

ASSENTAMENTOS DE EDIFÍCIOS SOBRE SOLO ELÁSTICO E HOMOGÉNEO

SETTLEMENT OF BUILDINGS ON ELASTIC AND HOMOGENEOUS GROUND

Isabel Alvim Teles (*)

Manuel de Matos Fernandes (**)

RESUMO

É forma corrente de dimensionar as fundações de edifícios adoptar para todas as sapatas um determinado valor da tensão a ser por estas transmitida ao terreno. Tal forma de proceder induz assentamentos diferenciais entre sapatas vizinhas logo que a sua forma e (ou) a carga dos respectivos pilares não sejam coincidentes. Por meio da análise dos projectos de 10 edifícios com estrutura de betão armado avaliam-se os assentamentos diferenciais e as distorções angulares associadas àquela forma de proceder, identificando-se as situações onde as grandezas nomeadas atingem valores mais elevados.

ABSTRACT

In building foundation design it is common practice to adopt a given value for the stress applied to the ground. Such a method induces differential settlements between adjacent footings if they differ in shape or applied load. Based on the analysis of the structural design of 10 reinforced concrete buildings, the paper studies the differential settlements and the angular distortions caused by the aforementioned procedure, identifying the situations that produce maximum values.

(*) Engenheira Civil. Bolseira da JNICT

(**) Doutor em Engenharia Civil. Professor Associado da FEUP

1. INTRODUÇÃO

Ao dimensionar uma fundação superficial há que garantir: i) uma certa margem de segurança em relação ao colapso do maciço de fundação, isto é, que a tensão transmitida pela sapata não ultrapasse uma certa fracção da capacidade de carga; ii) um assentamento compatível com a segurança e a funcionalidade estruturais.

Nas estruturas correntes de betão armado a segunda questão é em regra condicionante. Por outras palavras, as dimensões em planta e a cota da base da sapata são estabelecidas de modo a que a tensão transmitida ao maciço induza neste deformações verticais cujo integral, o assentamento, seja considerado "admissível", e aquela tensão é em geral muito inferior à que acarretaria a rotura por corte do solo subjacente à sapata.

O que acaba de ser referido torna razoável que a estimativa dos assentamentos, quando não estão englobados no maciço estratos argilosos que vão experimentar consolidação, se faça frequentemente com recurso a soluções derivadas da Teoria da Elasticidade. Como é sabido (Perloff, 1975), o assentamento, s , de uma sapata de largura B que transmite a um maciço elástico, homogéneo e isotrópico, de coeficiente de Poisson ν e módulo de elasticidade E , uma tensão uniforme q vale:

$$s = q B \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) I_p \quad (1)$$

em que I_p é um parâmetro adimensional dependente da rigidez e da forma (em planta) da fundação.

Ao discutir se a grandeza do assentamento de uma dada fundação é ou não admissível há que distinguir essencialmente a parcela desse assentamento que vai ser comum aos outros pontos de apoio da estrutura da parcela restante, que vai pois conduzir a assentamentos diferenciais (Burland e Wroth, 1974; Novais Ferreira, 1977).

Uma análise da equação (1) mostra que os assentamentos diferenciais podem resultar de uma ou mais das seguintes hipóteses:

- i) sapatas de iguais geometria e dimensões transmitindo ao maciço diferentes tensões;
- ii) sapatas de diferentes dimensões e (ou) geometria transmitindo ao maciço tensões de igual valor;
- iii) heterogeneidades do maciço, em especial do módulo de deformabilidade do solo subjacente às diferentes sapatas.

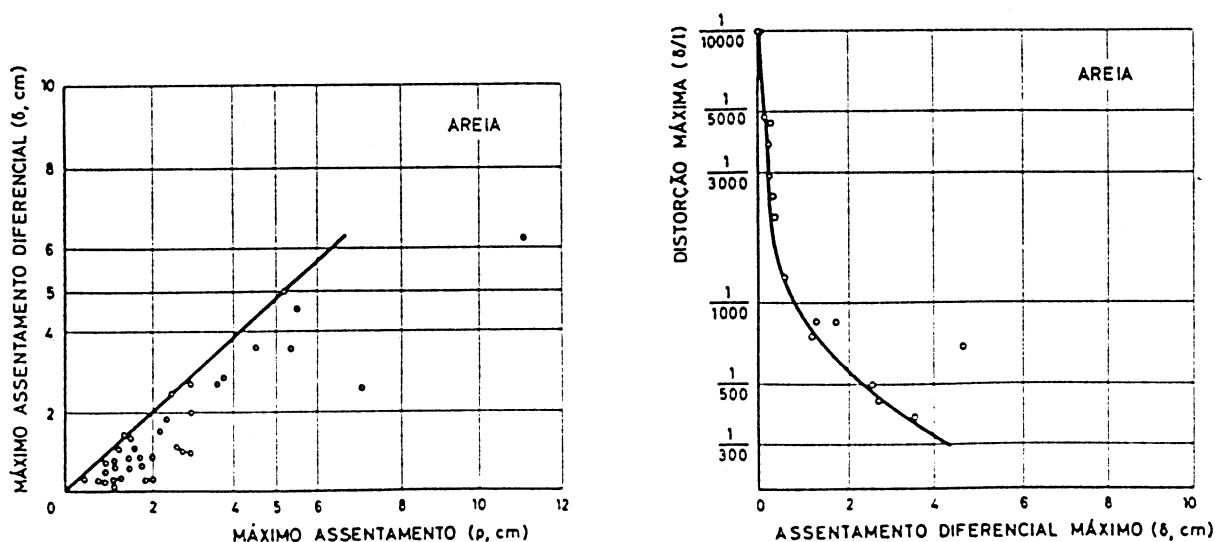


Fig.1- Assentamentos de estruturas sobre maciços arenosos (Bjerrum, 1963)

Quando se permitem assentamentos totais elevados torna-se muito difícil limitar os assentamentos diferenciais dentro de valores reduzidos. Assim, na prática, a limitação dos assentamentos totais de uma dada fundação a um dado valor relativamente pequeno, visa essencialmente controlar os assentamentos diferenciais, que então serão, naturalmente, inferiores àquele valor, como ilustra, por exemplo, a Figura 1a, referente a resultados coligidos por Bjerrum (1963) de observações de obras reais. A Figura 1b, por sua vez, relaciona para as mesmas obras os assentamentos diferenciais máximos com a respectiva distorção angular. Recorde-se que esta é definida como a razão do assentamento diferencial pela distância dos pontos de apoio da estrutura com base em cujos assentamentos totais aquele foi calculado.

A razão do assentamento diferencial máximo pelo assentamento máximo em cada caso depende naturalmente dos factores intervenientes na equação (1). Dentre estes, alguns são de difícil ou mesmo impossível controle pelo projectista, em particular as variações no plano horizontal das características "elásticas" do maciço. Aquelas variações são, em geral, bastante suaves nos maciços de origem sedimentar, enquanto que podem ser muito bruscas e pronunciadas nos maciços residuais como os graníticos da Região Norte. Já os factores referentes à geometria, dimensões e tensão transmitida pela sapata, podem, pelo menos parcialmente, ser controlados pelo projectista de modo a atenuarem tanto quanto possível a razão entre as grandezas dos assentamentos máximos diferencial e total.

É, todavia, prática muito divulgada proceder ao dimensionamento de fundações adoptando para todas as sapatas de uma dada estrutura uma determinada "tensão de segurança" ou "tensão admissível", seja ela sugerida em relatórios referentes à prospecção geotécnica do local da obra, seja retirada de correlações empíricas com resultados de ensaios "in situ", seja simplesmente por "tradição regional".

Sem pretender discutir a adequação dos métodos por meio dos quais aquela tensão admissível é adoptada, o presente trabalho visa fornecer uma avaliação de quanto o procedimento citado poderá contribuir para o crescimento dos assentamentos diferenciais ou da razão destes pelos assentamentos totais.

2. METODOLOGIA ADOPTADA

A metodologia seguida no estudo descreve-se seguidamente.

QUADRO I

CASO	N. Pilares	N. Ligações	N. Andares	Destino	Dim. em planta (m ²)	Tipo
1	33	38	6	Habituação	33x16	
2	43	53	7	Habituação	40x13	
3	58	102	4	Escritórios e Indústria	1578	
4	66	75	6	Habituação	70x10	
5	80	86	3	Escola	1124	
6	111	134	8	Habituação	1600	
7	31	33	10	Habituação	21,5x19	
8	42	53	4	Habituação	25,5x33	
9	98	118	16,14,6	Habituação	50x30	
10	246	410	63,21	Hospital	9438	

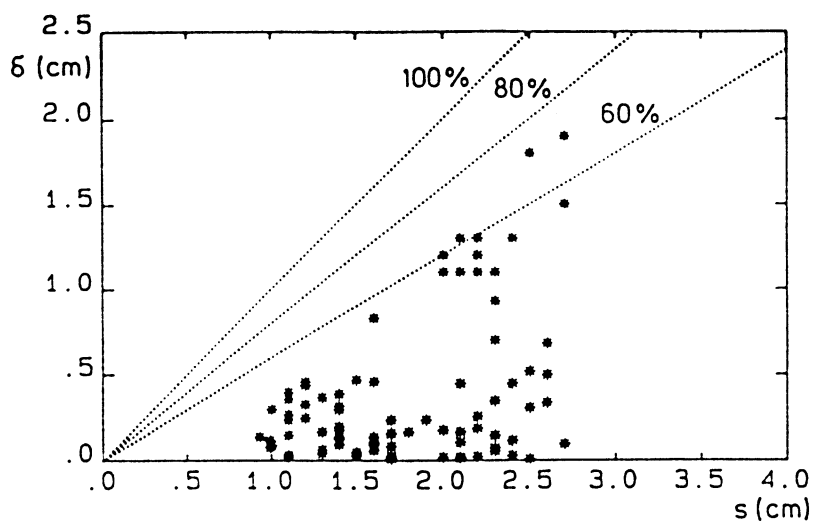


Fig. 2- Relação entre os assentamentos totais e diferenciais (caso 5)

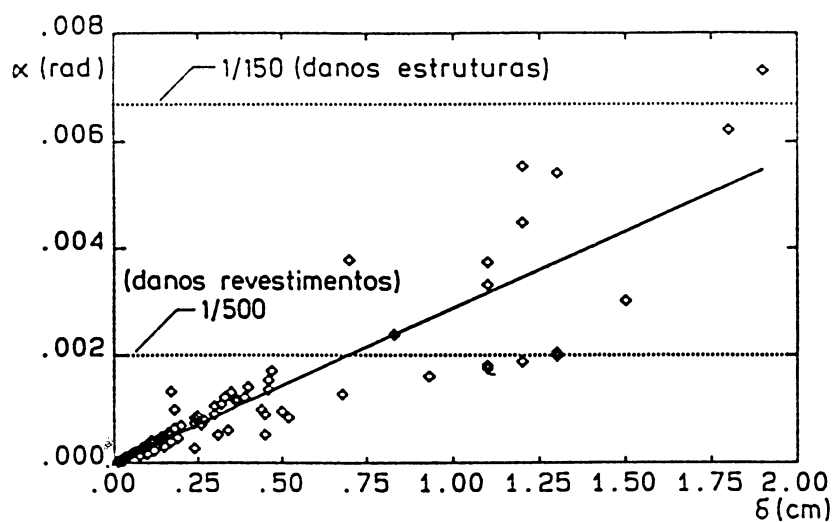


Fig. 3- Relação entre os assentamentos diferenciais e as distorções (caso 5)

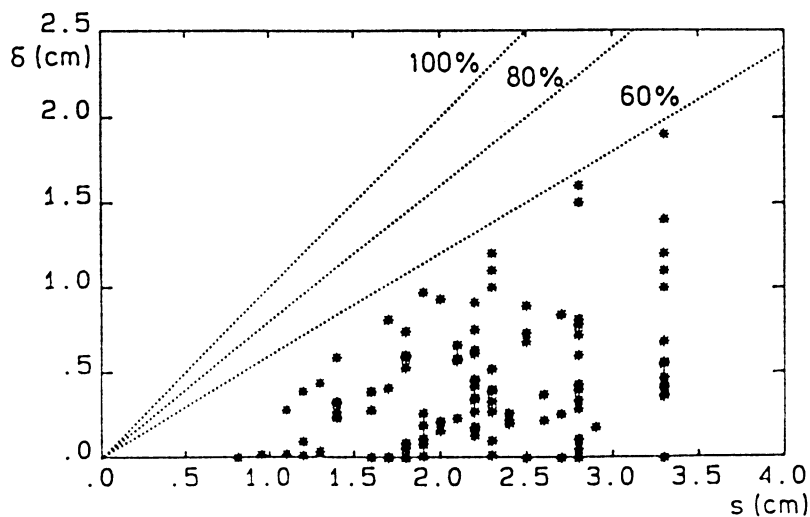


Fig. 4- Relação entre os assentamentos totais e diferenciais (caso 6)

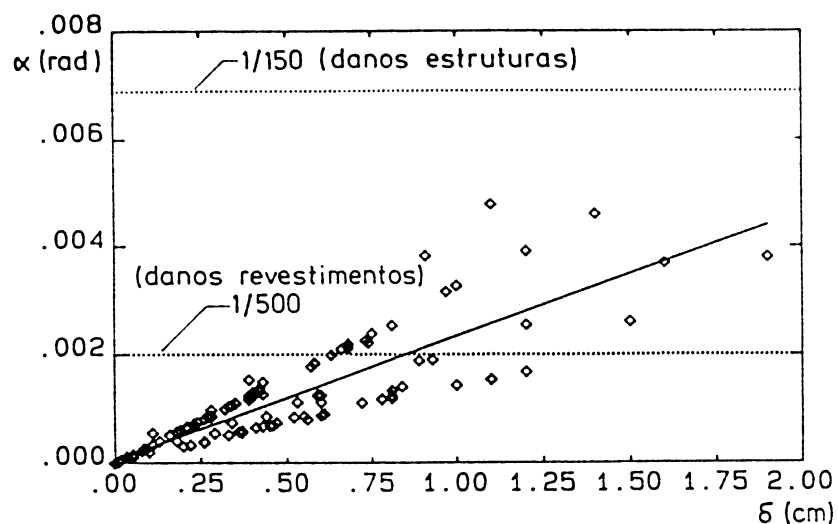


Fig. 5- Relação entre os assentamentos diferenciais e as distorções (caso 6)

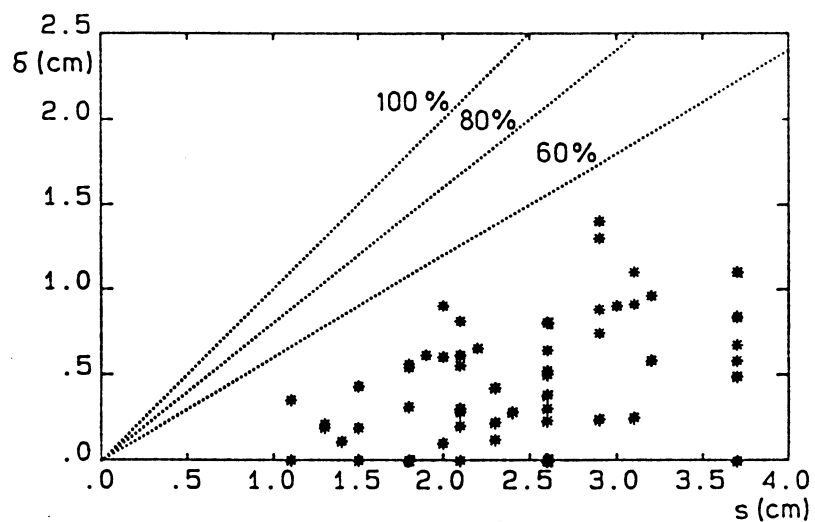


Fig. 6- Relação entre os assentamentos totais e diferenciais (caso 10)

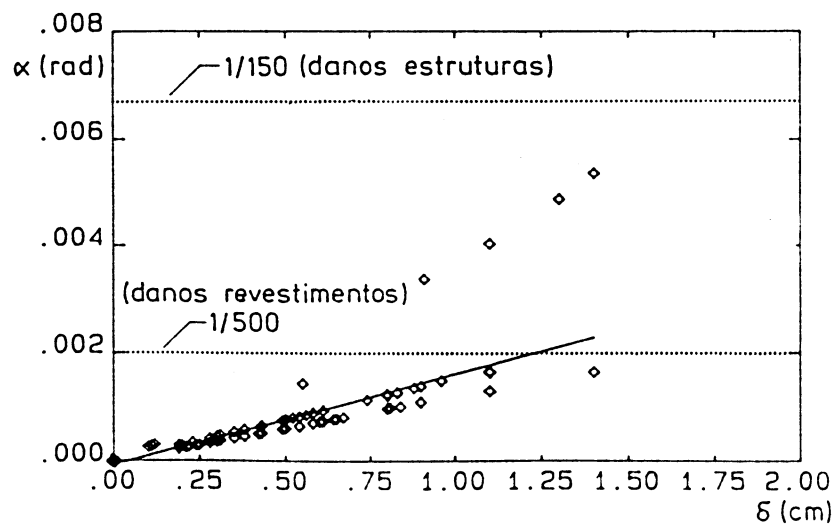


Fig. 7- Relação entre os assentamentos diferenciais e as distorções (caso 10)

QUADRO II

CASO	s max. (cm)	δ max. (cm)	α max. (rad)	(δ/s) med	(δ/α) med (m)
1	3,0	1,8	1/71	0,35	2,5
2	3,2	1,0	1/500	0,17	5,0
3	2,5	1,5	1/286	0,12	5,4
4	2,4	1,2	1/167	0,21	3,3
5	2,7	1,9	1/137	0,21	3,4
6	3,3	1,9	1/208	0,21	4,2
7	7,5	4,3	1/108	0,21	5,1
8	2,3	1,0	1/385	0,15	5,9
9	3,7	1,1	1/233	0,17	3,7
10	3,7	1,4	1/185	0,26	6,3

Analisaram-se os projectos de dez edifícios de estrutura convencional de betão armado cujas características essenciais se apresentam no Quadro I. A escolha dos projectos não obedeceu a nenhum critério em particular, tendo-se procurado, contudo, analisar edifícios relativamente correntes ainda que de dimensões e tipologia variada.

Independentemente do respectivo local de implantação, admitiu-se que seriam dotados de fundações superficiais dimensionadas para transmitir ao terreno, suposto homogéneo e elástico, com um módulo de elasticidade de 20 MPa e um coeficiente de Poisson de 0,3, uma tensão uniforme de 250 kPa. Estes valores foram considerados representativos dos solos graníticos residuais da Região Norte e da prática corrente em termos de fundações sobre eles construídas.

Com base no quadro de cargas (não majoradas) nos pilares, correspondentes à combinação de acções permanentes e quase permanentes, e no valor da tensão a transmitir ao maciço, determinaram-se as dimensões em planta de cada sapata, respeitando-se a relação B/L do próprio projecto entre a largura e o respectivo desenvolvimento. Para certos casos, de que são exemplo as sapatas das caixas de escadas, os condicionalismos geométricos implicaram a adopção de dimensões mais elevadas do que as correspondentes à limitação da tensão transmitida a 250 kPa.

Aplicando a equação (1) calcularam-se os assentamentos admitindo para a determinação de I_0 as fundações como rígidas. Para as sapatas correspondentes a pilares ligados entre si por elementos estruturais determinaram-se ainda os assentamentos diferenciais e as respectivas distorções angulares.

As Figuras 2 a 7 apresentam os resultados da análise efectuada para três dos edifícios, relacionando-se para cada par de sapatas vizinhas ligadas por elementos estruturais o maior dos assentamentos, s, o assentamento diferencial, δ , e a correspondente distorção, α . Nas figuras onde esta é representada indicam-se os limites prováveis sugeridos por Bjerrum (1963) para os danos nos revestimentos e nos elementos estruturais.

O Quadro II indica, por sua vez, para cada caso analisado, o valor máximo das três grandezas acima citadas (s, δ e α) e os valores médios das razões δ/s e δ/α . Repare-se que esta última não é mais do que o valor médio dos vãos da estrutura em cada caso.

As Figuras 8 e 9 relacionam para os dez casos analisados os valores máximos das grandezas que têm vindo a ser referidas.

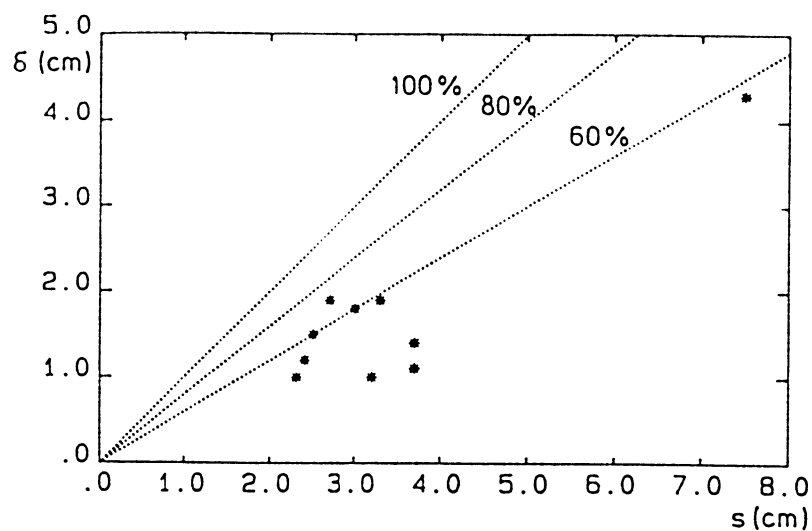


Fig. 8- Relação entre os valores máximos dos assentamentos totais e diferenciais

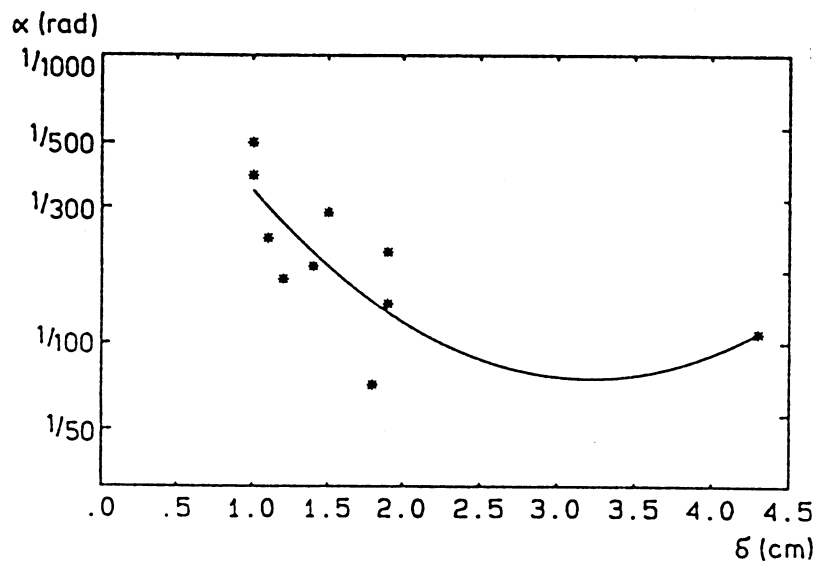


Fig. 9- Relação entre os valores máximos dos assentamentos diferenciais e das distorções angulares

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Antes de mais, interessa discutir em que medida os resultados incluídos nas figuras e quadro anteriores dependem dos parâmetros de partida e da metodologia seguida.

As grandezas dos assentamentos totais, dos assentamentos diferenciais e das distorções angulares dependem directamente do par de valores tomado para o módulo de deformabilidade do maciço e para a tensão a este transmitida. Desta forma, para edifícios com determinada combinação do número de andares e da dimensão média dos vãos, as cargas descarregadas pelos pilares conduzem a elevados assentamentos totais, como no caso 7 em que o valor máximo destes atinge 7,5 cm, valor em geral considerado excessivo. Isso significa que o solo adoptado seria, em princípio, menos adequado para fundar a estrutura em causa, pelo que o caso citado não será mais considerado nos comentários subsequentes. Já nos casos restantes, os assentamentos máximos atingem valores em geral tidos por razoáveis, pelo que se poderá aceitar que aqueles, no seu conjunto, constituem um domínio representativo, ou pelo menos plausível, para análise da questão em apreço.

Já os valores obtidos para a razão entre os assentamentos diferenciais e os assentamentos totais são independentes do par de parâmetros referido (E , q). Com efeito, como em Anexo se demonstra, para sapatas de igual forma em planta (que não dimensões), aquela razão depende apenas das cargas aplicadas a cada uma das fundações; para sapatas de diferentes formas, a razão em causa passa a depender também da geometria de cada uma. Ora ambos os factores (cargas e forma geométrica) foram respeitados no estudo efectuado.

Um exame das figuras e quadro apresentados sugere alguns comentários.

Em primeiro lugar, e como seria previsível: i) os assentamentos diferenciais crescem com os assentamentos totais; ii) as distorções crescem com os assentamentos diferenciais; iii) das duas relações anteriores é mais estreita a segunda, em especial para valores mais baixos de ambas as grandezas.

A razão δ/s pode atingir valores importantes, superiores ou da ordem dos 60%, rondando a média geral para os valores médios dos nove casos agora em análise os 20%.

Nos três casos para os quais são apresentadas figuras, pode constatar-se que em numerosas ligações as distorções ultrapassam largamente o valor de 1/500 radianos (Figuras 3, 5 e 7) considerado crítico para os danos nos revestimentos. O Quadro II mostra, aliás, que em boa parte dos casos o valor máximo da distorção angular se aproxima ou ultrapassa mesmo (caso 1) o limite 1/150, sugerido como podendo implicar já danos nos próprios elementos estruturais.

Uma investigação das fundações e ligações onde se verificam mais elevados assentamentos diferenciais e distorções permitiu concluir pela existência de alguns pontos, digamos, "críticos" onde a questão em análise assume especial importância e que seguidamente se passam a referir.

A caixa de escadas funciona normalmente como elemento estrutural com que se conta para resistir a acções horizontais, pelo que, para incrementar a estabilidade, nela são concentradas cargas verticais relativamente elevadas. Estas, conjugadas com as grandes dimensões das respectivas fundações, acarretam assentamentos em geral significativamente maiores do que os dos pilares circundantes.

Outro caso típico de concentração de assentamentos diferenciais refere-se a edifícios, como os dos casos 9 e 10, em que existe um corpo central com um número de andares muito superior a toda a zona envolvente. E nas ligações entre pilares das duas zonas que se manifestam maiores assentamentos diferenciais e distorções, o que sugere, pelo menos nalguns casos, a conveniência de separar os dois corpos por juntas de dilatação que se prolonguem até às próprias fundações.

Terceiro ponto crítico é o das sapatas comuns a dois (ou mais) pilares, já que a sua geometria alongada tende a aumentar os assentamentos (aumento do factor I_p na equação (1)).

Por último, embora em regra os pilares da periferia dos edifícios suportem cargas mais reduzidas, é aí que, por razões arquitectónicas e estruturais, é maior o seu número e mais irregular o seu espaçamento (por exemplo, dois pilares muito próximos para dar apoio a uma pequena varanda, ligados a pilares mais afastados e mais carregados). A estes pilares de afastamentos e cargas contrastantes correspondem assentamentos diferenciais importantes e elevadas distorções angulares (até porque os vãos são reduzidos), com a agravante de ser precisamente nas fachadas que se situam os elementos mais sensíveis àqueles movimentos e deformações.

Como comentário final, julga-se útil acrescentar que diversos factores não considerados no estudo afectam num ou noutro sentido os resultados obtidos.

Tenderiam a amenizar os valores calculados aspectos como: i) as sapatas mais carregadas, logo com maiores dimensões, interessam camadas mais profundas, que muitas vezes exibem melhores características mecânicas; ii) as cargas descarregadas pelos pilares são em geral menores do que as que presidem ao dimensionamento das sapatas, já que as últimas incluem normalmente a totalidade das sobrecargas de utilização.

Por outro lado, tenderiam a aumentar os valores obtidos, para além do aspecto de importância fundamental que é a heterogeneidade no plano horizontal do maciço de fundação, factores como: i) a aleatoriedade da distribuição das sobrecargas de utilização, aspecto que pode ser importante em casos como bibliotecas, arquivos e edifícios industriais em que o valor daquelas é muito elevado; ii) a interacção, em termos das alterações do estado de tensão e deformação no maciço, das sapatas mais próximas.

4. CONCLUSÕES

Com o presente trabalho procurou efectuar-se uma avaliação da importância relativa dos assentamentos diferenciais associados à prática corrente de dimensionar as fundações para "igualdade de tensão transmitida ao maciço".

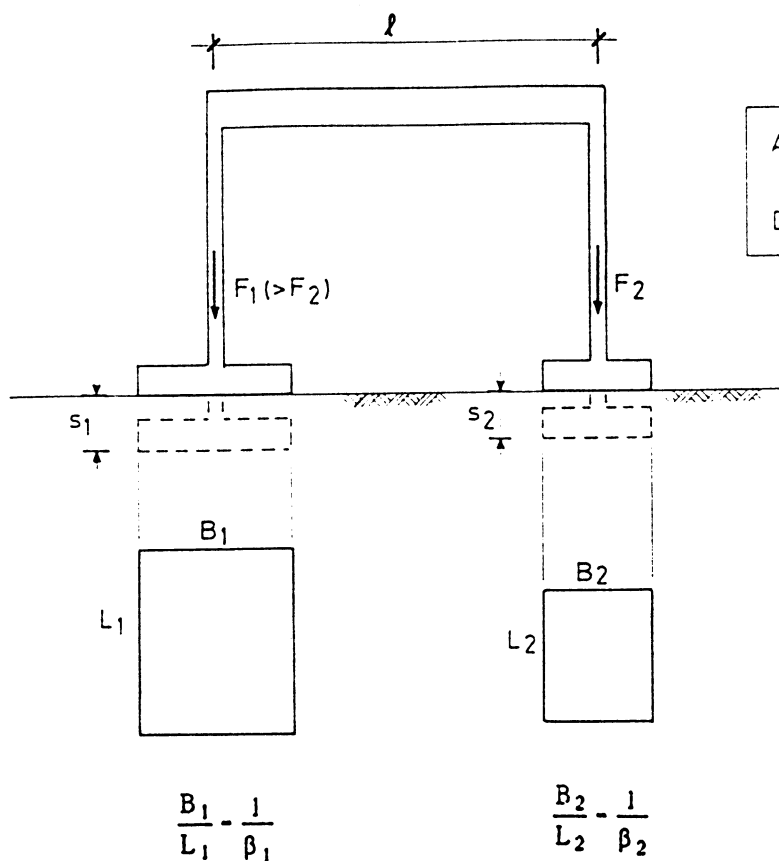
Os resultados obtidos sugerem que tal forma de dimensionamento poderá, para edifícios correntes com estrutura de betão armado, acarretar assentamentos diferenciais e distorções angulares de grandeza suficiente para, no mínimo, ultrapassar os limites críticos para os danos nos revestimentos. A razão dos assentamentos diferenciais pelos totais pode atingir percentagens substanciais, da ordem dos 60%, sendo de sublinhar que este resultado é independente do "cenário geotécnico" considerado no estudo, dependendo apenas da representatividade da amostragem efectuada na escolha dos projectos analisados.

Os valores mais altos das grandezas acima referidas correspondem fundamentalmente a zonas da estrutura onde existem fundações com cargas e (ou) geometrias contrastantes, como zonas próximas de caixas de escadas, zonas de transição entre corpos com diferente número de andares, fachadas, etc. Em especial nestes casos, torna-se altamente conveniente procurar proceder a um dimensionamento das fundações que se poderá designar como "de igualdade de assentamentos". Claro que, em rigor, tal não pode ser conseguido, quanto mais não seja porque tal dimensionamento dificilmente poderá acautelar as heterogeneidades do maciço. Mas é precisamente quando estas são mais pronunciadas que a adopção da metodologia defendida se torna mais pertinente.

5. BIBLIOGRAFIA

- Bjerrum, L. (1963). Contribuição para a discussão, Seccção nº 6. Proc. Europ. Conf. Soil Mechanics Found. Eng., Wiesbaden, Vol. 2, p. 135-137.
- Burland, J. B. e Wroth, C. P. (1974). Settlement of Buildings and Associated Damage. Proc. Conf. on Settlement of Structures, Session V, p. 611-654
- Novais-Ferreira, H. (1977). Assentamentos Admissíveis. Geotecnia nºs 18 e 19.
- Perloff, W. H. (1975). Pressure Distribution and Settlement. Capítulo 4 de "Foundation Engineering Handbook", Edited by H. F. Winterkorn e H. Y. Fang. Van Nostrand Reinhold Comp., New York.

ANEXO



Assentamento máx. ligação s_1
 " diferencial $\delta = s_1 - s_2$
 Distorção angular $\alpha = \delta/l$

$$B_1 L_1 = \frac{F_1}{q} ; \beta_1 B_1^2 = \frac{F_1}{q} ; B_1 = \sqrt{\frac{F_1}{\beta_1 q}}$$

$$B_2 L_2 = \frac{F_2}{q} ; \beta_2 B_2^2 = \frac{F_2}{q} ; B_2 = \sqrt{\frac{F_2}{\beta_2 q}}$$

$$s_1 = q B_1 \frac{1 - \nu^2}{E} I_{p1}$$

$$s_2 = q B_2 \frac{1 - \nu^2}{E} I_{p2}$$

(assentamento máximo da ligação)

$$\delta = q \frac{1 - \nu^2}{E} (B_1 I_{p1} - B_2 I_{p2})$$

$$\frac{\delta}{s_1} = \frac{B_1 I_{p1} - B_2 I_{p2}}{B_1 I_{p1}}$$

$$\frac{\delta}{s_1} = \frac{I_{p1} \sqrt{\frac{F_1}{\beta_1 q}} - I_{p2} \sqrt{\frac{F_2}{\beta_2 q}}}{I_{p1} \sqrt{\frac{F_1}{\beta_1 q}}} = 1 - \frac{I_{p2}}{I_{p1}} \sqrt{\frac{F_2 \beta_1}{F_1 \beta_2}}$$

Se $\beta_1 = \beta_2$ (sapatas com igual forma), $I_{p1} = I_{p2}$

$$\frac{\delta}{s_1} = 1 - \sqrt{\frac{F_2}{F_1}}$$