XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/92

Reavaliação do Método de Decourt-Quaresma para os Solos de Curitiba-PR

Luiz Henrique Felipe Olavo
Engenheiro Civil, ENSOLO Engenharia de Solos e Fundações Ltda, Pinhais, Brasil, luiz@ensolo.com.br

RESUMO: O método de Decourt-Quaresma foi o método semiempírico que apresentou os melhores resultados conforme Vianna (2000) para previsão da capacidade de carga em estacas pré-moldadas na cidade de Curitiba, PR, porém uma análise de confiabilidade com base nos valores médios de coeficiente de variação para as solicitações propostos por Zhang e Tang (2002) levou a uma probabilidade de falha referente à incerteza de modelo de 1/45 quando se projeta com base em um fator de segurança igual a 2. Com o objetivo de melhorar a acurácia do método, o mesmo foi calibrado com base em ensaios de carregamento dinâmico, onde se percebeu a necessidade de se multiplicar o atrito lateral em solos aluvionares por 0,744, por 1,966 em solo residual de migmatito e por 1,612 na formação Guabirotuba. O fator de proporção entre o N_{SPT} e a tensão de ruptura da ponta obtido foi de 131,26kN/m² para o solo residual de migmatito e 154,91kN/m² para a formação Guabirotuba. O método calibrado desta forma foi comparado com as provas de carga apresentadas por Vianna (2000) e obteve-se que o mesmo ficou em média coincidente com as provas de carga estática e com coeficiente de variação de 4,98%, levando a uma probabilidade de falha referente à incerteza de modelo de $1/10^9$, com as mesmas premissas utilizadas para o método original, indicando a validade da calibração.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas Pré-Moldadas, Método de Decourt-Quaresma, Calibração de Método Semiempírico.

ABSTRACT: The Decourt-Quaresma method was the semi-empirical method that presented the best results, according to Vianna (2000), for predicting the load capacity of precast piles in the city of Curitiba, PR. However, a reliability analysis based on the average values for the loads coefficient of variation proposed by Zhang and Tang (2002) resulted in a probability of failure regarding the model uncertainty of 1/45 when designing based on a safety factor equal to 2. In order to improve the accuracy of the method, it was calibrated based on dynamic load tests, where it was observed that it was necessary to multiply the lateral friction in alluvial soils by 0.744, by 1.966 in residual migmatite soil and by 1.612 for the Guabirotuba formation. The proportion factor between the N_{SPT} and the tip rupture stress obtained was 131.26 kN/m² for the migmatite residual soil and 154.91 kN/m² for the Guabirotuba formation. The method calibrated in this way was compared with the load tests presented by Vianna (2000) and it was found that it coincided on average with the static load tests and with a coefficient of variation of 4.98%, leading to a probability of failure regarding the model uncertainty of $1/10^9$, with the same assumptions used for the original method, indicating the validity of the calibration

KEYWORDS: Precast Piles, Decourt-Quaresma Method, Semi-Empirical Method Calibration.

1 INTRODUÇÃO

Vianna (2000) analisou 3 métodos semiempíricos em comparação com 34 provas de carga estática realizadas em Curitiba, PR, em estacas pré-moldadas. A conclusão da autora foi a de que o método que apresentou o melhor desempenho foi o método de Decourt-Quaresma, o qual ficou 15% a favor da segurança, porém com coeficiente de variação de 28%.

Por outro lado, após a norma de fundações de 2010 (ABNT, 2010) foram feitas diversas provas de carga e ensaios de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas na região, cujos resultados permitem uma melhor calibração do método de cálculo, incluindo a calibração por unidade geotécnica, o que não era o objetivo do trabalho de Vianna (2000).

A região de Curitiba apresenta três unidades geotécnicas principais, as quais são: Solos de origem aluvionar, a formação Guabirotuba e solos residuais de migmatito. As três unidades possuem características muito diferentes e é possível notar nos ensaios de carregamento dinâmico, comportamentos bastante distintos entre elas em relação à capacidade de carga, o que explica a variabilidade encontrada pelo método semiempírico.

As obras estudadas para esta reavaliação encontram-se listadas na Tabela 1 e os ensaios de carregamento dinâmico estão listados na Tabela 2, onde C.Al. indica o comprimento da estaca em aluvião, N.Al., o valor médio do N_{SPT} no solo de aluvião, At.Al. o atrito lateral médio no solo de aluvião, C.Gu. o comprimento da estaca em solo da formação Guabirotuba, N.Gu., o valor médio do N_{SPT} na formação Guabirotuba, At.Gu. o valor da tensão de atrito lateral média no solo da formação Guabirotuba, C.Re. o comprimento da estaca em solo residual, N.Re. o valor médio do N_{SPT} no solo residual, At.Re. a tensão média de atrito lateral no solo residual, N.Pt o valor do N_{SPT} para a ponta da estaca, conforme o método de Decourt-Quaresma (na cota da ponta, um metro acima e um metro abaixo), R.Pt. a tensão resistente do solo sob a ponta da estaca.

Tabela 1. Relação de obras

Obra	Endereço
1	Rua Saint Hilaire esq. R. Petit Carneiro, Água Verde, Curitiba
2	Rua Marques do Paraná, 601, Água Verde, Curitiba
3	Rua Guaratuba, 355, Ahú, Curitiba
4	Rua África, 50, Jardim Boa Esperança, Pinhais
5	Rua Ari José Vale, 980, Santa Felicidade, Curitiba
6	Av. Mal. Floriano Peixoto, Boqueirão, Curitiba
7	Av. Iguaçu, 880, Rebouças, Curitiba
8	Rua Nova Esperança, 808, Emiliano Perneta, Pinhais
9	Av. Mateus Leme, 2288, São Lourenço, Curitiba
10	Av. Comendador Franco, esq. Com Linha Verde, Prado Velho, Curitiba
11	Rua do Herval, 611, Cristo Rei, Curitiba
12	Rua das Guianas, 123, esq. Com R. Haiti, Alto Tarumã, Pinhais
13	Av. Manoel Ribas, 5729, Santa Felicidade, Curitiba
14	Av. Pref. Maurício Fruet 2150, Cajuru, Curitiba
15	Rua Lourenço Pinto, 240, Centro, Curitiba
16	Rua Luziano Cordeiro, 1655, Parque da Fonte, São José dos Pinhas
17	Rua Izabel a Redentora, 2356, Centro, São José dos Pinhais
18	Av. Cel. Francisco H. Dos Santos,1871, Jardim das Américas, Curitiba
19	Rua Sete de Setembro, Estância Pinhais, Pinhais
20	Rua Rodolpho Hatschbach, 1581, CIC, Curitiba
21	Av. Rocha Pombo, São José dos Pinhais
22	Rua João Chede, 1955, CIC, Curitiba
23	Rua Monsenhor Ivo Zanlorenzi, 2460, Ecoville, Curitiba
24	Rua Paulo Turkievicz, s/n, Tarumã, Curitiba
25	Av. Victor Ferreira do Amaral, Tarumã, Curitiba
26	Rua Sen. Accioly Filho, CIC, Curitiba
27	Rua Fernando Amaro, 169, Alto da XV, Curitiba
28	Rua Guaratuba esq. com Rua Benjamin Zilli, Ahú, Curitiba
29	Rua Américo Firmino de Toledo, 210, Curitiba
30	Travessa Polysu, Juvevê, Curitiba
31	Rua Adriano Lungarini esquina com Rua Sílvio Manfron, Curitiba
32	Rua Francisco Nunes, 1441, Prado Velho, Curitiba
33	Rodovia BR 116 km 012+700, Colombo
34	Estrada Campo Largo da Roseira, km 4, São José dos Pinhais
35	Aeroporto Afonso Pena, São José dos Pinhais
36	Rua Cassiano Ricardo, Pinhais
37	Rodovia BR 376, km 619+600

Tabela 1 (continuação). Relação de obras.

Obra	Endereço
38	Rua Francisco Nunes, 715, Curitiba
39	Rodovia BR 277, km 76, São José dos Pinhais
40	Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 1575, Jardim Amélia, Pinhais
41	Rua Apucarana, 1218, Pinhais

Tabela 2. Ensaios de Carregamento Dinâmico

Obra	Estaca	Seção	C.Al (m)	N.Al (gp/30)	At.Al (kPa)	C.Gu (m)	N.Gu (gp/30)	At.Gu (kPa)	C.Re (m)	N.Re (gp/30)	At.Re (kPa)	N.Pt (gp/30)	R.Pt (MPa)
1	E183	40x40	3,10	2,67	51,0	5,42	20,2	149,6				31,7	9,18
2	P9A	25x25	7,80	2,25	32,4	6,20	26,2	69,4				49,0	12,31
2	P33B	40x40	8,50	2,88	62,7	5,30	18,6	65,0				26,0	2,94
2	P39A	35x35	8,70	2,67	12,2	6,20	32,2	185,8				46,0	0,04
3	P8B	30x30				5,00	11,0	70,6	3,00	13,8	219,7	43,6	3,20
3	P14B	30x30				5,20	9,0	80,0	3,70	31,8	236,0	34,7	4,26
3	P24B	35x35				5,20	9,0	43,7	4,10	31,8	137,2	34,7	3,81
4	P4	18x18	5,90	5,60	30,3	4,90	19,2	168,9				22,0	10,74
4	P7	14x14	5,90	5,60	88,3	2,80	18,0	109,2				20,0	25,00
5	P23	20x20							11,00	19,0	129,0	59,3	4,89
6	P17	30x30	10,60	5,10	25,6				5,50	15,0	123,4	27,0	16,05
6	P23	25x25	10,60	5,10	1,9				6,50	15,9	253,1	30,0	0,24
7	P21A	35x35	1,45	2,00	3,2	9,25	13,7	120,7				26,0	5,32
7	P21B	35x35	1,45	2,00	0,0	9,25	13,7	118,9				26,0	0,31
7	P22A	35x35	0,45	3,00	13,8	9,80	16,8	160,9				28,7	0,14
7	P22B	35x35	0,45	3,00	7,4	9,70	16,8	103,5				28,7	0,18
8	P10	18x18	2,15	10,00	0,0				9,85	8,3	26,1	48,4	0,20
9	P21B	20x20	5,30	2,87	15,7				8,10	9,6	87,8	23,3	3,92
9	P30A	18x18	5,30	2,87	15,6				6,20	6,2	142,7	8,0	1,54
10	P12B	22x22	5,80	4,50	8,28				4,80	15,8	106,5	22,3	8,35
10	P25A	25x25	5,80	4,50	14,22				9,60	22,8	198,7	50,9	5,33
10	P42A	35x35	4,80	5,00	29,10				9,50	23,1	138,7	39,7	6,18
10	P55B	25x25	4,80	5,00	57,54				10,30	32,0	119,9	78,0	2,83
10	P68E	25x25	4,80	5,00	7,28				9,00	23,1	140,2	39,7	3,67
10	P70I	25x25	4,70	3,50	13,28				9,10	22,9	184,3	62,3	2,63
10	P75B	25x25	4,70	3,50	45,27				8,80	22,9	239,0	62,3	1,56
11	P6B	35x35	3,85	3,67	1,40				7,35	29,4	209,2	52,0	4,64
11	P8A	35x35	3,47	4,00	14,48				8,23	22,0	196,3	40,3	13,83
11	P11B	35x35	1,17	3,00	0,00				7,83	21,4	158,9	52,3	10,08
11	P20H	30x30	3,47	4,00	0,00				8,73	22,0	232,7	40,3	1,16
12	E76	30x30	4,00	5,00	50,98				5,32	10,7	23,9	17,3	2,49
12	E60	25x25	4,00	5,00	61,70				5,42	10,7	28,4	17,3	2,41
13	P12A	35x35							9,60	18,8	88,5	49,5	6,14
13	P13B	30x30							10,30	18,8	129,8	49,5	6,70
13	P22B	35x35							11,00	22,2	136,1	56,5	8,69
13	P23A	30x30							10,15	18,8	122,4	49,5	8,88
14	P457B	22x22				15,00	12,87	94,0				22,3	1,35
14	P414	18x18				12,45	8,25	39,2					
14	P411B	25x25				12,45	8,67	104,5					
14	P442B	25x25				14,60	11,93	69,7				19,7	2,65
14	P455C	25x25				12,90	11,38	132,1				19,0	5,16
14	P434A	30x30				12,45	8,25	58,3					
14	P448	25x25				12,00	11,17	104,4				16,0	1,47

Tabela 2 (continuação).Ensaios de carregamento dinâmico.

Obra	Estaca	Seção	C.Al (m)	N.Al (gp/30)	At.Al (kPa)	C.Gu (m)	N.Gu (gp/30)	At.Gu (kPa)	C.Re (m)	N.Re (gp/30)	At.Re (kPa)	N.Pt (gp/30)	R.Pt (MPa)
14	P216B	30x30				17,10	13,88	77,84				23,7	5,21
14	P218B	30x30				12,45	6,67	53,48					
14	P220	30x30	2,65	3,33	0,00	11,20	15,42	59,03				26,0	17,10
14	P227B	30x30	2,65	3,33	63,63	11,20	15,42	65,17				26,0	9,31
14	P303	30x30				12,45	6,67	51,62					
14	P325B	30x30				12,45	12,67	63,01					
14	P332A	25x25				12,45	12,67	13,61					
15	Teste1	25x25				8,60	5,75	80,25	2,70	13,0	219,8	18,0	4,43
16	P1C	20x20	2,14	3,50	44,45	9,82	8,63	86,50				11,7	5,80
17	AP2	18x18	3,20	3,00	0,00	8,50	10,00	88,55				19,0	2,79
17	P1BA	25x25	4,60	4,25	59,12	14,20	9,40	101,21	4,60	15,3	60,9	24,3	6,74
17	P4EC	35x35	6,65	2,83	0,00	12,13	11,54	83,85	4,92	33,1	240,3	74,6	2,09
17	P12A	40x40	6,25	4,33	2,10	12,15	15,31	13,23	5,40	23,7	224,6	52,0	3,25
17	P17A	40x40	7,25	3,29	5,69	9,85	14,80	40,87	6,80	61,6	346,8	92,9	2,57
18	E148	30x30				10,20	21,80	123,90				28,0	5,30
18	E47	25x25				9,20	21,11	106,20				25,7	6,88
18	E50	25x25				11,30	22,55	162,20				30,0	5,98
18	E61	30x30				12,30	15,43	196,50				45,1	8,53
18	E171	30x30				10,30	8,40	115,90				24,3	5,25
18	E94	25X25				11,30	10,45	122,00				31,0	4,75
18	E100	30x30				12,20	7,42	53,90				22,7	26,13
18	E111	30x30				12,20	7,42	108,70				22,7	5,86
18	E126	25x25				11,40	10,45	116,30				31,0	8,95
19	P12B	35x35	9,45	2,75	11,12				7,85	14,75	285,4	25,3	2,78
20	EP9	30x30	2,90	7,50	0 ,00				9,20	13,00	53,1	33,0	20,50
20	EP12	30x30	8,87	3,38	15,16				3,00	16,75	329,5	27,7	1,55
20	EP52	30x30	7,95	4,71	11,63				5,15	17,17	326,6	28,7	1,13
20	EP100	30x30	9,70	5,44	16,02				4,70	21,60	222,9	36,7	2,81
20	EP138	30x30	7,60	3,86	18,80				4,80	18,80	251,6	25,3	1,71
20	EP150	30x30	8,80	3,25	1,21				5,60	18,50	222,1	18,7	6,98
21	P37A	40x40	2,45	5,50	80,27				9,75	13,33	186,2	44,3	7,27
21	P34B	40x40	3,45	4,33	41,30				5,35	12,00	108,3	24,0	11,76
21	P46D	35x35	2,45	5,50	206,75				9,05	13,33	203,1	44,3	3,13
21	PC7A	20x20	3,45	4,33	56,45				7,95	6,85	84,9	26,0	19,94
21	P11B	30x30	3,45	4,33	0 ,00				6,85	11,63	304,2	31,3	1,94
21	P9B	35x35	3,45	4,33	6 ,50				6,85	11,63	276,2	31,3	4,92
22	E27	18x18	3,95	4,00	13,88	4,95	3,20	106,40	2,30	13,00	42,9	12,0	1,62
22	E44	18x18	3,95	4,00	0,00	4,95	3,20	47,94	1,60	11,00	212,6	11,7	1,09
23	P4B	35x35							11,80	11,20	63,6	16,0	12,32
23	P17H	40x40							18,00	23,50	123,2	41,3	1,62
23	P18D	40x40							21,00	26,57	112,3	45,0	2,95
24	PE26C	18x18	3,45	2,67	5,49	7,05	37,60	164,67				54,0	12,06
24	PE19C	18x18	4,45	3,75	10,48	6,15	42,33	228,41				57,3	7,51
24	PE8B	25x25	4,45	3,75	20,06	6,15	42,33	280,32				57,3	5,97
24	PD12C	25x25	3,45	2,67	9,02	6,55	36,43	212,69				51,3	1,78
24	PB02	20x20	3,45	1,33	3,61	7,25	33,00	170,90				52,7	4,99
25	Teste1	14x14	11,00	4,72	13,60							7,3	2,63
25	Teste2	18x18	11,00	4,72	9,12				4,40	10,75	111,4	12,3	0,91
25	E126	20x20	11,00	5,82	3,38				4,30	8,25	100,7		
25	E63	20x20	11,00	3,64	34,40				7,20	8,14	59,60	9,0	2,09

Tabela 2 (continuação). Ensaios de carregamento dinâmico.

Obra	Estaca	Seção	C.Al (m)	N.Al (gp/30)	At.Al (kPa)	C.Gu (m)	N.Gu (gp/30)	At.Gu (kPa)	C.Re (m)	N.Re (gp/30)	At.Re (kPa)	N.Pt (gp/30)	R.Pt (MPa)
25	E113	20x20	9,70	4,89	4,56				13,30	7,75	11,50		
25	E33	18x18	11,00	4,72	35,28				4,40	10,75	123,0		
25	E37	20x20	11,00	4,72	53,18				4,50	10,75	47,80		
26	P2A	22x22				15,45	12,27	29,97					
26	P8D	18x18				13,50	9,77	28,50				24,3	2,77
26	P30D	18x18				11,00	9,91	47,00				22,0	8,22
26	P60D	22x22				12,50	11,08	34,60				24,3	13,19
27	P12E	22x22				11,00	24,82	93,20				43,3	2,30
27	P18A	30x30				11,00	28,09	115,00				48,7	1,35
28	P244C	35x35							9,10	20,11	247,2	30,0	3,75
28	P132C	35x35							11,00	15,91	101,4	30,0	1,84
28	P232C	35x35							9,00	20,11	117,9	30,0	3,06
28	P127A	35x35							8,00	10,88	134,7	22,7	8,21
28	P125A	35x35							8,60	10,88	169,6	22,7	6,93
28	P110C	35x35							13,00	13,85	31,38		
29	P4	20x20	4,78	2,67	1,78				6,62	40,06	236,4	48,4	17,02
30	P4C	30x30							13,40	28,70	172,3	46,3	1,47
30	P1A	30x30							11,40	19,55	94,6	41,7	6,10
30	P6C	25x25							11,00	26,21	138,8	80,9	7,16
30	P8B	25x25							11,00	25,92	111,4	46,9	7,87
30	P17A	20x20							11,00	26,21	151,9	80,9	3,10
31	P9	18x18							11,00	8,55	16,80	11,0	4,42
32	E31	25x25	5,10	3,00	11,58				6,90	28,38	200,8	49,3	2,95
32	E67	30x30	5,10	3,00	28,44				6,60	28,38	185,2	49,3	4,02
33	ES4	Ø38	4,30	1,58	0,00	8,10	12,50	286,66				27,0	1,51
33	EN4	Ø38	4,80	4,63	20,37	7,60	14,71	208,00				26,3	2,17
34	E2	25x25				8,10	17,00	142,31				35,3	0,96
35	E23	30x30	2,00	3,00	19,40	20,00	27,45	77,18				98,0	6,38
35	E28	30x30	2,00	3,00	27,80	23,00	32,83	95,24				68,7	6,87
36	P13	18x18	2,20	2,00	90,80	5,00	14,00	64,18				21,7	2,26
37	NE13	Ø38							12,40	12,75	210,4	35,0	0,57
37	NE5	Ø38							9,50	7,40	184,4	28,3	0,46
37	SE2	Ø38							13,00	16,54	120,0	27,7	2,71
37	SE13	Ø38							11,90	15,67	123,5	34,0	3,39
38	P7A	30x30	5,02	1,28	10,94				7,18	26,46	96,29	51,7	12,16
38	P27A	18x18	4,80	0,76	14,98				7,40	11,67	96,24	26,0	1,97
38	P110	30x30	4,92	1,45	12,46				6,18	16,84	103,0	36,6	17,06
38	P112	30x30	4,92	1,45	0,00				6,38	16,84	126,7	36,6	3,68
38	P141	25x25	4,80	0,76	5,92				7,50	11,67	93,91	26,0	3,31
39	P12C	22x22	3,45	2,00	0,10				6,05	14,67	88,70	22,0	6,89
40	Teste	18x18	5,00	3,20	9,38				5,50	17,00	139,57	30,7	10,63
41	E4	30x30	4,00	5,75	88,35				1,50	31,00	265,05	120,7	6,51

2 ANÁLISE DOS ENSAIOS

Os valores medidos da tensão de aderência solo-estaca por atrito lateral foram comparados com os valores previstos pelo método. Optou-se pela tensão média na camada para reduzir a dispersão. Mesmo assim, alguma dispersão é observada em função de fatores como a variabilidade da granulometria nos aluviões e no solo residual, a distância das estacas à sondagem mais próxima associada à própria variabilidade espacial do solo e o próprio método de análise dos ensaios dinâmicos.

Para o solo de aluvião foi encontrado uma média para o valor de correção igual a 0,987, porém com desvio padrão igual a 1,279. Para encontrar uma estimativa conservadora para o fator de correção recorreu-se ao teorema do limite central, o qual diz que é a média de uma população pode ser estimada com base em uma amostra e possui uma distribuição normal com média igual à média amostral e desvio padrão igual ao desvio padrão da amostra dividido pela raiz do número de elementos da amostra. Desta forma, para um intervalo de confiança de 95%, para o aluvião o fator de calibração encontrado foi de 0,752.

Procedeu-se da mesma maneira para a formação Guabirotuba, onde a média obtida foi de 1,844 com desvio padrão de 0,971, levando a um fator de calibração de 1,628.

Para o solo residual foi encontrada uma média de 2,266 e desvio padrão de 1,292, o que conduz a um fator de calibração de 1,986.

Para a capacidade de ponta, ao invés de um fator de calibração, buscou-se o fator de correlação entre o N_{SPT} médio e a tensão de ponta. Pode ter havido alguma estaca que não mobilizou toda a capacidade de ponta no ensaio dinâmico, porém o fator obtido desta forma está a favor da segurança.

Não há no banco de dados nenhuma estaca apoiada sobre o aluvião. Para o Guabirotuba, o fator de correlação ficou com média de 232,54kPa e desvio padrão de 260,34kPa. Para o intervalo de confiança de 95% o fator de correlação é de 156,48kPa. Para o solo residual, o valor médio ficou em 170,04kPa, com desvio padrão de 167,67kPa, ficando o fator de correlação em 132,59kPa. Nota-se que o solo residual jovem, onde apoiam-se a maioria das estacas possui granulometria mais grossa que as argilas siltosas da formação Guabirotuba e por este motivo era esperado um valor mais alto do fator de correlação.

3 COMPARAÇÃO COM AS PROVAS DE CARGA ESTÁTICA

Em seguida foi feita uma comparação com 34 provas de carga estática apresentadas por Vianna (2000) na região de Curitiba, Paraná. Foi possível observar que o método calibrado pelos ensaios dinâmicos obteve valores de capacidade de carga em média 1,01% acima dos valores extrapolados por Van der Veen por Vianna (2000). Desta forma, os fatores de ajuste do método de Decourt-Quaresma foram divididos por 1+ 1,01% de tal modo que os valores médios fossem coincidentes. Desta forma, os novos valores médios do método previsto coincidem com a média dos valores obtidos nas provas de carga estática. Os fatores de calibração ficaram sendo 0,744 para o aluvião, 1,612 para a formação Guabirotuba e 1,966 para o solo residual. Para a ponta no Guabirotuba, o fator de correlação com o N_{SPT} ficou sendo de 154,91 e para o solo residual 131,26.

Procedeu-se então para as análises de confiabilidade, com o objetivo de validar a calibração do método. Para a análise de confiabilidade, no que diz respeito às solicitações, foi considerado que 80% é carga permanente e 20% é carga variável. Adotando-se os valores médios propostos por Zhang e Tang (2002), tem-se que a solicitação média vale 0,975 vezes a característica e possui desvio padrão igual a 0,13875. O índice de confiabilidade pode ser dado pela equação 1, onde μ_R é a resistência média, μ_S é a solicitação média, σ_R é o desvio padrão da resistência e σ_S é o desvio padrão da solicitação.

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1)$$

Para o método original, tem-se que o mesmo gera resultados 15% a favor da segurança com 28% de coeficiente de variação. Desta forma, a resistência média é de 2,30 quando se calcula a partir de uma solicitação unitária com fator de segurança igual a 2,0 com desvio padrão de 0,644. A equação 2 mostra a obtenção do índice de confiabilidade para o método original.

$$\beta = \frac{2{,}30 - 0{,}975}{\sqrt{0{,}644^2 + 0{,}13875^2}} = 2{,}011 \quad (2)$$

O valor de β obtido corresponde a uma probabilidade de falha de 1/45, a qual é a incerteza de modelo do método original.

O método ajustado gera resultados em média iguais aos medidos com coeficiente de variação de 4,98%. Desta forma, para o método ajustado, a resistência média é igual a 2,0 quando se calcula a partir da solicitação

unitária com fator de segurança 2,0 com desvio padrão igual a 0,0996. A equação 3 mostra a obtenção do índice de confiabilidade para o método ajustado.

$$\beta = \frac{2{,}00 - 0{,}975}{\sqrt{0{,}0996^2 + 0{,}13875^2}} = 6{,}001 \quad (3)$$

O valor de β obtido corresponde a probabilidade de falha de $1/10^9$, a qual representa a incerteza de modelo do método ajustado. O gráfico indicando a correspondência entre o previsto pelo método ajustado e os valores medidos nas provas de carga encontra-se na Figura 1.

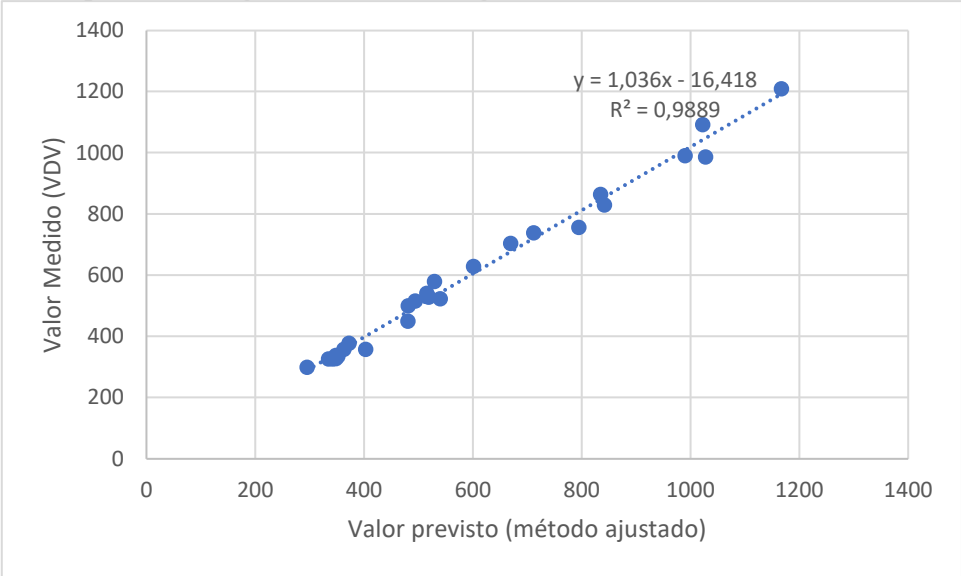


Figura 1. Comparativo entre os valores previstos pelo método ajustado e os obtidos nas 34 provas de carga estática publicadas por Vianna (2000).

O método de Decourt-Quaresma conforme ajustado neste artigo, fica então conforme descrito nas equações 4 e 5 e na tabela 3 para estacas pré-moldadas nos solos de Curitiba e região. A equação 4 descreve como obter a resistência de ponta e a equação 5 é utilizada para obtenção do atrito lateral de uma estaca. A tabela 3 mostra os coeficientes de ajuste. Decourt havia chamado os coeficientes de ajuste para ponta e atrito de α e β. B neste caso foi substituído por B para evitar confusão com o índice de confiabilidade e α foi suprimido, sendo apresentado já o valor do fator de correlação entre o N_{SPT} e a tensão de ponta, sendo que para a ponta a ponta usa-se a média do valor de N_{SPT} na cota da ponta, um metro acima e um metro abaixo e para o atrito usa-se o valor médio de N_{SPT} para a camada de solo.

$$Q_P = C.N.A_P \quad (4)$$

$$Q_l = B.\left(\frac{N}{3} + 1\right).A_l \quad (5)$$

Tabela 3. Resumo dos valores dos coeficientes de ajuste encontrados no presente estudo*

Solo	Número de ensaios dinâmicos	Coeficiente de variação (%)	Valor de B	Valor de C (kN/m²)
Aluvião	114	129,5%	0,744	
Guabirotuba	78	52,6%	1,612	154,91
Residual de Migmatito	82	57,0%	1,966	131,26

*Valores validados apenas para estacas pré-moldadas nos solos de Curitiba e região.

4. CONCLUSÕES

Os ensaios de carregamento dinâmico permitiram calibrar o método de Decourt-Quaresma para os solos de Curitiba, ficando em média 1,01% acima dos resultados das provas de carga estática apresentadas por Vianna (2000), indicando a boa correlação entre os ensaios.

Observou-se alguma variação nos valores de atrito lateral e capacidade de ponta unitários obtidos nos ensaios dinâmicos, as quais podem ter relação com a variação granulométrica apresentada pelos aluviões e solo residual e com a própria variabilidade espacial do solo e a distância das estacas ensaiadas até o furo de sondagem mais próximo.

Propõe-se multiplicar o atrito lateral calculado pelo método de Decourt-Quaresma por 0,744 para o aluvião, 1,612 para a formação Guabirotuba e 1,966 para o solo residual. Para a ponta no Guabirotuba, o fator de correlação com o N_{SPT} proposto é de 154,91kN/m² e para o solo residual 131,26kN/m².

Com o método proposto obteve-se um índice de confiabilidade, β, igual a 6,001, que leva a uma probabilidade de falha de $1/10^9$, que é a incerteza de modelo deste método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.

Vianna, A.P.F., 2000, Análise de Provas de Carga Estática em Estacas Pré-Moldadas Cravadas na Cidade de Curitiba e Região Metropolitana, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 112pp.

Zhang, L., Tang, W., 2002, Reliability based design of large diameter bored piles in Hong Kong part I: Evaluation of design methods. Foundation design codes in view of international harmonization and performance. IWS Kamakura, Japão. 10 a 12 de Abril de 2000, pp. 263-271.