

Análise do Desempenho de Martelo Hidráulico Autopropulsor testando Estacas de Alta Capacidade de Carga

Sérgio C. Paraíso

Geomec Engenheiros Consultores, Belo Horizonte, Brasil.

Cláudia Maria Cunha da Costa

Geomec Engenheiros Consultores, Belo Horizonte, Brasil.

RESUMO: Este artigo objetiva a análise de desempenho e eficiência de Martelo Hidráulico autopropulsor no ensaio de carregamento dinâmico (ECD) de energia crescente, conforme Beim e Aoki (1996), testando estacas de elevada capacidade de carga, com cargas mobilizadas de até 26000kN. Através da análise de 48 Ensaio de Carregamento Dinâmico realizados, propõe-se critério técnico para energia potencial bruta necessária, função da carga de ensaio a ser mobilizada, permitindo assim, a previsão de modulação de peso e das alturas de queda livre durante o ECD.

PALAVRAS-CHAVE: Martelo, Energia, Estacas, Capacidade, Desempenho.

1 INTRODUÇÃO

Provas de carga estáticas em estacas de elevada capacidade de carga são raramente utilizadas na prática da engenharia de fundações em razão dos elevados custos operacionais e excessivo período de tempo necessário para a realização das mesmas.

Com base nesta realidade, associada ao desafio de testar fundações profundas de elevada capacidade de carga de maneira rápida, segura, confiável e a custos operacionais atraentes, idealizou-se a fabricação de um Martelo Hidráulico Autopropulsor (MHAP-20) exclusivamente para esta finalidade.

Correlações entre a energia potencial e as cargas mobilizadas e histogramas de porcentagem de energia transferida (ETR) são apresentados com base em 48 ECD's realizados em estacas moldadas "in loco" perfuradas e escavadas mecanicamente, estacas composite, constituídas de camisa metálica perdida e núcleo de concreto e estacas prefabricadas de concreto protendidas.

2 CARACTERÍSTICAS DO MARTELO

O sistema de impacto MHAP-20 é constituído de uma base circular de aço solidarizada à camisa de aço que veste a estaca a ensaiar, equipada com dispositivos de auto-ajuste em

relação ao topo e fuste na variação de diâmetro de 70cm a 250cm.

Sobreposto à base circular de apoio, estende-se camisa de aço guia que permite a queda livre do martelo com modulação de peso de até 200 kN, modulações estas que permitem observar os critérios de pesos para cargas máximas mobilizadas conforme recomendações de Hussein et al (1996), ou seja, 1,5% a 2,0% da carga última prevista a ser mobilizada no ECD de energia crescente. O sistema de elevação do martelo possui controle de altura de queda de precisão centimétrica. Este sistema de elevação funciona com gatilho e pistões hidráulicos automáticos garantindo a queda livre sem interferências das perdas por atritos mecânicos.

Os ensaios podem ser realizados em obras offshore e onshore com as mesmas facilidades operacionais de instalação e operação.

A máxima altura de queda disponível é de 3,0 metros o que corresponde a energia potencial bruta de 600 kN x m.

As figuras 1 e 2 referem-se, respectivamente, ao detalhe típico do sistema de impacto MHAP-20 e ECD com lâmina d'água.

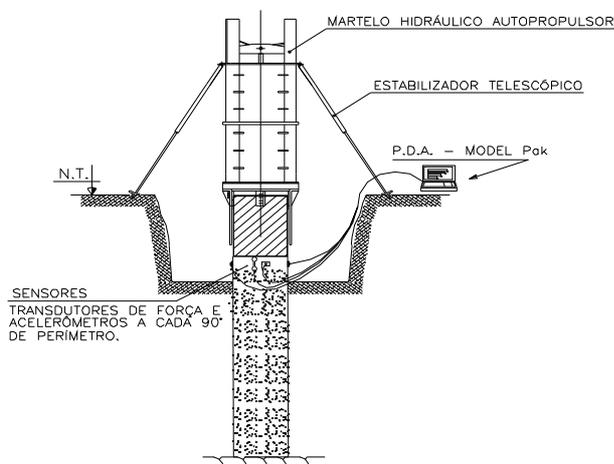


Figura 1. – MHAP-20 – Detalhe esquemático.

3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Os ECD's foram realizados de acordo com metodologia de energia crescente conforme Aoki e Mello (1992), Hussein et al. (1992), de Mello e Paraíso (1998), Niyama et al. (2000) e Paraíso et al. (2000).

3.1 Dispositivos de amortecimento

No caso das estacas escavadas de grande diâmetro é necessária a construção de um bloco de concreto sobre o topo das estacas, ou ainda reforçar a armação do trecho final de fuste, com a finalidade da absorção de elevadas tensões dinâmicas de compressão durante os ECD's, Seidel et al. (1996). Adicionalmente, cepos e coxins devem ser utilizados no topo da estaca e na placa de aço de impacto do martelo e devem ser constituídos preferencialmente de chapas de borracha com malhas de aço e ou neoprene.

3.2 Instrumentação da Estaca

Para a instrumentação das estacas é recomendável a utilização de 4 transdutores de deformação específica e quatro acelerômetros dispostos em 4 posições diametralmente opostas visando compensar os efeitos de flexão que eventualmente se originam do impacto dinâmico.

Com o objetivo de proporcionar total contato dos sensores com o fuste das estacas, Tabela 1. Dados das Estacas Ensaaiadas e Analisadas.

a superfície de concreto no local de fixação deverá estar o mais lisa possível. Os ensaios de campo foram realizados conforme os procedimentos do método de CASE, utilizando o equipamento PDA modelo PAK com 8 canais de saída que viabiliza a aquisição, armazenamento e análise dos dados obtidos conforme postula Likins (1994).



Figura 2. – ECD em estacas composite Φ 140cm. Ponte sobre o rio São Francisco Ibó BA..

3.3 Ensaio de Carregamento Dinâmico.

O martelo a ser utilizado deverá disponibilizar energia potencial suficiente para mobilizar a carga máxima desejada para o ECD.

Os ECD's de energia crescente devem ser realizados pelo menos, 7 dias após a concretagem da estaca e bloco de ensaio e desde que pelo menos a resistência característica FCK do concreto estaca/bloco sejam atingidos, observando um dos seguintes critérios de paralisação:

- Fator de segurança satisfatório;
- Valores de CSX (tensão de compressão) e TSX (tensão de tração) acima dos valores permitidos para o material da estaca ;
- Se a carga máxima mobilizada decresce com o aumento da energia aplicada.

4 DADOS OBTIDOS NO ECD

Os dados obtidos nas instrumentações encontram-se resumidos na tabela 1.

Grupo	Tipo Estaca	D (cm)	L (m)	Nt (kN)	QU (kN)	Nega (mm/golpe)	Wm (kN)	Hq (m)	EMX (kN x m)	Ep (kN xm)	ETR (%)	
I	Escavadas/ Lama Bentonítica, Tubulões ar comprimido e Hélice Contínua	100	13	5000	13.856	-	120	2.5	90,0	300,0	30.00	
		150	20	10000	26.340	-	200	2.7	216,0	540,0	40.00	
		120	14	4400	1.3.400	0.0	120	2.8	110,8	336,0	33.00	
		140	25	6380	16.250	-	200	2.5	234,0	500,0	46.80	
		100	22	3160	9.500	-	160	2.0	171,0	320,0	53.40	
		120	7	2260	8.060	-	140	1.2	54,5	168,0	32.40	
		100	12	2500	5.150	12.0	160	1.5	87,0	240,0	36.30	
		100	12	2500	4.320	20.0	180	2.0	230,0	360,0	64.70	
		100	16	3100	5.560	20.0	180	2.0	224,0	360,0	62.20	
		120	14	4500	11.280	2.5	160	1.0	62,0	160,0	38.80	
		120	21	4500	9.930	2.0	140	2.5	121,0	350,0	34.60	
		120	6	3400	12.700	0.0	120	1.5	57,0	180,0	31.70	
		140	22	8700	16.950	1.1	200	1.3	120,0	260,0	46.20	
		120	15	4500	7.750	9.0	200	2.4	172,1	480,0	35.90	
		80	16	3500	6.000	3,0	100	0,8	24,4	80,0	30.50	
		80	16	3000	7.930	6,0	100	2,4	103,9	240,0	43.30	
		80	23	3500	8.310	6,0	100	2,0	79,5	200,0	39.80	
		80	20	2000	6.220	8,0	100	2,2	88,8	220,0	40.40	
		90	18	2870	4.920	5,0	100	1,6	70,2	160,0	43.90	
		90	18	2740	5.810	10,0	100	3,0	119,9	300,0	40.00	
90	18	2790	3.500	10,0	100	2,4	102,8	240,0	42.80			
90	18	2880	5.510	20,0	100	1	63,9	100,0	63.90			
120	30	3940	8.310	0,0	200	1,8	124,0	360,0	34.40			
120	30	5350	13.010	3,0	200	2,0	145,0	400,0	36.30			
II	Estacas composite Camisa Metálica perdida e Núcleo de Concreto	120	48	4500	12.040	2.0	200	1.2	148,0	240,0	61.70	
			48		16.460	3.0		1.4	141,0	280,0	50.40	
			47		6.650	-		1.0	100,0	200,0	50.00	
			38		12.720	1.0		1.6	166,0	320,0	51.90	
			43		14.840	2.0		1.8	173,0	360,0	48.10	
			38		12.000	1.0		1.8	177,0	360,0	49.20	
			29		14.400	4.8		1.8	142,0	360,0	39.40	
			31		12.430	1.5		1.8	143,0	360,0	39.70	
			30		14.800	1.5		1.8	157,0	360,0	43.60	
			160		30	6290		20.190	0.0	1.5	120,0	300,0
		30	2.0100	0.0	1.5	106,0	300,0	35.30				
		28	21.450	0.0	1.8	104,0	360,0	28.90				
		100	38	4500	13.600	0,0	200	2.3	164,5	460,0	35.80	
			38	4500	15.460	0,0	200	1.6	113,9	320,0	35.60	
			38	4500	12.860	0,0	200	2.0	135,5	400,0	33.90	
			38	4500	12.500	0,0	200	1.8	118,5	360,0	32.9	
			III	Estacas Pemoldadas de concreto protendidas	80	42	2500	4.130	7.0	80	1.8	96,7
36	3.650		23.0			200		0.9	139,1	180,0	77.30	
37	3.940		13.0			140		1.5	140,9	210,0	67.10	
37	3.920	18.0	200			0.8		119,8	160,0	74.90		
37	3.840	27.0	200			0.9		123,1	180,0	68.40		
37	3.850	20.0	200			0.8		117,3	160,0	73.30		
37	4.190	11.0	200			0.8		114,5	160,0	71.60		
41	4.200	16.0	200			1.1		172,1	220,0	78.20		

L (m) – Comprimento da Estaca

Nt (kN) – Carga de Trabalho

QU (kN) – Carga Última Mobilizada

Wm (kN) – Peso do Martelo

Hq (m) – Altura queda Martelo

EMX (kNxm) Energia Transferida

ETR (%) – Porcentagem Energia Transferida – Eficiência.

$$15MPa \leq CSX \leq 28MPa$$

$$1MPa \leq TSX \leq 2.5MPa$$

CSX = Máxima tensão de compressão.

TSX = Máxima tensão de tração

Para cada golpe de energia crescente, processou-se análise numérica CAPWAP– Case Pile Wave Analysis Program com a finalidade de ajuste e calibração das cargas máximas mobilizadas (Q_u) conforme dados constantes na tabela 1.

6 ANÁLISE DE DESEMPENHO

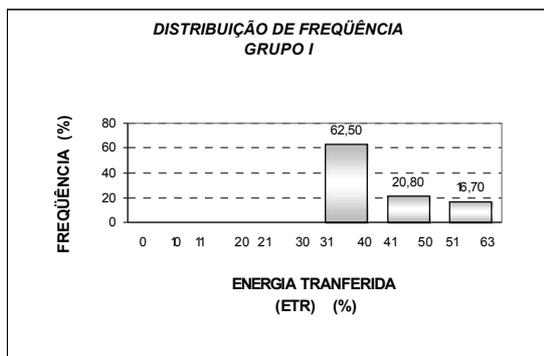
A energia transferida para a estaca é calculada no equipamento PDA utilizando as medidas de força e velocidade no instante do impacto, conforme equação 1:

$$E(t) = \int_0^t F(t) V(t) (dt) \quad (1)$$

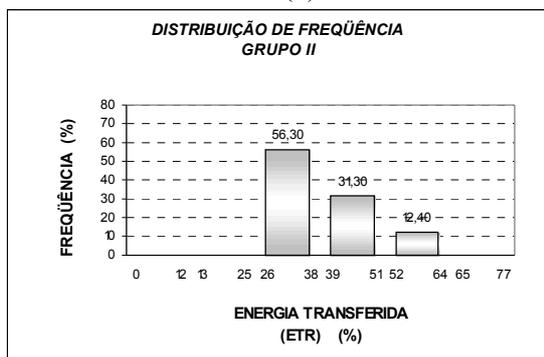
E = Energia transferida no nível dos sensores função do tempo;

F = Força no nível dos sensores função do tempo;

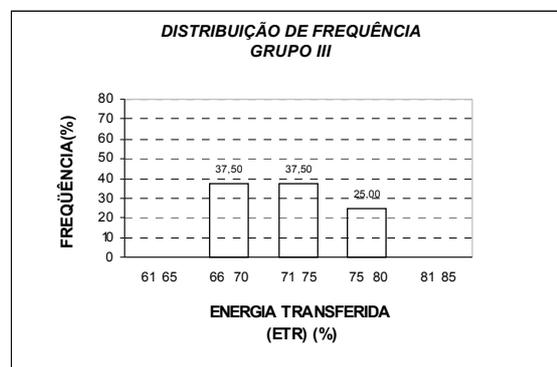
V = Velocidade obtida a partir da integração da aceleração no nível dos sensores função do tempo.



(a)



(b)



(c)

Figura 3(a, b, c) – Histogramas frequência energia transferida

Os histogramas resumem a porcentagem dos intervalos de energia transferida para o universo de estacas ensaiadas.

Com base nesta frequência de energia transferida, estudou-se critério de energia potencial necessária para mobilização da carga última no ECD (Fig 3 a, b, c).

7 CRITÉRIO ENERGIA POTENCIAL

Com base nos gráficos das fig. 4 e 5, sugere-se a seguinte correlação entre a energia potencial necessária e a carga última a ser mobilizada no ensaio dinâmico:

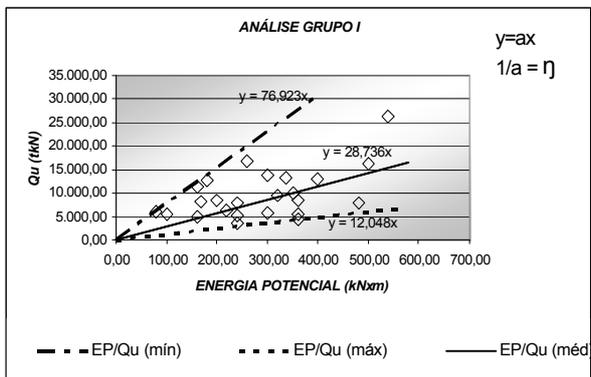
$$E_p \geq \eta \cdot Q_u \quad (kN \times m) \quad (2)$$

$$H_q \leq 3.00m$$

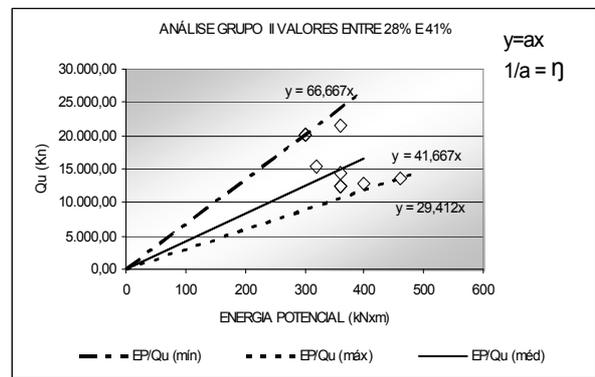
E_p = Energia Potencial (kN x m).

Q_u = Carga última a ser mobilizada no ECD (kN).

Os valores de η (tabela 2) foram obtidos a partir dos gráficos que correlacionam energia potencial e carga última mobilizada. Inicialmente, estudaram-se os valores de η para todo o universo de estacas ensaiadas (amostragem global) (fig.4) e por fim os valores de η para as estacas compreendidas no universo de maior frequência de energia transferida (fig. 5).

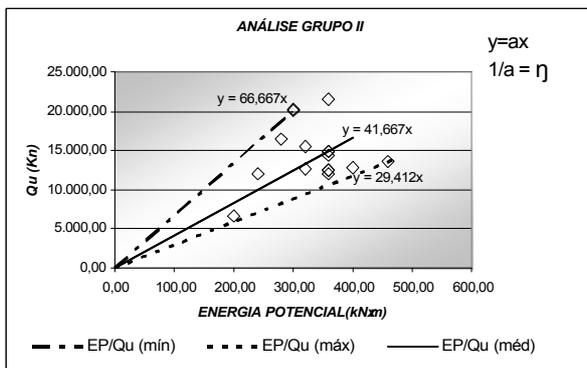


(a)

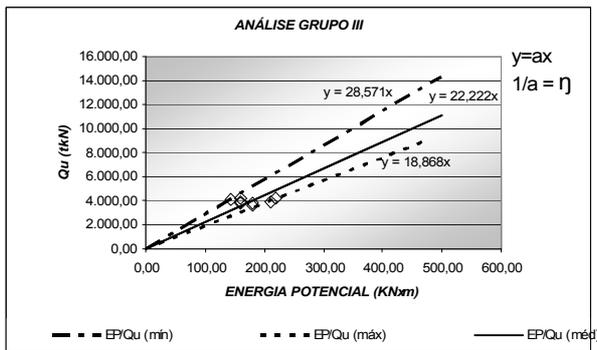


(b)

Figura 5 (a, b).- Análise relação $Q_u \times E_p$ - Amostragem de maior incidência de energia transferida.



(b)



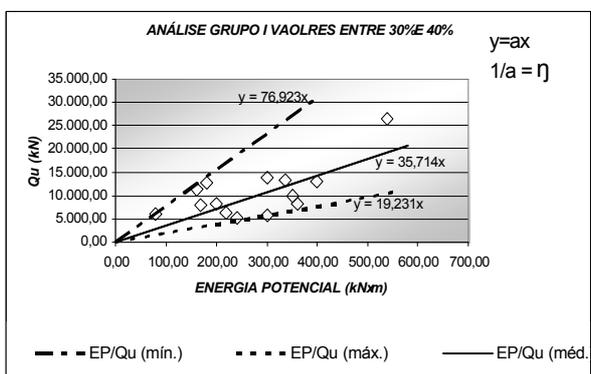
(c)

Figura 4(a, b, c) - Análise relação $Q_u \times E_p$ Amostragem global.

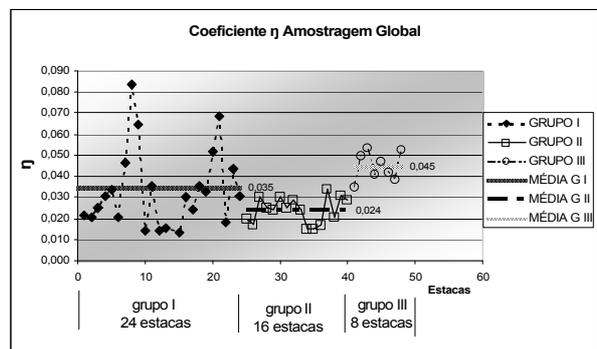
Tabela 2. Valores de η ($kN \times m / kN$)

Grupo	η			η		
	AMOSTRAGEM GLOBAL			AMOSTRAGEM MAIOR FREQUÊNCIA		
	Mín.	Médio	Máx.	Mín.	Médio	Máx.
I	0,013	0,035	0,083	0,013	0,028	0,052
II	0,015	0,024	0,034	0,015	0,024	0,034
III	0,035	0,045	0,053	0,035	0,045	0,053
I + II	0,013	0,030	0,083	0,013	0,026	0,052
I + II + III	0,013	0,033	0,083	0,013	0,032	0,053

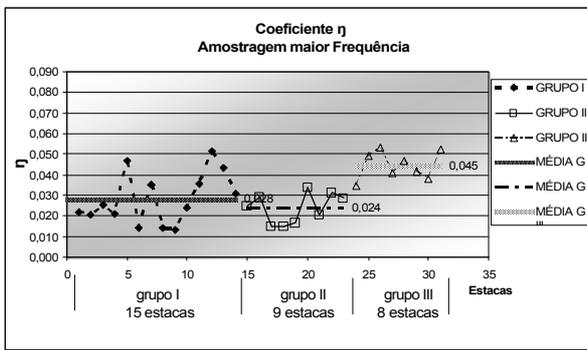
A figura 6 representa graficamente os valores de η resumidos na tabela 2 para cada estaca ensaiada.



(a)



(a)



(b)

Figura 6(a, b) – Representação gráfica tabela 2.

8 CONCLUSÕES

O MHAP-20 se apresenta como ferramenta competente a ensaiar estacas de alta capacidade de carga em obras em terra (onshore) e com lâmina d'água (offshore), disponibilizando energia potencial suficiente às previsões de cargas máximas mobilizadas no ECD.

As estacas pertencentes ao grupo III apresentam cargas máximas mobilizadas na ruptura, enquanto que as dos grupos I e II caracterizam cargas máximas mobilizadas sem a manifestação de ruptura, ou seja, decréscimo da carga mobilizada com o aumento de energia transferida.

Verifica-se que as cargas mobilizadas do grupo III manifestam-se em baixa magnitude apresentando baixa rigidez geotécnica que em conseqüência, geram elevados valores de η em relação às dos grupos I e II.

O critério de energia potencial que sugere este artigo coincide com o que postula Paikowsky (2004) e Paraíso et al (2004).

Sugere-se o valor médio de 0,033 para η como o mais representativo para a estimativa de energia potencial necessária.

REFERÊNCIAS

- AASHTO LRFD/93 – American Association of State Highway Officials Standard - Method of test for high-strain dynamic testing of piles.
- ABNT NBR 13208/94 – Associação Brasileira de Normas Técnicas – Estacas Ensaio de Carregamento Dinâmico.
- ASTM D4945/00 – American Society for Testing and Materials Standard - Test method for high-strain dynamic testing of piles.

- Aoki, N. & Mello, V. F. B. 1992 Dynamic loading test curves. *4th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*. Hauge, Holland.
- Beim, J. W. & Aoki, N. 1996 Dynamic load test method with variable energy. *5th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Orlando, USA.
- Capwap Users Manual 2000 Goble Rausche Likins and Associates, Inc. – Cleveland, Ohio, USA.
- de Mello, L. G. & Paraíso, S. C. 1998 Variable energy dynamic load test on a 1.0m diameter CFA pile. *Proc. Belgium – BAP III*.
- Hussein, M., Rauche, F. & Linkins, G. 1992 Dynamics of pile driving as a function of ram drop height. *4th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*. Hauge, Holland.
- Hussein, M., Rauche, F. & Linkins, G. 1996 Selection of a hammer for high strain dynamic testing of cast in place shafts. *5th Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles*, Florida, USA.
- Likins, G. 1994 Technical note for testing drilled shafts. Pile Dynamics Inc.
- Niyama, S., Campos, G. C., Navajas, S., Paraíso, S. C., Costa, C. M. C. & Barbosa, G. E. 2000 Dynamic load test of cast in place pile using a free fall hammer, *6th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, São Paulo, Brasil.
- Niyama, S., Campos, G. C., Navajas, S., Niyama, S., Campos, G. C., Navajas, S. 2000 Dynamic testing of large auger pile using free fall loading system in a harbour work, *6th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, São Paulo, Brasil.
- Paikowsky, S. G. 2004 Drop weight dynamic testing of drilled deep foundations, *7th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Malasia.
- Paraíso, S. C., Costa, C. M. C. & Soares, E. P.. 2000 Dynamic load test on high capacity pile socketed in basaltic rock, *6th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, São Paulo, Brasil.
- Paraíso, S. C., Costa, C. M. C. & Soares, E. P.. 2004 The performance of a free fall auto-propulsion hydraulic hammer testing high capacity piles, *7th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Malásia.
- Seidel, J. P., Klingberg, D. J. & Cannon, J. G. 1996 Dynamic testing of barretes for a cement silo project. *5th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*. Orlando, USA.