

INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE CARGA DINÂMICO EM ESTACAS ATRAVÉS DE ANÁLISES TIPO CAPWAP

DYNAMIC PILE LOAD TEST INTERPRETATION BY CAPWAP ANALYSES

Gouveia Pereira, José Jorge, *Aveiro, Portugal, gouveiapereira_mail@yahoo.com*
Santos, Jaime Alberto dos, *Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, jaime@civil.ist.utl.pt*
Gomes Correia, António, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, agc@civil.uminho.pt*
Simões, Teresa Nogueira, *SOPECATE, Lisboa, Portugal, teresans@sopecate.pt*

Resumo

O objectivo deste trabalho é o de mostrar as potencialidades do ensaio de carga dinâmico, como método alternativo ou complementar ao ensaio de carga estático. Discutem-se os problemas associados ao método de interpretação dos registos obtidos no ensaio dinâmico, com base em análises tipo *CAPWAP*. Apresenta-se um estudo paramétrico discutindo a influência dos diversos parâmetros do modelo, nomeadamente, da rigidez de ponta, do deslocamento elástico limite e dos factores de amortecimento lateral e de ponta. Este modelo foi implementado num programa de cálculo com base nas equações originalmente propostas por Smith (1960).

Abstract

The aim of this work is to show the potentialities of the dynamic load test, as an alternative or a complementary method to the static load test. The problems associated to the interpretation method based on *CAPWAP* analyses are discussed. A parametric study is presented, discussing the influence of several parameters of the model, namely, the base rigidity, the quake and the lateral and base soil damping constant. This model was implemented in a computer code using the original equations proposed by Smith (1960).

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Eurocódigo 7-parte 1 (*EC7*-parte 1), os ensaios de carga dinâmicos podem ser utilizados no dimensionamento de estacas, desde que haja um programa adequado de caracterização do terreno e o método de ensaio tenha sido calibrado em relação a ensaios de carga estáticos sobre estacas do mesmo tipo, com secção e comprimento semelhantes e em condições de terreno comparáveis.

Devido às dificuldades associadas à execução dos ensaios de carga estáticos, os profissionais da área têm recorrido a métodos alternativos mais expeditos para a avaliação da capacidade resistente das estacas. É neste contexto que, nos anos 30 foi proposto um ensaio baseado na equação de onda. Este ensaio utiliza a onda gerada pela cravação para verificação do desempenho de estacas solicitadas axialmente, embora por questões de dificuldades no processamento e na interpretação dos dados, apenas nos anos 60 se tenha iniciado a sua aplicação. Actualmente o ensaio de carga dinâmico é, em algumas situações, aceite como método de verificação da capacidade resistente e como método de dimensionamento. Pelo facto de ainda ser um ensaio pouco difundido no nosso país, discutem-se, neste trabalho, os

problemas associados ao método de interpretação dos registos obtidos no ensaio de carga dinâmico, com base em análises tipo *CAPWAP*.

2. ENSAIO DE CARGA DINÂMICO

Tradicionalmente a capacidade resistente das estacas é verificada através do ensaio de carga estático, mas devido a questões económicas e aos prazos de execução das obras, nalguns países tem vindo a ser complementado pelo ensaio de carga dinâmico. Este ensaio encontra-se normalizado em diversos países. Possivelmente, o código mais divulgado que rege este ensaio é a norma ASTM D 4945-00.

Este ensaio foi desenvolvido numa tentativa de aperfeiçoamento das fórmulas de cravação, sendo Newton em 1931 o primeiro a referir que no processo de cravação se desenvolve um efeito ondulatório. Em 1938 Fox publicou o primeiro conjunto de equações para estimar a capacidade resistente de estacas a partir do ensaio de carga dinâmico. Estas equações baseiam-se na teoria da propagação unidimensional de ondas mecânicas longitudinais.

O princípio de execução do ensaio é relativamente simples, uma vez que consiste apenas na geração duma perturbação na cabeça da estaca, que se propaga até à ponta onde se reflecte voltando à cabeça. A forma mais simples de provocar esta perturbação é utilizar o equipamento de cravação de estacas, até porque no caso das estacas cravadas já se encontra em obra.

Esta perturbação propaga-se na estaca sob a forma de uma onda longitudinal e unidimensional na direcção do eixo de simetria da estaca. No processo de propagação a onda é afectada pela interacção solo-estaca. A análise através da equação de onda consiste na quantificação desta interacção, através do estudo da onda que se propaga na estaca, inicialmente no sentido descendente e numa fase posterior no sentido ascendente.

Devido às limitações tecnológicas, embora se conhecessem os princípios de execução e de interpretação do ensaio, este não era muito utilizado. Esta situação alterou-se com o desenvolvimento dos meios informáticos e com o trabalho pioneiro de Smith (1960).

Numa primeira fase de utilização deste ensaio, a energia transferida para a estaca era determinada a partir da velocidade de impacto do martelo e do coeficiente de restituição do amortecedor. Cada uma destas grandezas era determinada teoricamente recorrendo, às leis básicas da física. A interpretação do ensaio baseava-se na energia transferida para a estaca e no trabalho realizado correspondente à penetração da estaca. As dúvidas surgidas na interpretação do ensaio podiam ser devidas às incertezas no conhecimento dos parâmetros do solo, mas também às aproximações efectuadas no cálculo da energia. Para ultrapassar estas incertezas foi implementada a realização de medições na própria estaca, efectuadas através de extensómetros e acelerómetros. Desta forma, são obtidas as curvas da força e da velocidade em função do tempo numa determinada posição da estaca. Actualmente é esta a técnica utilizada, que se designa por *ENSAIO DE CARGA DINÂMICO*.

O ensaio de carga dinâmico tem como principal objectivo a determinação da capacidade resistente do conjunto solo-estaca, mas os dados que permite obter podem ainda ser utilizados na verificação da integridade da estaca, no cálculo da eficiência do sistema de cravação e na determinação das tensões aplicadas à estaca na cravação.

Têm sido efectuadas correlações entre os resultados deste ensaio e os do ensaio de carga estático, mostrando para vários tipos de estacas e em diferentes tipos de solos que existe uma concordância bastante satisfatória entre os resultados de ambos os ensaios.

3. ANÁLISES TIPO CAPWAP

As principais limitações do modelo apresentado por Smith (1960) são as incertezas acerca da energia transmitida para a estaca, inerentes às simplificações efectuadas na determinação da velocidade de impacto do martelo e do coeficiente de restituição do amortecedor. Para minimizar estas incertezas, foram implementadas medições da deformação e da aceleração na cabeça da estaca, numa posição em geral, próxima do seu topo.

As medidas da deformação e da aceleração na cabeça da estaca, são independentes entre si, embora tenham sido provocadas pelo mesmo impacto, pelo que são afectadas pela mesma resistência do solo, seguindo, desta forma as mesmas relações físicas da equação de onda, Fellenius et al. (1989). Através do método *CAPWAP* efectua-se a interpretação dos registos obtidos, determinando a força na estaca a partir da velocidade obtida da aceleração medida e compara-a com a força obtida da deformação medida. Este método utiliza o modelo proposto por Smith (1960), variando os parâmetros do solo até que se obtenha um bom ajuste entre as curvas das forças medida e calculada. Neste modelo, a estaca é modelada através de molas e elementos com massa e o solo por molas e amortecedores.

Para que os valores obtidos por este processo possam ser melhorados é possível realizar uma interpretação através do método *WAPCAP*, que permite a obtenção dos mesmos parâmetros que o método *CAPWAP*, mas utiliza os dados da força como entrada para determinar a velocidade que depois é comparada com a velocidade determinada a partir da aceleração medida.

Desta forma o método *CAPWAP* pode ser calibrado para as condições locais e permite a determinação não só da capacidade resistente da estaca, bem como de parâmetros dinâmicos do solo. Tem a vantagem de eliminar as incertezas quanto à avaliação da energia dissipada aquando da aplicação do impacto.

O modelo utilizado considera que o solo tem um comportamento elástico-perfeitamente plástico, definido por duas zonas: uma zona inicial em que a resistência é proporcional ao deslocamento, e uma segunda zona em que a resistência se mantém com o aumento do deslocamento, como apresentado na Figura 1. O ponto que marca a separação das duas zonas é definido pelo deslocamento elástico limite, Q (conhecido na bibliografia por “quake”) e pela resistência última R_u . Nesta figura s representa o deslocamento plástico.

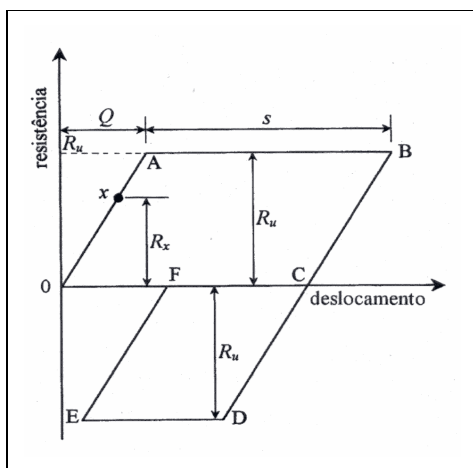


Figura 1 – Comportamento considerado para o solo e modelo para implementação numérica.

O factor de amortecimento J define a forma como a energia é dissipada pelo solo, correspondendo a uma diminuição da energia efectiva transmitida aos restantes elementos da estaca. Através dos cálculos numéricos, a partir da equação de onda, é possível obter a velocidade instantânea de qualquer ponto em qualquer instante. Se a velocidade instantânea de um ponto da estaca for designada por v , e o factor de amortecimento por J , o produto JvR_x traduz a resistência por amortecimento do ponto x , representado na Figura 1.

Os valores obtidos para o deslocamento elástico limite, para o factor de amortecimento e para a distribuição da resistência lateral são utilizados na avaliação da resistência mobilizada. Uma vez obtidos os parâmetros do modelo, é possível simular o resultado de um ensaio de carga estático.

4. CASO DE ESTUDO

O caso de estudo que se apresenta neste trabalho insere-se num projecto de investigação do Instituto Superior Técnico com a participação da empresa Sopecate. O campo experimental desenvolveu-se próximo da auto-estrada A13, junto ao nó de Santo Estevão, sublanço Santo Estevão-Pegões, nas proximidades da passagem PI-2A e enquadra-se no projecto de investigação *POCTI/ECM/36057/99*, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).

No campo experimental foram executadas cinco estacas moldadas, sendo as estacas de reacção denominadas por E_1 a E_4 , e a estaca solicitada à compressão por E_5 , como se mostra de forma esquemática na Figura 2. As estacas E_1 e E_4 foram submetidas ao ensaio de carga dinâmico, enquanto que a estaca E_5 foi sujeita ao ensaio de carga estático.

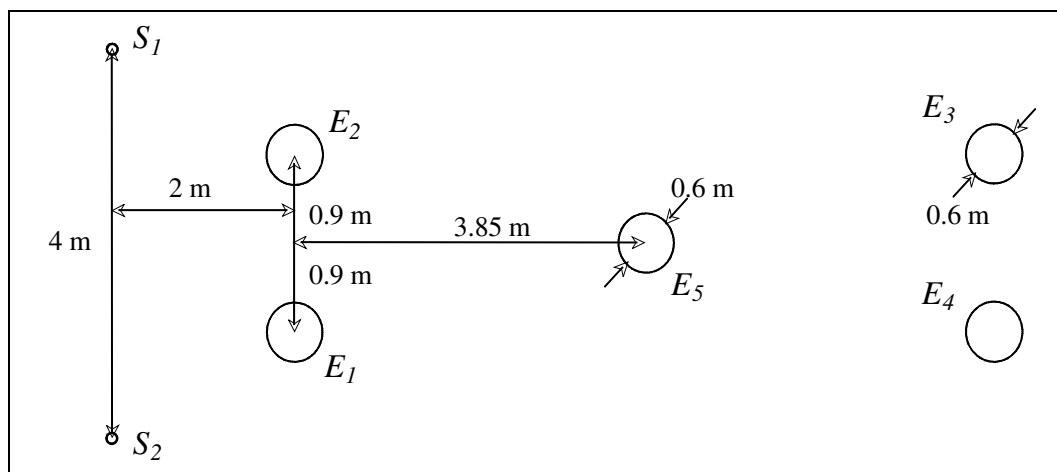


Figura 2 – Geometria do local de ensaio.

As estacas apresentam um diâmetro de 0.6 m até aos 17 m de profundidade e de 0.55 m no restante comprimento (comprimento total de 22m). As estacas foram executadas com recurso a tubo moldador recuperável, até aos 17 m.

A caracterização geotécnica do terreno foi realizada com base numa campanha de prospecção constituída por duas sondagens com a realização de ensaios *SPT* de 2.0 em 2.0 m ou quando ocorria alteração das propriedades nas camadas. Além disso, executaram-se ensaios sísmicos entre furos de sondagem (*cross-hole*).

Neste trabalho, analisam-se apenas os resultados obtidos no ensaio E1G1H4 realizado na estaca E_1 , cujos registos em termos de força e do produto da velocidade (v) pela impedância (Z), são apresentados na Figura 3.

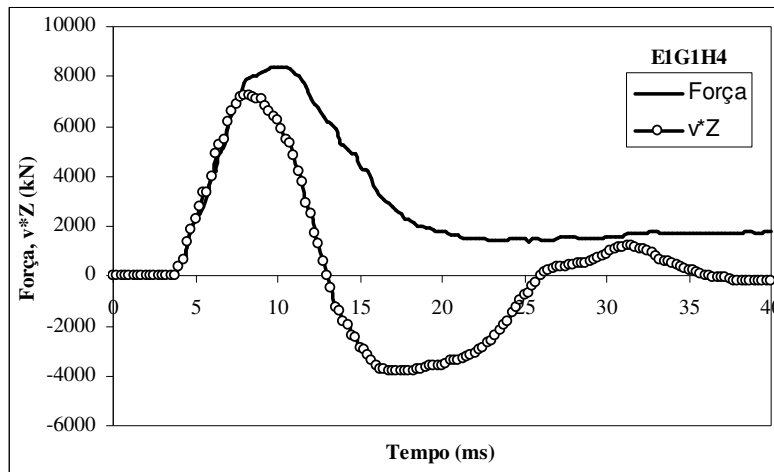


Figura 3 – Registro obtido no ensaio de carga dinâmico E1G1H4.

O estudo paramétrico foi realizado recorrendo a um programa de cálculo automático (Gouveia Pereira, 2003). Estudou-se a influência dos diferentes parâmetros utilizados, nomeadamente: a rigidez de ponta (K_p), o factor de amortecimento de ponta (J_p) e o factor de amortecimento (J) e o deslocamento elástico limite (Q) laterais .

No sentido de avaliar a influência individual de cada um dos parâmetros mencionados foram inicialmente utilizados valores correntes de cada um dos parâmetros em estudo. De seguida, o seu valor foi variado de forma a aferir a sua influência na resistência mobilizada. Em todos os cálculos efectuados as curvas da força obtida a partir das deformações medidas foi ajustada com a força calculada variando os parâmetros do modelo.

O modelo necessita de vários parâmetros, nomeadamente: o factor de amortecimento J , o deslocamento elástico limite Q e a rigidez da mola que simula o solo, K' . Parâmetros como J e Q podem ser variados de forma a que o utilizador avalie qual a combinação que permite obter melhores ajustes. O parâmetro K' pode ser derivado a partir de ensaios de campo. No caso deste trabalho foi determinado com base em ensaios sísmicos entre furos. Atendendo a que a velocidade de propagação das ondas obtidas no referido ensaio, são válidas para o domínio das muito pequenas deformações, o módulo de distorção correspondente é normalmente definido como G_0 . Se a rigidez das molas for obtida a partir do módulo de distorção de acordo com a expressão (1), proposta por Lee et al. (1988), e se for utilizado o módulo de distorção obtido através do ensaio sísmico, será definida a rigidez inicial das molas, K'_0 .

$$K'_0 = 2.75G_0 \quad (1)$$

Para ter em conta o comportamento não linear do solo, optou-se por afectar os valores de K'_0 , obtidos pelo processo anteriormente referido, dum factor que tem por objectivo o de traduzir o efeito da degradação da rigidez com o nível de deformação. O factor que afecta a rigidez de cada um dos elementos, varia de cálculo para cálculo tendo sido definido de modo a permitir um melhor ajuste entre as curvas da força medida e calculada.

O factor de descarga define a percentagem entre as resistências estáticas mobilizadas quando a estaca tem um movimento descendente e ascendente.

Para estudar a influência dos diferentes parâmetros realizaram-se 35 cálculos. No Quadro 1 são identificados os parâmetros utilizados em cada um dos cálculos efectuados, assim como os valores das resistências que foram obtidos em cada um deles.

Quadro 1 – Parâmetros utilizados nos diferentes cálculos efectuados.

Objectivo	n.º do cálculo	J (s/m)	J_p (s/m)	Q (m)	K_p (kN/m)	Factor de descarga	R_s (kN)	R_b (kN)	R (kN)
Avaliar a influência da rigidez de ponta	1	1	1	0.003	594804	0.07	6255	1784	8039
	2	1	1	0.003	793072	0.12	6255	2379	8634
	3	1	1	0.003	1189607	0.23	6219	3008	9227
	4	1	1	0.003	1802436	0.25	6083	3635	9718
	5	1	1	0.003	2379215	0.25	5971	4045	10016
	6	1	1	0.003	2974019	0.25	5878	4354	10232
Avaliar a influência do factor de amortecimento de ponta	7	1	2.8	0.003	1802436	0.27	5988	3240	9228
	8	1	2.5	0.003	1802436	0.27	6001	3295	9296
	9	1	2	0.003	1802436	0.27	6025	3396	9421
	10	1	1.5	0.003	1802436	0.25	6052	3510	9562
	11	1	1	0.003	1802436	0.25	6083	3635	9718
	12	1	0.67	0.003	1802436	0.25	6105	3728	9833
	13	1	0.50	0.003	1802436	0.25	6116	3775	9891
	14	1	0.33	0.003	1802436	0.22	6124	3821	9945
Avaliar a influência do deslocamento elástico limite e do factor de amortecimento laterais	15	1	0.1	0.003	1802436	0.20	6135	3885	10020
	16	0.8	0.8	0.002	1802436	0.12	6330	3605	9935
	17	0.8	0.8	0.003	1802436	0.17	6434	3781	10215
	18	0.8	0.8	0.004	1802436	0.30	6550	3871	10421
	19	0.8	0.8	0.005	1802436	0.45	6625	3969	10594
	20	1.0	1.0	0.002	1802436	0.18	5993	3489	9482
	21	1.0	1.0	0.003	1802436	0.25	6027	3670	9697
	22	1.0	1.0	0.004	1802436	0.40	6067	3787	9854
	23	1.0	1.0	0.005	1802436	0.60	6102	3906	10008
	24	1.2	1.2	0.002	1802436	0.20	5623	3418	9041
	25	1.2	1.2	0.003	1802436	0.30	5679	3580	9259
	26	1.2	1.2	0.004	1802436	0.40	5716	3709	9425
	27	1.2	1.2	0.005	1802436	0.60	5759	3809	9568
	28	1.4	1.4	0.002	1802436	0.20	5406	3281	8687
	29	1.4	1.4	0.003	1802436	0.30	5476	3434	8910
30	1.4	1.4	0.004	1802436	0.40	5497	3568	9065	
31	1.4	1.4	0.005	1802436	0.70	5522	3689	9211	
32	1.5	1.5	0.002	1802436	0.20	5364	3199	8563	
33	1.5	1.5	0.003	1802436	0.32	5412	3366	8778	
34	1.5	1.5	0.004	1802436	0.40	5454	3494	8948	
35	1.5	1.5	0.005	1802436	0.70	5515	3562	9077	

4.1 Influência da Rigidez de Ponta

Para avaliar a influência da rigidez de ponta foram efectuados os cálculos 1 a 6 em que a rigidez de ponta foi variada, mantendo-se constantes os valores dos factores de amortecimento lateral e

de ponta, assim como o deslocamento elástico limite. O factor de descarga foi variado de forma a que a parte final das curvas medida e calculada fosse de melhor qualidade (este parâmetro altera apenas a forma da curva no troço final, pelo que não altera significativamente a resistência mobilizada). Os factores de redução da rigidez foram ligeiramente alterados de forma a que as curvas se ajustassem melhor.

Os resultados obtidos neste estudo são apresentados na Figura 4, da qual se pode verificar que a rigidez de ponta da estaca influencia de forma considerável a resistência mobilizada, pelo que se considera que deve ser avaliada com o máximo rigor. Esta influência é claramente mais significativa no cálculo da resistência mobilizada pela ponta, embora também afecte ligeiramente a resistência mobilizada por atrito lateral. Pelos valores obtidos nos cálculos efectuados é possível verificar que a resistência total mobilizada apresenta uma variação de cerca de 10% em torno do seu valor médio. É de salientar que fez-se variar significativamente a rigidez de ponta, em torno do valor médio de 1800000 kN/m.

Atendendo à proximidade com o valor médio e ao bom ajuste que permitiu nos cálculos efectuados posteriormente utilizou-se preferencialmente um valor para a rigidez de ponta de 1802436 kN/m. Apenas quando este valor não permitia ajustes aceitáveis para as curvas é que foi alterado até que o referido ajuste pudesse ser considerado válido.

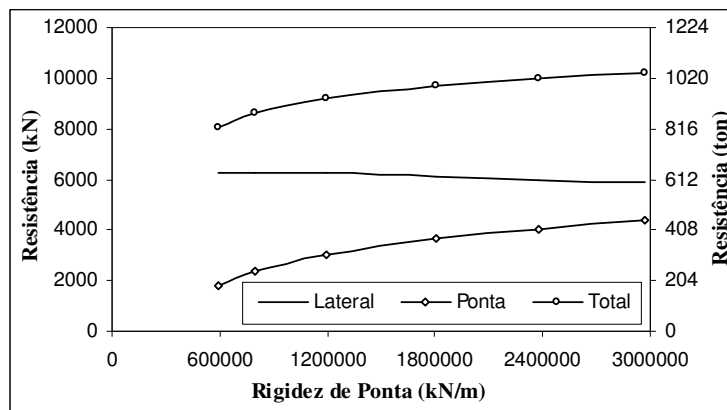


Figura 4 – Estudo da influência da rigidez de ponta na resistência mobilizada.

4.2 Influência do Factor de Amortecimento de Ponta

Para se estudar a influência do factor de amortecimento de ponta da estaca foram efectuados os cálculos 7 a 15 do Quadro 1, nos quais os restantes parâmetros se mantiveram inalterados, com excepção do factor de descarga e dos factores de redução da rigidez. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5. Desta figura é possível verificar que o factor de amortecimento de ponta da estaca tem uma influência pouco significativa na resistência mobilizada. Embora se tenha variado o referido factor de 0.1 a 2.8 as variações na resistência mobilizada foram de apenas de cerca de 8%. Por este facto, utilizou-se nos cálculos subsequentes um factor de amortecimento de ponta igual ao lateral, isto é $J=J_p$.

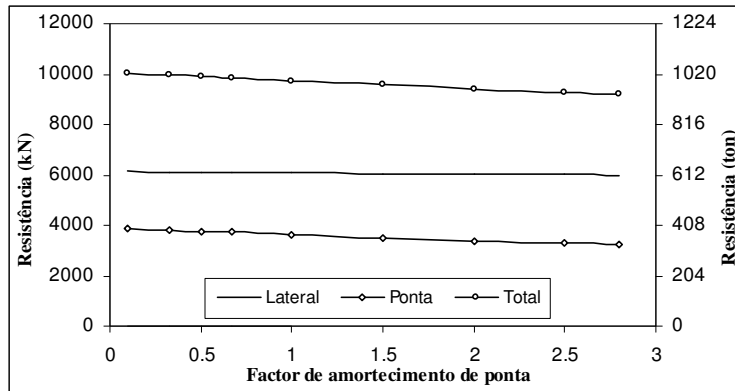


Figura 5 – Influência do factor de amortecimento de ponta na resistência mobilizada.

4.3 Influência do Factor de Amortecimento e do Deslocamento Elástico Limite Laterais

De forma a ser avaliada a influência do factor de amortecimento e do deslocamento elástico limite laterais foi realizado um estudo paramétrico em que um deles foi variado mantendo o outro constante. Começou-se por analisar o intervalo de variação dos parâmetros referidos, em que é possível obter-se um ajuste aceitável entre as curvas medida e calculada. Este estudo mostrou que o factor de amortecimento deve tomar valores no intervalo entre 0.8 e 1.5 s/m. Um estudo idêntico foi realizado acerca do deslocamento elástico limite, do qual foi definido que Q deve variar entre 2 e 5 mm. Desta forma foram efectuados cálculos para $J = 0.8, 1.0, 1.2, 1.4$ e 1.5 s/m e para $Q = 2, 3, 4$ e 5 mm. A variação destes parâmetros foi realizada, mantendo a rigidez de ponta fixa, sendo atribuído a K_p o valor de 1802436 kN/m. O factor de amortecimento de ponta foi, considerado igual ao lateral.

Com base no referido foram efectuados os cálculos 16 a 35 do Quadro 1. A influência do factor de amortecimento é apresentada na Figura 6, enquanto que a influência do deslocamento elástico limite é apresentada na Figura 7.

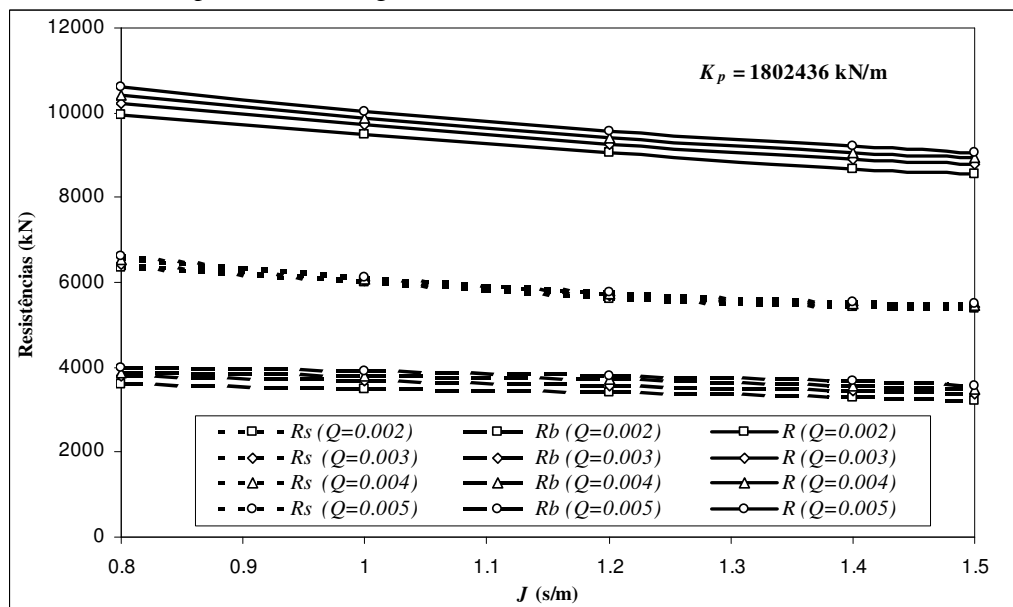


Figura 6 – Influência do factor de amortecimento lateral.

Da Figura 6 pode verificar-se que o aumento do factor de amortecimento tem a particularidade de diminuir a resistência estática mobilizada. Este facto deve-se a que a resistência por amortecimento depende directamente do factor de amortecimento. Desta forma, mantendo-se a resistência dinâmica mobilizada constante, se a resistência por amortecimento aumenta a resistência estática terá de diminuir, como na realidade se verificou, tanto para a lateral como para a de ponta.

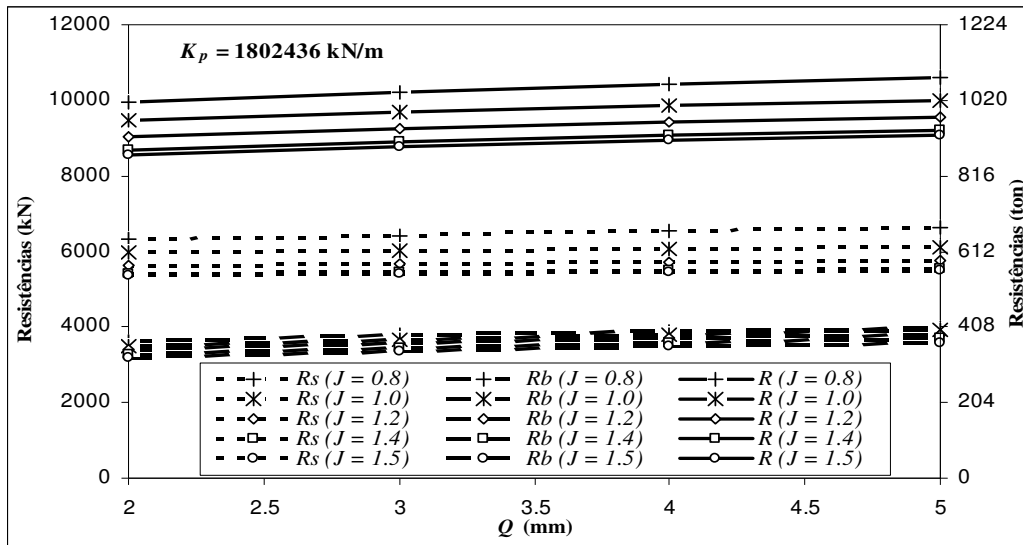


Figura 7 – Influência do deslocamento elástico limite.

Da Figura 7, verifica-se que a influência do deslocamento elástico limite não é tão significativa como a do factor de amortecimento, embora o seu aumento provoque um aumento da resistência mobilizada. Este aumento deve-se sobretudo ao aumento da resistência de ponta, mas também a um ligeiro aumento da resistência lateral.

Tendo em conta a Figura 6 e a Figura 7 pode concluir-se que o factor de amortecimento afecta principalmente a componente lateral da resistência mobilizada, enquanto que o deslocamento elástico limite afecta sobretudo a componente de ponta, para o caso de estudo, em análise.

5 CONCLUSÕES

Dos estudos paramétricos concluiu-se que, para o caso estudado:

- o factor de amortecimento que permitiu ajustes aceitáveis entre as curvas da força em função do tempo, medidas e calculadas, variou no intervalo de 0.8 a 1.5 s/m;
- os valores do deslocamento elástico limite, que permitiu ajustes aceitáveis das duas curvas pertenceram ao intervalo de 2 a 5 mm;
- a rigidez de ponta influencia consideravelmente a resistência mobilizada, provocando uma ligeira diminuição na componente lateral e um aumento significativo da componente de ponta. A razão entre as resistências estáticas totais mobilizadas máxima e mínima (nos cálculos 1 a 6) teve o valor de 1.27;
- a variação do factor de amortecimento de ponta produziu uma ligeira diminuição da resistência mobilizada pela ponta. Esta redução foi devida ao facto do aumento do factor de amortecimento ter aumentado a componente de amortecimento da resistência dinâmica. Como esta última se manteve constante, o aumento da resistência de amortecimento foi compensado pela diminuição da resistência estática. A resistência lateral foi menos afectada

- do que a resistência de ponta. A razão entre as resistências estáticas totais mobilizadas máxima e mínima (nos cálculos 7 a 15) teve o valor de 1.09;
- o aumento do factor de amortecimento produziu uma ligeira diminuição da resistência estática mobilizada. A razão entre as resistências estáticas totais mobilizadas máxima e mínima (nos cálculos 16 a 35, para o mesmo valor de Q) teve um valor aproximadamente constante de 1.16. Esta diminuição foi devida à diminuição da resistência lateral e da resistência de ponta, sendo a primeira mais significativa. A justificação desta diminuição foi a mesma do caso anterior;
 - o aumento do limite de deslocamento elástico traduziu-se num ligeiro aumento da resistência mobilizada. A razão entre as resistências estáticas totais mobilizadas máxima e mínima (nos cálculos 16 a 35, para o mesmo valor de J) teve um valor aproximadamente constante de 1.06. A contribuição mais significativa foi a da componente lateral, embora a componente de ponta também tenha registado um ligeiro aumento. O produto da rigidez pelo deslocamento elástico limite define a resistência última das molas que simulam o solo. Se o limite de deslocamento elástico aumentar é natural que a resistência mobilizada também aumente, se forem mantidas constantes as outras variáveis do problema.

É de salientar que apesar da elevada amplitude dos intervalos de variação dos parâmetros estudados, os ajustes entre as curvas medida e calculada mantiveram-se aceitáveis. Tal facto, deve-se a que o efeito da variação de um dado parâmetro ser anulado ou compensado pela variação de outro dos parâmetros, não afectando significativamente a resistência total mobilizada. Pode verificar-se que a variação dos valores da resistência total mobilizada foi inferior a 10% em torno do seu valor médio, mostrando a fiabilidade e robustez do ensaio de carga dinâmico em estacas.

É necessário ter em consideração que os ensinamentos obtidos a partir dos cálculos efectuados são válidos para as condições geotécnicas presentes no local de ensaio.

6 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente suportado pelo programa plurianual da FCT e pelo projecto de investigação POCTI/ECM/36057/99, que permitiu a atribuição de uma bolsa de investigação.

7 BIBLIOGRAFIA

- ASTM D 4945-00 (2000) "Standard Test Methods for High-Strain Dynamic Testing Of Piles".
- EC7-parte 1 (1999) "Eurocódigo 7: Projecto geotécnico. Parte 1: Regras gerais".
- Fellenius, B. H., Riker, R. E., O'Brien, A. J., Tracy, G. R. (1989) "Dynamic and static testing in soil exhibiting set-up". *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 115, n.º 7.
- Gouveia Pereira, J. J. (2003) "*Avaliação da capacidade resistente de estacas através do ensaio de carga estático.*" Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, para obtenção do grau de Mestre em Georrecursos.
- Lee, S. L., Chow, Y. K., Karunaratne, G. P., Wong, K. Y. (1988) "Rational wave equation model for pile-driving". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol. 114, n.º3, pp. 306-325.
- Smith, E. A. L. (1960) "Pile-driving analysis by the wave equation", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol. SM 4, pp. 35-61.