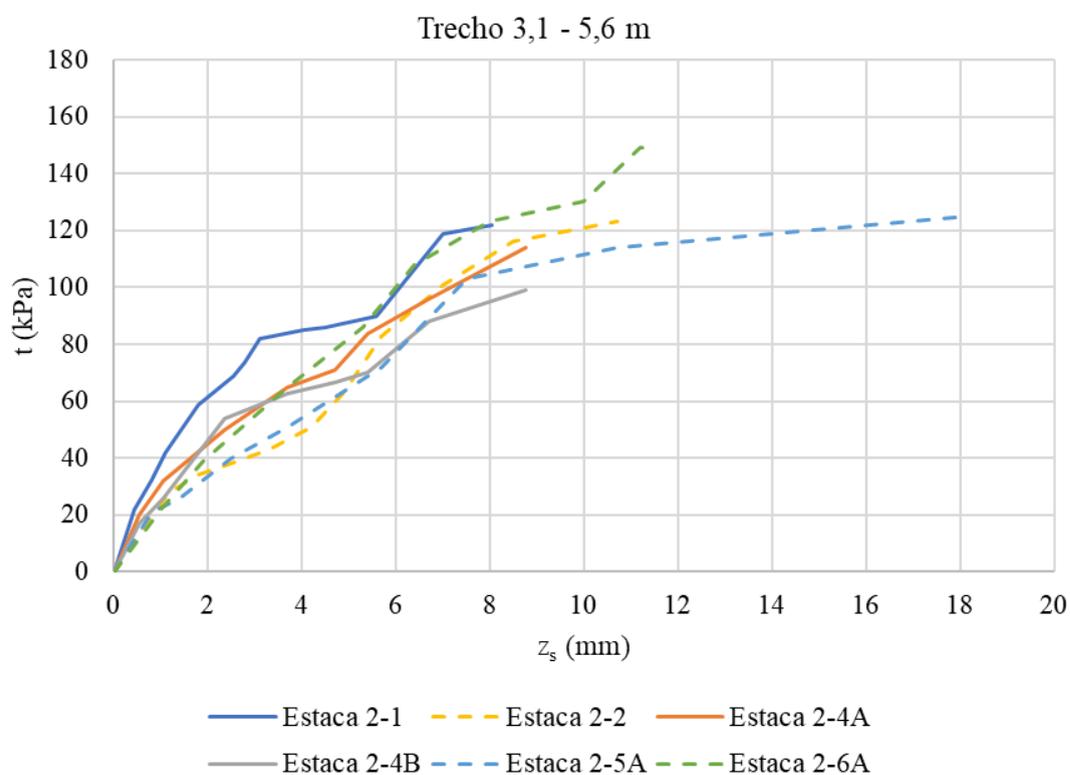
Fonte: Briaud, Tucker e Ng (1989)

Figura D3 – Curvas t-z experimentais (0,8 a 3,1 m) de Abdlrahem e El Naggar (2020)



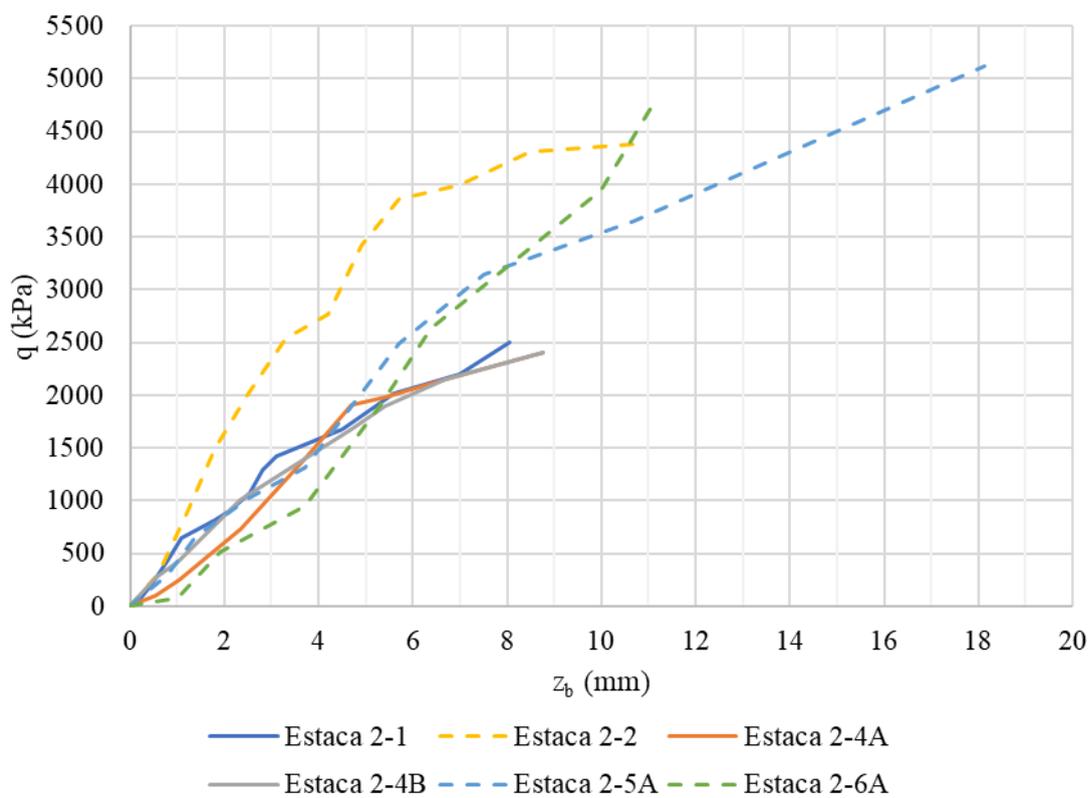
Fonte: Adaptado de Abdlrahem e El Naggar (2020)

Figura D4 – Curvas t-z experimentais (3,1 a 5,6 m) de Abdlrahem e El Naggar (2020)



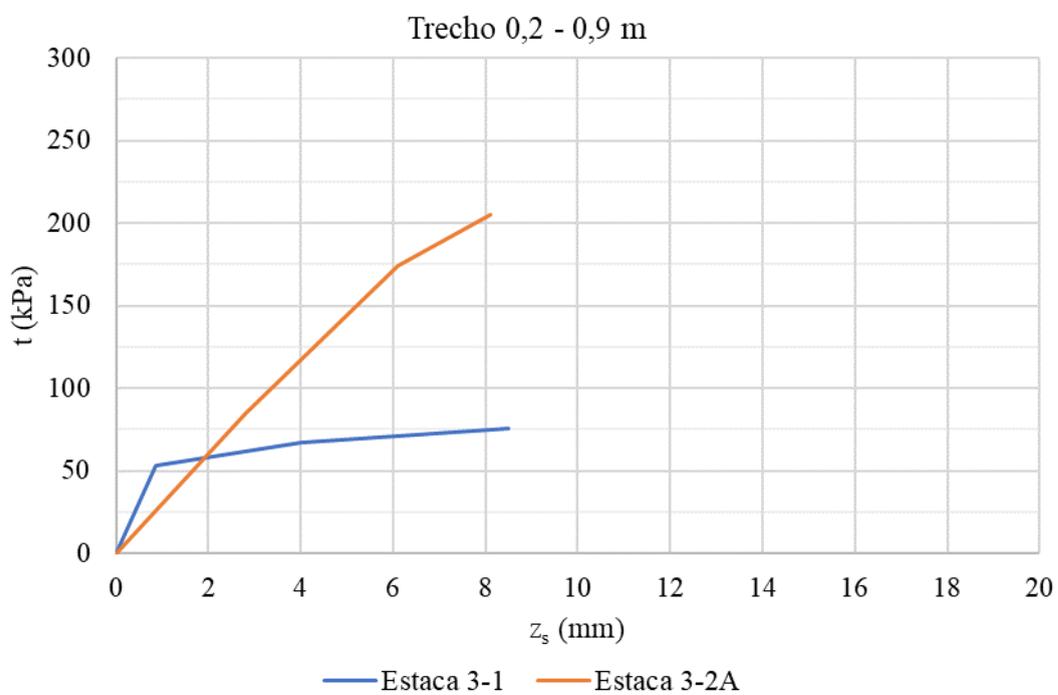
Fonte: Adaptado de Abdlrahem e El Naggar (2020)

Figura D5 – Curvas q-z experimentais de Abdlrahem e El Naggar (2020)



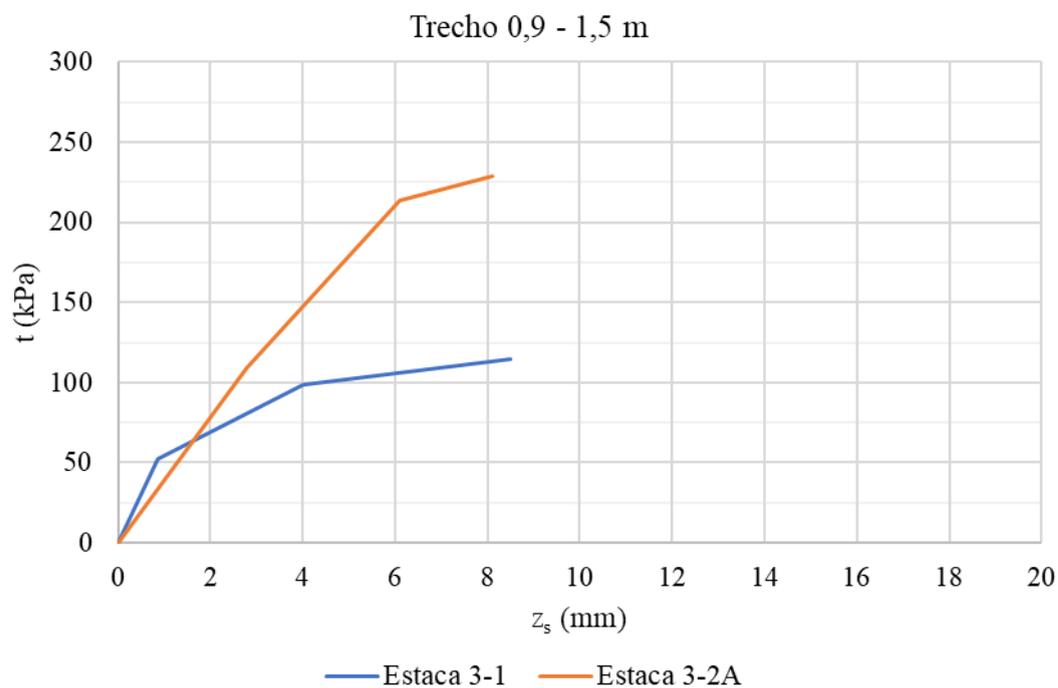
Fonte: Abdlrahem e El Naggar (2020)

Figura D6 – Curvas t-z experimentais (0,2 a 0,9 m) de Ismael (2001)



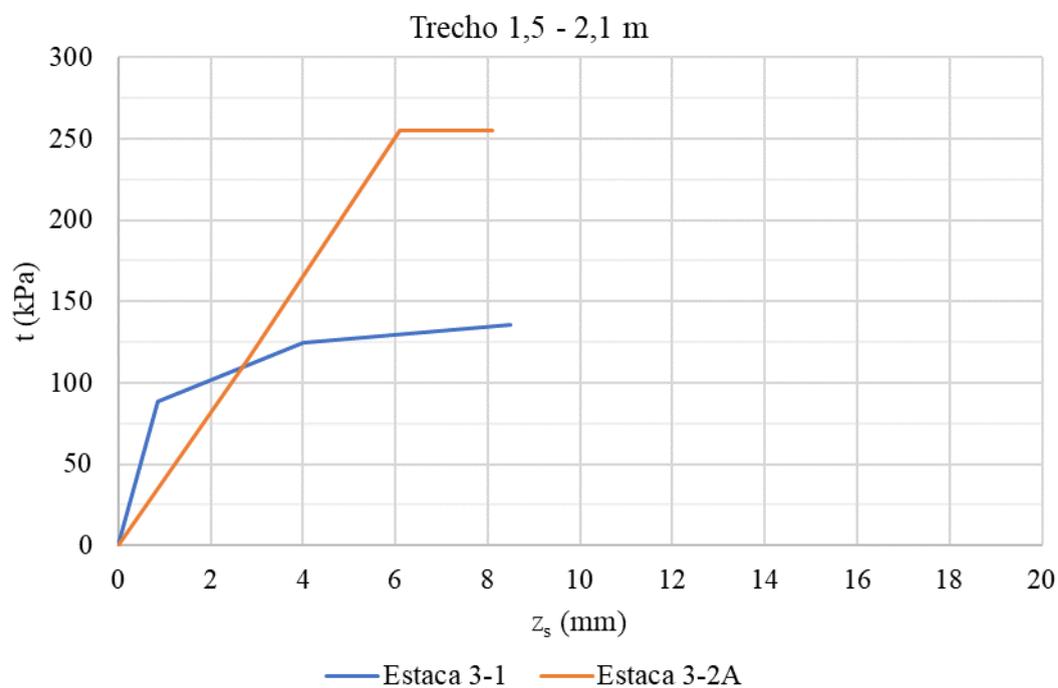
Fonte: Adaptado de Ismael (2001)

Figura D7 – Curvas t-z experimentais (0,9 a 1,5 m) de Ismael (2001)



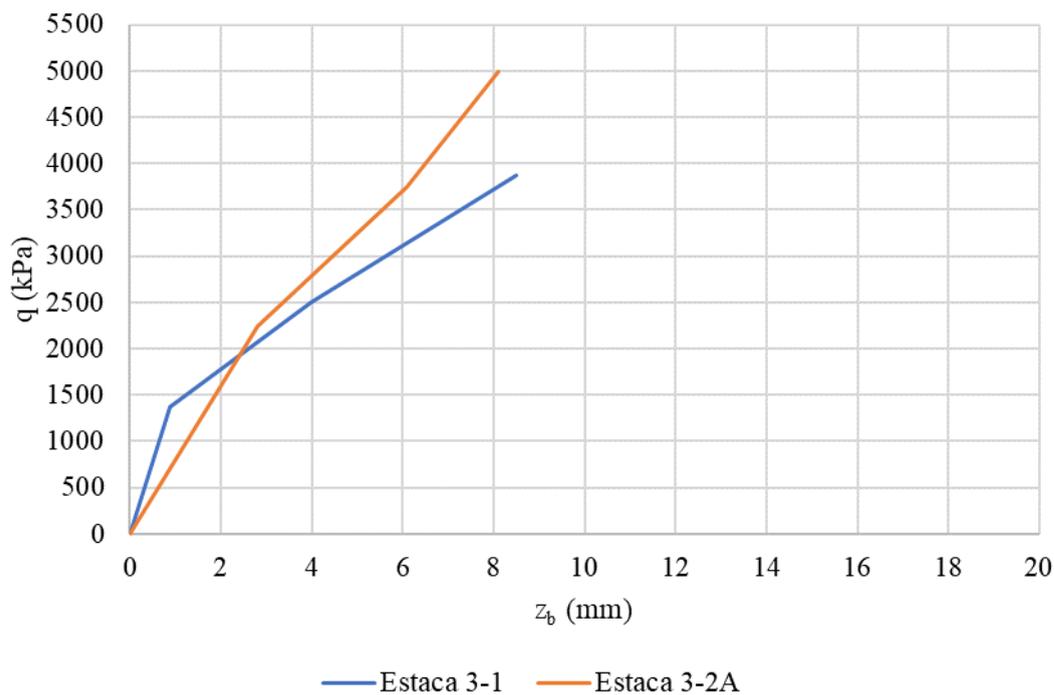
Fonte: Adaptado de Ismael (2001)

Figura D8 – Curvas t-z experimentais (1,5 a 2,1 m) de Ismael (2001)



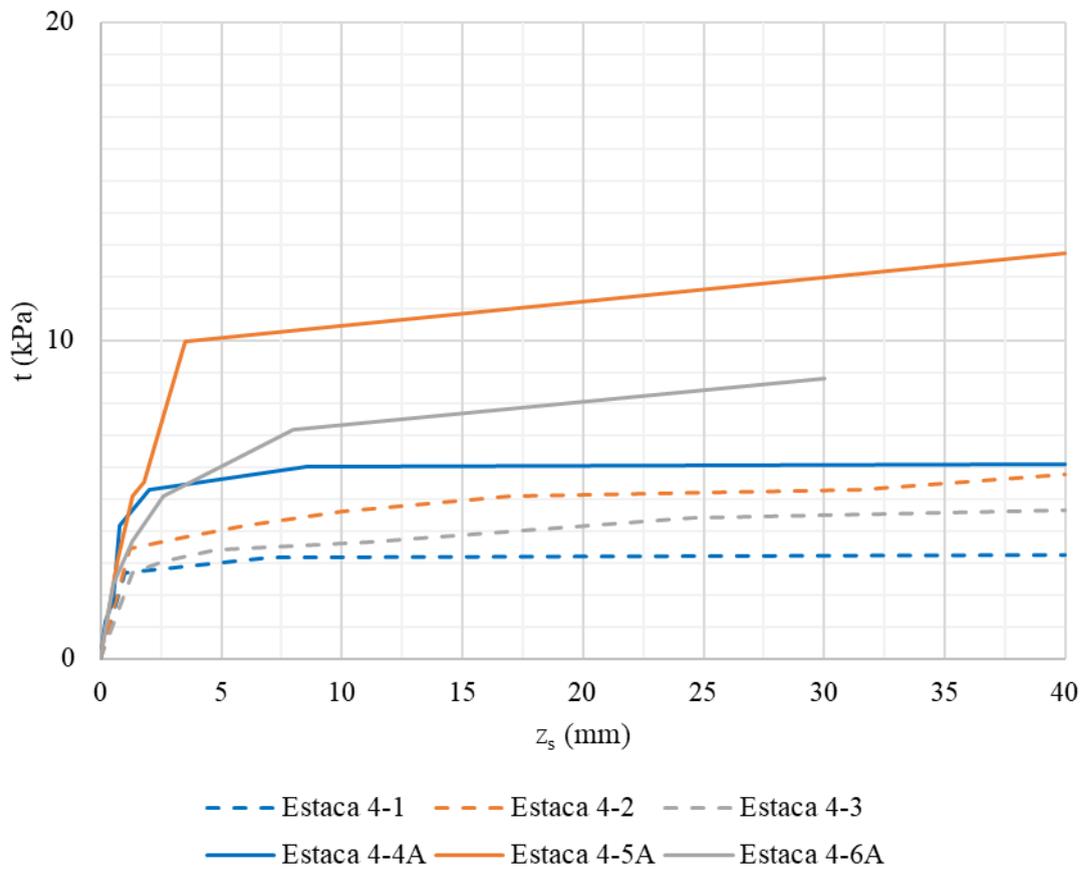
Fonte: Adaptado de Ismael (2001)

Figura D9 – Curvas q-z experimentais de Ismael (2001)



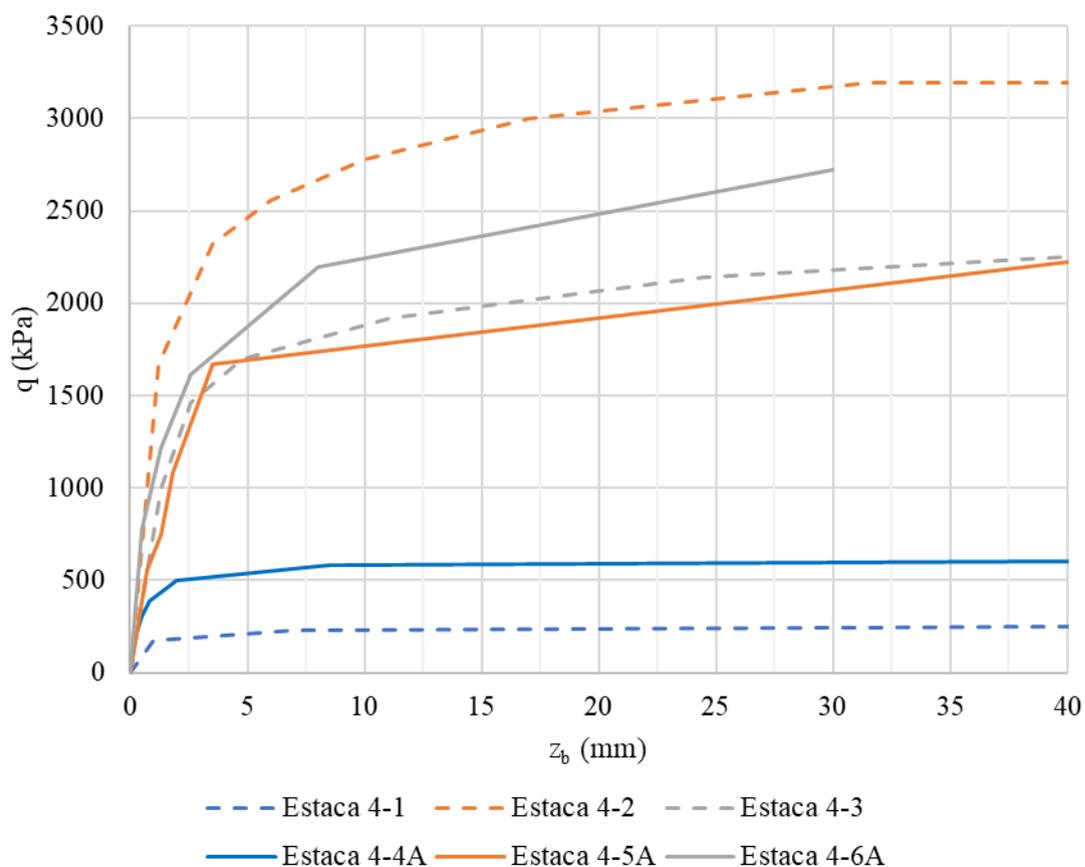
Fonte: Adaptado de Ismael (2001)

Figura D10 – Curvas t-z experimentais de Long (1993)



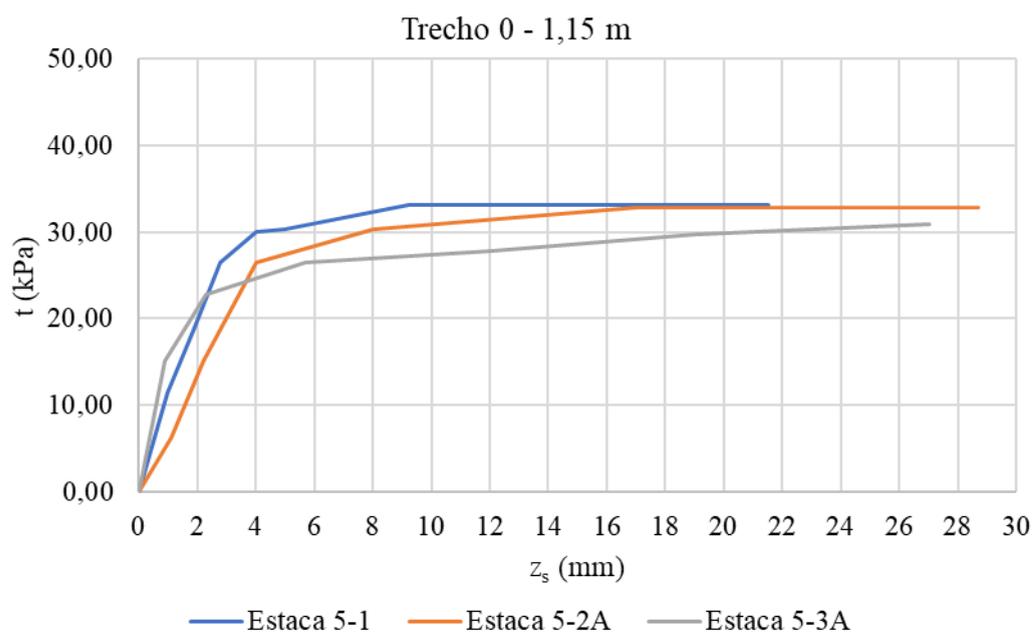
Fonte: Adaptado de Long (1993)

Figura D11 – Curvas q-z experimentais de Long (1993)



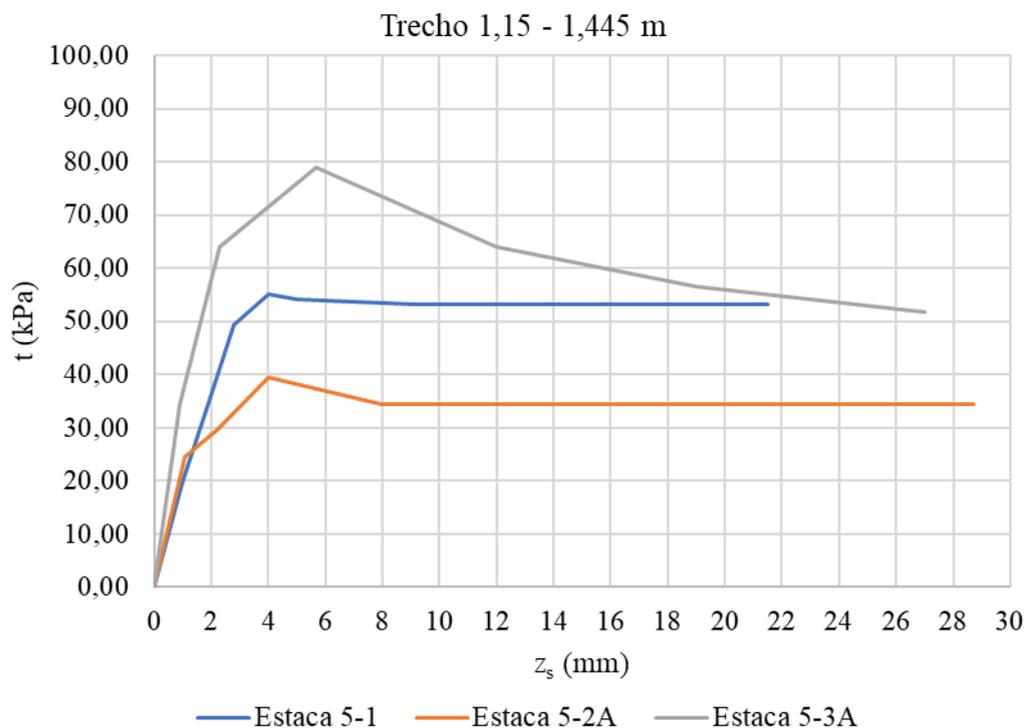
Fonte: Adaptado de Long (1993)

Figura D12 – Curvas t-z experimentais (0 a 1,15 m) de Norkus e Martinkus (2019)



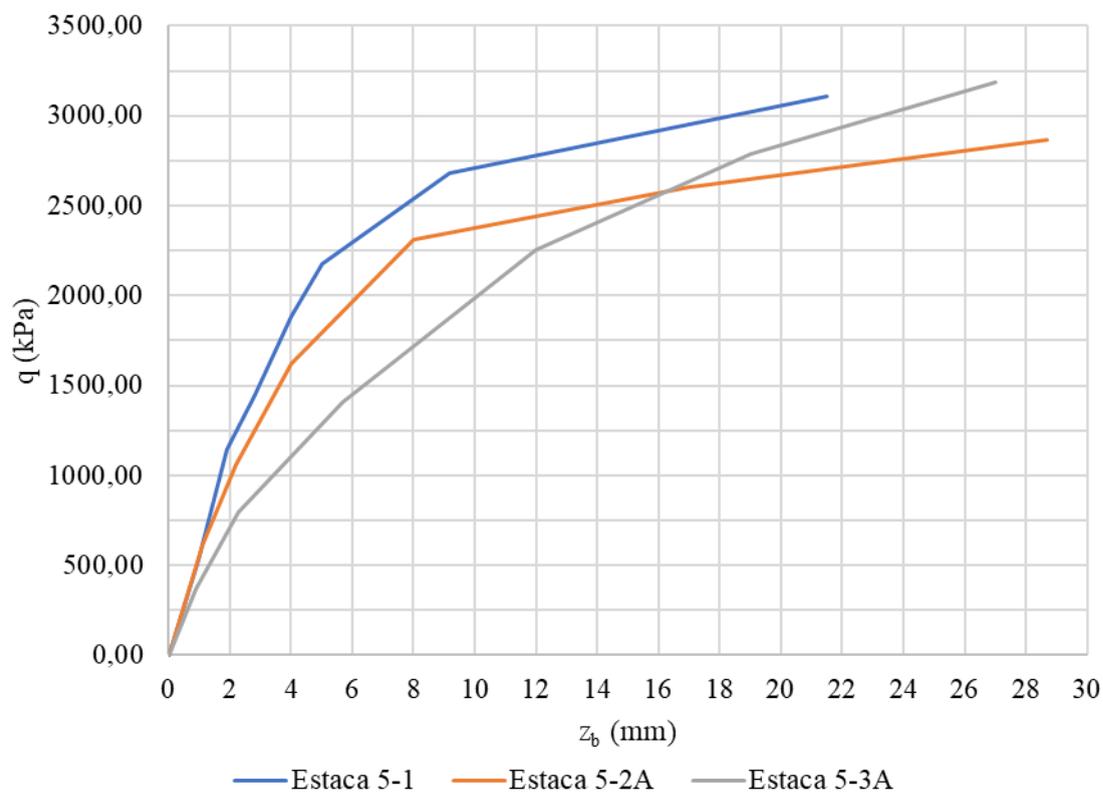
Fonte: Adaptado de Norkus e Martinkus (2019)

Figura D13 – Curvas t-z experimentais (1,15 a 1,445 m) de Norkus e Martinkus (2019)



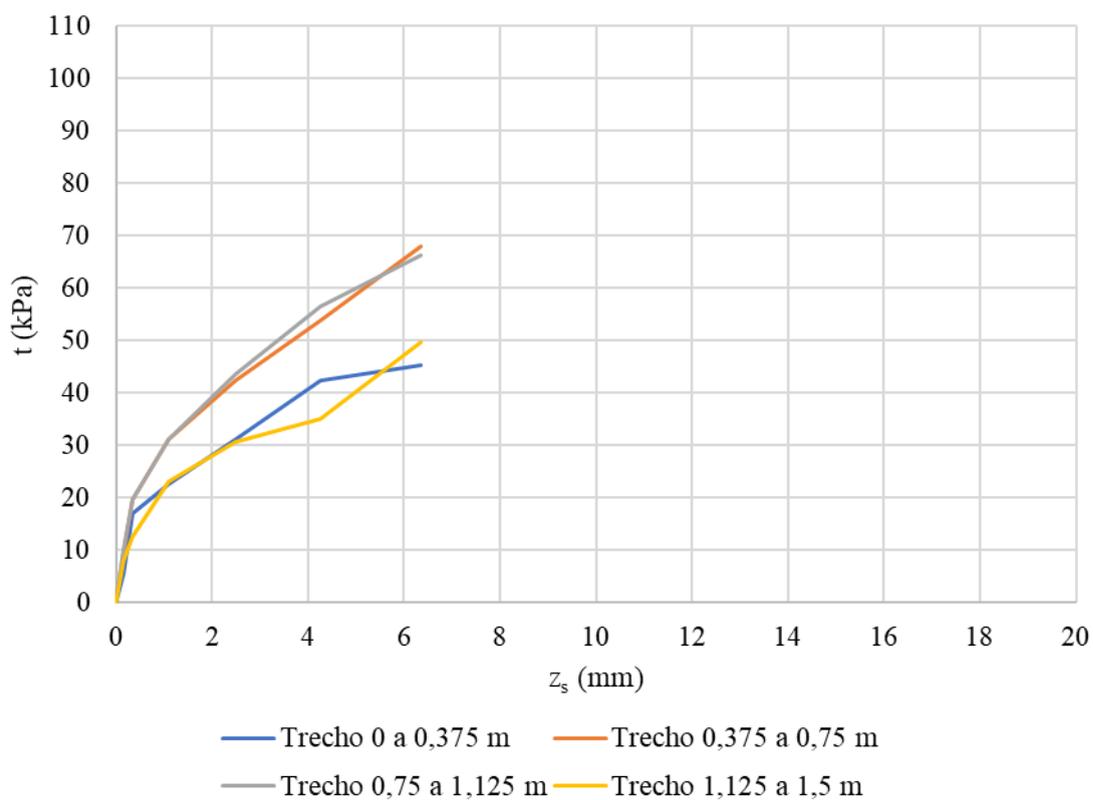
Fonte: Adaptado de Norkus e Martinkus (2019)

Figura D14 – Curvas q-z experimentais de Norkus e Martinkus (2019)



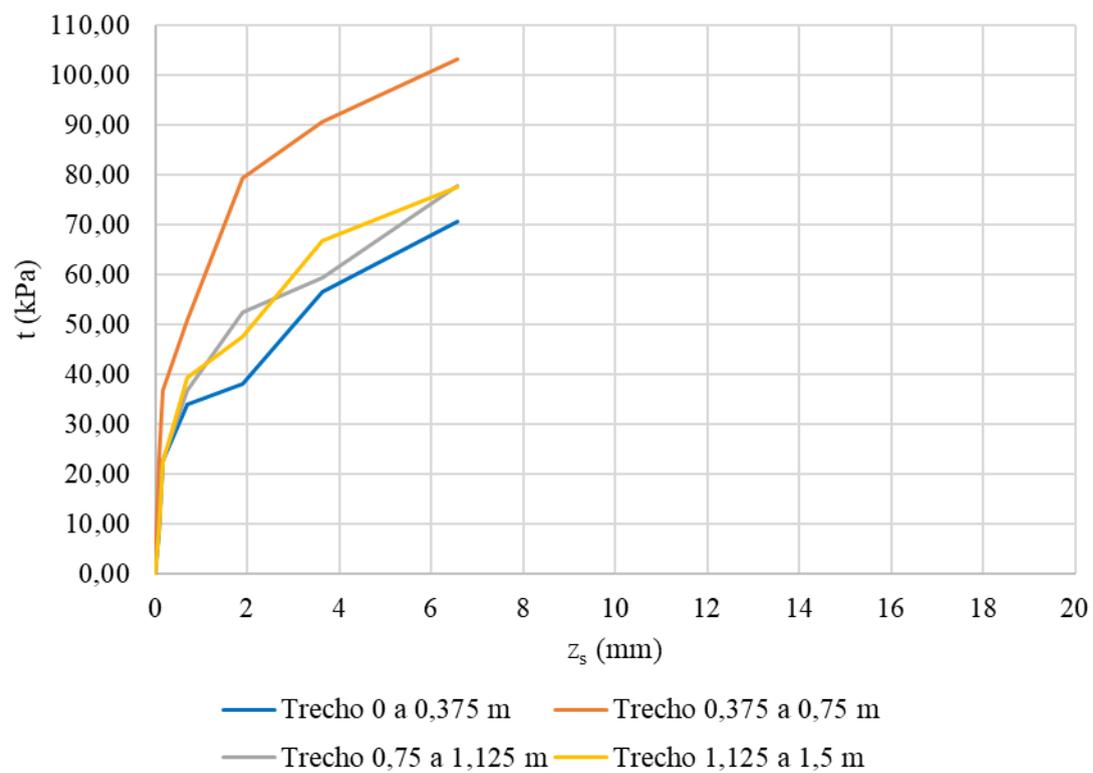
Fonte: Adaptado de Norkus e Martinkus (2019)

Figura D15 – Curvas t-z experimentais por trechos da estaca 6-1

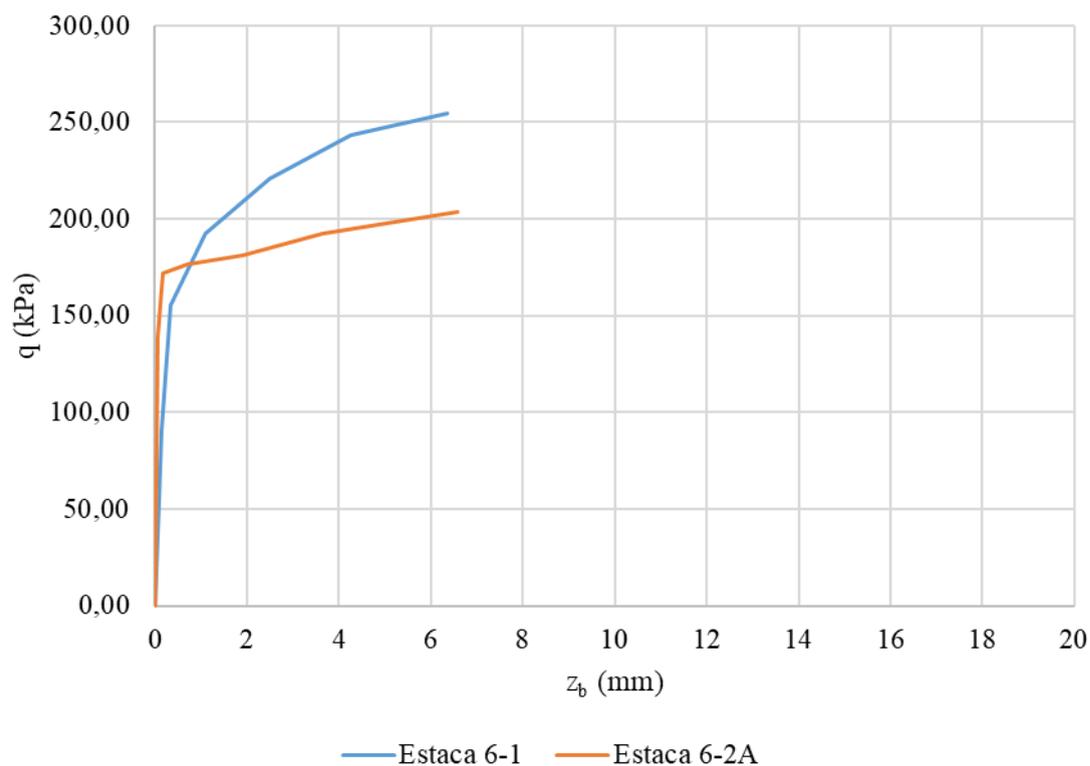


Fonte: Adaptado de Elsamny *et al.* (2017)

Figura D16 – Curvas t-z experimentais por trechos da estaca em grupo 6-2A

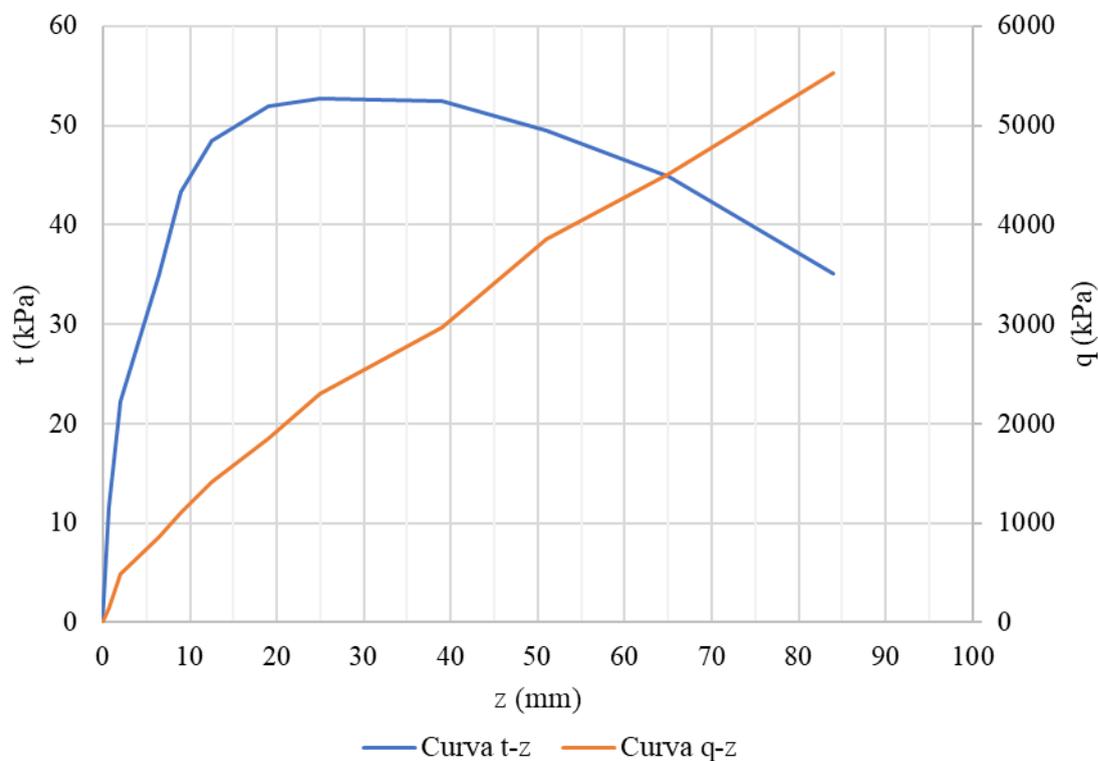


Fonte: Adaptado de Elsamny *et al.* (2017)

Figura D17 – Curvas q-z experimentais de Elsamny *et al.* (2017)

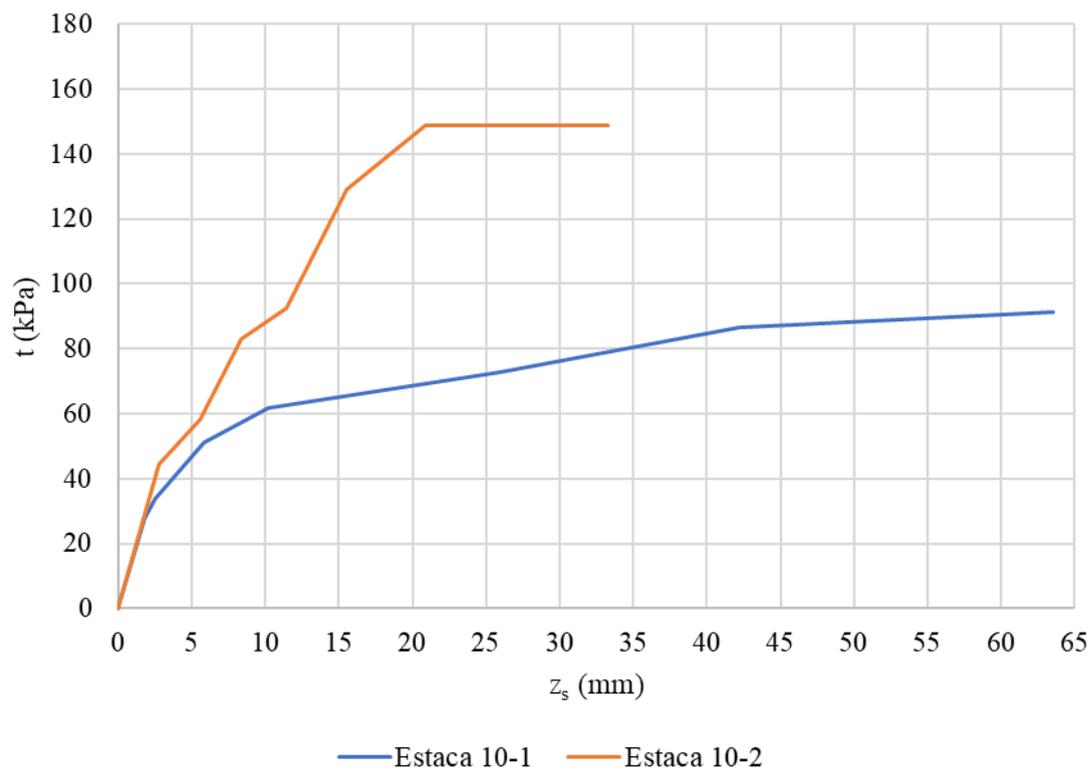
Fonte: Adaptado de Elsamny *et al.* (2017)

Figura D18 – Curvas t-z e q-z experimentais da estaca SCC-1



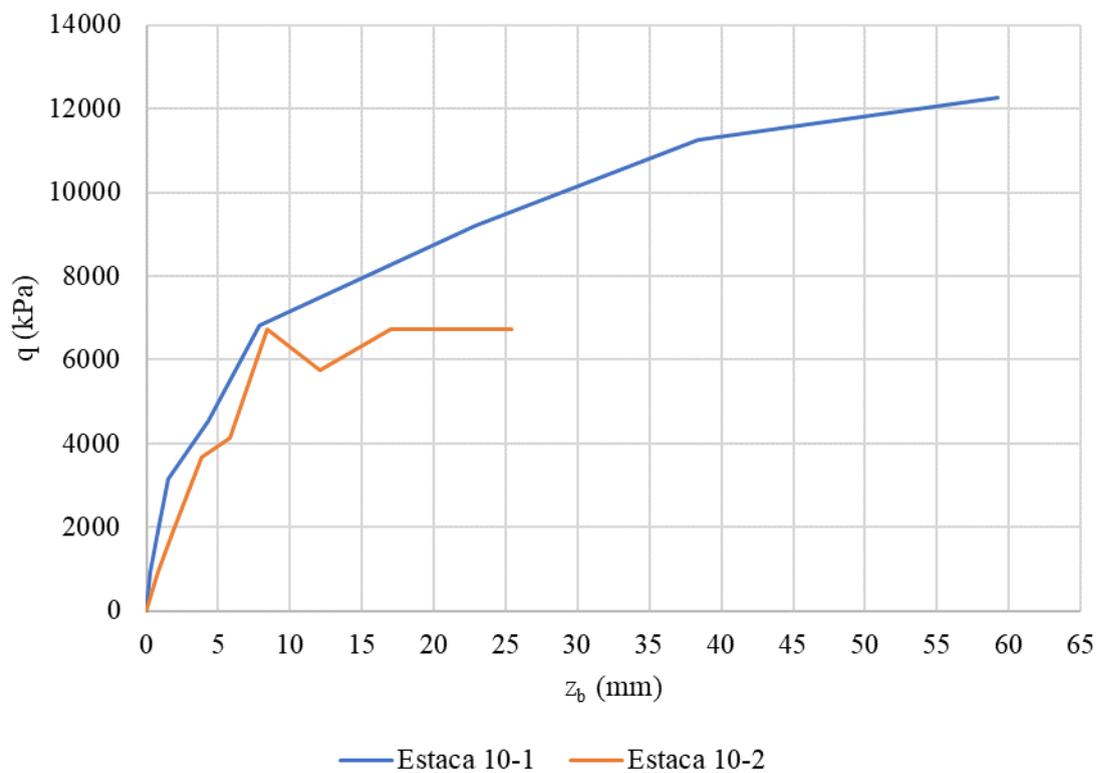
Fonte: Adaptado de Soares, Coutinho e Cunha (2021)

Figura D19 – Curvas t-z experimentais de Tucker e Briaud (1988)



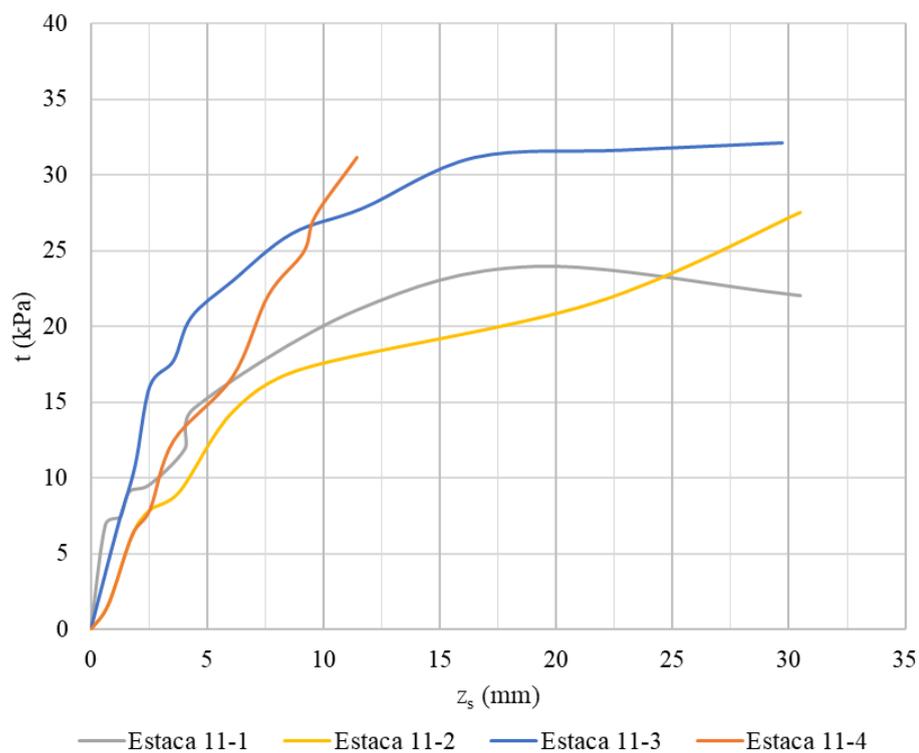
Fonte: Adaptado de Tucker e Briaud (1988)

Figura D20 – Curvas q-z experimentais de Tucker e Briaud (1988)



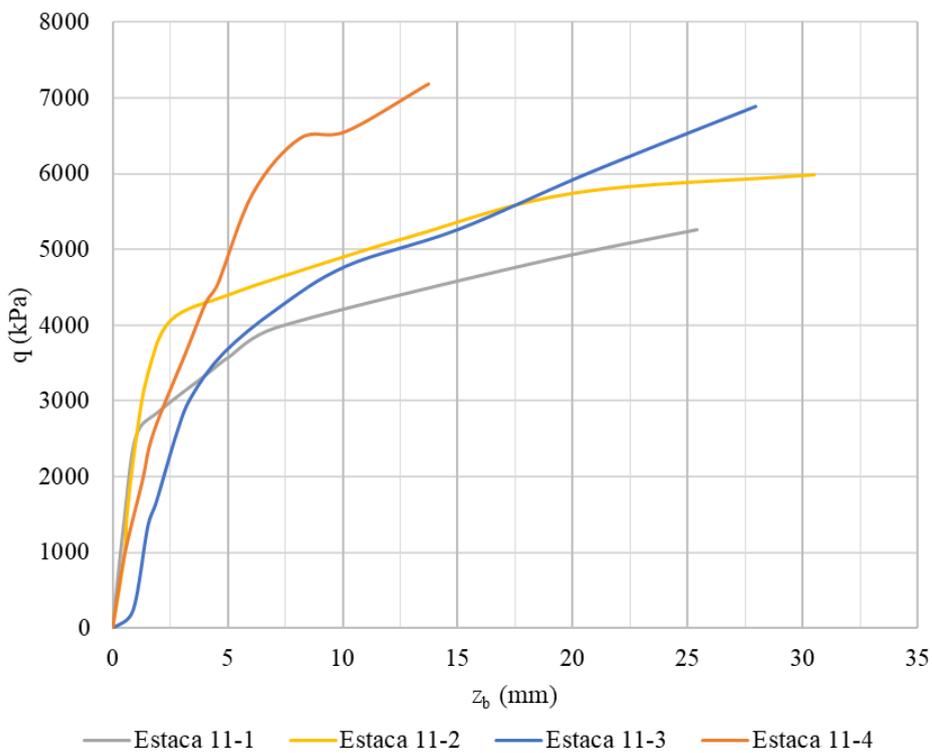
Fonte: Adaptado de Tucker e Briaud (1988)

Figura D21 – Curvas t-z experimentais das estacas 11-1 a 11-4 de Tavenas (1971)



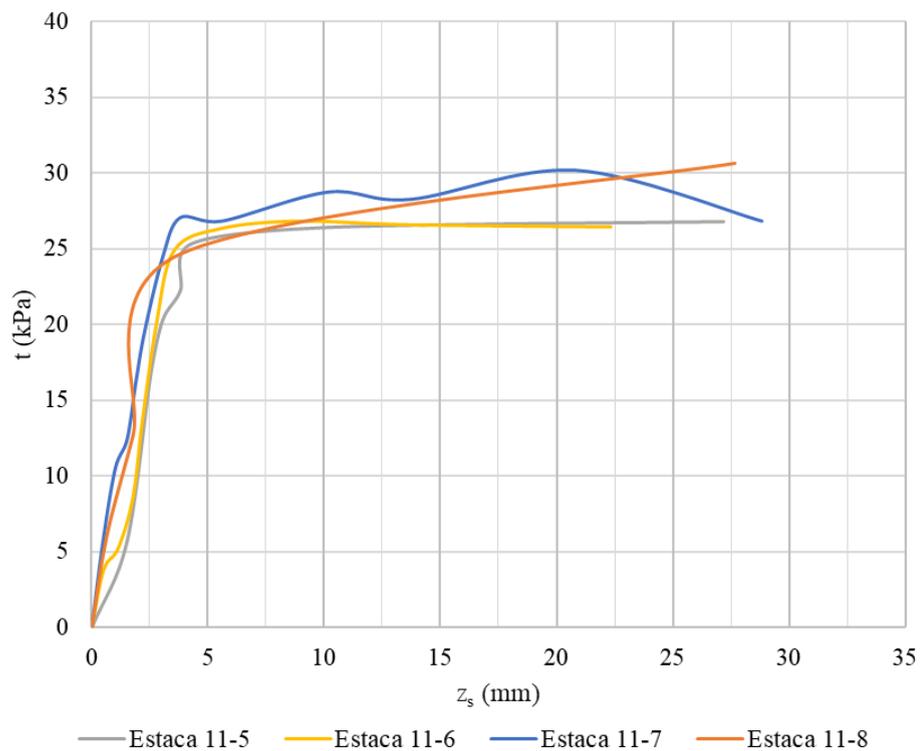
Fonte: Adaptado de Tavenas (1971)

Figura D22 – Curvas q-z experimentais das estacas 11-1 a 11-4 de Tavenas (1971)



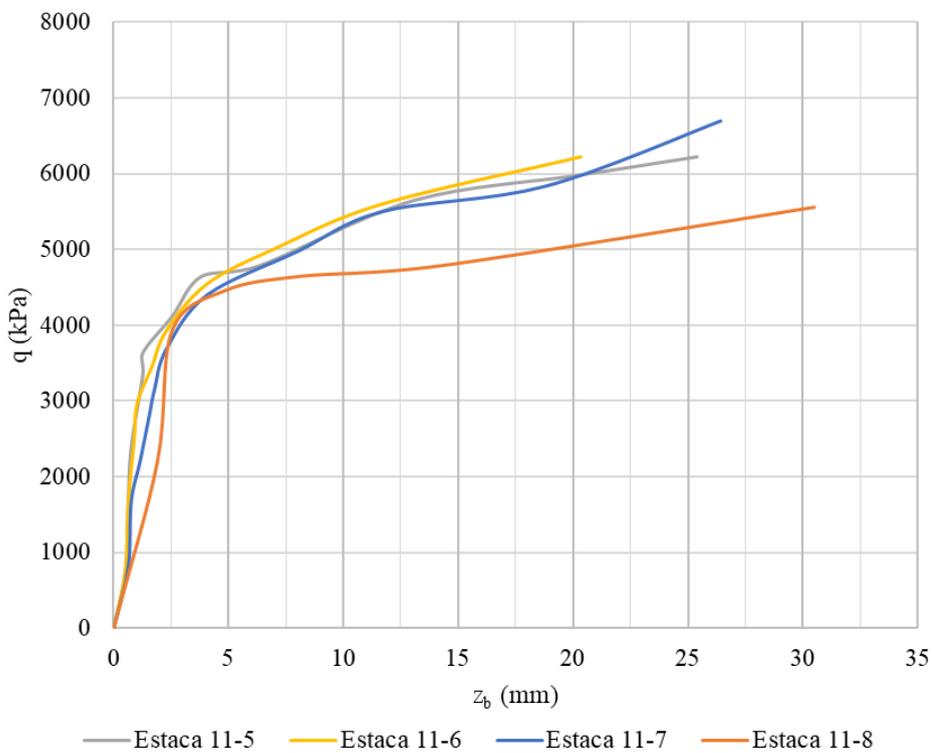
Fonte: Adaptado de Tavenas (1971)

Figura D23 – Curvas t-z experimentais das estacas 11-5 a 11-8 de Tavenas (1971)



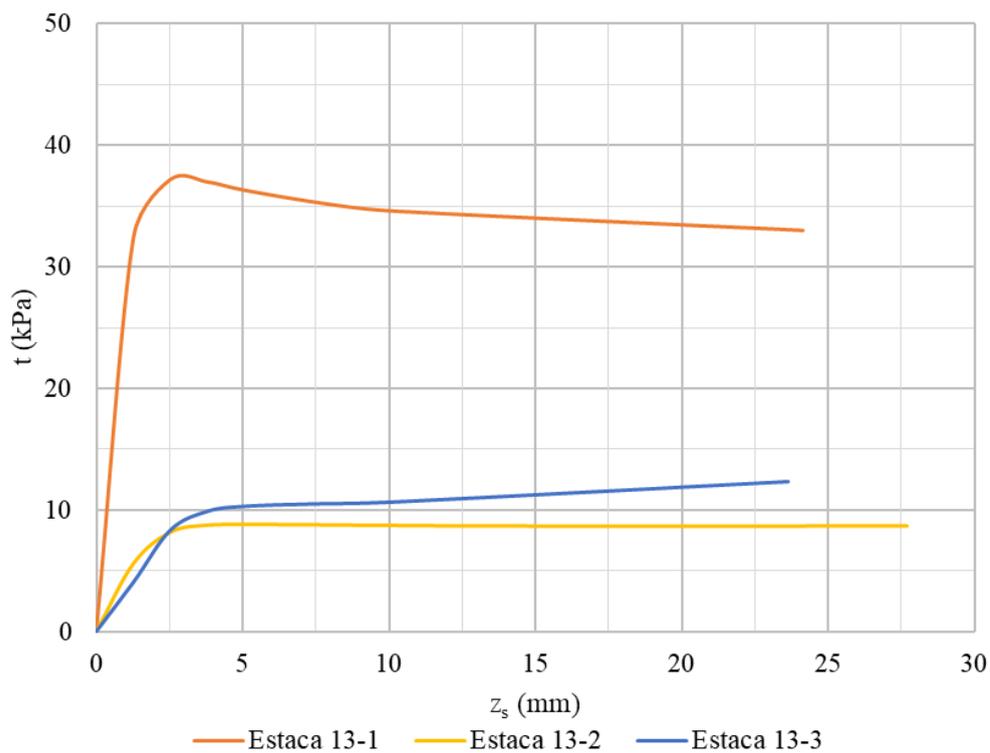
Fonte: Adaptado de Tavenas (1971)

Figura D24 – Curvas q-z experimentais das estacas 11-5 a 11-8 de Tavenas (1971)



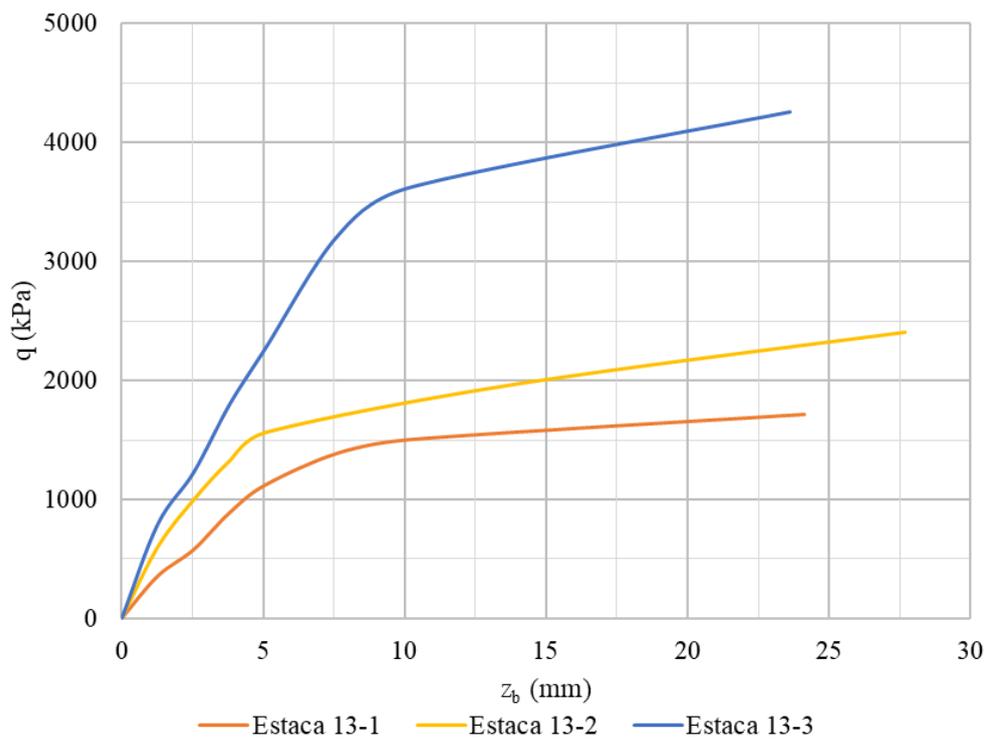
Fonte: Adaptado de Tavenas (1971)

Figura D25 – Curvas t-z experimentais das estacas 13-1 a 13-3 de Nottingham (1975)



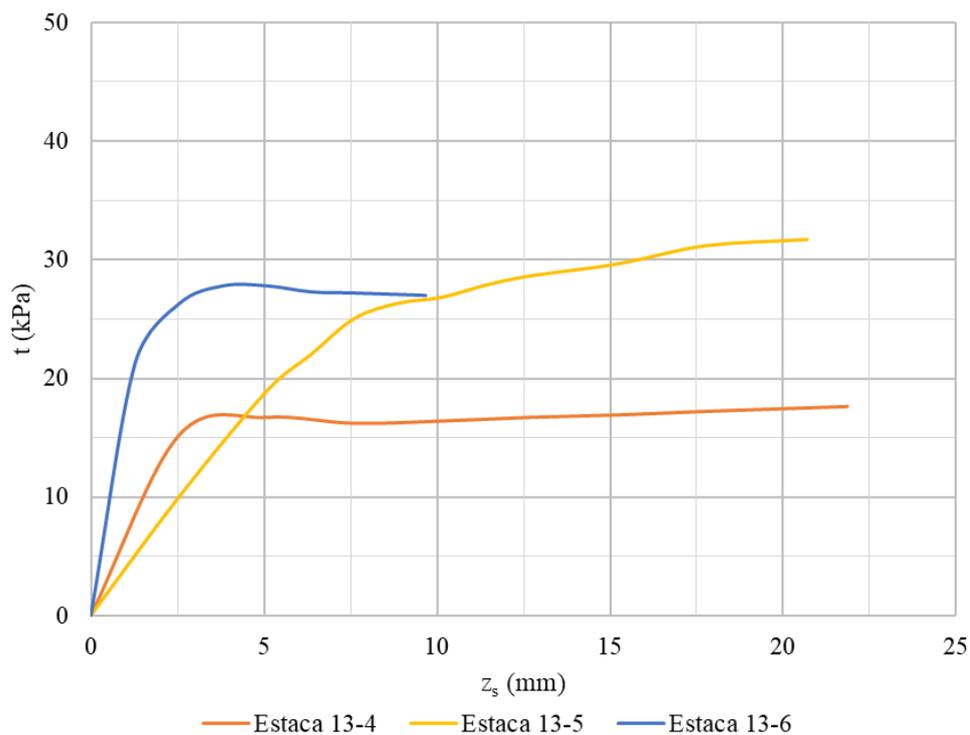
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura D26 – Curvas q-z experimentais das estacas 13-1 a 13-3 de Nottingham (1975)



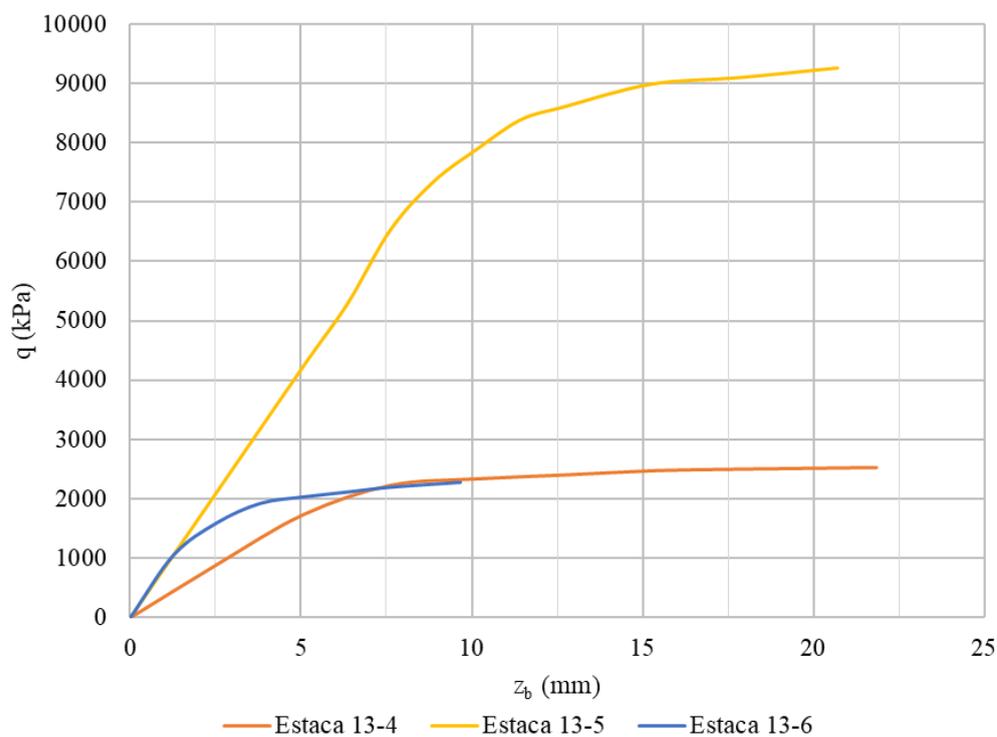
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura D27 – Curvas t-z experimentais das estacas 13-4 a 13-6 de Nottingham (1975)



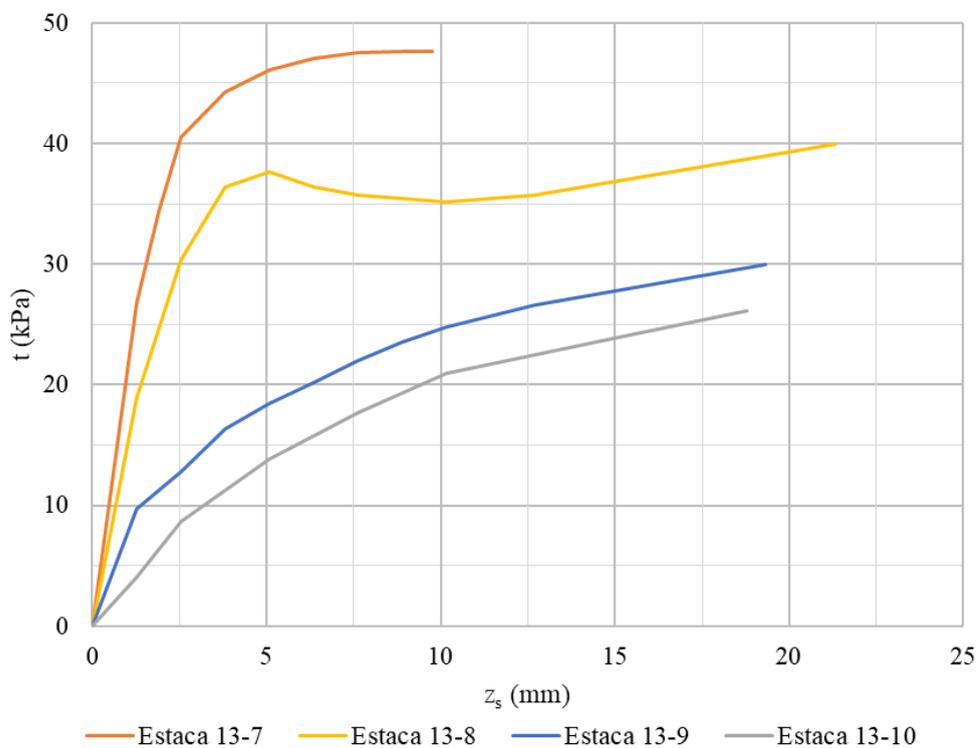
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura D28 – Curvas q-z experimentais das estacas 13-4 a 13-6 de Nottingham (1975)



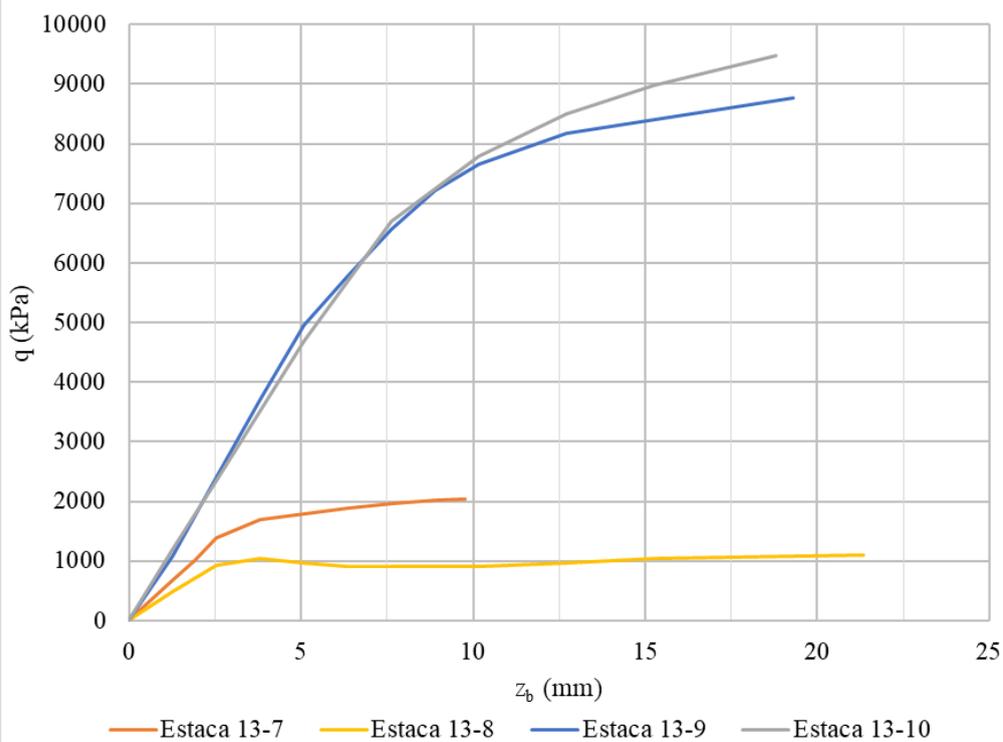
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura D29 – Curvas t-z experimentais das estacas 13-7 a 13-10 de Nottingham (1975)



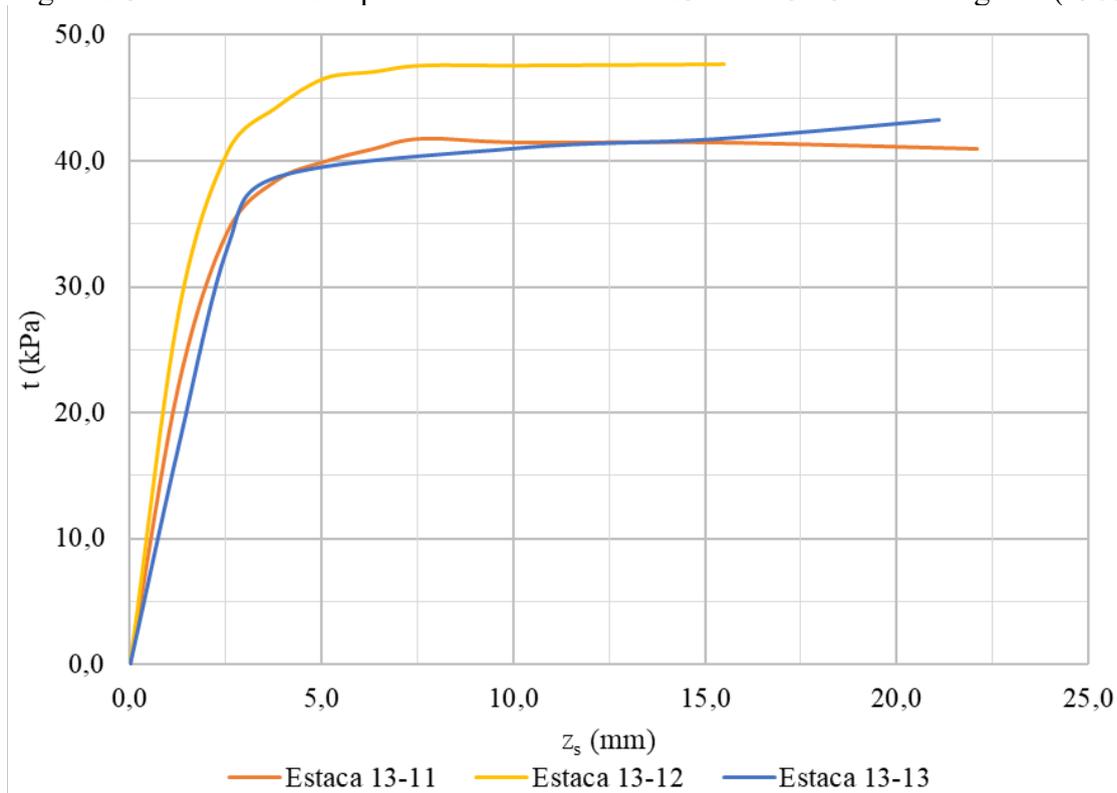
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura D30 – Curvas q-z experimentais das estacas 13-7 a 13-10 de Nottingham (1975)



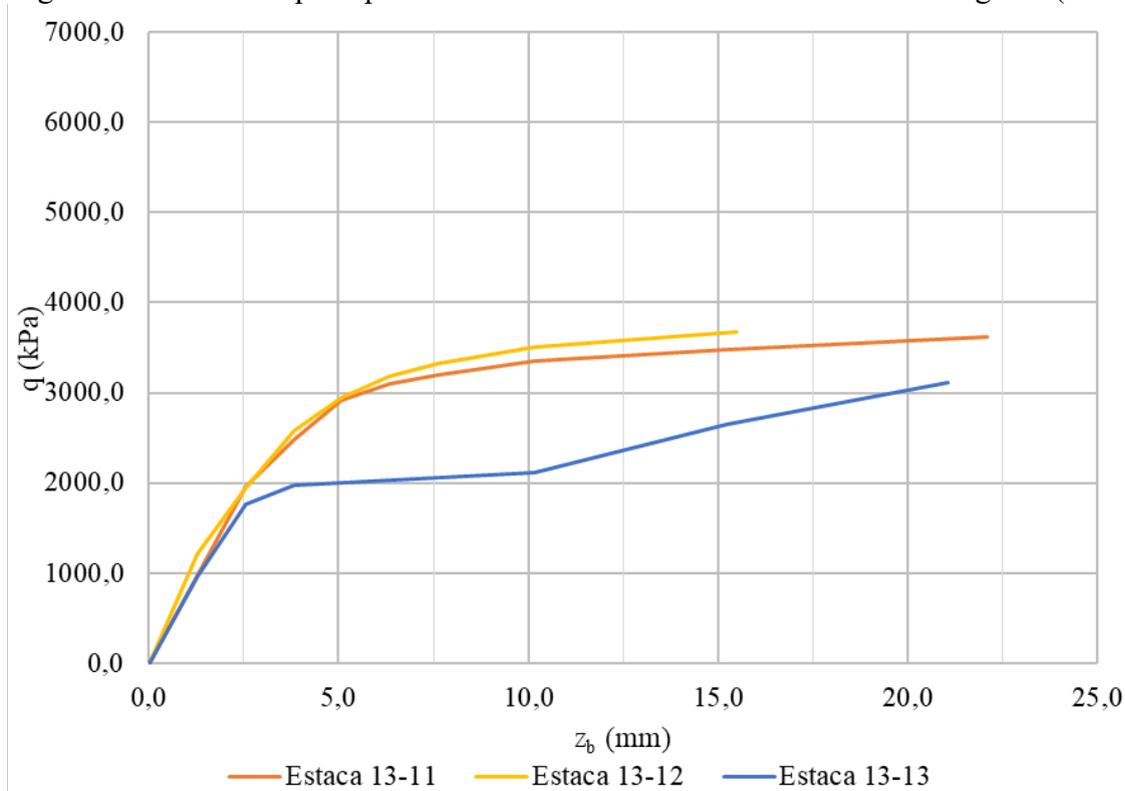
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura D31 – Curvas t-z experimentais das estacas 13-11 a 13-13 de Nottingham (1975)



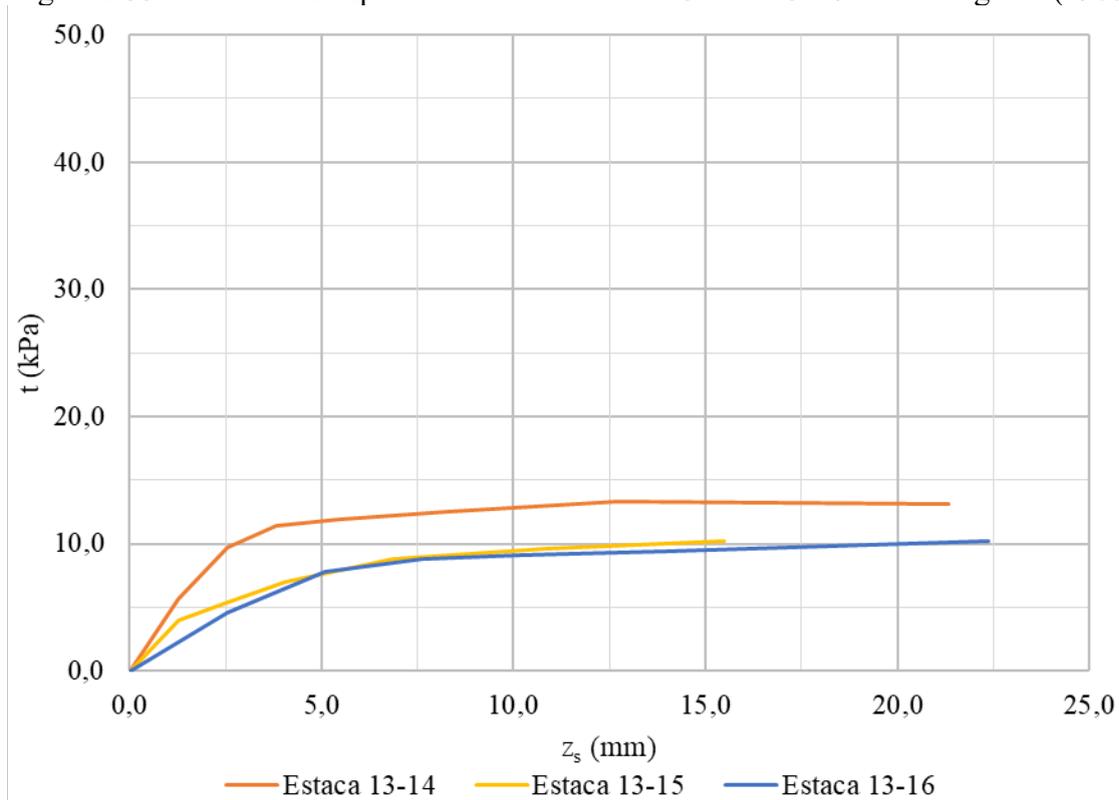
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura D32 – Curvas q-z experimentais das estacas 13-11 a 13-13 de Nottingham (1975)



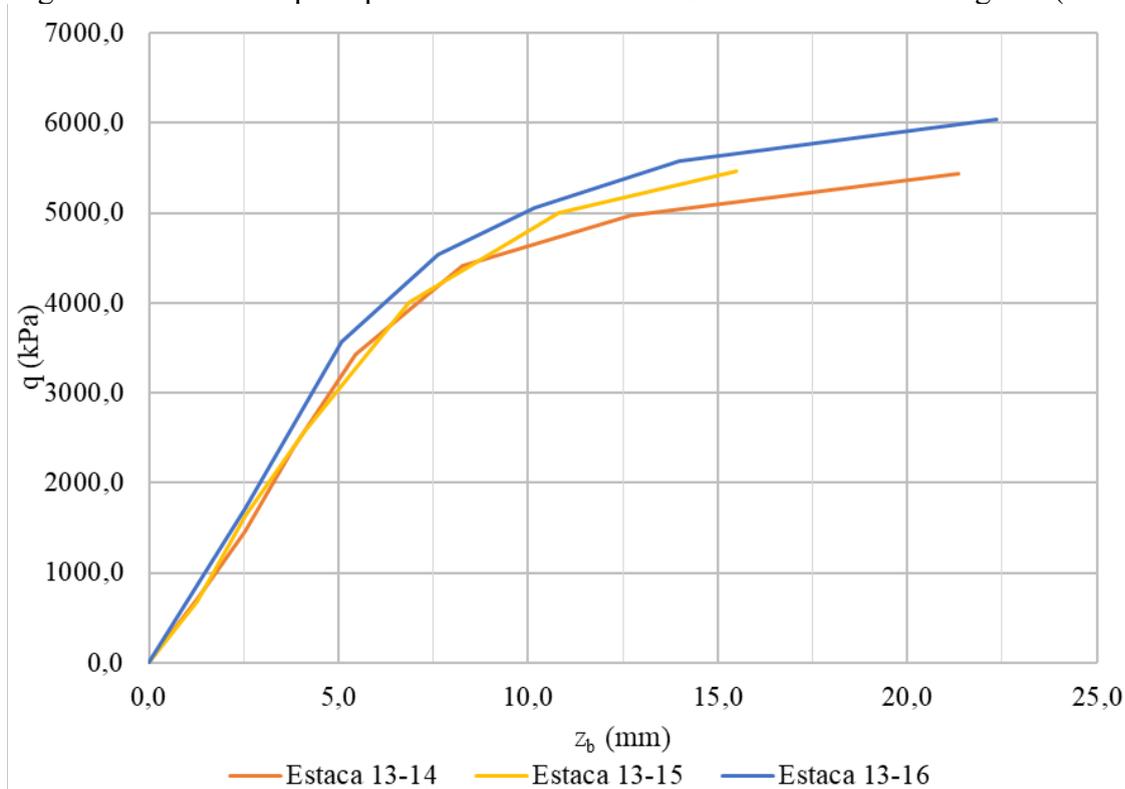
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura D33 – Curvas t-z experimentais das estacas 13-14 a 13-16 de Nottingham (1975)



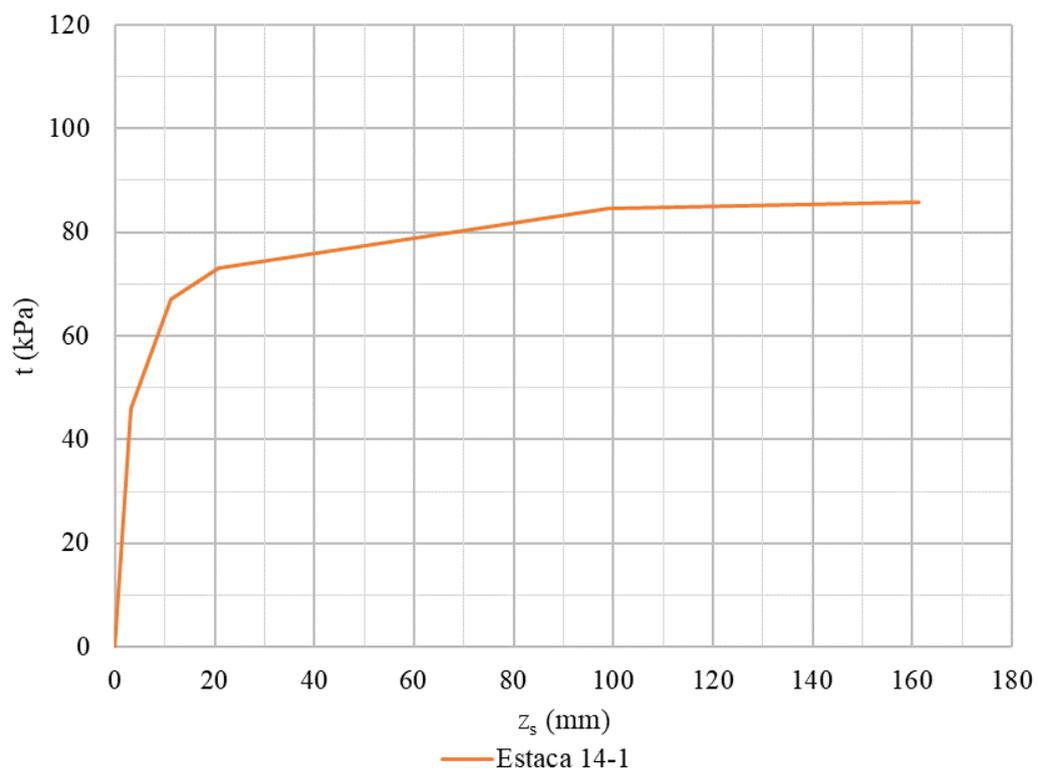
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura D34 – Curvas q-z experimentais das estacas 13-14 a 13-16 de Nottingham (1975)



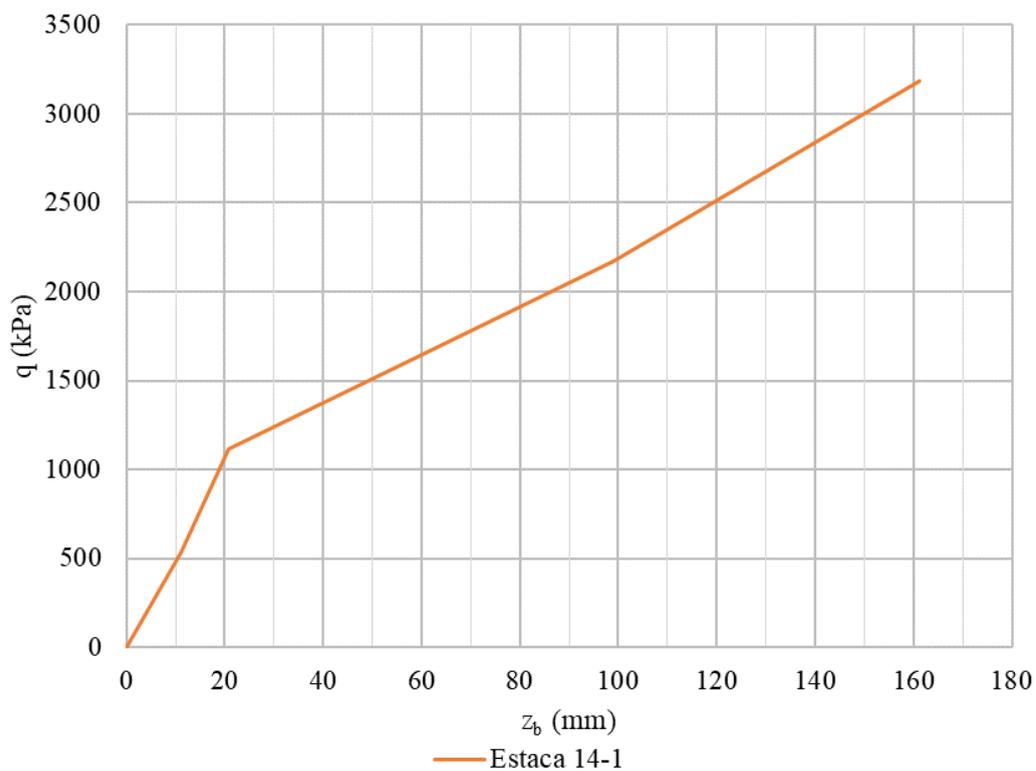
Fonte: Adaptado de Nottingham (1975)

Figura D35 – Curvas t-z experimentais da estaca 14-1 de Mayne e Harris (1993)



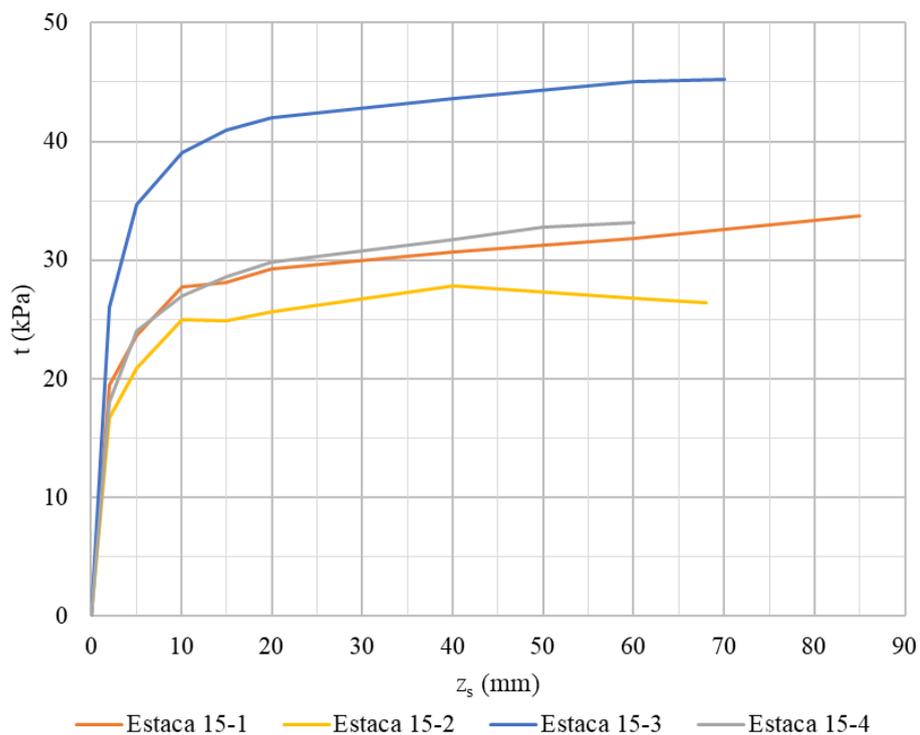
Fonte: Adaptado de Mayne e Harris (1993)

Figura D36 – Curvas q-z experimentais da estaca 14-1 de Mayne e Harris (1993)



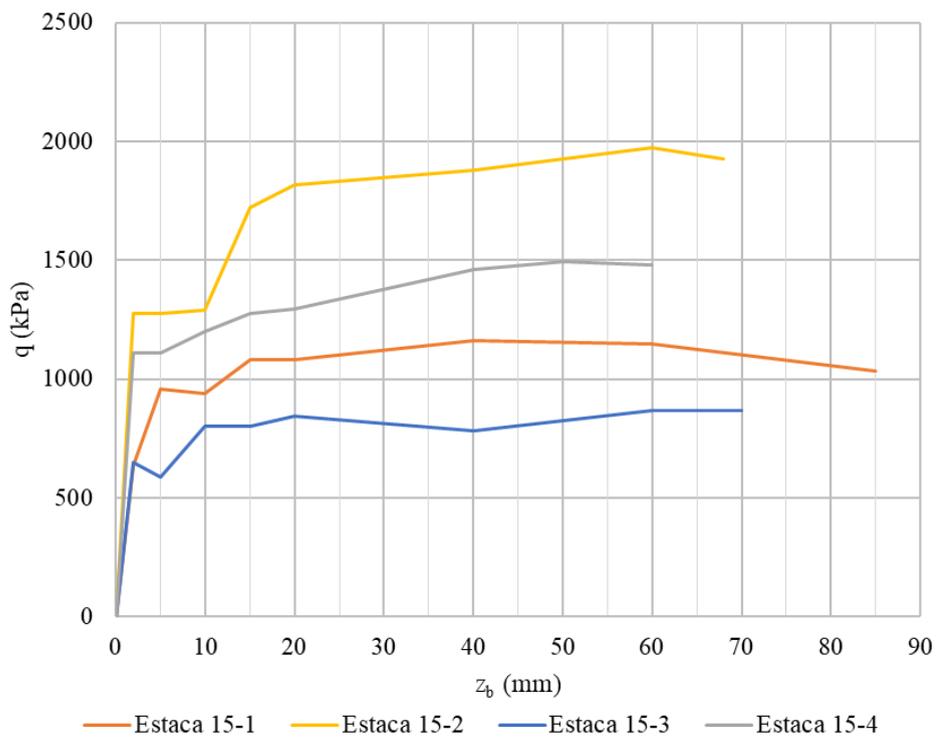
Fonte: Adaptado de Mayne e Harris (1993)

Figura D37 – Curvas t-z experimentais das estacas isoladas de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)



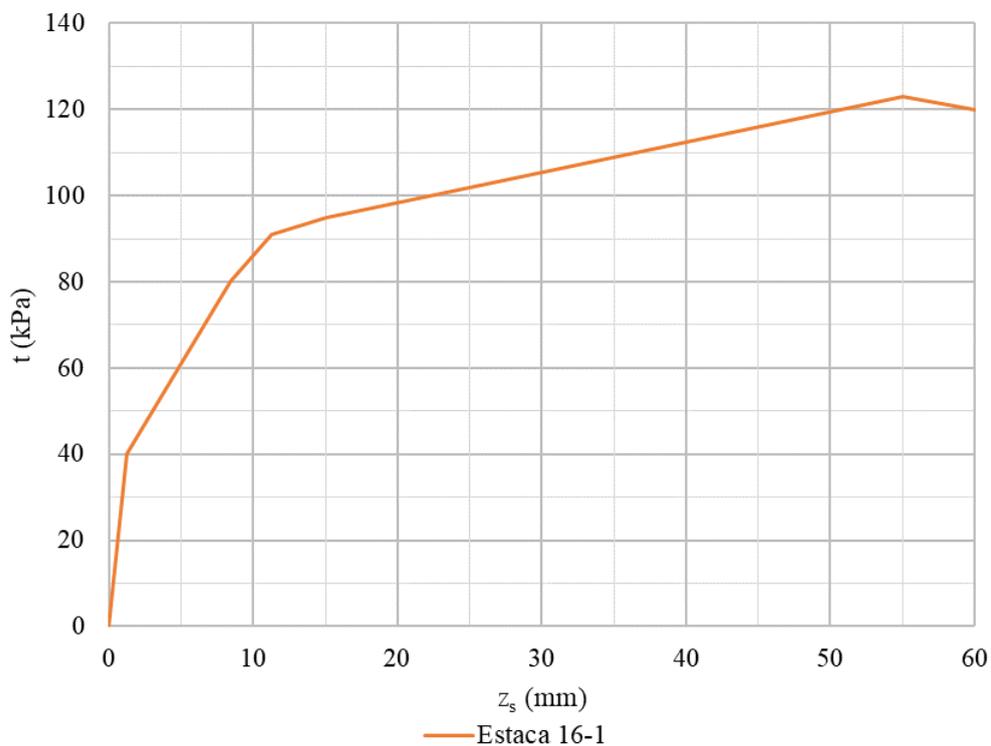
Fonte: Adaptado de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)

Figura D38 – Curvas q-z experimentais das estacas isoladas de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)



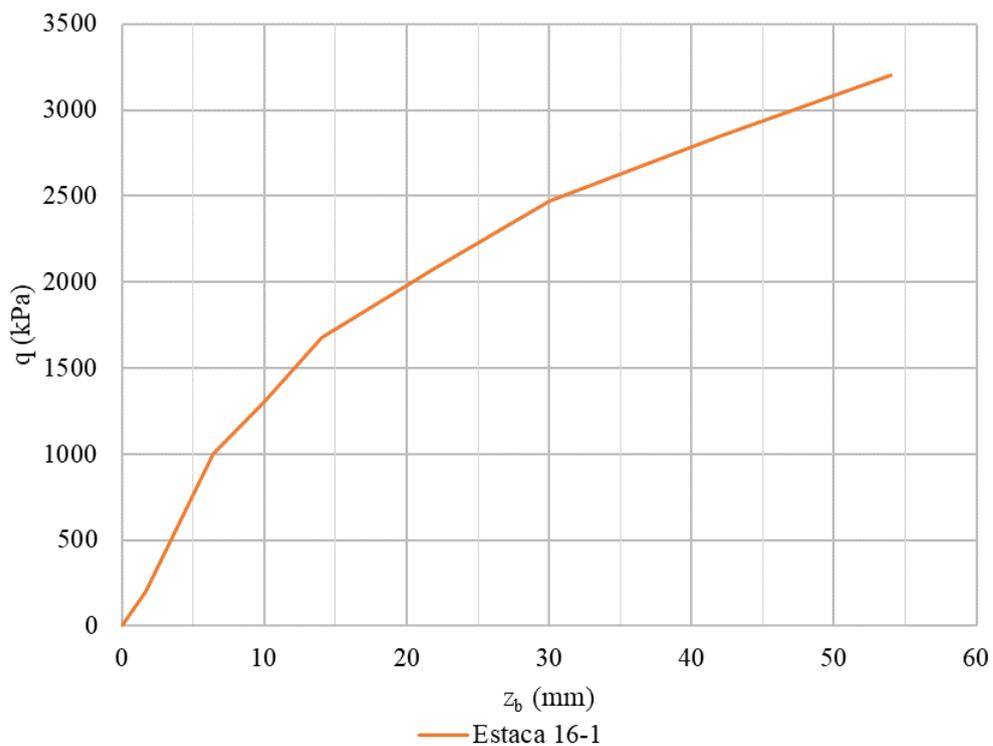
Fonte: Adaptado de Gregersen, Aas e DiBiagio (1973)

Figura D39 – Curva t-z experimental da estaca 16-1 de Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014)



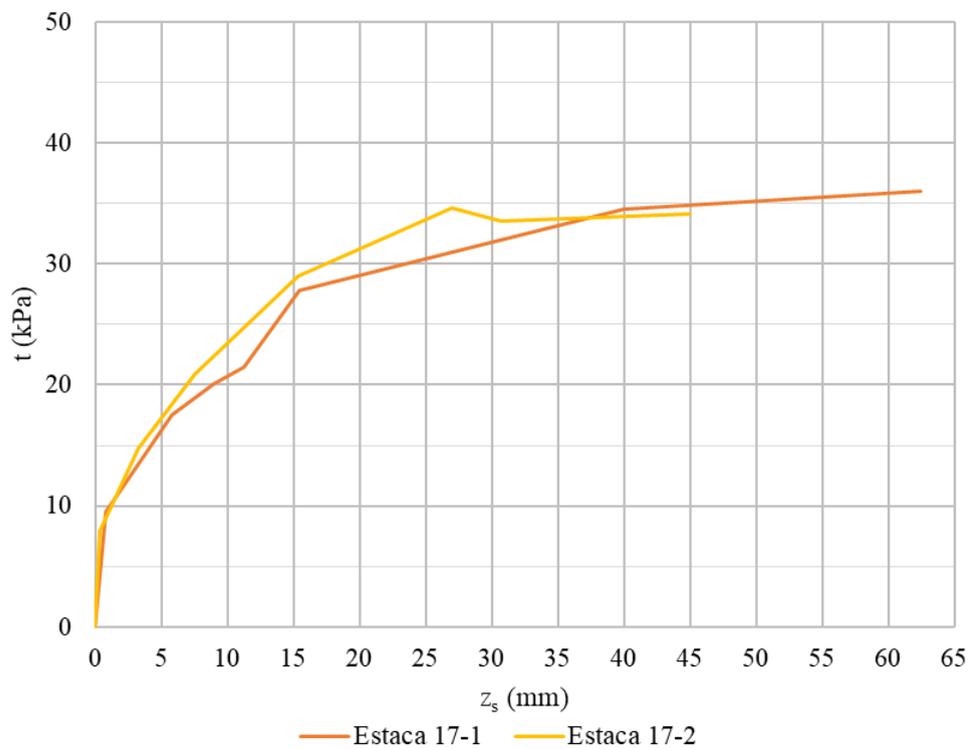
Fonte: Adaptado de Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014)

Figura D40 – Curva q-z experimental da estaca 16-1 de Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014)



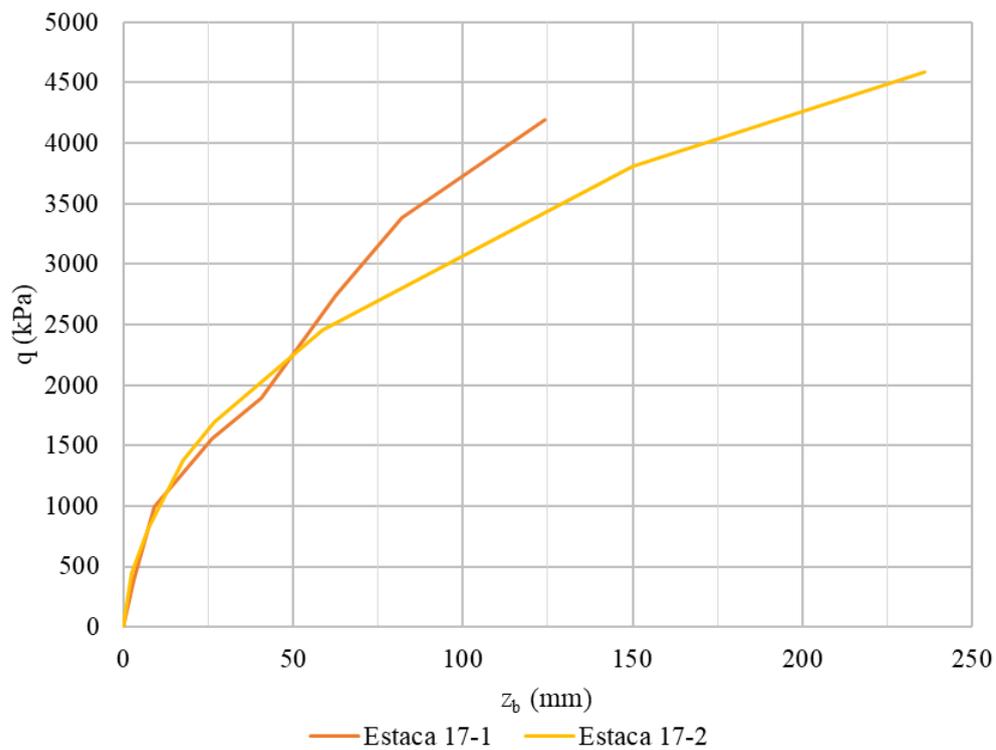
Fonte: Adaptado de Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014)

Figura D41 – Curvas t-z experimentais das estacas isoladas de Gavin, Cadogan e Casey (2009)



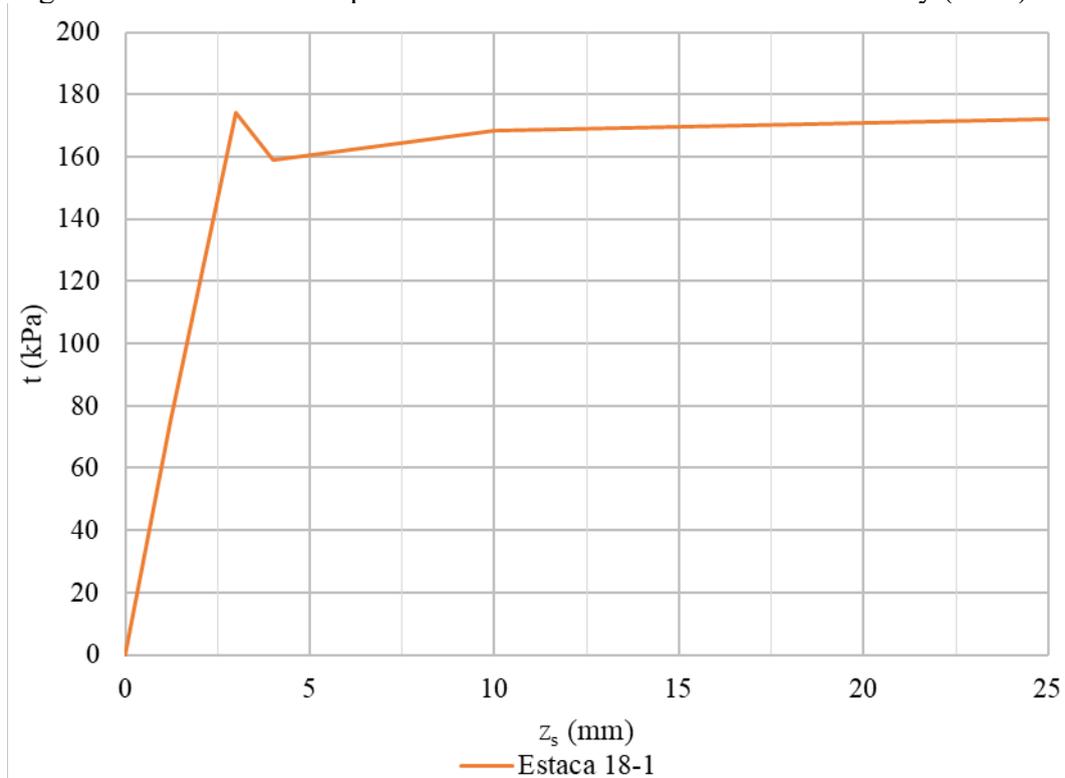
Fonte: Adaptado de Gavin, Cadogan e Casey (2009)

Figura D42 – Curvas q-z experimentais das estacas isoladas de Gavin, Cadogan e Casey (2009)



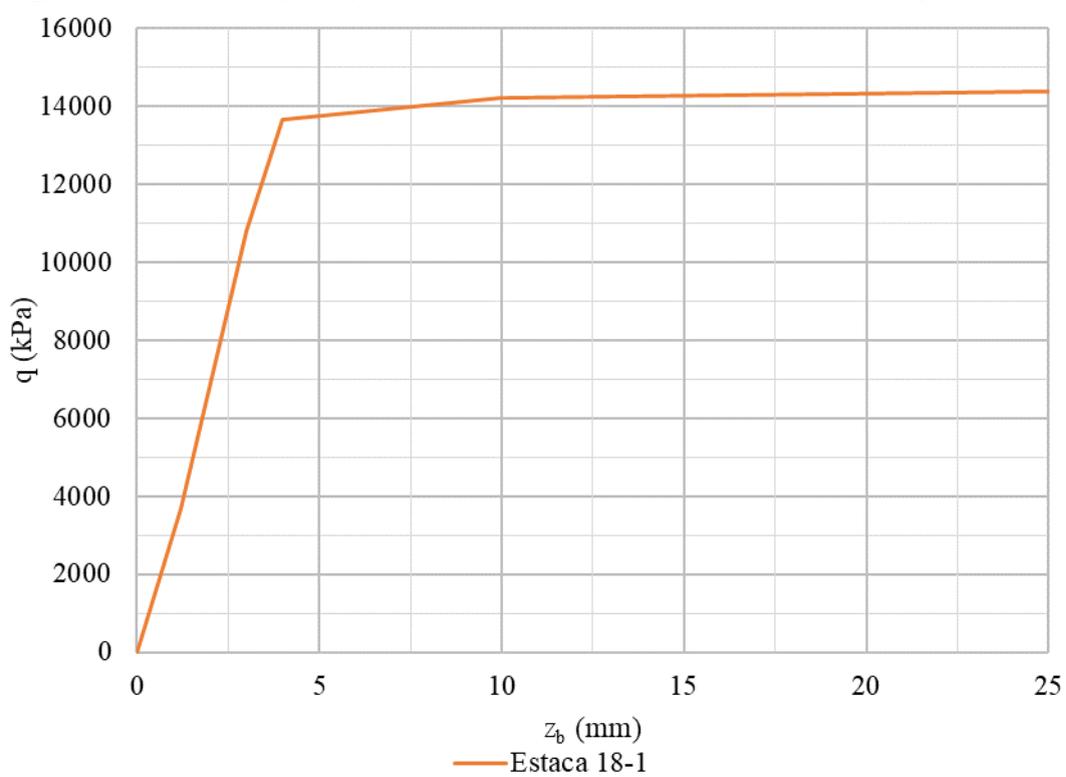
Fonte: Adaptado de Gavin, Cadogan e Casey (2009)

Figura D43 – Curva t-z experimental da estaca 18-1 de Gavin e O'Kelly (2007)



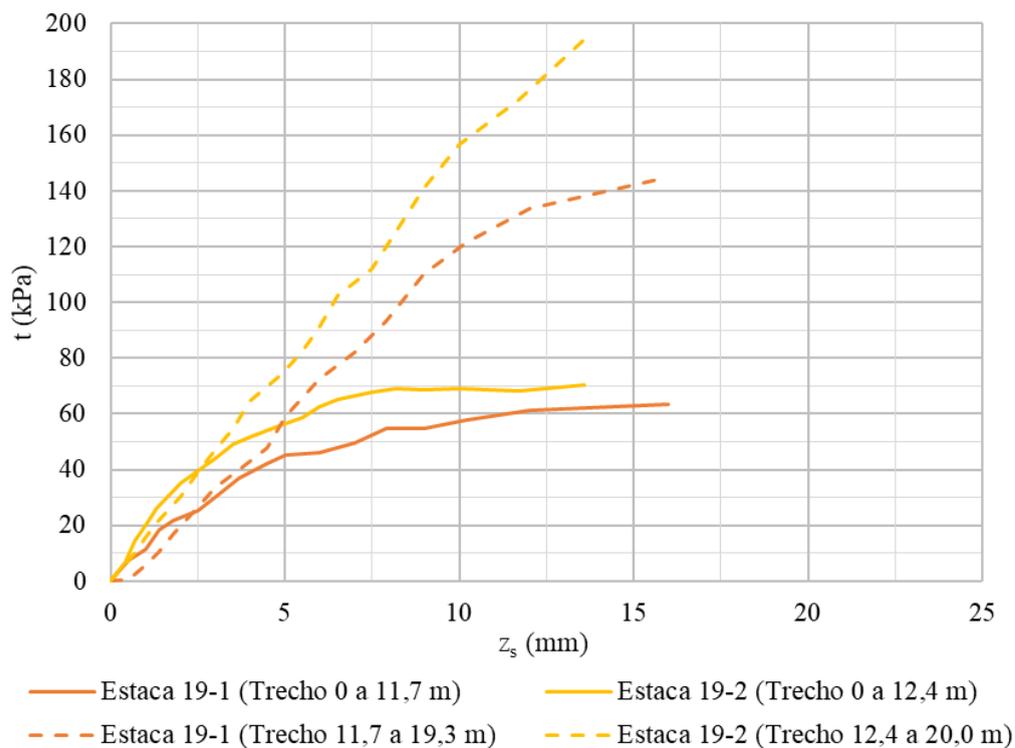
Fonte: Adaptado de Gavin e O'Kelly (2007)

Figura D44 – Curva q-z experimental da estaca 18-1 de Gavin e O'Kelly (2007)



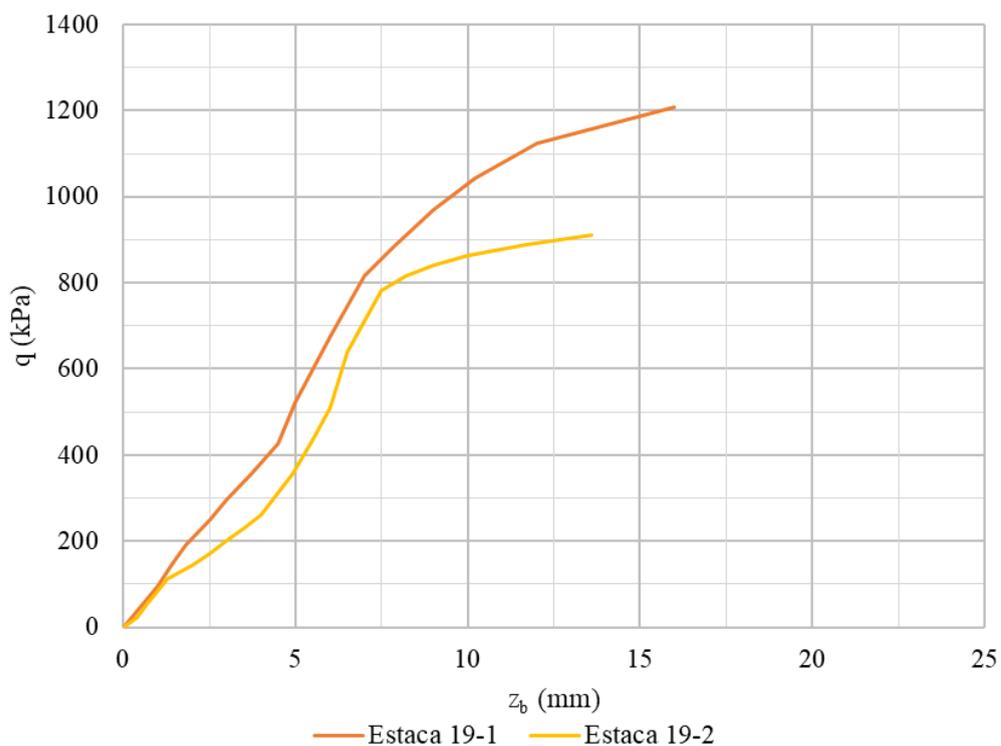
Fonte: Adaptado de Gavin e O'Kelly (2007)

Figura D45 – Curvas t-z experimentais das estacas isoladas de Fellenius, Brusey e Pepe (2000)



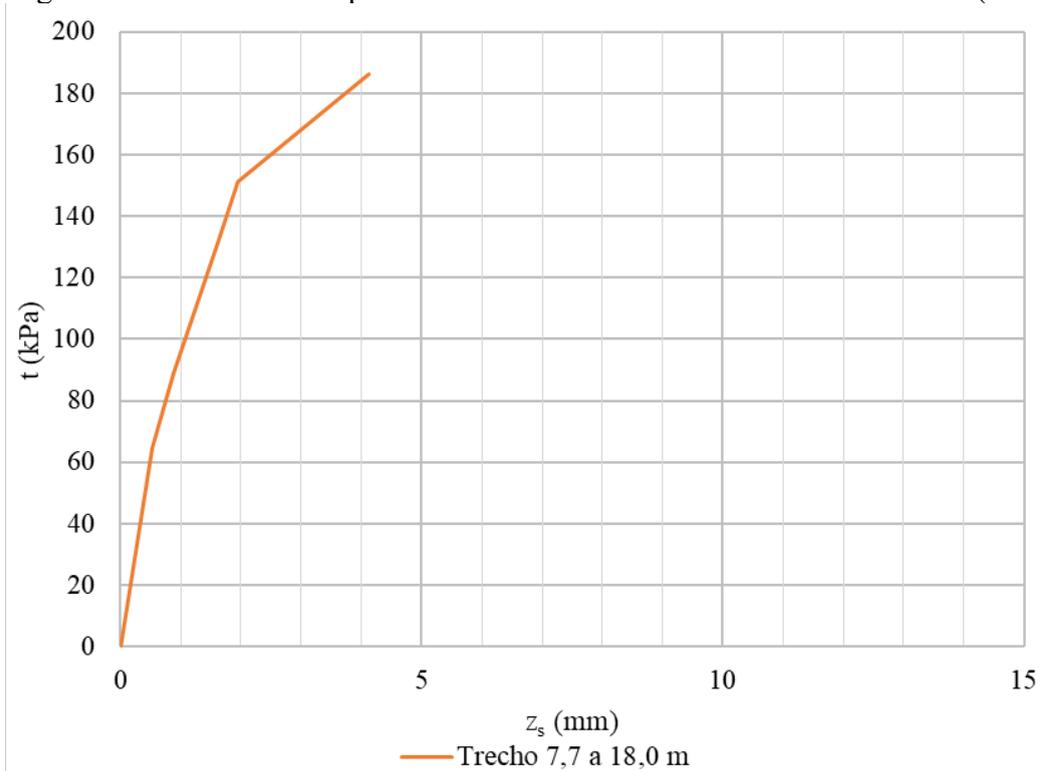
Fonte: Adaptado de Fellenius, Brusey e Pepe (2000)

Figura D46 – Curvas q-z experimentais das estacas isoladas de Fellenius, Brusey e Pepe (2000)



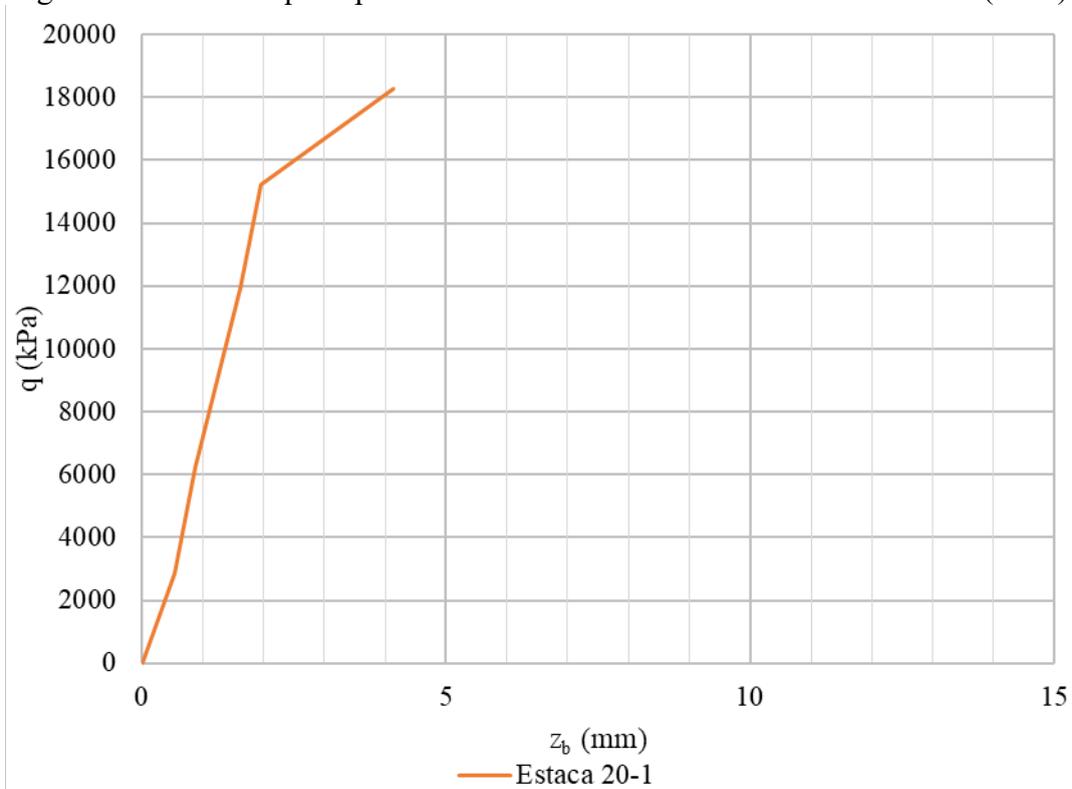
Fonte: Adaptado de Fellenius, Brusey e Pepe (2000)

Figura D47 – Curva t-z experimental da estaca 20-1 de Bradshaw e Baxter (2006)



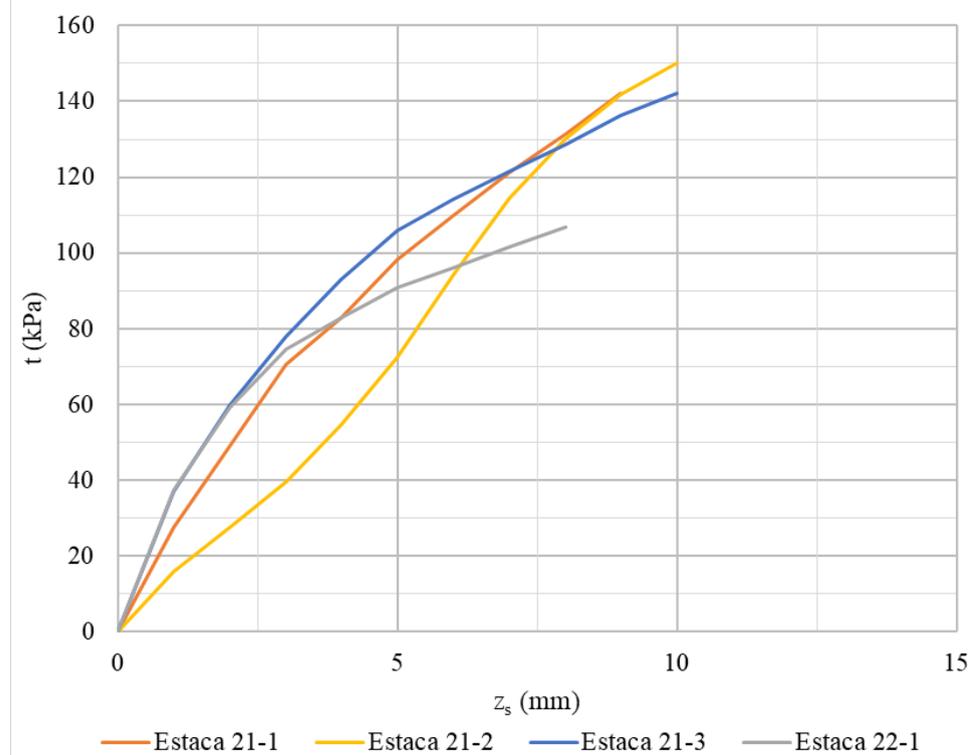
Fonte: Adaptado de Bradshaw e Baxter (2006)

Figura D48 – Curva q-z experimental da estaca 20-1 de Bradshaw e Baxter (2006)



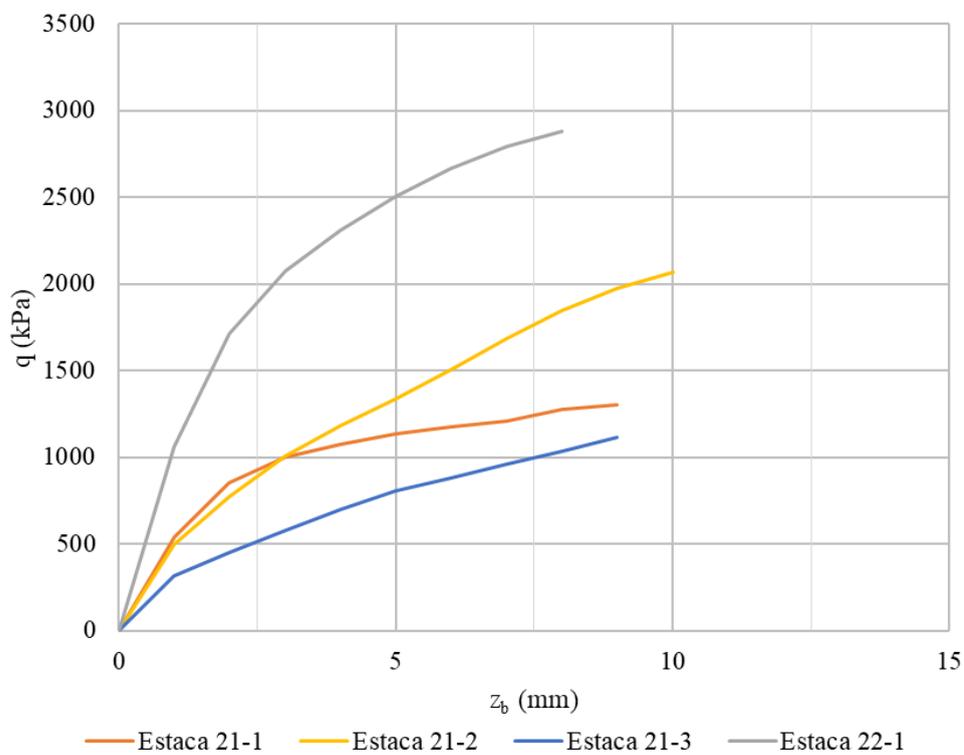
Fonte: Adaptado de Bradshaw e Baxter (2006)

Figura D49 – Curvas t-z experimentais das estacas isoladas de Krasinski (2011) e Krasinski (2012)



Fonte: Adaptado de Krasinski (2011) e Krasinski (2012)

Figura D50 – Curvas q-z experimentais das estacas isoladas de Krasinski (2011) e Krasinski (2012)



Fonte: Adaptado de Krasinski (2011) e Krasinski (2012)