

**CAPACIDADE DE SUPORTE DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS
MÉTODOS PENETROMÉTRICO E PRESSIOMÉTRICO**

JOSÉ VELOSO*

JÚLIO MAGRO*

SUMÁRIO

Apresentam-se os métodos penetrométrico e pressiométrico de cálculo da capacidade de suporte de fundações profundas isoladas sob cargas axiais, recomendados no Capítulo 11 dos Comentários ao D.T.U. 13.2 "Fondations Profondes". Eles consideram a perturbação do solo associada à tecnologia de execução e resultam de estudos correlativos com ensaios de carga instrumentados, efectuados por Bustamante e Gianeselli. Os Autores propõem correlações do S.P.T. com outros ensaios in situ e com as características de resistência ao corte, para várias categorias de solos, o que permite a sua utilização indirecta nas fórmulas estáticas.

1 - INTRODUÇÃO

As fórmulas estáticas de cálculo à rotura consideram que a carga limite de uma fundação profunda sob cargas axiais é a soma da carga limite de ponta e da carga limite de atrito lateral nas camadas resistentes, isto é, naquelas em que o deslocamento da fundação é superior ao do solo envolvente. Para se obter a carga nominal, divide-se a carga limite de ponta por 3 e a carga limite de atrito lateral por 2. Para as acções avaliadas segundo o Regulamento de Segurança e Acções (R.S.A.), divide-se a carga limite de ponta por 2 e a carga limite de atrito lateral por 1,33.

Estas fórmulas subentendem que as resistências de ponta e de atrito lateral se desenvolvem simultaneamente, qualquer que seja o assentamento da fundação, e ignoram as propriedades de deformação do solo. A partir de determinado assentamento há evidentemente interacção entre a mobilização do atrito lateral e da resistência de ponta, mas a primeira atinge o seu máximo para pequenos assentamentos.

A realização de elevado número de ensaios de carga bem instrumentados, com medição da resistência de ponta e do atrito lateral, forneceu os dados experimentais que permitiram a Bustamante e Gianeselli o reajustamento dos

* Eng^{os} Projectistas de Fundações - TEIXEIRA DUARTE, S.A.

métodos de previsão da capacidade de suporte de fundações profundas, baseados na utilização de ensaios penetrométricos e pressiométricos.

Os Autores propõem correlações do S.P.T. com outros ensaios in situ e com as características de resistência ao corte, para várias categorias de solo, a fim de permitir a sua utilização indirecta nas fórmulas estáticas.

Foram estabelecidas com base na experiência pessoal e na conciliação entre correlações de diversos autores, não se destinando todavia a substituir os ensaios de laboratório e muito menos os outros ensaios in situ, tão necessários a uma boa caracterização dos solos. Servem sim para estimativas preliminares da ordem de grandeza dos diversos parâmetros.

2 - MÉTODOS DE CÁLCULO

2.1 - Método Penetrométrico

A resistência de ponta das fundações profundas é calculada a partir da resistência de ponta do penetrómetro, pela expressão:

$$q_p = K_c \cdot q_{ca}$$

em que K_c é o factor de suporte penetrométrico cujos valores, estabelecidos a partir de ensaios de carga em verdadeira grandeza, são apresentados no Quadro I, para um encastramento superior ao crítico.

A resistência de ponta equivalente, q_{ca} , corresponde à média aritmética das resistências de ponta junto à base da fundação, depois de suprimidos os valores extremos.

O atrito lateral unitário da camada i é deduzido empiricamente da resistência de ponta medida nessa camada:

$$q_{si} = q_{ci} / \alpha_{ci}$$

Os valores de α_c que constam do Quadro II, assim como os valores máximos de q_s a considerar nos cálculos, constituem valores médios deduzidos de ensaios de carga. O quadro distingue ainda três categorias de tecnologia de execução das fundações (ver anexo).

QUADRO I
VALORES DO FACTOR DE SUPORTE PENETROMÉTRICO Kc
(Segundo Bustamante e Gianeselli)

NATUREZA DO SOLO	qc (10 ⁵ Pa)	VALORES DE Kc	
		GRUPO I	GRUPO II
Lodos e argilas moles	< 10	0,40	0,50
Argilas de consistência média	10 a 50	0,35	0,45
Argilas e siltes duros a rijos	> 50	0,45	0,55
Areias e siltes soltos	≤ 50	0,40	0,50
Areias e seixos medianamente compactos	50 a 120	0,40	0,50
Areias e seixos compactos a muito compactos	> 120	0,30	0,40

2.2 - Método Pressiométrico

Do ensaio com pressiómetro de Ménard deduzem-se os seguintes parâmetros:

- pl - pressão limite
- E_M - módulo pressiométrico

A resistência de ponta das fundações calcula-se por meio de uma fórmula semi-empírica ligando directamente a pressão limite equivalente, ple, à pressão de rotura sob a ponta, qp:

$$q_p - q_0 = K (p_{le} - p_0)$$

QUADRO II
MÉTODO PENOMÉTRICO
VALORES DOS COEFICIENTES α_c PARA CÁLCULO DO ATRITO LIMITE
(Segundo Bustamante e Gianseselli)

NATUREZA DO SOLO	qc (10 ⁵ Pa)	COEFICIENTES α_c						VALORES MÁXIMOS DE qs (10 ⁵ Pa)					
		IA	IB	IIA	IIIB	IA	IB	IIA	IIIB	IIIA	IIIB	IIIA	IIIB
LIDOS E ARGILAS MOLES	<10	30	30	30	30	0.15	0.15	0.15	0.15	0.35	0.15	0.35	0.15
ARGILAS DE CONSISTÊNCIA MÉDIA	10 a 50	40	80	40	80	0.35	0.35	0.35	0.35	0.8	0.35	0.8	0.35
ARGILAS E SILTES DUROS A RIJOS	>50	60	120	60	120	0.35	0.35	0.35	0.35	0.8	0.35	0.8	0.35
AREIAS E SILTES SOLTOS	≤50	60	150	60	120	0.35	0.35	0.35	0.35	0.8	0.35	0.8	0.35
AREIAS E SILTES MEDIANAMENTE COMPACTOS	50 a 120	100	200	100	200	0.8	0.35	0.8	0.8	1.2	0.8	1.2	0.8
AREIAS E SILTES COMPACTOS A MUITO COMPACTOS	>120	150	300	150	200	1.2	0.8	1.2	1.2	1.5	1.2	1.5	1.2

em que q_0 e p_0 são as pressões verticais e horizontais totais das terras ao nível considerado, podendo em geral ser desprezadas.

O factor K, chamado factor de suporte pressiométrico, depende da natureza e compacidade do terreno, do tipo de fundação e da sua tecnologia de execução, bem como do seu encastramento. É um coeficiente empírico para o qual os valores propostos na Fig. 1 tiveram em conta os resultados experimentais de carregamento de fundações profundas.

Os solos foram classificados em três categorias, definidas no Quadro III. Para solos de características intermédias recomenda-se a interpolação.

Determinada a categoria do solo e tipo de fundação (ver anexos), retira-se o valor de K (Fig.1) em função de H_e/R , onde H_e representa a profundidade de encastramento equivalente, dado pelas expressões:

$$H_e = \frac{1}{p_{le}} \int_0^h p_l(z) dz \quad \text{ou} \quad H_e = \sum h_i \left(\frac{p_{li}}{p_{le}} \right)$$

sendo h_i e p_{li} a altura e pressão limite relativas à camada i .

A pressão limite equivalente, p_{le} , é uma pressão limite ponderada que tem em conta a distribuição das pressões limites acima e abaixo da base da fundação. As pressões limites consideradas não devem variar entre si mais de 50%. Assim, devem desprezar-se as pressões limites mais baixas de uma camada compressível sobrejacente à camada de suporte.

QUADRO III

CATEGORIAS DOS SOLOS EM FUNÇÃO DA SUA NATUREZA E COMPACIDADE (Segundo Bustamante e Gianceselli)

$p_l (10^5 \text{ Pa})$	NATUREZA DOS SOLOS	CATEGORIA
< 7	Argila mole	1
< 8	Silte mole	
< 7	Areia argilosa a siltosa ou lodosa, solta	
10 a 20	Areia e seixo median. compactos	2
12 a 30	Argila e silte duros a rijos	
15 a 40	Marga e marga calcária	
25 a 40	Rocha alterada	
> 45	Marga muito rija	
> 25	Areia e seixo comp. a muito compactos	3
> 45	Rocha fragmentada	

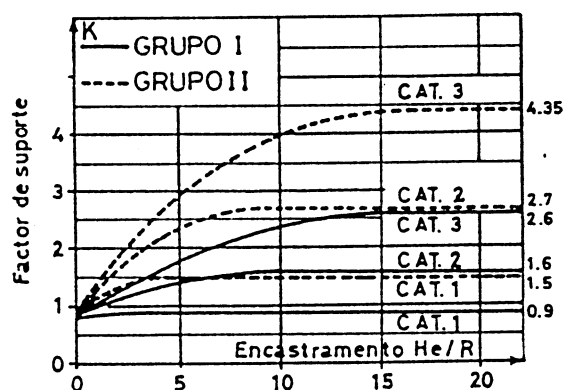


Fig. 1 - Valores do factor de suporte K
(segundo Bustamante e Gianceselli)

O atrito lateral unitário q_{sl} é obtido directamente a partir da pressão limite p_{li} , utilizando o Quadro IV e as Fig. 2 e 3.

QUADRO IV
MÉTODO PRESSIOMÉTRICO
IDENTIFICAÇÃO DOS ABACOS PARA DETERMINAÇÃO DO ATRITO LIMITE
(Segundo Bustamante e Gianeselli)

NATUREZA DO SOLO	PRESSÃO Limite p _l (10 ⁵ PA)	MODO DE EXECUÇÃO E NATUREZA DO FUSTE					
		Furado	Furado entubado	Cravado	Injectado		
AREIA ARGILOSA A SILTOSA OU LODOSA	< 7	A bis	A bis	A bis	A bis	A	---
ARGILA MOLE A RIJA	≤ 30	A bis (A)	A bis (A)	A bis (A)	A bis	A	D*
SILTE A SILTE RIJO	≤ 30	A bis (A)	A bis (A)	A bis (A)	A bis	A	D*
AREIA E SEIXO MEDIANAMENTE COMPACTOS	10 a 20	A (B)	A bis (A)	A (B)	A	B	≥ D
AREIA E SEIXO COMPACTOS A MUITO COMPACTOS	> 25	B (C)	A (B)	B (C)	B	C	≥ D
MARGA E MARGA CÁLCARIA	15 a 40	C (E)	B (C)	B (C)	E**	E	F
MARGA MUITO RIJA	> 45	E	---	---	---	F	> F
ROCHA ALTERADA	25 a 40	F	F	F**	F**	≥ F	> F
ROCHA FRAGMENTADA	> 45	F	---	---	---	≥ F	> F

* Para p_l > 15x10⁵ Pa

** Onde a cravação for possível

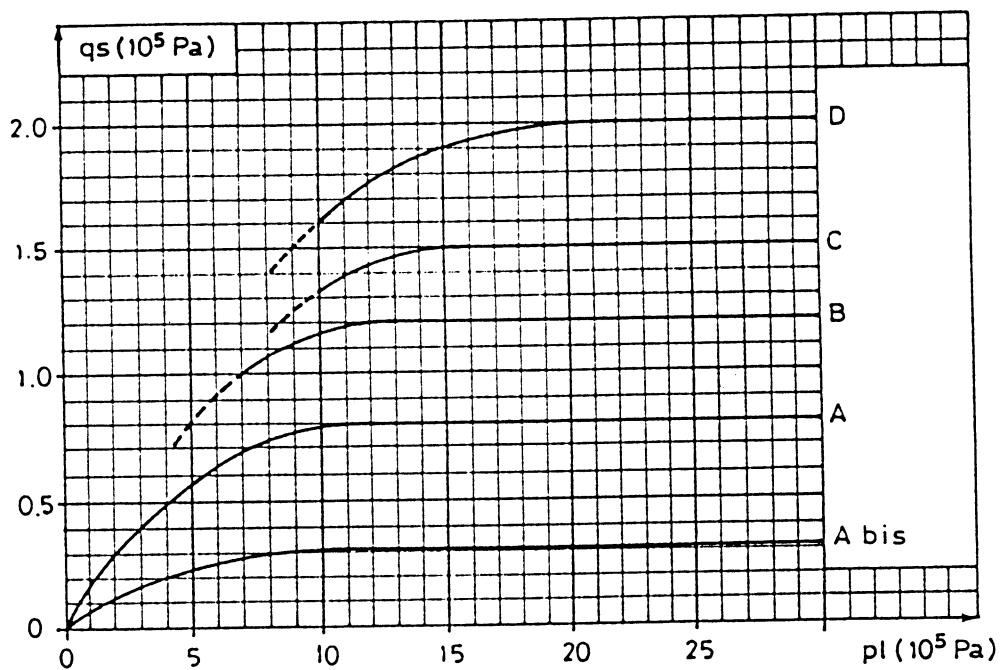


Fig. 2

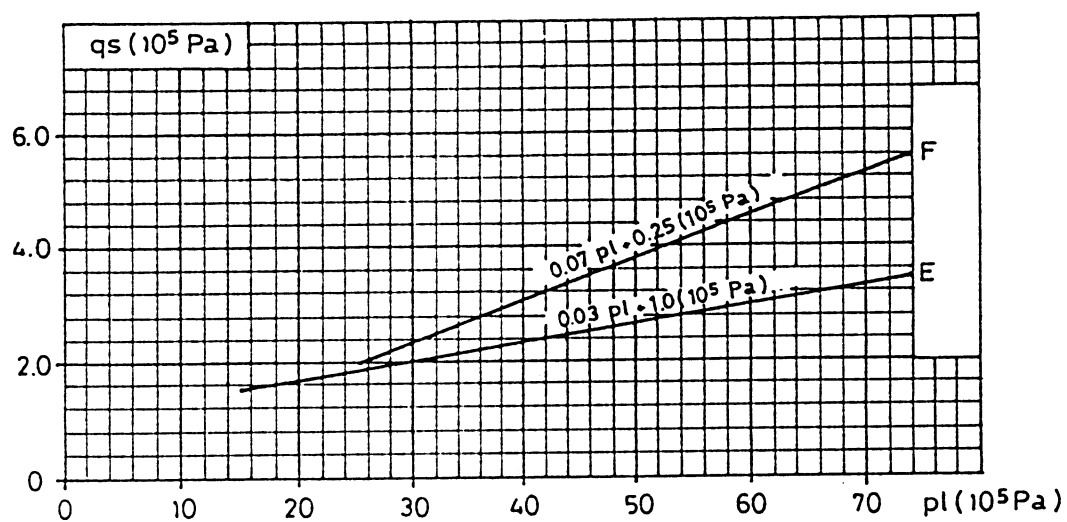


Fig. 3

Fig. 2 e 3 - Ábacos para avaliação do atrito lateral unitário q_s (segundo Bustamante e GIANESELLI)

3 - CORRELAÇÕES

Apesar das críticas e dúvidas de certos autores, o S.P.T. (Standard Penetration Test) continua a ser o ensaio in situ mais usual em reconhecimentos geotécnicos e muitas vezes o único elemento disponível para o estudo de fundações.

Embora mais adaptado a solos arenosos (as correlações para as argilas não passam de aproximações grosseiras), o S.P.T. fornece indicações muito úteis sobre a compacidade ou consistência dos solos e as informações obtidas são por vezes suficientes para o projecto final.

Dado o seu carácter empírico, recomenda-se a sua utilização indirecta através de correlações com outros ensaios in situ e com as características de resistência ao corte.

No Quadro V apresentam-se essas correlações para 5 categorias de solo, a que correspondem as seguintes descrições:

- Lodos e argilas moles ($N < 8$), quase sempre submersos
- Argilas siltosas ou arenosas ($N > 8$), com fracção argilosa superior a 25%
- Areias argilosas, com fracção argilosa compreendida entre 10 e 25%
- Areias finas a médias, siltosas ou lodosas
- Areias médias a grosseiras com seixos

Breves definições e relações utilizadas:

a) N , número de pancadas por 30 cm de penetração do amostrador normalizado de TERZAGHI (Standard Penetration Test - S.P.T.).

b) q_c , resistência de ponta do penetrómetro estático (Cone Penetration Test - C.P.T.). Adoptaram-se as seguintes relações:

- | | |
|---|--------------------------|
| - Lodos e argilas moles | $q_c/N = 1 \text{ a } 2$ |
| - Argilas siltosas ou arenosas | $q_c/N = 3$ |
| - Areias argilosas | $q_c/N = 4$ |
| - Areias finas a médias siltosas ou lodosas | $q_c/N = 5$ |
| - Areias médias a grosseiras com seixos | $q_c/N = 6$ |

QUADRO V
CORRELAÇÕES

NATUREZA DO SOLO	N	qc (10 ⁵ Pa)	pl (10 ⁵ Pa)	cu (10 ⁵ Pa)	c' (10 ⁵ Pa)	φ' (°)
LODOS E ARGILAS MOLES	1	1-2	0,67	0,1		14,7
	2	2-4	1,33	0,2		18,7
	2	2-4	1,33	0,2		18,7
	4	4-8	2,67	0,4		22,7
	4	8	2,67	0,4		22,7
	8	16	5,33	0,8	0,08	26,7
ARGILAS SILTOSAS OU ARENOSAS	8	24	5,33	0,53	0,08	26,7
	15	45	10	1,0	0,22	30,3
	15	45	10	1,0	0,22	30,3
	30	90	20	2,0	0,52	34,3
	30	90	20	2,0	0,52	34,3
	60	180	40	4,0	1,12	38,3
AREIAS ARGILOSAS	4	16	2			32,0
	4	16	2			32,0
	10	40	5		0,04	37,3
	10	40	5		0,04	37,3
	30	120	15		0,17	43,6
	30	120	15		0,17	43,6
AREIAS FINAS A MÉDIAS, SILTOSAS OU LODOSAS	50	200	25		0,31	46,6
	60	240	30		0,37	47,6
	4	20	2			26,7
	4	20	2			26,7
	10	50	5			32,0
	10	50	5			32,0
AREIAS MÉDIAS A GROSSEIRAS, COM SEIXOS	30	150	15			38,3
	30	150	15			38,3
	50	250	25			41,3
	50	250	25			41,3
	60	300	30			42,3
	60	300	30			42,3
AREIAS MÉDIAS A GROSSEIRAS, COM SEIXOS	4	24	2			32,0
	4	24	2			32,0
	10	60	5			37,3
	10	60	5			37,3
	30	180	15			43,6
	30	180	15			43,6
AREIAS MÉDIAS A GROSSEIRAS, COM SEIXOS	50	300	25			46,6
	50	300	25			46,6
	60	360	30			47,6
	60	360	30			47,6

c) p_l , pressão limite no ensaio com o pressiómetro de MÉNARD. Relações utilizadas:

- Argilas $N/p_l = 1,5$
- Areias $N/p_l = 2$

d) c_u , coesão não consolidada, não drenada, determinada em ensaios de laboratório ou em ensaios in situ (Vane Test). Relações:

- Lodos e argilas moles $N/c_u = 10$
- Argilas siltosas ou arenosas $N/c_u = 15$

e) c' , coesão drenada. Relações:

- Argilas $c' = (N-4)/50$
- Argilas arenosas $c' = (N-4)/150$

f) ϕ' , ângulo de atrito interno drenado. Adoptou-se:

$$\phi' = 24^\circ + 4 (\log N - \log K) / \log 2, \text{ com}$$

- $K = 5$ - Argilas
- $K = 2,5$ - Areias finas a médias, siltosas ou lodosas
- $K = 1$ - Areias argilosas ou areias médias a grosseiras.

4 - NOTAS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A resistência de ponta das fundações furadas pode ser seriamente afectada quando:

- Furação efectuada através de um aquífero artesiano, com subidas importantes de materiais, nomeadamente arenosos.
- Limpeza deficiente do fundo do furo.
- Não ter sido realizada a betonagem imediatamente após a conclusão do furo, o que provoca muitas vezes fenómenos irreversíveis de descompressão do fundo, não compensados pela colocação do betão.

O atrito lateral depende muito do remeximento do solo em torno do fuste, provocado por algumas ferramentas e técnicas de execução das fundações. Para a sua quantificação, os quadros apresentados indicam por vezes dois valores

máximos:

- O primeiro corresponde a uma execução menos cuidada.
- O segundo (entre parêntesis) corresponde a uma execução cuidadosa e à escolha da tecnologia mais adequada para garantir a mínima perturbação do solo em contacto com o fuste. Assim, em obras importantes e onde se preveja um grande número de fundações profundas, interessa verificar experimentalmente, por um ou mais ensaios prévios de carregamento, se é possível ou não adoptar esses valores.

Nas estacas mistas, isto é, entubadas na parte superior e depois furadas simples ou com lamelas, aplicar-se-á a cada uma das partes do fuste o atrito unitário correspondente à técnica de furação utilizada.

É bem evidente que as regras penetrométricas e pressiométricas, apesar de calibradas por ensaios de carga, não são suficientes para garantir em todos os casos que a capacidade de suporte real é da mesma ordem de grandeza da estimada pelo cálculo. Fica-se à mercê de um remeximento do solo junto às paredes do furo e, no caso de fundações furadas, de um mau contacto da ponta. Daí a importância de confiar os trabalhos de fundações profundas a empresas especializadas e idóneas, de quem se espera uma execução cuidadosa e a aplicação da tecnologia mais adequada à natureza do solo, de modo a minimizar a sua perturbação.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - VELOSO, J., MAGRO, J., "Capacidade de suporte de fundações profundas, fórmulas estáticas", a publicar e que serviu de base a esta comunicação.
- 2 - BUSTAMANTE, M., GIANESELLI, L., "Prevision de la capacité portante des pieux isolés sous charge vertical, règles pressiométriques et pénétrométriques", "Bull. liaison Labo. P. et Ch.", 113, Mai - Juin 1981.
- 3 - BUSTAMANTE, M., GIANESELLI, L., "Calcul de la capacité portante des pieux à partir des essais au pénétromètre statique", "Bull. liaison Labo. P. et Ch.", 127, Septembre - Octobre 1983.

ANEXOS

1 - CLASSIFICAÇÃO DAS FUNDAÇÕES PROFUNDAS CONSOANTE A TECNOLOGIA DE EXECUÇÃO (D.T.U. 13.2 - FONDATIONS PROFONDES)

GRUPO I

- Estaca furada simples e barreta (Foré Simple et Barrette)
- Estaca furada com lamias e barreta (Foré Boue et Barrette)
- Estaca furada entubada (Foré Tubé)
- Estaca furada com trado vazado (Tarière Creuse)
- Poços (Puits)
- Microestaca tipo I (Micropieu Type I)

GRUPO II

- Estaca aparafusada moldada (Vissé Moulé)
- Estaca cravada revestida (Battu Enrobé)
- Estaca cravada pré-fabricada (Battu Préfabriqué)
- Estaca metálica cravada (Métal Battu)
- Estaca tubular pré-esforçada (Tubulaire Précontraint)
- Estaca cravada apiloada (Battu Pilonné)
- Estaca cravada moldada (Battu Moulé)
- Estaca de betão cravada por reacção (Béton Foncé)
- Estaca metálica cravada por reacção (Métal Foncé)
- Microestaca tipo II (Micropieu Type II)
- Estaca injectada a alta pressão (Pieu Injecté sous Haute Pression)

2 - CATEGORIAS DAS FUNDAÇÕES PROFUNDAS DE ACORDO COM A TECNOLOGIA DE EXECUÇÃO (Segundo Bustamante e Gianceselli)

CATEGORIA IA:

- Estacas furadas simples
- Estacas furadas com lamias
- Estacas furadas com trado vazado
- Estacas aparafusadas moldadas
- Microestacas Tipo I
- Poços
- Barretas.

CATEGORIAS IB:

- Estacas furadas entubadas (fuste em betão ou metálico)
- Estacas cravadas moldadas.

CATEGORIAS IIA:

- Estacas cravadas pré-fabricadas
- Estacas tubulares pré-esforçadas
- Estacas de betão cravadas por reacção.

CATEGORIA IIB:

- Estacas metálicas cravadas
- Estacas metálicas cravadas por reacção.

CATEGORIA IIIA:

- Estacas cravadas revestidas
- Estacas cravadas apiloadas.

CATEGORIA IIIB:

- Estacas injectadas a alta pressão ($p_i > p_l$) de diâmetro superior a 250 mm
- Microestacas Tipo II.