

Fundações de Aerogeradores: Controle Tecnológico na Obra do Parque Eólico de Osório/RS

Debas, L. F.

Fugro In Situ Geotecnia Ltda., Curitiba, PR, Brasil, debas@insitu.com.br

Kormann, A.C.M.

Fugro In Situ Geotecnia Ltda. / Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, alessander@insitu.com.br

Antoniutti Neto, L.

Fugro In Situ Geotecnia Ltda., Curitiba, PR, Brasil, antoniutti@insitu.com.br

Swinka, L. M.

Fugro In Situ Geotecnia Ltda., Curitiba, PR, Brasil, lilian@insitu.com.br

Debas, C. W.

Curitiba, PR, Brasil, camila_wa@yahoo.com.br

Resumo: O presente trabalho descreve o programa de ensaios utilizado no controle de qualidade das fundações profundas do Parque Eólico de Osório, RS. São apresentadas informações do perfil geológico-geotécnico da área e os dados de ensaios de integridade, provas de carga estáticas e ensaios de carregamento dinâmico. Além de se avaliar a adequação do programa de qualidade especificado para o projeto, a análise e experiência advinda da obra permitiram estabelecer algumas comparações entre os resultados das provas de carga estáticas e dinâmicas e a quantificação de efeitos de *set-up* em estacas cravadas metálicas.

1 INTRODUÇÃO

A construção de um parque eólico tende a se concentrar mais nas atividades de montagem mecânica dos aerogeradores do que execução de obras de infra-estrutura civil. Entretanto, para a instalação das torres, faz-se necessária a execução de bases de apoio, que receberão e transmitirão as cargas provenientes dos aerogeradores para as fundações.

O carregamento nesse tipo de estrutura envolve cargas verticais e horizontais, além de momentos fletores na base. Com isso, as fundações assumem um papel fundamental na garantia do funcionamento adequado do sistema eletro-mecânico.

Em 2005, iniciou-se a construção de um grande Parque Eólico na Região Sul do Brasil, na cidade de Osório, RS. Esse empreendimento se transformou na maior usina eólica da América Latina, com aproximadamente 150 MW instalados.

O controle de qualidade da obra contemplou aspectos diversos, dentre os quais a garantia de qualidade das fundações.

Esse controle ocorreu primeiramente através do acompanhamento e execução de ensaios dos materiais constituintes da fundação, ou seja, agregados, água, cimento, aditivos, aço e concreto. Depois, através da fiscalização dos serviços em

campo, locação dos elementos, profundidade, torque e velocidade de subida do trado, pressão de injeção, altura de queda, nega, etc.

Finalmente, foram executados ensaios para a avaliação das condições dos elementos concluídos. As técnicas empregadas envolveram ensaios de integridade, provas de carga dinâmicas e provas de carga estáticas.

O objetivo do presente trabalho é apresentar o programa de ensaios executados no Parque Eólico de Osório, RS, divulgando os dados obtidos e a experiência advinda do empreendimento.

2 PARQUE EÓLICO DE OSÓRIO – CARACTERIZAÇÃO DA OBRA

2.1 Geral

O Parque Eólico de Osório é composto por 75 aerogeradores, os quais foram subdivididos em três sítios com 25 unidades cada: Osório, Sangradouro e Índios.

Os aerogeradores possuem 98 metros de altura e são dotados de hélices com 70 m de diâmetro. As torres foram apoiadas em bases circulares de concreto com 16,4 m de diâmetro, sendo que estes elementos possuíam fundações profundas

constituídas de estacas do tipo hélice contínua monitorada ou estacas metálicas cravadas.

Foram projetadas para cada base 32 estacas hélice contínua verticais (diâmetro 50 cm), para cargas de trabalho de 1450 kN de compressão, 300 kN de tração e 50 kN de esforço horizontal. Essas cargas referiam-se à combinação mais desfavorável de cargas atuantes.

Para as bases com estacas metálicas, foram empregados 32 elementos de seção H (HP310x110) inclinados 8 graus em relação à vertical. As cargas de trabalho são 1450 kN de compressão e 250 kN de tração.

2.2 Perfil Geológico - Geotécnico

Os depósitos sedimentares cenozóicos da costa Brasileira são característicos de ambientes deposicionais ocasionados pelas flutuações do nível relativo do mar, responsáveis pelo efeito das mudanças dos níveis marinhos (eustasia) e a modificação dos níveis dos continentes (tectonismo e isostasia).

O plano costeiro do estado do Rio Grande do Sul apresenta o mais completo registro dessas flutuações representadas por quatro gerações de depósitos arenosos marinhos (eventos transgressivos, transregressivos e regressivos), que foram descritos como Barreiras I, II, III, e IV (Villwock et al. 1996 apud Antoniutti et al. 2006).

Basicamente, esses depósitos litorâneos cenozóicos são constituídos por areias quartzozas finas a médias, bem selecionadas, arredondadas, por vezes avermelhadas, podendo estar inconsolidadas e semi-consolidadas, intercaladas por argilas de coloração cinza, com fragmentos de conchas, em profundidades de 20 - 25 m.

Para os sedimentos mais recentes, depositados sobre argilas flúvio-lagunares, são atribuídos ambientes de mangue, com a alternância de argilas arenosas e areias argilosas que possuem consistência de vaza (Massad, 1994).

Em particular, na área de implantação do Parque Eólico, ocorrem grandes espessuras de sedimentos arenosos de alta compactidade, os quais fazem parte do sistema Barreiras, com provável re-trabalhamento eólico.

Dessa forma, em linhas gerais, o perfil geotécnico local é caracterizado inicialmente por não mais que 2 m de solos argilosos seguidos por uma grande camada de areia com compactidade crescente com a profundidade. Entre 19 e 30 m encontram-se camadas de argila mole a rija de espessuras variando de 3 a 7 m. Abaixo dessa camada argilosa, ocorre novamente areia compacta a muito compacta, até o limite das sondagens. A Figura 1 apresenta um perfil típico da região de implantação da obra. É reproduzida uma sondagem a percussão juntamente com um ensaio de cone com medida de poro-pressão.

3 CONTROLE DE QUALIDADE DE FUNDAÇÕES – ENSAIOS EXECUTADOS

Para o controle das fundações dos aerogeradores foram especificados ensaios de integridade nas estacas hélice contínua. Tanto nos elementos moldados *in loco* como nas estacas metálicas, foram ainda executadas provas de carga dinâmicas e provas de carga estáticas com carregamento vertical (compressão e tração) e horizontal.

3.1 Ensaios de Integridade

A execução de ensaios de integridade em estacas moldadas *in loco* é de grande importância para a identificação de anomalias construtivas que possam vir a comprometer seu desempenho estrutural.

Na obra do Parque Eólico de Osório foram realizados ensaios de integridade em 1.750 estacas. Os diagnósticos convergiram, basicamente, para quatro situações: estacas íntegras e com sinal de ponta visível; estacas íntegras, mas sem o sinal de ponta visível; estacas com redução de impedância e estacas com comprimento inferior ao especificado.

As Figuras 2 e 3 apresentam respectivamente a distribuição dos comportamentos observados na obra e sinais representativos de diferentes situações.

Nos casos em que foram identificadas reduções de impedância mais significativas, a tomada de decisão contemplou a posição das possíveis anomalias e a condição das estacas adjacentes. Quando havia riscos de desempenho não-conforme, elementos de reforço eram especificados.

Nas situações em que o ensaio de integridade indicava a continuidade ao elemento, mas não se percebia claramente o sinal da ponta, as estacas foram consideradas aptas.

Quando a resposta de ponta era identificada, mas a velocidade de propagação da onda no concreto calculada com base do comprimento informado resultava acima da faixa tipicamente encontrada na obra (entre 3.400 e 4.400 m/s), interpretava-se como um indicativo de comprimento executado inferior ao especificado. Nesses casos, a eventual necessidade de reforço foi avaliada através da execução de provas de carga dinâmicas.

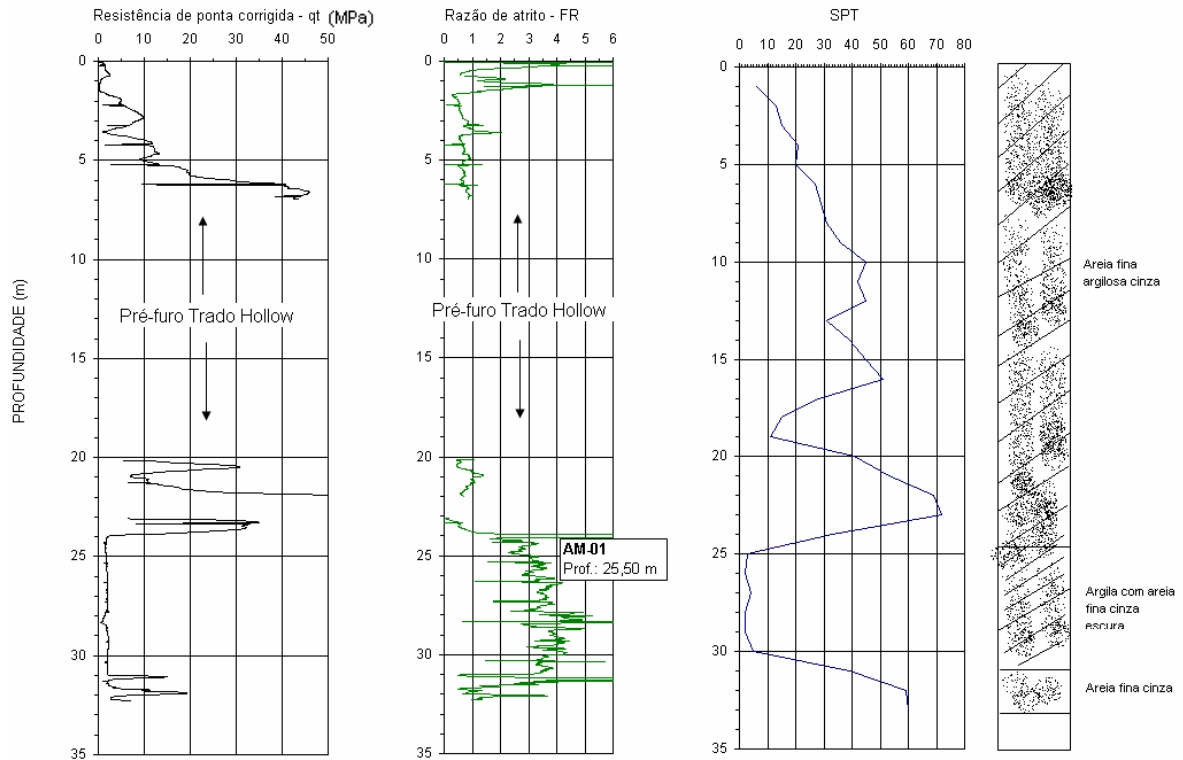


Figura 1: Perfil Geotécnico – Parque Eólico de Osório (Antoniutti et al., 2006).

ENSAIO DE INTEGRIDADE (PIT)

Anomalias encontradas nos 1.750 ensaios executados

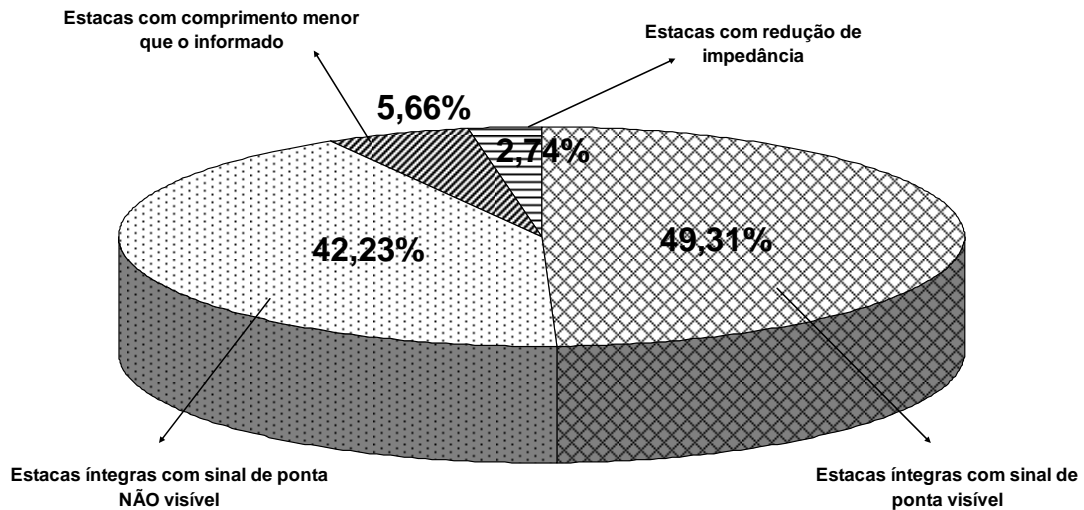


Figura 2: Ensaio de integridade – distribuição de diagnósticos.

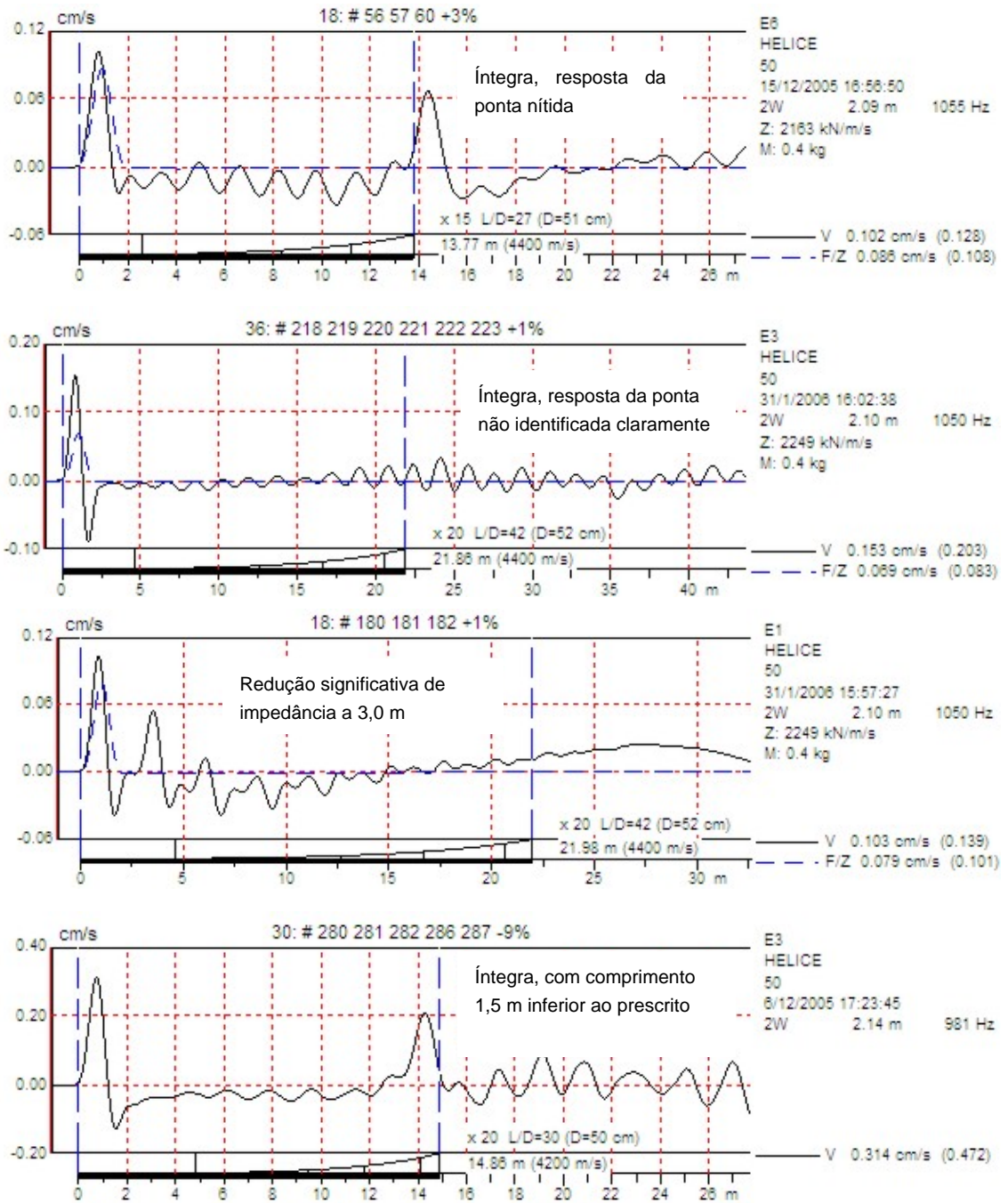


Figura 3: Ensaio de integridade – sinais típicos.

3.2 Provas de Carga Dinâmicas

A determinação da capacidade de carga dos elementos de fundação para se verificar as premissas adotadas em projeto é recomendada na norma de fundações e foi especificada no projeto dos aerogeradores. Buscando-se ampliar o universo amostral, foram executadas provas de carga dinâmicas nas estacas hélice contínua e nas estacas metálicas.

Para possibilitar a aplicação de golpes com martelo de queda-livre, foram executados blocos de reforço nas estacas a serem ensaiadas. Esses elementos apresentavam seção quadrada, com armadura dimensionada para resistir aos esforços gerados no impacto do martelo. O peso do pilão utilizado foi de 50 kN e o amortecimento consistiu em coxim de madeira posicionado sobre o bloco de coroamento.

Nas estacas metálicas, os ensaios ocorreram durante a cravação (acompanhamento e final de

cravação) e em recravações. Para a execução dos ensaios, foram utilizados os bate-estacas de queda-livre presentes na obra, com pesos de 49 e 60 kN.

No total, foram realizadas provas de carga dinâmica em 18 estacas hélice contínua e em 48 estacas metálicas. A Tabela 1 resume os principais resultados encontrados nos ensaios das estacas hélice contínua. A Tabela 2 traz as informações obtidas nas estacas metálicas. A Figura 4 apresenta as curvas de resistência mobilizada em cada golpe (RMX) *versus* a energia transferida à estaca (EMX) nos ensaios realizados nas estacas hélice contínua.

A interpretação dos ensaios das estacas metálicas permitiu quantificar o fenômeno de cicatrização do solo (*set up*). Conforme dados da Tabela 2, os acréscimos na capacidade de carga das estacas chegaram a atingir 130 % (estaca E14 da base SAG03, 19 dias de repouso).

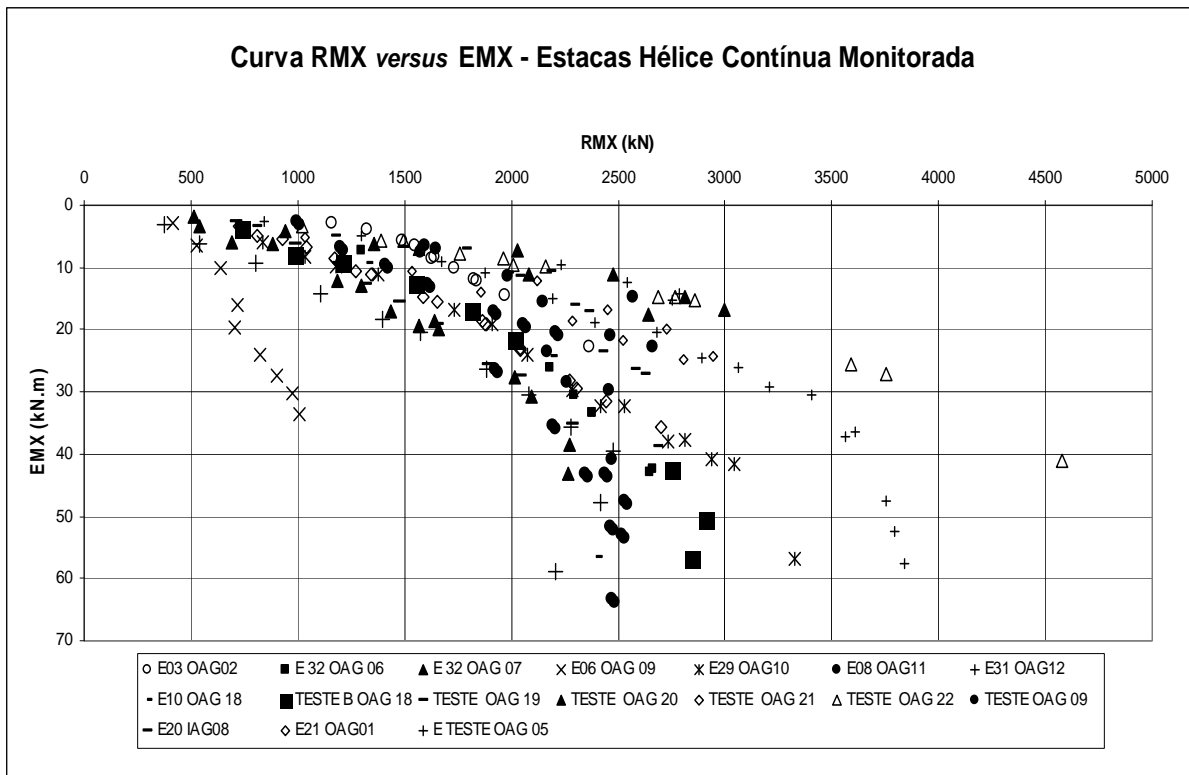


Figura 4: Provas de carga dinâmicas em estacas hélice contínua – curva de resistência mobilizada *versus* energia transferida.

Tabela 1: Provas de carga dinâmica em estacas hélice contínua – quadro resumo.

Estaca	Base	Diâmetro nominal (cm)	Diâmetro na região dos sensores (cm)	Comp. (m)	Data de execução	Data do ensaio	RMX máx. (kN)	EMX ⁽¹⁾ (kN.m)	DMX ⁽¹⁾ (mm)	Nega ⁽¹⁾ (mm)	CSX ⁽¹⁾ (MPa)
E20	IAG 08	50,0	58,25	19,35	Não disponível	12/04/06	2689	38,7	12,0	7,0	14,7
E21	OAG 01	50,0	59,52	22,50	21/12/06	27/01/07	2942	24,3	8,0	3,0	15,8
E03	OAG 02	50,0	50,50	23,00	02/12/05	03/01/06	2363	22,7	9,0	2,0	16,8
E-TESTE	OAG 05	50,0	49,65	14,20	30/11/06	26/01/07	2476	39,5	17,0	7,0	19,3
E32	OAG 06	50,0	51,60	21,60	Não disponível	04/01/06	2659	42,4	13,0	7,0	21,1
E32	OAG 07	50,0	51,25	14,50	01/12/05	04/01/06	2271	38,4	18,0	6,0	17,8
E06	OAG 09	50,0	50,93	13,77	12/05/05	12/01/06	1005	33,7	21,0	14,0	16,6
E-TESTE	OAG 09	50,0	53,15	13,30	23/02/06	14/03/06	2662	22,7	10,0	5,0	17,0
E29	OAG 10	50,0	50,93	22,50	17/12/05	13/01/06	3329	56,8	13,0	5,0	25,4
E08	OAG 11	50,0	56,66	23,35	13/12/05	12/01/06	2529	47,6	13,0	4,0	18,2
E31	OAG 12	50,0	62,71	23,46	27/12/05	13/01/06	3842	57,5	14,0	6,0	17,2
E10	OAG 18	50,0	53,50	12,70 ₍₂₎	24/11/05	11/01/06	2451	40,4	20,0	10,0	16,2
TESTE A	OAG 18	50,0	50,30	15,20	Não disponível	21/12/05	Dano a 9,10 m do topo da estaca				
TESTE B	OAG 18	50,0	55,40	14,70	Não disponível	11/01/06	2915	50,7	20,0	10,0	18,6
TESTE	OAG 19	50,0	51,56	24,60	25/11/05	23/12/05	2288	35,1	11,0	5,0	19,7
TESTE	OAG 20	50,0	50,29	14,50	20/11/05	27/12/05	3000	16,8	7,0	2,0	17,3
TESTE	OAG 21	50,0	66,84	19,50	21/11/05	27/12/05	2701	35,6	14,0	6,0	11,5
TESTE	OAG 22	50,0	54,75	19,60	18/11/05	28/12/05	4580	41,1	11,0	2,0	21,3

⁽¹⁾ Correspondente ao RMX máx⁽²⁾ Comprimento informado igual a 14,70 m, porém a análise do sinal indicou elemento mais curto

Tabela 2: Provas de carga dinâmica em estacas metálicas – quadro resumo.

Estaca	Base	Comp. (m)	Composição (m)	Comp. cravado (m)	Data de cravação	Data do ensaio	RMX máx. (kN)	EMX ⁽¹⁾ (kN.m)	DMX ⁽¹⁾ (mm)	NEGA ⁽¹⁾ (mm)	CSX ⁽¹⁾ (MPa)
E04	SAG-03	36,00	12+12+12	35,00	29/05/06	02/06/06	2036	36,1	24,0	2,5	143,8
E04	SAG-03	36,00	12+12+12	34,80	29/05/06	20/06/06	2810	66,0	30,0	1,0	196,2
E11	SAG-03	48,00	12+12+12+12	45,40	13/06/06	13/06/06	2382	76,4	37,0	8,0	218,9
E14	SAG-03	36,00	12+12+12	35,50	01/06/06	02/06/06	1211	11,5	12,0	1,5	76,7
E14	SAG-03	36,00	12+12+12	35,50	01/06/06	20/06/06	2798	62,1	29,0	0,5	186,6
E16	SAG-03	38,20	12+12+12+2,2	35,30	07/06/06	27/06/06	2340	47,6	26,0	0,5	158,8
E18	SAG-03	38,20	12+12+12+2,2	35,30	06/06/06	27/06/06	2881	66,3	31,0	3,0	197,2
E20	SAG-03	38,20	12+12+12+2,2	35,30	05/06/06	27/06/06	2366	56,6	28,0	1,0	187,3
E22	SAG-03	38,20	12+12+12+2,2	35,20	02/06/06	28/06/06	2427	42,9	23,0	0,5	173,4
E23	SAG-03	36,00	12+12+12	34,50	01/06/06	01/06/06	1255	51,8	31,0	20,0	171,2
E23	SAG-03	38,30	12+12+12+2,3	35,20	01/06/06	20/06/06	2742	69,7	32,0	6,0	193,2
E25	SAG-03	36,00	12+12+12	34,00	25/05/06	01/06/06	1909	52,6	29,0	6,0	171,8
E25	SAG-03	36,00	12+12+12	34,70	25/05/06	20/06/06	2480	51,6	28,0	5,0	164,6
E08	SAG-01	36,00	12+12+12	34,50	19/06/06	19/06/06	1363	31,8	22	5	122,2
E09	SAG-01	38,14	12+12+12+2,14	35,00	14/06/06	04/07/06	3192	95,8	39	4	218,5
E20	SAG-01	38,14	12+12+12+2,14	35,36	12/06/06	04/07/06	2410	80,3	36	4,5	207,4
E25	SAG-01	36,00	12+12+12	34,50	20/06/06	20/06/06	1549	69,5	32	25	178,5
E25	SAG-01	38,13	12+12+12+2,13	35,50	20/06/06	04/07/06	2282	52,9	28	3,5	154,8
E04	SAG-02	37,15	12+12+12+2,15	34,75	14/06/06	14/06/06	1132	59,7	29	17	184,3
E04	SAG-02	38,15	12+12+12+2,15	35,75	14/06/06	03/07/06	2216	55,1	30	5	152,2
E14	SAG-02	38,14	12+12+12+2,14	35,47	14/06/08	04/07/06	3051	71	32	1	184
E25	SAG-02	36,00	12+12+12	34,50	14/06/06	14/06/06	1438	58	30	13	176,9
E25	SAG-02	38,16	12+12+12+2,16	35,40	14/06/06	03/07/06	2621	70,2	32	7	186,4

⁽¹⁾ Correspondente ao RMX máximo

Tabela 2: Provas de carga dinâmica em estacas metálicas – quadro resumo (continuação).

Estaca	Base	Comp.(m)	Composição (m)	Comp. cravado (m)	Data de cravação	Data do ensaio	RMX máx. (kN)	EMX ⁽¹⁾ (kN.m)	DMX ⁽¹⁾ (mm)	NEGA ⁽¹⁾ (mm)	CSX ⁽¹⁾ (MPa)
E04	IAG-07	36,00	12+12+12	31,54	30/06/06	05/07/06	2083	30,6	20	3,6	148,5
E04	IAG-07	36,00	12+12+12	31,80	30/06/06	19/07/06	2670	105,6	38	18	259,9
E15	IAG-07	36,00	12+12+12	34,05	03/07/06	05/07/06	1927	21,2	16	2,2	126,7
E15	IAG-07	36,00	12+12+12	34,45	03/07/06	20/07/06	2191	42,6	25	4	150,6
E25	IAG-07	36,00	12+12+12	32,15	29/06/06	05/07/06	1841	127,8	49	36	280,2
E25	IAG-07	36,00	12+12+12	32,37	29/06/06	19/07/06	2381	94,9	37	19	243,9
E04	IAG-09	32,10	6+12+12+2,1	32,10	29/06/06	05/07/06	2285	33,9	22	2,6	152,6
E04	IAG-09	32,10	6+12+12+2,1	33,10	29/06/06	19/07/06	2838	69,4	31	3,5	204,7
E14	IAG-09	32,51	6+12+12+2,51	29,20	03/07/06	05/07/06	1996	24,5	19	5,5	130,4
E14	IAG-09	32,51	6+12+12+2,51	29,20	03/07/06	19/07/06	2838	69,4	31	3,5	204,7
E25	IAG-09	32,13	6+12+12+2,13	28,94	04/07/06	05/07/06	2490	121,9	46	22,5	242,8
E25	IAG-09	32,13	6+12+12+2,13	29,15	04/07/06	19/07/06	2203	32,4	22	1,3	151,3
E04	IAG-15	36,00	12+12+12	33,20	20/07/06	24/07/06	2792	75,1	34	4	188,4
E04	IAG-15	36,00	12+12+12	33,20	20/07/06	14/08/06	3020	105,5	39	10	225,2
E14	IAG-15	36,00	12+12+12	32,92	20/07/06	24/07/06	2375	43,3	26	1	146,5
E14	IAG-15	36,00	12+12+12	33,06	20/07/06	14/08/06	2866	107,7	39	8	231,9
E25	IAG-15	36,00	12+12+12	32,83	20/07/06	24/07/06	3335	91,9	39	5,5	217,7
E25	IAG-15	36,00	12+12+12	32,83	20/07/06	14/08/06	3711	114,2	43	0	247,9
E04	IAG-21	36,00	12+12+12	33,00	09/08/06	15/08/06	3668	108	42	2	246
E04	IAG-21	36,00	12+12+12	33,00	09/08/06	05/09/06	3410	90	36	1	239,6
E14	IAG-21	36,00	12+12+12	32,79	08/08/06	15/08/06	2835	69,6	35	1	189,1
E14	IAG-21	36,00	12+12+12	32,79	08/08/06	05/09/06	2754	97,9	38	7,5	249,8
E25	IAG-21	36,00	12+12+12	32,95	09/08/06	15/08/06	2329	30,1	19	2,9	148,1
E25	IAG-21	36,00	12+12+12	33,03	09/08/06	05/09/06	2368	57,6	29	3	185,6

⁽¹⁾ Correspondente ao RMX máximo

3.3 Provas de Carga Estáticas

Para se analisar o comportamento carga recalque dos elementos de fundação, foram realizadas provas de carga estáticas à compressão, tração e com carregamento horizontal.

Nas estacas hélice contínua, os trabalhos envolveram um ensaio de compressão em uma estaca teste (base OAG 09), dois ensaios de tração nas estacas R3 e R4 da base OAG 09 e dois ensaios com carregamento horizontal nos elementos Teste e R3 da mesma base. As provas de carga seguiram o método de carregamento rápido da norma brasileira. Deve-se notar que a prova de carga à compressão estava projetada para um carregamento máximo de 3.000 kN. Entretanto, a ruptura da interação estaca-solo foi atingida com 2536 kN. Nas Figuras 5, 6 e 7 são apresentadas as curvas carga *versus* deslocamento dos ensaios.

A estaca Teste da base OAG 09 havia sido ensaiada com uma prova de carga dinâmica anteriormente à execução do ensaio estático. Conforme os dados da Tabela 1, a carga mobilizada no ensaio de carregamento dinâmico desse elemento foi de 2662 kN, resultado este muito próxima à carga de ruptura obtida na prova de carga estática (2356 kN).

Para as estacas metálicas, foram executadas duas provas de carga à compressão e duas à tração (elementos E04 e E14 da base IAG 21). Entretanto, os tirantes de reação não suportaram a aplicação dos carregamentos, apresentando ruptura da interação estaca-solo nos estágios de 2000 e 1647 kN, respectivamente para as estacas E04 e E14. As Figuras 8 e 9 apresentam as curvas carga *versus* deslocamento, sendo que nas provas de carga à compressão foram incluídas também as extrapolações com o método de Van der Veen.

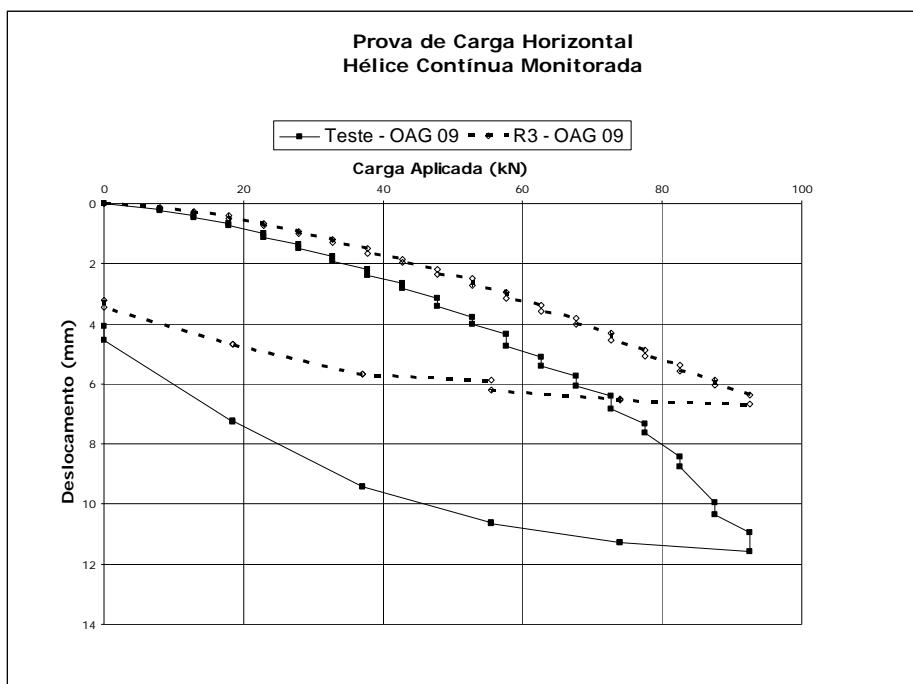


Figura 7: Prova de carga estática com carregamento horizontal em estacas hélice contínua – curva carga aplicada *versus* deslocamento.

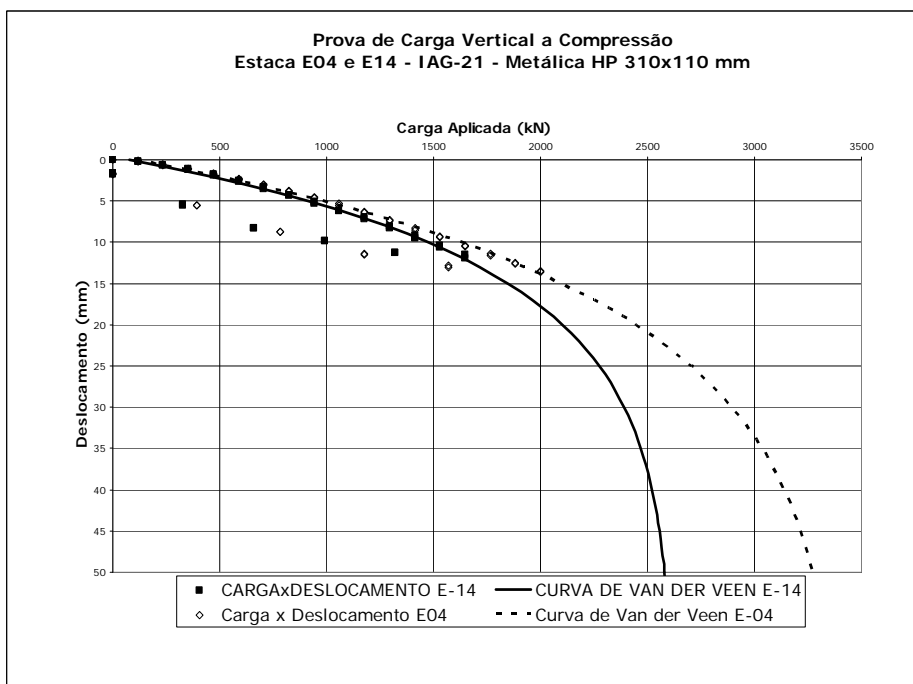


Figura 8: Prova de carga estática à compressão em estacas metálicas – curva carga aplicada *versus* deslocamento.

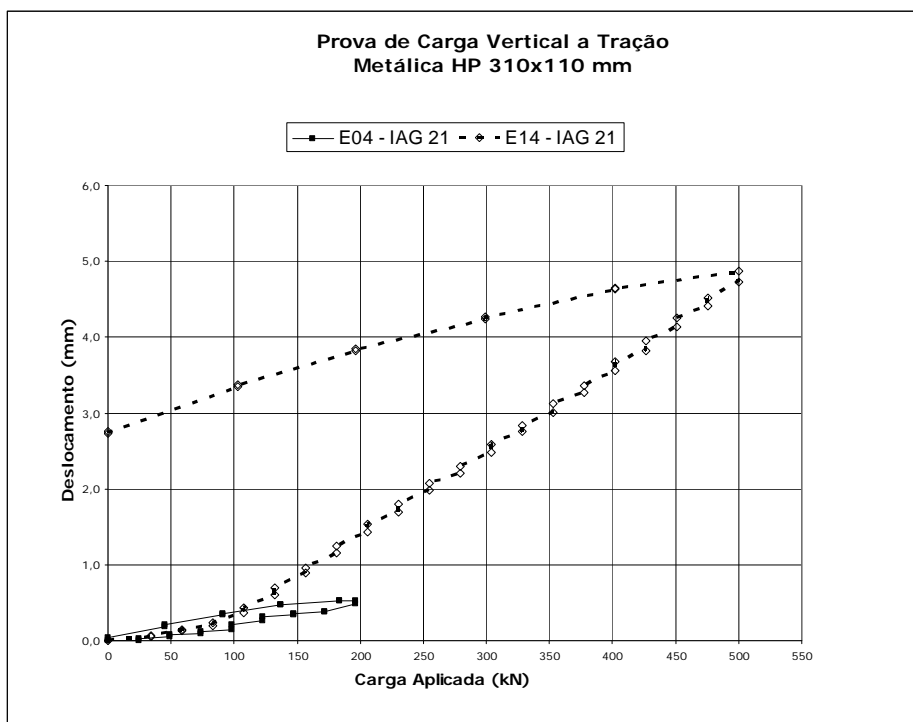


Figura 9: Prova de carga estática à tração em estacas metálicas – curva carga aplicada *versus* deslocamento.

4 CONCLUSÕES

A experiência adquirida na obra do Parque Eólico de Osório evidencia a importância de se estabelecer um programa de controle de qualidade para as fundações de obras de infra-estrutura.

O perfil geológico-geotécnico em questão, que envolve a presença de solos compressíveis, bem como as dificuldades inerentes à execução de estacas moldadas *in loco* neste tipo de terreno, justificam plenamente os ensaios especificados.

As informações apresentadas no presente trabalho e trazidas ao meio técnico podem ser úteis para o planejamento de novos empreendimentos em condições geotécnicas semelhantes. Em particular, destaca-se o tratamento dado aos diagnósticos dos ensaios de integridade, os quais contribuíam para nortear decisões com foco na garantia da segurança das fundações.

As provas de carga realizadas no projeto mostraram uma boa correlação entre os resultados dos ensaios de carregamento dinâmicos e estáticos. Esse fato reforça a aplicabilidade das provas de carga dinâmicas na verificação da capacidade de suporte de estacas moldadas *in loco*. O conjunto de provas de carga permitiu ainda avaliar nas estacas metálicas os efeitos de *set up* (cicatrização do solo).

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antoniutti Neto, L., Kormann, A. C. M., Guimarães, J., Henchen, R. (2006). Perfis Geotécnicos de Depósitos Litorâneos da Região Sul do Brasil - Casos de Obra. In: Anais do GEOSUL 2006, Porto Alegre, ABMS, p. 33-42.
- Massad, F. (1994) Propriedades dos sedimentos marinhos. In: Solos do litoral de São Paulo, São Paulo, p. 99-128
- Suguio, K., Martin, L. (1994) Geologia do quaternário. In: Solos do litoral de São Paulo, São Paulo, p. 69-98.