

Correlação entre resultados de ensaios de estacas cravadas, SLT, DLT/SM e nega

Correlation between test results of driven piles, SLT, DLT/SM and final set

H. Novais-Ferreira*

RESUMO - São referidas as razões do estudo, relacionadas com o custo e o tempo de ensaio e a conveniência de dispor de uma apreciação global das estacas cravadas numa obra. Apresenta-se a informação disponível da geologia local, das estacas ensaiadas e dos resultados de ensaios. Discutem-se os resultados da avaliação da capacidade de carga através de nega e procura-se identificar a população estatística dos resultados. Confirma-se a grande dispersão dos resultados da nega. Estabelecem-se as correlações entre os resultados dos ensaios estáticos de carga (SLT) e ensaio dinâmicos com ajustamento de sinal (DLT-SM) no que se refere à capacidade de carga e aos assentamentos. Discute-se a correlação entre as capacidades de carga estimadas pelo ensaio DLT-SM e pela fórmula de Hiley (DTu vs PTu). Apresentam-se três formas de ajustar a fórmula de Hiley às condições da obra, tendo presente que a dispersão de resultados será sempre grande. Sugere-se uma estratégia para ampliar o método de controlo de qualidade de estacas cravadas, e o conhecimento global da população.

SYNOPSIS - Reasons of the study are referred, related with the cost and time of the tests, and the convenience to have a general appreciation of the piles driven in a job. The existing information of the local geology, piles tested and results is presented. The results of the evaluation of the bearing capacity of piles by the final set are discussed, and the statistic population of the results is identified. The very large dispersion of the final set results is confirmed. Correlations between static load tests (SLT) and dynamic load test signal matching (DLT-SM) relating results of bearing capacity and results of settlements are established. Correlations between bearing capacity estimated by dynamic load test signal matching (DLT-SM) and by Hiley formula, are discussed (DTu vs PTu). Three possibilities of adjust the Hiley formula to the job conditions are presented; however the dispersion is always very large. A strategy to straightened the quality control of the driven piles and to know the global population is suggested.

* Investigador Coordenador
do LNEC, E-mail:
hnf@lecm.org.mo

Palavras-chave – Estacas cravadas; ensaios de estacas; correlação entre ensaios.

1 - INTRODUÇÃO

Em Macau, os grandes edifícios nas zonas recuperadas ao mar, são geralmente fundados sobre estacas cravadas tipo PHC (JIS A 5337-1995). O controlo de qualidade envolve diversos estudos e ensaios, incluindo, durante a execução, entre outros: (a) Ensaios e estáticos (Static Load Test – SLT); (b) Ensaios dinâmicos com ajustamento de sinal (Dynamic load test with signal matching - DLT-SM); (c) Medição da nega (final set on the piles – SET).

Muito raramente o ensaio estático (SLT), é levado à rotura do solo. Em regra o ensaio é realizado por ciclos até duas vezes a carga admissível definindo o diagrama de assentamento da cabeça da estaca (Ss) e em função da carga aplicada (Ps) ou seja o diagrama (Ss vs. Ps), seguindo-se a norma ASTM D1143. Este ensaio é considerado o mais fiável. Contudo, requer muito tempo e uma preparação cuidada e dispendiosa. O ensaio completo pode custar acima de 5 000 euros.

O ensaio dinâmico com ajustamento de sinal (DLT-SM) requer somente o equipamento de cravação, equipamento ligeiro de medição e registo, e algum tempo de gabinete com o computador dedicado ao ensaio. O preço é de cerca de 1 000 euros. Os resultados permitem avaliar:

- a integridade da estaca;
- a resistência de atrito estaca-solo para cada camada de solo (DLui);
- a resistência de ponta da estaca (DBu);
- a resistência geotécnica total da estaca - (DTu);
- a curva de assentamento da estaca (curva Sd vs Pd), com estimativa do assentamento total e do assentamento residual;
- a curva de carga ao longo da estaca.

O ensaio dinâmico com ajustamento de sinal (DLT-SM) é mais poderoso do que o ensaio estático (SLT) mas não é um ensaio directo, requer várias hipóteses para a interpretação dos resultados, sendo útil a execução de ensaio estático simultâneo em algumas estacas, para calibragem relativamente ao local e tipo da obra.

A nega (final set, SET) é verificada em todas as estacas, praticamente a custo nulo. Embora se saiba que os resultados desta medição são muito dispersos, dão uma ideia do comportamento da estaca e de um valor (Phu) da carga de rotura usando uma equação de cravação. A equação de Hiley tem uma aceitação internacional generalizada; no entanto, tem recebido grandes críticas e não é aceitável como fórmula de cálculo mas somente como um indicador grosseiro da capacidade de carga, podendo tentar-se sempre uma (duvidosa) calibragem posterior.

Considerando o custo, o tempo de obtenção de resultados e as características desses resultados,

esquematisou-se um sistema de controlo envolvendo os três métodos;

- Diagrama de cravação com especial atenção aos valores finais e à nega (SET);
- Ensaios DLT-SM em 3% das estacas;
- Ensaios de SLT em cerca de 33 % das estacas ensaiadas por DLT-SM (1% do total das estacas).

Deste modo, a população é definida qualitativamente pelos diagramas de cravação e resultados da nega (SET). A população é avaliada quantitativamente pelos resultados de SLT. É calculada a correlação entre os resultados de SLT e DLT-SM. Os resultados de DLT-SM são calibrados para as condições da obra em análise. A fórmula de Hiley (SET) é apreciada para as condições da mesma obra.

2 - FUNDAÇÕES DO CENTRO CULTURAL DE MACAU

2.1 - Generalidades

O Centro Cultural de Macau está fundado sobre estacas, tendo-se seguido o critério anterior. A cravação das estacas foi acompanhada do registo do número de pancadas ni aplicado para cravar cada metro de estaca à profundidade Di (diagrama de cravação, ni vs Di, mais correctamente diagrama diferencial ou de densidade de cravação). Quando é atingido um valor superior a $ni = 150$ pancadas por metro, geralmente é efectuada a medição da nega, média de penetração por pancada obtida em 10 últimas pancadas adicionais. A fórmula de Hiley foi usada à priori (com o coeficiente de segurança 2,5, $C1 = 0,002$ m (em alguns casos $C1 = 0,004683$), $ef = 0,9$ e $n = 0,4$) para constituir uma indicação qualitativa de aceitabilidade da capacidade de carga da estaca e de fim da cravação.

Foram definidos três conjuntos (ou populações) de estacas:

- Conjunto T – todas as 1309 estacas – todas as estacas têm resultados de nega;
- Conjunto D – 32 estacas com resultados de DLT-SM e nega;
- Conjunto S – 9 estacas com resultados de SLT, DLT-SM e nega;

O conjunto S é um subconjunto de D, que por sua vez é subconjunto de T.

A calibragem à posteriori da nega (SET) foi efectuada de acordo com o procedimento seguinte:

- Definição da população estatística dos resultados obtidos a partir da nega para todas as estacas (População T), e para as populações D e S;
- Avaliação da correlação entre resultados SLT e DLT-SM para a população S;

- Avaliação da correlação entre resultados de DLT-SM e nega para as populações D e S;
- Ajustamento dos resultados de DLT-SM e da formula Hiley (SET) para o conjunto D;
- Extrapolação para o conjunto T.

2.2 - Informação geotécnica

Para o Centro Cultural de Macau foram executadas 21 sondagens geológicas localizadas na área uniformemente distribuídas (Relatório LECM 614 e Boletim LECM 971) com medição de SPT (ASTM D1586) a cada 2 metros de profundidade e ensaio de algumas amostras não remexidas. Os ensaios de laboratório forneceram as características das diversas camadas – areia, lodo, argila, granito alterado (CDG), rocha.

Os resultados das sondagens mostraram que a área é relativamente homogênea com as mesma camadas geológicas, diferindo somente na sua espessura (Quadro 1).

Quadro 1 - Síntese das sondagens

Camada	Base da camada prof. Min. (m)	Base da camada prof. Max. (m)	Espessura (m)
Aterro de areia	7	15	7 a 15
Depósito marinho	10,5	18	3 a 9
Alúvio	21	33	8 a 19,5
CDG	38,6	76,64	11,6 a 55,64
Rocha sã			

2.3 - Estacas

As estacas utilizadas eram prefabricadas, de betão armado pré-esforçado, tipo Daido, com as características indicadas no Quadro 2 (normas GB 13476-99 e JIS A 5337-1995).

Quadro 2 - Características das estacas

Tipo	Estaca de betão prefabricada pre-esforçada, (PHC) tipo, Daido
Diâmetro exterior	500 mm
Diâmetro interior	250 mm
Espessura	125 mm
Peso	26 kN / m ³
Carga admissível	540 ton
Nº de estacas	1309
Cravação	vertical

2.4 - Ensaios

Os ensaios estão indicados no Quadro 3.

Quadro 3 – Ensaios de estacas – Centro Cultural de Macau

Ensaios de estacas	Quant.	Forças obtidas*	Diagrama
SET - Nega – Formula de Hiley População T	1309	PHu PHa	
DLT-SM População D	32	DTu DTa	Sd vs Pd
STL - População S	9		Ss vs Ps

* u – última; a - admissível

Todas as estacas com ensaio SLT foram ensaiadas por DLT-SM. Para todas as estacas com ensaio DLT-SM foi medida a nega.

2.5 - Nega

Os resultados da nega de todas as estacas (população T) foram listados e uma síntese é apresentado no Quadro 4.

A uniformidade dos resultados é razoável. O coeficiente de variação (Cfov) é de 7,1 %.

O ensaio de χ^2 não permitiu rejeitar a hipótese nula com mais de 1% de erro. Assim a população das negas, nesta obra, pode ser considerada gaussiana para efeito de estimas.

Quadro 4 - Síntese das negas
C1 = 0,002mm

Item	Símbolo	Valor (T)	Valor (D)
Mínimo	Min	488	488
Máximo	Max	923	923
Média	\bar{X}	644	627
Desvio padrão	σ ou s	45,67	83,13
Coef. de variação	Cfov	7,1	13,27
Probabilidade do Min	Pr(Min)	0,00031	4,7868
Probabilidade do Max	Pr(Max)	99,999	99,982
Valor com probabilidade de 5%	V ₅	569	490
Valor com probabilidade de 95%	V ₉₅	720	763
Número de valores	N	1310	32

Valor (T) – refere-se à população T

Valor (D) - refere-se à população D

A Figura 1 apresenta as curvas de frequências acumuladas das negas, real e teórica (normal) para a mesma média e desvio padrão.

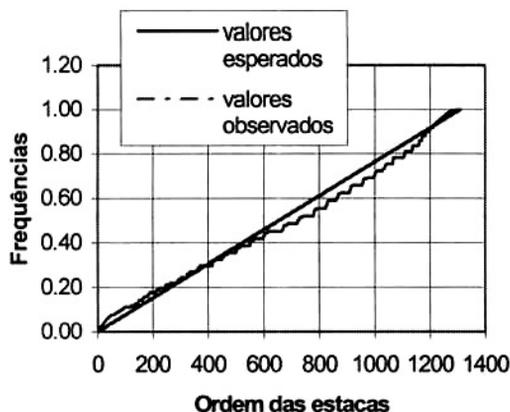


Fig. 1 - Curvas de frequência acumulada de PHu.

As duas curvas não correspondem exactamente ao mesmo tipo de população. A população dos resultados obtidos a partir das negas (valores medidos) não é exactamente normal parecendo antes linear. Considerando que a distribuição dos ensaios na área de construção é mais ou menos uniforme parece haver uma distribuição normal sobreposta por uma distribuição causal. Para a interpretação dos resultados é conveniente ter em atenção este facto.

3 - CORRELAÇÕES

3.1 - SLT versus DLT

A comparação entre SLT e DLT só é possível pelos diagramas de deformação, de carga e de descarga (S versus P), uma vez que as cargas limites no ensaio SLT não são cargas últimas. Foram comparados os diagramas de carga (primeira curva no SLT) e de descarga (última curva no SLT).

Nos ensaios SLT, os diagramas de deformações correspondem a 4 ciclos - 0 a 135; 0 a 270; 0 a 405 e 0 a 540 ton, (por vezes 5 ciclos), com as deformações eventualmente crescendo (para a mesma carga) de ciclo para ciclo. As curvas de deformação no DLT-SM refere-se a deformação instantânea (ensaio dinâmico). Assim a comparação foi efectuada entre as deformações DLT-SM e as deformações SLT usando a primeira carga para cada força.

Na descarga os assentamentos SLT usados foram os da última descarga (a partir da máxima carga).

Os resultados foram comparados individualmente por estaca e para a média. Com os valores individuais (carga) foram obtidos diagramas (Figura 2):

- deformações (Ss e Sd, mm) versus força (P, ton)
- deformações DLT-SM (Sd, mm) versus deformações SLT (Ss, mm)

Destes diagramas pode verificar-se que a correlação das deformações (Ss, Sd) é aproximadamente linear até P=405 ton, para cada uma das estacas.

Os resultados da relação (Ss/Sd) estão sumariados na Figura 3, indicando a variação com a força (P,ton): mínimo, máximo e média. Entre P = 180 e P = 405 ton a média é praticamente constante.

A relação entre deformações (Ss/Sd) para P = 405 ton apresenta os valores indicados no Quadro 5.

Quadro 5 - Relação Ss / Sd para P = 405 ton

Estaca	Ss / Sd
A 80	0,783
A 100	0,844
A 213	0,606
A 228	0,727
B 68	1,026
B 113	0,687
C 60	0,776
D 32	0,853
G 48	0,757
Média	0,784
Desv. Padrão	0,118
Coef. Var.	15%

Até uma força aplicada de (405 ton), 1.5 vezes a carga de serviço (270 ton), os dois ensaios apresentam uma curva similar S versus P, sendo em geral Ss<Sd.

Na descarga as curvas de deformação de STL e DLT-SM foram também comparadas, tendo-se verificado que os valores eram relativamente diferentes, não sendo aceitável uma correlação.

3.2 - DTu versus Phu

3.2.1 - A fórmula de Hiley de cravação de estacas é dada pelas expressões seguintes:

$$A = (ef \times W \times H / (S + (C_1 + C_2 + C_3) / 2)) \quad (1)$$

$$N = (W + (n^2) \times (Wp)) / (W + (Wp)) \quad (2)$$

$$Phu = A \times N \quad (3)$$

onde:

H = altura de queda do pilão, m

W = peso do pilão, kN

Wp = peso da estaca, kN

ef = valor de eficiência do pilão (usado 0.9)

S = nega, penetração da estaca resultante da última pancada (usualmente a média da penetração das últimas 10 pancadas), m

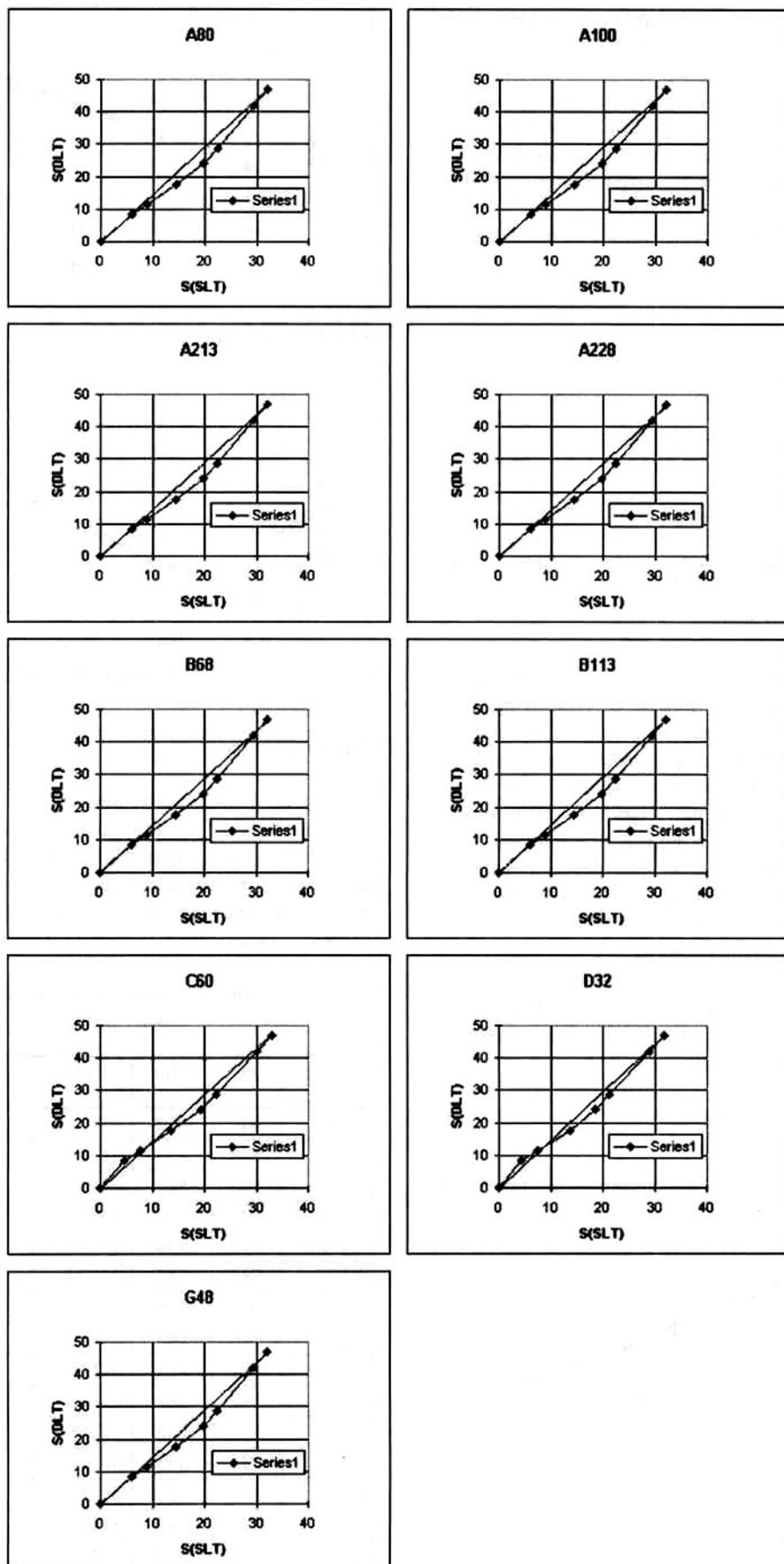


Fig. 2 - S_s (mm) vs S_d (mm).

C_1 = deformação temporária da cabeça da estaca, m (indicado nos quadros e figuras os valores usados)
 C_2 = deformação temporária da estaca, m
 C_3 = deformação temporária do solo, m
 n = coeficiente de restituição (usado 0.4)
 PH_u = capacidade de carga última da estaca, kN

É recomendado um factor de segurança entre 2 e 4.

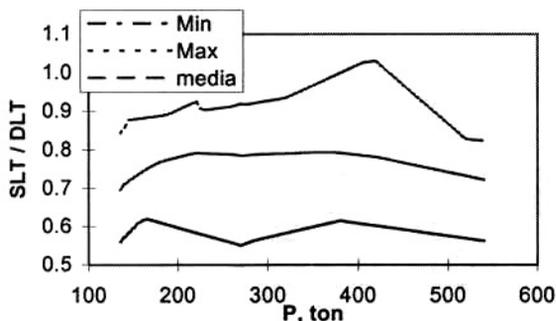


Fig. 3 - SLT/ DLT vs P

A fórmula de Hiley apresenta três parâmetros (C_1 , ef , n) não medidos durante os ensaios mas que são relativamente constantes para o mesmo equipamento usado. Esses parâmetros tem uma larga influência nos resultados. A variação de PH_u para a estaca A68 é mostrada na Figura 4 - PH_u vs C_1 , Figura 5 - PH_u vs ef e Figura 6 - PH_u vs n . A escolha criteriosa de cada uma destas constantes conduz a um valor de PH_u (C_1 , ef , n). Note-se que é possível obter o mesmo valor de PH_u com infinitos conjuntos destes três parâmetros.

É possível ajustar um dos parâmetros (C_1 , ef , n) para obter com as negas (SET) a mesma média de resistência que a obtida com DLT - SM. Ajustando C_1 (numa gama aceitável):

$$PH_u(C_1, ef, n) = Dtu \quad (4)$$

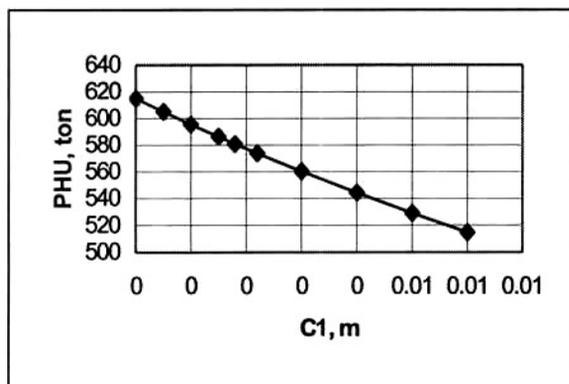


Fig. 4 - PH_u vs C_1 .

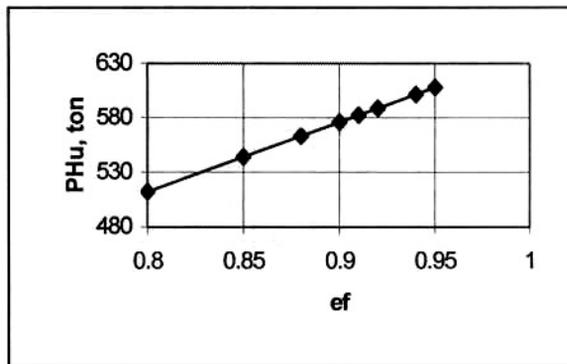


Fig. 5 - PH_u vs ef .

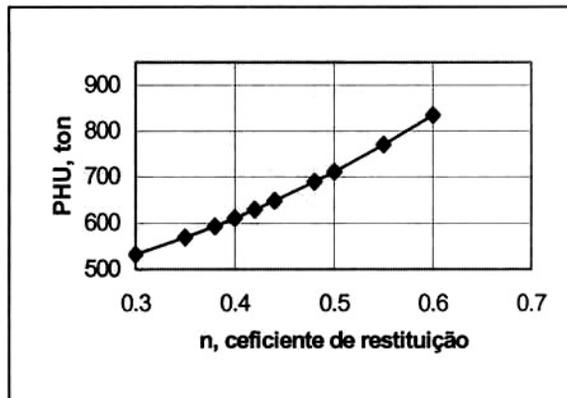


Fig. 6 - PH_u vs n .

3.2.2 - A comparação entre DT_u e PH_u está apresentada nos Quadros 6 e 7 e na Figura 7. Foram consideradas as cargas últimas (DT_u) obtida pelo DLT-SM e (PH_u) calculada pela fórmula de Hiley para as mesmas estacas (total de 32 estacas). Em ambos os casos não foi usado factor de segurança.

Quadro 6 - Comparação entre DT_u e PH_u
 $C_1 = 0,004683$

Estaca	DT_u	PH_u	Estaca	DT_u	PH_u
A68	569	534	D11	583	626
A80	588	565	D32	585	590
A100	585	511	D46	561	678
A118	595	546	D54	565	557
A128	595	558	D72	587	598
A163	585	581	D72A	564	824
A213	593	456	E111	571	522
A228	586	543	E120	561	579
B68	587	581	E220	580	545
B113	597	588	E238	580	506
B128	575	568	E248	567	756
C7	594	645	E266	580	579
C42	574	520	F194	563	562
C52	574	548	G11	565	587
C60	578	554	G48	569	537
C86	560	617	G76	572	528

Quadro 7 - Resumo da comparação entre DTu e PHu (kN)

(Foram usados diversos valores de C1)

C1 =	0,004683	0,002078	0,002	0	-0,00379	DTu
MIN	4561	4871	4881	5151	5753	5600
MAX	8241	9196	9229	10133	12447	5970
Média	5777,5	6250	6266	6688	7672	5777,5
Desvio Padrão	707	827	831	949	1266	113,56
Coef. Vari.	12,24	13,23	13,27	14,20	16,50	1,97
Probab. Min	4,3	4,8	4,8	5,3	6,5	5,9
Probab. Max	100	100	100	100	100	95,5
Valor 5%	4615	4890	4898	5126	5590	5590
Valor 95%	6940	7611	7633	8250	9755	5960
N	32	32	32	32	32	32

Pela Figura 7 verifica-se que não é possível estabelecer uma correlação fiável entre os valores individuais PHu e DTu. As duas populações têm respectivamente os coeficientes de variação de cerca de 13% e 2%. Considerando que a resistência das estacas observadas é igual ou inferior a 2% pode admitir-se que a diferença entre 13% e 2% corresponde a incerteza da fórmula de Hiley. E esta verificação mostra que a fórmula de Hiley é meramente indicativa para valores individuais.

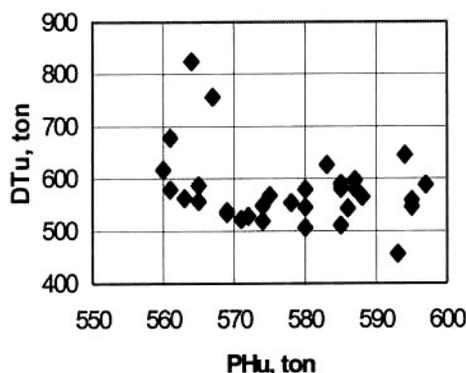


Fig. 7 - PHu vs DTu (C1 = 0,004683).

3.2.3 - É bem conhecido que a correlação entre valores individuais de duas séries de grandezas só tem significado quando a gama de variação dessas grandezas é de ordem superior ao erro de determinação. Assim não faz sentido neste caso correlacionar individualmente os resultados obtidos com as negas e a população dos resultados dos ensaios DLT-SM. No entanto os valores de ambas as populações são variáveis concomitantes dependentes da capacidade de carga das estacas.

A calibragem de PH pode ser efectuada procurando igualar (a) os valores últimos (PHu(C1) =

DTu), os valores característicos, ou seja os valores com 5% de frequência (PHk(C1) = Dtk), ou os valores de projecto (PHd(C1) = Dtd).

A igualdade PHu(C1) = DTu faz coincidir as médias e pode servir para comparação das populações dos resultados de DLT-SM e os obtidos com a nega.

As igualdades entre valores característicos (valores de 5% , PHk(C1) = Dtk) e entre valores de projecto (PHd(C1) = Dtd) são semelhantes desde que os factores parciais de segurança (γm) de DLT-SM e nega sejam iguais. Estas igualdades serão mais adequadas para confirmação da qualidade das estacas.

É importante verificar que a variação de qualquer dos parâmetros (C1, ef, n) faz variar o desvio padrão e o coeficiente de variação no sentido inverso ao da variação de PH.

3.2.4 - Outro método de ajustamento mais apropriado pode ser baseado num factor de segurança.

A capacidade admissível de uma estaca é:

DLT-SM	FSD = factor de segurança	DTa = DTu / FSD
Hiley	FSh = factor de segurança	PHa = PHu / FSh

A capacidade admissível deve ser a mesma.

$$DTa = PHa \tag{5}$$

$$PHu / FSh = DTu / FSD \tag{6}$$

$$FSh = FSD * (PHu / DTu) \tag{7}$$

Considerando os resultados obtidos (FSh / FSD = PHu / DTu), é possível apresentar os valores de FSh em função de FSD. Este método também influi no desvio padrão mas não influi no coeficiente de variação.

4 - CONCLUSÕES

Foi estudado um universo de 1310 estacas PHC 500*125, cravadas numa zona suposta geologicamente uniforme.

A comparação entre os diagramas de carga (assentamento vs força aplicada) de ensaios estáticos (SLT) e de ensaios dinâmicos (DST-SM) mostrou uma correspondência bastante boa. Os diagramas de descarga apresentaram grandes diferenças.

A aplicação da fórmula de Hiley conduziu a valores muito dispersos, aliás como é geralmente sabido. Pode contudo aceitar-se que os resultados constituem uma população estatisticamente normal.

É pouco significativa a comparação entre os resultados individuais da fórmula de Hiley e os

resultados equivalentes dos ensaios DLT-SM. É possível no entanto ajustar as duas populações (DLT-SM e Hiley) por forma a poder inferir, da comparação entre resultados simultâneos de um pequeno universo (31 no caso presente), um julgamento dos resultados obtidos para todas as estacas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ao Peng Kong & Leong Sai (1994) *Centro Cultural de Macau, Site Investigation*. LECM Report N°614, Nov, 30, Macau.
- ASTM D1143 (1987) *Method of testing piles under static axial compressive load*. American standards for testing Materials, USA, Volume 04.08.
- Bowles, J. E. (1988) *Foundation analysis and design*, McGraw-Hill, NY, USA, pp. 791-803.
- Chinese standard. (1999). *Pretensioned spun concrete piles*. GB13476. National Quality Technical Supervise Department, China.
- Japanese Standards Association (1995) *Pretensioned spun high strength concrete piles*. JIS A-5337-1995, Tóquio, Japão.
- LECM (1994) *Test results of Atterberg limits test, Particle size distribution, Water content, Specific gravity, Field vane test, Cone penetration test, Odometer consolidation test and Triaxial compression test*. LECM Bulletin N° 971, Dec, 21, Macau.
- Marques, F. M. S. F. (1988) *Contribuição para o conhecimento geológico do território de Macau*. Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências de Lisboa, Portugal.
- Novais-Ferreira, H. (2003) *Estimation of applied loads on a driven pile at different depths, Computational Methods in Engineering and Science*. 9th EPMESC Congress, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 481-486.
- Poulos, H.G.; Davis, E.H. (1980) *Pile foundation analysis and design*. Wiley, NY, USA, pp. 53-58.
- TNO – *Foundation Pile Diagnostic System, TNOWAVE, Dynamic Load Test Signal Matching, User's Guide, version 1.0* - TNO Institute for Building Materials and Structures, Delft, Netherlands.
- TNO (1989) *Foundation Pile Diagnostic System, TNOWAVE, User's Manual, version 2.1*. TNO Institute for Building Materials and Structures, Delft, Netherlands.
- Zhang, L., Chau, A. C. W. e Shek, M. P. (2003). *Bearing Capacity of Long Driven Piles using Dynamic Methods*. 12th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. World Scientific Publishing, Singapore, pp. 685-688.