

# ASSENTAMENTOS ADMISSÍVEIS\*

## Allowable settlements

por

H. NOVAIS-FERREIRA\*\*

**RESUMO** – Os projectos de fundações devem atender, ou à interligação estrutura-solo, ou fixar deformações admissíveis para o solo de fundação. Este último critério é o geralmente seguido, mas impõe a definição das deformações a considerar e a fixação dos limites aceitáveis. O presente trabalho, constitui uma síntese dos conhecimentos apresentados na bibliografia sobre os tipos de assentamento e os valores admissíveis para os diversos tipos de construção, efectuando em cada caso uma apreciação do assunto.

São definidos os diversos tipos de assentamento (assentamento total, inclinação, assentamento diferencial e distorção) e a sua utilização para os diversos tipos de construção. Refere-se a classificação de danos das construções: arquitecturais, funcionais e estruturais. Apresentam-se, de diversos autores, os quadros de maior interesse onde se sistematizam os limites aconselhados para os diversos tipos de deformação e os edifícios a que se adaptam para evitar danos.

Indicam-se também as correlações entre os diversos tipos de deformação.

**SYNOPSIS** – The foundation projects must take into account either the interconnection structure-soil or the establishing of allowable strains for the foundation soil. This latter criterion is the usually followed one, but it imposes the definition of the strains to be considered and the establishing of the acceptable limits. This paper constitutes a synthesis of the knowledge presented in the bibliography on the types of settlements and the allowable values for the different types of construction, it being made for each case as appreciation of the matter.

The various types of settlement (total settlement, slope, differential settlement and distortion) are defined as well as its use for the various types of construction. Reference is made to the classification of the damages to the constructions: architectural, functional and structural. It is presented, from different authors, the tables of greater interest where are systematized the advisable limits for the different types of deformation and the buildings to which they adapt for avoiding damages.

The correlations for the different types of strain are also indicated.

---

\* Memória n.º 207 do Laboratório de Engenharia de Angola

\*\* Engenheiro Civil, Investigador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal) GEOTECNIA 18

## 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 – A aplicação de cargas a um solo provoca a sua deformação de acordo com a lei tensão-deformação a que obedeça nas condições reais de carga. No caso de fundações de edifícios, estruturas, ou construções de um modo geral, dar-se-ão assentamentos positivos ou negativos. As heterogeneidades geológicas ou dos próprios solos sob a construção, e das cargas aplicadas, conduzem a deformações que não serão uniformes, podendo essa não-uniformidade verificar-se não só em relação aos valores finais mas também em relação à taxa de variação com o tempo.

Em consequência da deformação do solo de fundação, a construção que sobre ele se apoia sofrerá: (a) translação; (b) rotação; (c) deformação. A translação e a rotação são movimentos de conjunto (deslocamentos). A translação mais importante é, em regra, no sentido vertical, sendo corrente usar o termo assentamento. Para a rotação global das construções usa-se correntemente o termo inclinação. Sendo as deformações do solo não-uniformes e a construção não-rígida, as diversas partes dessa construção deslocam-se relativamente umas às outras; diz-se que a construção se deformou.

As deformações são uma das causas principais de estados de tensão adicionais, que poderão traduzir-se em fendilhamento. A forma de definir a deformação dos edifícios em termos de assentamento das fundações é objecto de dois critérios fundamentais: assentamentos diferenciais relativos, rotações ou distorções; flexas relativas ou tensões de deflexão (ver 2).

O problema das interacções fundação-construção, ou da influência da deformabilidade do solo no cálculo da superestrutura pode ser encarado de dois modos diferentes.

O modo usual e mais simples é considerar fundação e superestrutura como dois conjuntos diferentes. O engenheiro geotécnico calculará a fundação garantindo a estabilidade e uma deformabilidade máxima (referida por assentamento admissível como designação genérica). O engenheiro estrutural calcula a superestrutura admitindo a indeformabilidade da fundação, ou pelo menos que a deformabilidade é suficientemente pequena para poder ser absorvida sem dano pela deformabilidade própria da superestrutura. E é curioso verificar a ideia geral implícita de que a fundação, mesmo quando assenta em camadas de solo altamente deformáveis, poderá ser “apoio fixo” para a superestrutura.

O outro modo de encarar as interacções fundação-construções é estudar como um todo o conjunto fundação-superstrutura dando origem a processos de cálculo mais complexos e ainda de pequena aplicabilidade prática, nem sempre justificados na fase actual dos conhecimentos, para os edifícios usuais.

O modo clássico de encarar o problema (cálculos separados da fundação e da superstrutura) dá origem ao problema da fixação dos assentamentos que possam ser considerados admissíveis para a superstrutura calculada pelos processos usuais do seu cálculo e constituída pelos materiais nela utilizados.

O conceito de *assentamento admissível* é consequência de uma metodologia do processo de cálculo de estruturas e tem um carácter relativo à obra e materiais. Dependerá não só do tipo de obra mas também, numa mesma obra, poderá depender de cada parte de obra. A barragem de Ducan, Columbia Britânica, teve assentamentos da ordem dos 4,2m, apresentou fendas que foram reparáveis e está em serviço. Obras há para as quais assentamentos cem vezes menores provocam a ruína. Por outro lado, num edifício, portas, elevadores, paredes, pórticos, exigem uma limitação dos assentamentos nem sempre a mesma (Golder, 1971).

A definição dos assentamentos admissíveis por via teórica é bastante difícil. Para prosseguir nos conhecimentos para definição desses assentamentos admissíveis é necessário medir as cargas efectivamente descarregadas sobre as fundações e melhorar os conhecimentos das características de deformabilidade do solo submetido a tais cargas (Barata, 1971).

1.2 – Os assentamentos são pois um fenómeno normal dos solos de fundação de todas as construções mas podem conduzir, quando excessivos, a fendas, deslocamentos e deformações que prejudiquem (Skempton e Mac Donald, 1956):

- a) – a aparência – danos arquitecturais;
- b) – a resistência da estrutura – danos estruturais;
- c) – a utilidade da construção – danos funcionais.

Conforme o tipo de construção, assim ela poderá ser afectada principalmente pelo assentamento total máximo, pela inclinação ou pelos assentamentos diferenciais. O assentamento máximo não afectará directamente a estrutura mas criará problemas de ligação à vizinhança do edifício. Será afectada a drenagem, os acessos de redes diversas e das pessoas e viaturas.

Contudo o edifício poderá manter-se a funcionar com acessos corrigidos. O caso mais típico é o do Palácio das Belas Artes no México, com assentamento total de 7m e cerca de 4 metros de assentamento em relação às ruas vizinhas.

A inclinação afectará principalmente torres, edifícios altos, máquinas que devam trabalhar de nível ou com inclinação fixa, zonas de movimento de viaturas que devam ser de nível, e a drenagem.

Os assentamentos diferenciais afectarão fundamentalmente as estruturas, mas também as obras referidas relativamente à inclinação.

Embora exista uma certa correlação entre estas três grandezas (assentamento total, inclinação e assentamentos diferenciais) essa correlação depende de outros parâmetros e apresenta grande dispersão.

O cálculo de fundações é feito considerando dois aspectos\*:

- a) - rotura;
- b) - assentamento excessivo.

Fundações sobre solos sem coesão apresentam uma capacidade de suporte linearmente crescente com a sua largura. Contudo, os assentamentos são relativamente crescentes também, pelo que, para fundações estreitas será mais desfavorável o critério da rotura, enquanto para fundações largas será mais desfavorável o critério do assentamento excessivo.

Fundações sobre solos coesivos apresentam capacidade de suporte praticamente independente da largura da fundação, mas os assentamentos crescem rapidamente quando a largura aumenta. A conclusão é pois similar à dos solos arenosos.

No caso geral, a capacidade de suporte, decisiva para fundações estreitas cresce com a largura da fundação até um valor máximo, a partir do qual é decisivo o assentamento, que obrigará a carga admissível a decrescer quando a largura da fundação cresce.

Quando se refere o critério do assentamento excessivo deve considerar-se tal critério na sua forma genérica, englobando considerações sobre os três aspectos referidos: assentamento total, inclinação e assentamento

---

\* Ver por exemplo Taylor, 1948, pg. 560 e seguintes, nomeadamente Fig. 19.15, pg. 606.

diferencial (ou flexa). O assentamento diferencial máximo deve ainda ser considerado em termos da máxima razão de assentamento diferencial ou seja máxima relação  $(\delta/l)$  – rotação –, sendo  $\delta$  o assentamento diferencial que se verifica entre dois pontos distando de  $l$ . Poderá, seguindo o critério de Burland e Worth (1974), preferir-se definir a flexa relativa  $(\Delta/L)$ , sendo  $\Delta$  a flexa e  $L$  o comprimento do arco.

A apresentação de cada um destes aspectos como critério diferente, a discutir para escolha do melhor, faz pouco sentido uma vez que cada construção tem os seus próprios requisitos que o projectista deve definir, havendo construções onde é necessário aplicar um dos critérios, dois ou todos.

1.3 – A eliminação de fendas, deformações e deslocamentos corresponde a um encarecimento da construção (Peck et alli, 1956, Little, 1969) que, a partir de um dado grau, não terá interesse para a sua aparência, estabilidade ou utilidade. Em cada caso deverá estabelecer-se um compromisso económico entre condições de utilização e assentamentos. O primeiro problema reside pois no estabelecimento de assentamentos admissíveis técnica e economicamente. Esta questão pode ser encarada por duas vias: (a) observação de obras e correlação entre assentamentos e o seu comportamento; (b) estudo analítico da influência da deformação das fundações no comportamento das construções. A abordagem empírica tem sido a usual, e é referida em 3. A abordagem analítica é indicada em 4.

O segundo problema reside em prever os assentamentos. Estes são, em regra, mais importantes nos solos argilosos, mas mais fáceis de prever. O erro cometido na previsão dos assentamentos nos solos argilosos com razoável consolidação natural não excede normalmente 50%. Os solos argilosos com elevado teor de água sofrem assentamento menos fácil de prever. Nos solos arenosos o assentamento é em regra menor mas o assentamento calculado vem afectado de maior erro relativo.

A previsão de assentamento sai fora do âmbito do presente trabalho.

## 2 – ALGUMAS DEFINIÇÕES

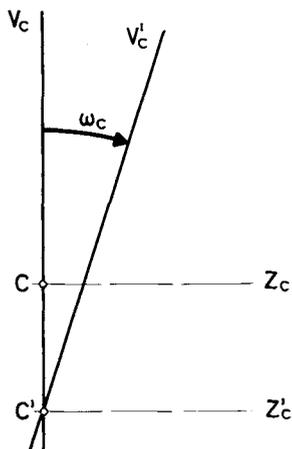
2.1 – Os deslocamentos e as deformações que pode sofrer uma construção serão lineares ou angulares, e podem ser consideradas em valor absoluto (num

ponto, secção, ou perfil) ou relativamente a dois ou mais pontos. As definições variam com o autor, mas podem sistematizar-se como segue\*.

Considere-se um ponto C qualquer da fundação, antes de esta ser sujeita a cargas, e a posição C' desse ponto após carregamento. Sejam  $Z_C$  a cota de C e  $Z'_C$  a cota de C'. Define-se *assentamento* de C como (Fig. 1):

$$\rho_c = Z_c - Z'_c$$

Será positivo (assentamento propriamente dito) quando C desce para C'; será negativo (empolamento do solo) quando C sobe para C'.



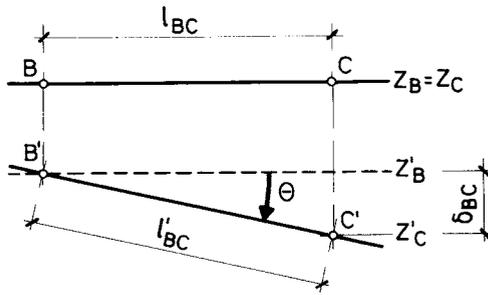
ASSENTAMENTO  $\rho_c = Z_c - Z'_c$

INCLINAÇÃO  $\omega_c$

*Fig. 1 – Deformações em C, em plano vertical*

---

\* Segue-se de perto Burland e Worth, 1974.



EXTENSÃO

$$\epsilon_{BC} = \frac{l'_{BC} - l_{BC}}{l_{BC}}$$

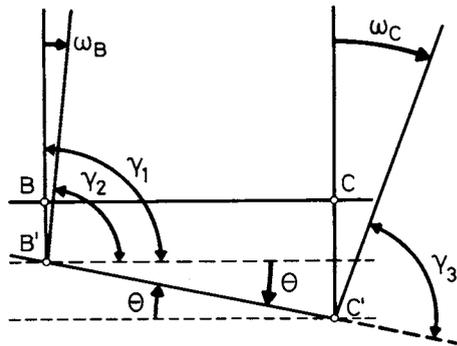
ASSENTAMENTO DIFERENCIAL

$$\delta_{BC} = \rho_C - \rho_B = Z'_B - Z'_C$$

ROTAÇÃO DE BC (DISTORÇÃO)

$$\theta = \frac{\delta_{BC}}{l_{BC}}$$

ROTAÇÃO RELATIVA DE BC (DISTORÇÃO RELATIVA)



$$\beta_{B,BC} = \theta - \omega_B = \gamma_2 - \gamma_1$$

$$\beta_{C,BC} = \theta - \omega_C = \gamma_3 - \gamma_1$$

Fig. 2 - Deformações relativas a B e C

Os deslocamentos lineares de  $C$  podem ainda dar-se na horizontal. É possível definir esses deslocamentos em duas direcções horizontais ortogonais, em regra coincidentes com os alinhamentos principais da estrutura. Os deslocamentos lineares serão assim definidos em três direcções ortogonais\*. Só em alguns casos os deslocamentos horizontais são importantes.

A vizinhança do ponto  $C$ , quando este se deslocou para  $C'$ , sofreu uma translação mas também uma rotação que, em princípio será sensivelmente a mesma qualquer que seja o elemento recto (de comprimento suficientemente pequeno) que se considere, vertical ou horizontal. O ponto  $C$  será considerado como um nó.

A rotação de  $C$  para  $C'$  corresponde a uma inclinação do edifício ou pelo menos de uma parte dele. A inclinação é mais visível relativamente a elementos verticais. Dada a deformabilidade da superestrutura, um mesmo elemento vertical poderá deformar-se deixando de ser alinhamento recto. Num estudo de fundação, a definição de uma rotação em  $C$  poderá ser feita a partir de um elemento vertical por  $C$  mas a nível da fundação. Define-se deste modo *inclinação em  $C$*  o ângulo de rotação ( $\omega$ ) sofrido, ao nível da fundação, por um alinhamento vertical  $C_c$  por  $C$ , quando  $C$  se desloca para  $C'$ , e  $V_c$  passa a  $V'_c$ . O ângulo (como as rotações que a seguir se definirão) será positivo quando  $V_c$  roda para  $V'_c$  no sentido inverso.

2.2 – Considerem-se agora dois pontos quaisquer da fundação,  $B$  e  $C$ , que após carregamento passaram a  $B'$ ,  $C'$ . Seja  $l_{BC}$  a distância entre  $B$  e  $C$ , e  $l'_{CB}$  a distância entre  $B'$  e  $C'$ . Define-se *extensão de  $BC$*  (Fig. 2):

$$\epsilon_{BC} = \frac{l'_{BC} - l_{BC}}{l_{BC}}$$

Será positiva (alongamento) ou negativa (encurtamento). Esta extensão tem três componentes (duas horizontais e uma vertical) de acordo com os eixos em que serão medidas as deslocações.

A componente vertical de  $l'_{BC}$  é o *assentamento diferencial de  $BC$*  que se define como:

$$\delta_{BC} = \rho_C - \rho_B$$

---

\* Só se consideram as deformações no plano, não havendo portanto referências à torção.

A rotação de BC ( $\Theta_{BC}$ ) é o ângulo medido do alinhamento BC para B'C'. Uma vez que esse ângulo é muito pequeno, o arco coincide praticamente com a tangente, podendo usar-se:

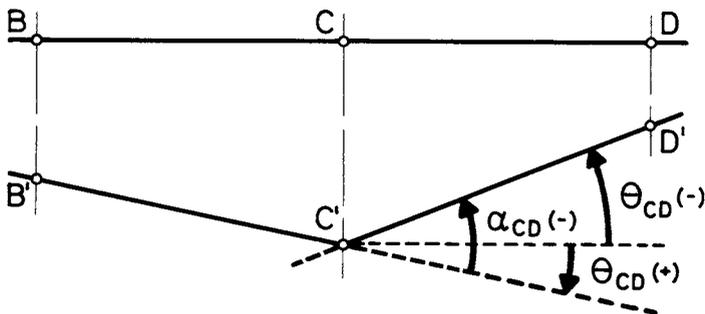
$$\Theta_{BC} \text{ (radianos)} \approx \tan \Theta_{BC} \approx \frac{\delta_{BC}}{l_{BC}}$$

A rotação de BC corresponde a um alinhamento de grandeza finita ( $l_{BC}$ ) e não coincidirá, numa estrutura deformável, com as inclinações em B ou em C. A comparação dessas rotação e inclinações permite definir a *rotação de BG relativamente a B ou a C*:

$$\beta_{B, BC} = + \Theta_{BC} - \omega_B$$

$$\beta_{C, BC} = - \Theta_{CB} - \omega_C = + \Theta_{BC} - \omega_C$$

2.3 – A rotação relativa corresponde a uma *distorção* ou deformação angular, mas em que se compara uma rotação de elemento de grandeza finita (rotação de secante) com a rotação de uma tangente num ponto externo da



### DEFORMAÇÃO ANGULAR

$$\alpha_C = \frac{\delta_{CD}}{l_{CD}} - \frac{\delta_{BC}}{l_{BC}}$$

$\alpha_C < 0$  – CONCAVIDADE

$\alpha_C > 0$  – CONVEXIDADE

Fig. 3 – Deformação relativa a B, C, D

secante. Considerem-se porém três pontos B, C, D inicialmente sobre um segmento de recta horizontal. Define-se *deformação angular em C*, relativamente aos alinhamentos BC e CD, ao ângulo  $\alpha_C$  de rotação relativa de C'D' em relação a B'C' (Fig. 3):

$$\alpha_C \approx \frac{\delta_{BC}}{l_{CD}} - \frac{\delta_{CD}}{l_{BC}}$$

2.4 – Considere-se finalmente uma sucessão A, B, C . . . , M, N de pontos de fundação sobre um alinhamento recto horizontal que após assentamento passam respectivamente a A', B', C' . . . , M' N'.

As deformações angulares  $\alpha_B, \dots, \alpha_M$ , enquanto positivas, correspondem a rotações  $\Theta$  de valor crescente, e portanto a *zonas convexas*. As deformações angulares negativas correspondem a rotações  $\Theta$  de valor decrescente e portanto a *zonas côncavas*.

Considere-se uma zona exclusivamente côncava ou exclusivamente convexa, cujos pontos extremos sejam A e N. Seja  $\Delta_C$  a maior diferença de cotas entre um ponto C' intermédio da zona AN e a cota do ponto C'' do alinhamento A'N' na vertical de C' (Fig. 4):

$$\Delta_C = Z''_C - Z'_C \quad (\text{valor máximo considerados os pontos B' a M' na zona A'N'})$$

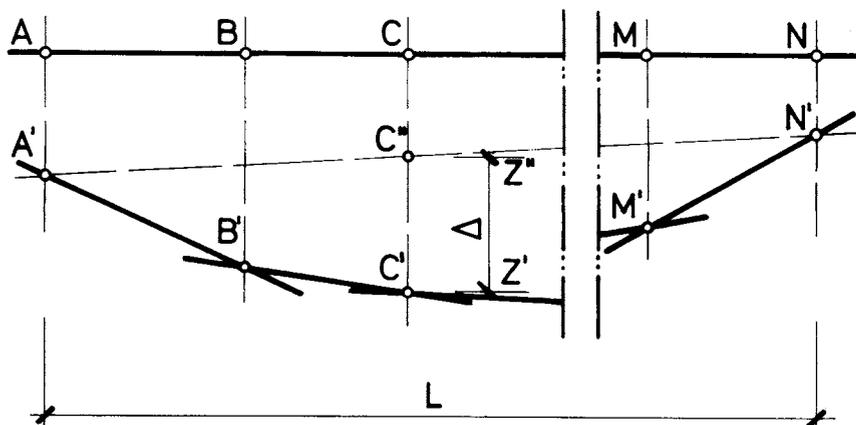
Define-se  $\Delta_C$  como *deflexão* (flexa) da zona AN, que será positiva em zonas côncavas e negativa em zonas convexas.

A *razão de deflexão* será definida como  $\Delta_C/l_{AN}$ .

Observe-se que a deflexão e a razão de deflexão podem ser igualmente definidas para quaisquer três pontos ABC consecutivos. Horn e Lamb (1964) definiram-nas contudo para zonas côncavas ou convexas completas uma vez que limitam essas zonas pelos pontos de inflexão.

2.5 – As definições apresentadas são concretizadas na observação de edifícios pela medição de assentamentos ( $\rho$ ) e inclinações ( $\omega$ ), calculando-se os assentamentos diferenciais ( $\delta$ ), as rotações ou as deflexões relativas. Em termos práticos as rotações  $\Theta$  e  $\beta$  confundem-se, sob a designação geral de distorções, que se consideram com o valor de  $\delta/l$ .

Em todos os casos interessam os valores máximos:  $\rho_{\max}$ ,  $(\delta/l)_{\max}$ ,  $(\Delta/l)_{\max}$ ,  $\omega_{\max}$ . A inclinação é muitas vezes definida relativamente a todo



DEFLEXÃO

$$\Delta = Z'' - Z' \text{ (VALOR MÁXIMO EM } \underline{AN})$$

DEFLEXÃO CÔNCAVA

$$\Delta > 0$$

DEFLEXÃO CONVEXA

$$\Delta < 0$$

RAZÃO DE DEFLEXÃO

$$\Delta/L$$

*Fig. 4 – Deformação relativa a A, B, C, ..., M, N*

o edifício. Só no caso de este ser relativamente importante se usará  $\beta$  em vez de  $\Theta$ . Então pode ainda calcular-se  $\beta = \delta'/l$ , sendo  $\delta'$  o assentamento diferencial referido a novo alinhamento da fundação, estabelecido considerando a inclinação do edifício.

### 3 – ABORDAGEM ATRAVÉS DA OBSERVAÇÃO DE CASOS REAIS

3.1 – O cálculo da carga admissível estabelecido pelo método Terzaghi (Terzaghi e Peck, 1967, pág. 491 e 516)\* prevê um assentamento diferencial admissível de 3/4” (1,9 cm) para edifícios, o que deve corresponder ao assentamento total de 1” (2,54 cm) para fundações isoladas, e de 2” (5,0 cm) para ensoleiramento geral. Estes números serão médios e têm unicamente um valor estatístico. De facto o módulo edométrico,  $E$ , não apresenta relação constante com a tensão de rotura, para todos os solos. A melhor correlação é com a tensão de consolidação ou de preconsolidação. Mas a relação  $E/\sigma_c$ , varia de solo para solo, e dentro do mesmo solo com a relação  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  rotura/ $(\sigma_1 - \sigma_3)$  ensaio – relação tensão deviatórica de rotura com a tensão deviatória de ensaio. Para projectos de grande importância não pode pois prescindir-se do cálculo dos assentamentos pois eles não serão necessariamente os previstos pelas equações de capacidade de carga, nem esses valores serão os mais convenientes quer por razões funcionais – poderão necessitar-se menores assentamentos – quer de economia – poderão aceitar-se assentamentos maiores.

Skempton e Mac Donald (1956) apresentam no seu trabalho (apêndice II, págs. 763/4) uma relação de autores que se pronunciaram sobre o assentamento admissível. Esse assentamento vai desde 1 1/2” (3,8 cm) para edifícios de paredes resistentes (Baumann, 1873)\* até 3 e 5” (7,6 e 12,7 cm) assentamentos que seriam comuns em Chicago, sobre argilas compressíveis, na época de 1880 a 1890. Terzaghi (1935) refere que a maior distorção angular para paredes resistentes de tijolo deve ser de 0,0035 (1/285). Terzaghi e Peck (1948) referem assentamentos diferenciais admissíveis de 3/4” (1,91 cm) entre pilares (para  $l=6$  m, a distorção angular é de 1/320). Ward e Green (1952) admitem assentamentos diferenciais de 1/4” em 10 pés (distorção angular de 1/480). Mayerhof (1953) sugere a distorção angular de 1/300 para pórticos abertos e 1/1000 para pórticos com paredes de enchimento. Para paredes de tijolo resistentes ou contínuas sugere a deflexão central de 1/2000 que corresponde a uma distorção angular de cerca de 1/600.

3.2 – Em 1958, Skempton e Mac Donald apresentaram uma síntese da apreciação de observações de assentamentos e correspondentes danos nos edifícios

---

\* A 1.ª edição do livro é 1948. A afirmação refere-se a fundações sobre areia.

\*\* Ver Skempton e Mac Donald (1956) para a bibliografia referida em 3.1.

baseada em 98 casos reais descritos pela literatura. Nesse trabalho, os autores baseiam-se fundamentalmente na distorção angular ( $\delta/l$ ), relação entre assentamento diferencial entre dois pontos e a distância entre os mesmos dois pontos\*, e estudam as correlações entre (a) máximo assentamento ( $\rho_{\max}$ ) e distorção angular ( $\delta/l$ ), definindo  $R = (\delta/l)/\rho_{\max}$  (b) e maior assentamento diferencial  $\delta_{\max}$  e a distorção angular. Finalmente apresentam os factores de segurança que devem ser considerados.

O estudo da correlação com a distorção angular máxima  $(\delta/\rho)_{\max}$ , dos danos verificados nos edifícios, bem como as correlações com o maior assentamento diferencial e o máximo assentamento, levou às conclusões sumarizadas no Quadro I.

**QUADRO I**  
**LIMITES DE DANOS PARA PAREDES RESISTENTES OU PARA PAINÉIS E TIPOS**  
**TRADICIONAIS DE PÓRTICOS DE EDIFÍCIOS (SEM DIAGONAIS)**  
 (Deverá usar-se um coeficiente de segurança)

Critério		Fundações isoladas	Ensoleiramentos vigados
Distorção angular ( $\delta/l$ )		1/300 <sup>(1)</sup> (0,0033)	
Maior assentamento diferencial (2)	argilas	1 3/4" (4,5 cm)	
	areias	1 1/4" (3,2 cm)	
Máximo assentamento (3)	argilas	3" (7,6 cm)	3 a 5" (7,6 a 12,7 cm)
	areias	2" (5,1 cm)	2 a 3" (5,1 a 7,6 cm)

(1) Distorções de 1/150 provocarão provavelmente danos estruturais. Assentamentos lentos poderão permitir maiores distorções.

(2) Valores provavelmente conservativos.

(3) Não aplicável a edifícios onde o assentamento resulta essencialmente da consolidação de camadas de argila profundas, nem a edifícios erigidos adjacentes a outros existentes nem aos assentamentos devidos principalmente a aterros e não ao próprio edifício.

Dada a incerteza do cálculo dos assentamentos, Skempton e Mac Donald aconselham usar um coeficiente de segurança de 1,5 para a distorção, pelo que deverá usar-se como limite máximo 0,002. Se se desejar evitar completamente qualquer dano deve considerar-se o limite máximo de 0,001 (ver Quadro II).

\* A distorção angular usada por Skempton e Mac Donald é de facto o valor  $\beta$  (com a correcção da inclinação  $\omega$  quando necessário).

Para os maiores assentamentos diferenciais e para os máximos assentamentos\* deve usar-se um coeficiente de 1,25 (ver Quadro II).

Os valores obtidos como limites para o maior assentamento diferencial ( $\delta$ ) e para o máximo assentamento total ( $\rho$ ) resultam de correlações estabelecidas com a distorção angular ( $\delta/\rho$ ), admitindo que ( $\delta/\rho$ ) não pode exceder 1/300 (0,0033).

Para as fundações em caixa em argila e assentamento admissível poderá exceder 4" (10,2cm) desde que, evidentemente, não haja inclinação excessiva ou outras consequências nefastas para o edifício.

As correlações de  $\delta$  e  $\rho$  com  $\delta/l$  são lineares:

$$\rho = \frac{1}{R} (\delta/l)$$
$$\delta = D (\delta/l)$$

Os valores de  $1/R$  e  $D$  estão indicados no Quadro III, apresentando-se conjuntamente os valores sugeridos por Grant *et alli* (1974).

3.3 – O trabalho de Skempton e Mac Donald foi objecto de numerosas críticas (págs. 768 a 784 do mesmo volume onde foi publicado o trabalho). Essas críticas vão desde extremamente ásperas como a de Terzaghi até francamente elogiosas como as de Meyerhof e outras. Indiscutivelmente serviu para vincar a importância de assentamentos nos edifícios, definir as ordens de grandeza desses assentamentos em casos reais e sugerir um método de abordagem do problema de assentamentos admissíveis. Esse método de abordagem estava aliás a ser utilizado por engenheiros russos (ver 3.6).

As conclusões relativas a fundações sobre argilas foram questionadas e rejeitadas por Terzaghi, que pôs em dúvida o critério usado pelos autores, tal como Ward. Este apontou desde logo um outro critério, a do raio de curvatura. A observação de Ward deve ser apreciada em conjunto com a de Flint, adiante referida.

A subjectividade da definição de fendilhamento como dano, foi apontada por Williams, e Peck *et alli* que defenderam claramente a necessidade de aceitação de graus de fendilhamento diferentes conforme as regiões, os

---

\* Segundo Grant *et alli* (1974) todos estes valores são muito conservativos. Nos Quadros II e III apresentam-se conjuntamente os valores sugeridos por Skempton *et al* (1956), sem e com coeficiente de segurança, e os valores sugeridos por Grant *et alli*.

**QUADRO II**  
**VALORES MÁXIMOS DE DEFORMAÇÃO DO SOLO DE FUNDAÇÃO**  
**EDIFÍCIOS COM PAREDES RESISTENTES OU PÓRTICOS (SEM DIAGONAIS)**

Critério	Fundações isoladas	Ensoleiramentos vigados
Distorção	(S1 e G)	1/300 (0,0033 l)
	(S2)	0,002 l ou 0,001 l
Maior assentamento diferencial	(S1)	1 3/4" (4,5 cm)
	(S2)	1 1/2" (3,8 cm)
	(G)	2" (5,1 cm)      2,2" (5,6 cm)
	(S1)	1 1/4" (3,2 cm)
	(S2)	1" (2,5 cm)
	(G)	1" (2,5 cm)      1,2" (3,0 cm)
Assentamento máximo	(S1)	3 a 5" (7,6 a 12,7 cm)
	(S2)	2 1/2" (6,4 cm)      2 1/2" a 4" (5,4 a 10,2 cm)
	(G)	4" (10,2 cm)      Valores (S) muito conservativos tanto mais quanto mais rígida a fundação
	(S1)	2" (5,1 cm)      2 a 3" (5,1 a 7,6 cm)
	(S2)	1 1/2" (3,8 cm)      1 1/2" a 2 1/2" (3,8 a 6,4 cm)
(G)	2" (5,1 cm)      Valores (S) muito conservativos	

(S1) Valores segundo Skempton e Mac Donald (1956) – sem coeficiente de segurança.

(S2) Valores segundo Skempton e Mac Donald (1956) – com coeficiente de segurança.

(G) Valores segundo Grant *et alii* (1947).

\* Estes valores devem ser considerados como indicações não rígidas, e só para os edifícios e construções correntes.

QUADRO III  
VALORES DE I/R E D

Constante	Solo de fundação		Fundações isoladas		Ensoleiramentos vigados ou lajes	
			em polegadas	em cm	em polegadas	em cm
I/R	Argila	S	1 000	2 540	1 250	3 175
		G	1 200	3 050	1:(1,1B)* – B largura da fundação	
	Areia	S	600	1 524	750	1 905
		G	600	1 524	Valores S são duvidosos	
D	Argila	S	550	1 400	550	1 400
		G	650	1 650	650	1 650
	Areia	S	350	890	350	890
		G	350	890	350	890

S Segundo Skempton e Mac Donald (1956)

G Segundo Grant *et alii* (1974)

\* 1,1 B considerando já um coeficiente 0,8 em face da dispersão dos ensaios

edifícios e os utentes. A influência da rigidez da estrutura e seu tipo, dos acabamentos e da utilização do edifício foi vinculada por Measor, Golder, Williams, Cassel, Rifley, Peck *et alli*, Schriver *et al.*, Ward.

A importância da velocidade de assentamento foi discutida por Souza, Meyerhof, Peck *et alli*, Schriver *et al.*

A existência de causas de fendilhamento diversas do assentamento, cuja acção pode perturbar a apreciação de casos reais, foi exposta por Peck *et alli* e Schriever *et al.*

Limites diferentes dos indicados pelos autores são referidos por Cooling, Meyerhof, Schriever *et al.* os quais apoiam francamente os critérios do autor.

Golder, Peck *et alli* e Schriever *et al.*, consideram extremamente útil o trabalho pois prevê a existência de assentamentos e refere a sua ordem de grandeza e consequências. Meyerhof considera ainda muito útil a apresentação das correlações da distorção angular com os assentamentos totais e diferenciais. A justificação teórica do critério é efectuada por Flint. As objecções ao trabalho de Skempton e Mac Donald valorizaram-no ainda mais, e são de interesse para quem se ocupe do problema do assentamento dos solos de fundação e sua influência nas construções.

Dada a importância dessas objecções, as quais constituem de certo modo a crítica ao próprio conceito de “assentamento admissível”, resumem-se essas intervenções nos aspectos de carácter geral e que se consideram significativos.

E. O. Measor referiu que o progresso no cálculo de fundações conduziu afinal (década dos anos 50) a uma diminuição de riscos com encarecimento das fundações. A divisão dos edifícios em dois tipos foi irrelevante pois os autores concluíram não haver diferença significativa entre eles. E contudo essa diferença tem que ser considerada pois a finalidade do edifício (escritórios, habitação ou indústria) requer cuidados diferentes com os danos resultantes de assentamentos. Measor objectou ainda contra a afirmação de que o assentamento total que causa ruína é relativamente independente da dimensão do edifício. Chamou a atenção para o efeito do assentamento dos pilares nos pavimentos.

L. F. Cooling indicou que a distorção de 1/300 estava de acordo com ensaios realizados no Building Research Station (U. K.). Mas não é prático basear os cálculos de fundações na distorção. Observou que muitos dos casos de danos de edifícios estavam associados a fundações em argila. Haverá alguma condição particular relativa ao solo ou método de cálculo?

R. W. Souza informou que no Imperial College (Londres) tinham sido apreciados danos em edifícios em relação com a velocidade de assentamento. No que se refere a fundações isoladas sobre argilas não apareceram danos em edifícios com assentamento total de 3" (7,6cm) ou menos, nem edifícios sem danos com 8" (20,3cm) ou mais. Nos edifícios com assentamento entre 3 e 8" (7,6 a 20,3cm) houve: 6 danificados durante ou imediatamente após construção; 3 danificados antes de 2 anos; 6 não danificados mas com assentamentos muito lentos. Assim sugeriu que o limite de 3" (7,6cm) deve referir-se ao final da construção, sendo de aceitar-se assentamentos maiores a longo prazo. No que se refere a ensoleiramentos sobre argila, os resultados são menos conclusivos mas sugerem analogia com os resultados de fundações isoladas.

H. Q. Golder chamou a atenção para o facto de que o trabalho dos autores prova, com 98 casos reais, que os edifícios assentam, do que os engenheiros de estruturas pareciam duvidar, e que esse assentamento se mede em polegadas, não em milésimos de polegadas. No que diz respeito ao assentamento admissível ele dependerá do edifício e sua utilização. Por exemplo, na Holanda, um edifício construído para funcionar como centro de instrumentos telefônicos foi projectado considerando-se que inutilizaria todo o sistema se assentasse 4 mm.

G. M. Williams chamou a atenção para a observação dos autores de que o critério apresentado deve ser usado cuidadosamente pois aparecerão excepções com frequência. Uma delas será a de edifícios de estrutura aporticada sobre sapatas com rés-do-chão suportado por laje. Nestes casos pode haver danos para  $\delta/l < 1/300$ . Também é de atender a que é por vezes mais conveniente (economicamente) aceitar certos danos e efectuar reparações desses danos do que executar fundações mais seguras. Os assentamentos a longo prazo têm importância diferente conforme o uso dos edifícios, aconselhando considerar 30 a 40 anos para os edifícios industriais e 50 a 75 anos para os de escritórios e habitações.

F. L. Cassel levantou a questão de limitação mais rigorosa dos assentamentos quando o edifício será construído adjacente a outro já existente, conforme insistem os autores.

A. R. Flint explicou a aplicabilidade do critério ( $\delta/l$ ) como segue. Admita-se o cálculo elástico para as estruturas. O momento  $M$  de cálculo de vigas é proporcional a  $ql^2$  ( $q$  carga uniformemente distribuída na viga de vão  $l$ ). Praticamente  $q$  é proporcional a  $l$ , e o módulo da secção da viga será proporcional a  $l^3$ . Os momentos induzidos pelo assentamento diferencial serão

aproximadamente dependentes de  $(EI)$   $(\delta/l^2)$ . Estes momentos  $M_2$  adicionam-se aos de projecto  $M_1$ , donde  $M_1 + M_2$ . A rotura dar-se-á quando é atingido o momento  $M$  proporcional ao de projecto  $M = FM_1$ , sendo  $F$  o factor de segurança. Então  $M_1 + M_2 = FM_1$ , donde  $M_2/M_1 = (F - 1) = \text{constante}$ , pelo que  $I \cdot \delta/l^3 = \text{constante}$ . Como  $I$  é proporcional a  $d^3$ , sendo  $d$  a altura da viga, então:

$$\delta/l = \text{const.} \times l/d$$

Mas  $l/d \approx \text{const.}$ , ou pouco varia para os edifícios correntes. Daí  $\delta/l \approx \text{const.}$ , como os autores observaram. Isto sugere que os danos resultam da introdução de momentos devidos aos assentamentos diferenciais e consequentes distorções.

G. G. Meyerhof referiu que a deformação angular é levemente dependente do tempo. Para fundações sobre argilas poderá considerar-se o efeito benéfico da fluência dos materiais, o que não pode ser aceite para fundações sobre areias.

Dada a dificuldade de prever distorções, a correlação estatística entre  $(\delta/l)$  e  $\rho$  ou  $\delta$  é muito útil. Essa correlação depende do tipo e dimensões da fundação e do edifício. A rotura de paredes de tijolo ocorre em laboratório para cargas 1,5 a 3 vezes a de fendilhamento. Sugeriu por isso usar um coeficiente de segurança de 2 para a distorção angular, o que daria o coeficiente usual de 3 para a rotura. Para as estruturas aporricadas o coeficiente 1,5 para a distorção assegura o coeficiente 3 para a rotura. Assim sugeriu, como distorção angular  $(\delta/l)$ :

muros resistentes	$(\delta/l) < 1/1000$
muros de tijolo	$(\delta/l) < 1/500$
pórticos	$(\delta/l) < 1/250$

Dado que a avaliação de assentamentos pode conduzir a erros de 1,5 em argilas e 2 em areia, aconselhou esses números como factor de segurança. Assim, os assentamentos máximos admissíveis aconselháveis serão de 2-4" (5,1-10,2cm) para argilas e 1-2" (2,5-5,1cm) para areias, respectivamente para fundações isoladas e para ensoleiramentos. Os valores de assentamentos diferenciais serão 1 1/4" (3,2cm) para argilas e 3/4" (1,1cm) para areias. Chamou ainda a atenção para a necessidade de avaliar o comportamento de edifícios diferentes dos apreciados pelos autores e referiu o método de cálculo conjunto estrutura-solos.

Karl Terzaghi observou que as conclusões relativas à relação entre a distorção angular e o máximo assentamento lhe parecem demasiado audaciosas para serem aceites na sua presente forma. As razões em que se baseia o raciocínio sobre fundações em argila são algumas bastante vagas.

Para fundações em areias, o assentamento é relativamente errático, mas desde que a camada de areia tenha espessura superior a duas vezes a largura da fundação, o assentamento médio é praticamente independente da espessura. Por outro lado a sua experiência indica serem os assentamentos em areias, normalmente inferiores a 3" (7,5 cm) e em argila, muitas vezes superiores a 20" (50,8 cm).

A correlação entre distorção angular e máximo assentamento em areias é razoavelmente definida. Chamou a atenção para a heterogeneidade de aterros como fundação e que não podem ser considerados como comportando-se similarmente a areias.

No que se refere a fundações sobre argila as conclusões são somente para fundações directamente apoiadas sobre estratos exclusivamente de argila e não sobre sedimentos com bolsas de argila. Para estas a relação entre  $(\delta/l)$  e  $\rho$  pode ser muito maior do que para estratos exclusivamente de argila. Em edifícios com blocos de vários andares ligados por blocos leves e baixos, a relação é também várias vezes maior do que seria caso os edifícios fossem de altura uniforme. As fundações sobre argila devem ser divididas em várias categorias de acordo com o solo, a fundação e o edifício. A correlação apresentada pelos autores é pois dispersa. Terzaghi propôs, em 1948, assentamentos admissíveis para fundações em areia, mas desencoraja o uso de limites para argila ou aterros que não sejam de areia, dado que a relação  $(\delta/l)/\rho$  depende em grande parte do tipo de estratificação, da fundação e edifício como acima referiu. Em consequência a dispersão é tão grande que um cálculo baseado numa relação pode conduzir a fundações anti-económicas ou perigosas. O estudo através de resultados de sondagem será mais conveniente que apreciar casos reais anteriores. Considerou as conclusões do trabalho dos autores como desencorajante do estudo de fundações em argilas, contrariamente ao que seria de estimular, sendo tais conclusões surpreendentes e audaciosas. Fez votos para que as tabelas apresentadas pelos autores não fiquem nos livros de texto de mecânica dos solos.

C. F. Ripley mostrou que a razão 1/300 em pórticos de 20 pés (6,10 m) entre pilares corresponde a assentamentos diferenciais de 3/4" (1,9 cm) precon-

zados por Terzaghi em 1948 e considerados convenientes pela grande maioria dos projectistas no Canadá. Observou porém que a distinção dos autores entre tipos de fundação é enganadora. O que é importante é a rigidez da estrutura, tipos de acabamentos, equipamento dos edifícios. Fixados estes parâmetros a importância dos danos será a mesma para qualquer tipo ou solo de fundação. O engenheiro de fundações deve avaliar a rigidez relativa do edifício e proceder em conformidade.

R. B. Peck, D. U. Deere e J. L. Capacete afirmaram a importância de ter sido chamada a atenção para o assentamento num estudo racional de fundações, mas dos diversos factores apontados pelos autores devem ser vinculados uns e não-considerados outros. Assim convém referir que a indicação de danos dada pela literatura é muito subjectiva, dependendo da experiência e hábitos do observador. Um observador experiente indicará danos mais significativos. Em certos territórios dá-se maior importância a fendas do que noutros. O fendilhamento não é exclusivamente provocado por assentamentos diferenciais, mas também por retracção, variações de temperatura, meteorização, vibrações. Pode ser antieconómico ou até sem sentido reduzir os assentamentos para evitar fendilhamento, persistindo outras causas. O tipo de edifício e decoração interior dão ao fendilhamento importância variável de caso para caso, sendo este outro aspecto a vencer. Também é de vincar a influência da velocidade de distorção no fendilhamento. Se a construção é realizada por pilares e pavimentos, só posteriormente aparecendo as paredes, o fendilhamento será eventualmente menor do que se a construção da estrutura e painéis for conjunta. Foram apresentados exemplos mostrando a importância da sucessão de cargas e do tipo de estrutura no fendilhamento. Concretamente foi indicado um caso de assentamento diferencial superior a 20" (51 cm) entre dois lados de um edifício sem que este tivesse de ser abandonado, enquanto outro com  $\delta/l \approx 1/288$  e  $\rho < 2"$  (5,1 cm) teve de ser demolido. O problema de assentamento admissível é pois muito complexo. Por outro lado, cidades como Shangai, México e Nova Orleães não podem sujeitar-se aos limites indicados pelos autores.

W. R. Schriever e W. G. Plewes consideraram o trabalho como valiosa contribuição para os conhecimentos técnicos. Chamaram a atenção para a necessidade de observações de obras, medindo, coligindo e publicando resultados de observações. Na observação de fendilhamentos devem distinguir-se os provocados pelas diversas causas, dando exemplos de casos de fendilha-

mento resultantes de retracção e variações de temperatura. Chamaram a atenção para Miller (1956) que indica 1/1000 como a distorção que em ensaios de laboratório tende a fender o estuque de gesso. Referiram ainda a possível importância da velocidade de deformação que permite maiores deformações em fundações sobre argila do que sobre a areia.

W. H. Ward observou que o critério da deformação angular dos autores pode ser expresso por:

$$\frac{d}{dx} \left[ y - y_0 - \left| \frac{dy}{dx} \right|_0 x \right]$$

simplicável para

$$\frac{dy}{dx} - \left| \frac{dy}{dx} \right|_0$$

sendo  $x$  as coordenadas horizontais,  $y$  as verticais e  $\left| \frac{dy}{dx} \right|_0$  a rotação como “corpo-rígido”.

Considerou difícil concordar com os autores quando referem ser a expressão anterior somente ligeiramente menos lógica do que a curvatura  $d^2y/dx^2$ .\*

Ensaio de painéis de alvenaria executados na Building Research Station mostraram-lhe que o fendilhamento estava associado com a curvatura, velocidade de carga, tipo de execução da parede, e outros factores, bem como com as dimensões e rigidez do quadro. Observações de obras mostraram-lhe que a consideração dos registos de assentamentos dos pilares e do cálculo sequente das deformações angulares são insuficientes para definir o fendilhamento. Não é pois de admirar a grande dispersão obtida pelos autores.

Skempton em resposta às intervenções de carácter geral concordou com a subjectividade do critério para definir danos por assentamento e que em certos edificios e circunstâncias pode e deve ser aceite um certo fendilhamento (Peck *et al.*, Measor, Williams e Ripley) o que pode ser chamada “sensibilidade regional”. *O critério apresentado, como os autores referem no texto, não deve ser considerado como regra rígida, nem mesmo regra a seguir se o projectista entender optar por critério diferente* (Terzaghi).

---

\* A curvatura é definida por  $\frac{d^2y}{dx^2} : \left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}$

É evidentemente impossível cobrir todos os casos. Mas os valores indicados, na ausência de outros anteriores para a argila, são certamente de interesse (Meyerhof).

A indicação mais útil do trabalho é o valor de 1/300 para a distorção limite de painéis de parede e paredes resistentes de tijolo. Segundo a observação de Peck *et al.*, esse limite servirá talvez também para paredes de betão armado. O limite de 1/150 indicado para danos estruturais de vigas e pilares de pórticos responde à objecção de Measor.

Concordou ainda com a possível perturbação de julgamento que outras causas de fendilhamento possam provocar (Schriever *et al.*) mas os danos das obras referidas no trabalho serão fundamentalmente devidos a assentamento. Concordou igualmente com a necessidade de melhor observação da influência do tempo (Souza e Williams).

3.4 – Em 1974, Grant *et alli* apresentam uma síntese similar à de Skempton e Mac Donald, baseada sobre os mesmos casos reais e ainda outros mais recentes. Apreciam também o efeito do tempo de aplicação de carga e o interesse da curvatura definido por Horn e Lamb (1964).

A sua análise confirma a de Skempton e Mac Donald, considerando porém que o valor de 1/R para fundações isoladas em argila deverá ser 1200. O valor para ensoleiramento em areias é discutível. De facto Skempton e Mac Donald (bem como Grant *et alli*) não encontraram número suficiente de casos reais descritos na literatura, tendo estabelecido o valor de 750 por analogia com o caso de fundações isoladas admitindo a mesma relação das fundações em argila (ver Quadro III):

$$750 = \frac{600}{1000} \times 1250$$

Uma estrutura circular\*, uniformemente carregada, apoiada sobre meio elástico, semi-indefinido (meio espaço), sem tensões de corte no contacto com o solo, apresentará os assentamentos seguintes (Jumikis, 1969, pág. 161):

$$\begin{aligned} \rho_{\max} \text{ (no centro)} &= 2 r \frac{1 - \mu^2}{E} q \\ \rho_{\min} \text{ (na periferia)} &= \frac{4}{\pi} r \frac{1 - \mu^2}{E} q \end{aligned}$$

---

\* Esta análise fora feita também por Skempton e Mac Donald que no entanto concluíram que em nenhum caso tem interesse considerar a largura B nas expressões de  $\rho_{\max}$ .

E - módulo de deformação do solo

r - raio da fundação.

q - intensidade de carga (uniformemente distribuída) sobre a fundação.

$\mu$  - coeficiente de Poisson.

Donde

$$\begin{aligned}\delta &= \rho_{\max} - \rho_{\min} = \frac{2\pi-4}{\pi} r \left[ \frac{1-\mu^2}{E} \right] q = 2 \left( 1 - \frac{2}{\pi} \right) r \left[ 1 - \frac{\mu^2}{E} \right] q \\ \delta/l &= 2 \left( 1 - \frac{2}{\pi} \right) \frac{1-\mu^2}{E} q \dots \dots \dots (l = r) \\ \frac{\delta/l}{\rho_{\max}} &= 2 \left( 1 - \frac{2}{\pi} \right) \frac{1}{2r} * = 2 \left( 1 - \frac{2}{\pi} \right) \frac{1}{B} \\ &= 0,72676 \frac{1}{B}\end{aligned}$$

Deste modo ( $\rho$  e B nas mesmas unidades)

$$\rho_{\max} = 1,376 B (\delta/l)$$

Usando  $\rho$  em polegadas e B em pés (12 polegadas), tem-se:

$$\rho_{\max} \text{ (polegadas)} = 12 \times 1,376 B (\delta/l) = 16,5 B (\delta/l)$$

Os solos não se comportam como sólidos elásticos pelo que as expressões apresentadas não serão adaptáveis. As estruturas de fundação não são também circulares, pelo que as expressões deveriam ser corrigidas com um coeficiente de forma. Grant *et alli* (1974) obtiveram um diagrama  $R = f(B)$  bastante disperso e que apareceu necessariamente influenciado pela rigidez da estrutura. A maior rigidez diminuirá os assentamentos totais e necessariamente os diferenciais. Grant *et alli* concluíram que a expressão  $\rho_{\max} = 1,375 B (\delta/l)$  pode ser usada para ensoleiramento geral em argilas, devendo admitir-se um coeficiente  $1/1,25 = 0,8$  em face da dispersão dos ensaios, pelo que (unidades iguais para  $\rho$  e B):

$$\rho_{\max} \text{ (admissível)} = 1,1 B (\delta/l)$$

Nos casos restantes, o valor de R parece ser independente da largura B do edifício, tomando (1/R) os valores indicados no Quadro III. A constância de R em face de B deve ser atribuída, no caso das areias, ao seu tipo de comportamento, o qual corresponde a um aumento da resistência por efeito de cintagem quando a largura da fundação aumenta.

---

\* Sendo  $B = 2r$ , largura ou diâmetro da fundação.

No caso das fundações isoladas sobre argilas deve admitir-se que não existe interação entre as fundações isoladas do mesmo edifício.

Com base nesta análise, Grant *et alli* consideram que para  $(\delta/l) = 1/300$  serão de aceitar, para fundações isoladas, os valores de  $\rho_{\max}$  indicados no Quadro II. Estes valores estão de acordo com observações de casos reais. Para ensoleiramentos gerais em argilas os valores que se obtêm da correlação anterior parecem muito conservativos em face da observação de casos reais. Serão de aceitar em casos de ensoleiramentos muito flexíveis ou para os quais se justifique excepcional cuidado.

Os valores apresentados diferem pois dos de Skempton e Mac Donald, embora a análise de Grant *et alli* fosse realizada incluindo todos os casos reais analisados pelos primeiros autores.

A correlação entre o máximo assentamento diferencial ( $\delta_{\max}$ ) e o máximo  $\delta/l$  é melhor definida e pode considerar-se linear (valores de  $D$  indicados no Quadro III). Deve no entanto considerar-se que é grande a dispersão, sendo de admitir uma gama de valores de 0,5 a 2 vezes os calculados.

Atendendo às considerações anteriores e à observação de casos reais, Grant *et alli* consideram que poderão admitir-se para os assentamentos diferenciais os valores indicados no Quadro II.

Em todos os casos está implícita a aceitação de  $(\delta/l)$  sensivelmente igual a 1/300.

De acordo com Grant *et alli* a influência da velocidade de carga é pequena. Embora possa aceitar-se que as deformações por aplicação lenta de carga (mais de dois anos) serão levemente menos prejudiciais, no entanto as observações feitas não são conclusivas.

3.5 – Bjerrum (1963), baseado no trabalho de Skempton e Mac Donald, e outros, apresentou o esquema da Fig. 5, dando os limites da distorção  $(\delta/l)$  para vários tipos de obras.

Bjerrum estabeleceu também as relações entre  $\delta_{\max}$  e a máxima relação  $(\delta/l)$  e o máximo assentamento para fundações em areia, bem como a correlação  $\delta_{\max} = f(\rho_{\max})$  para argilas. Para areias e no primeiro caso  $(\delta/l)_{\max} = f(\delta_{\max})$ , obteve uma correlação directa (Fig. 6) não linear.

A correlação entre  $\delta_{\max}$  e  $\rho_{\max}$  para areias é dada na Fig. 7, e para argilas na Fig. 8. A correlação entre  $\delta_{\max}$  e  $\rho_{\max}$  é muito dispersa havendo, para areias, vários casos de  $\rho_{\max} = \delta_{\max}$ . Lambe e Whitman (1969) admitem

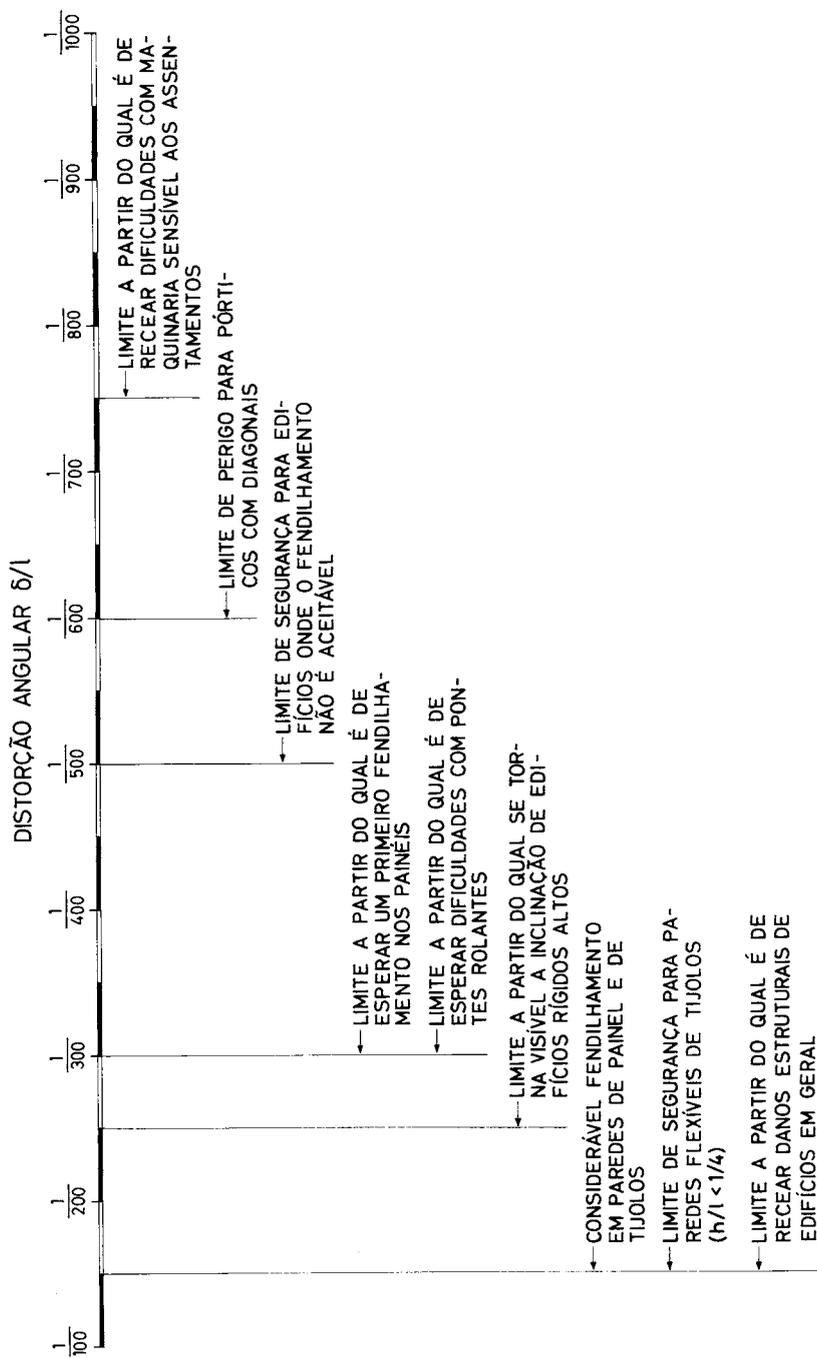


Fig. 5 – Limites para distorções angulares (in Bjerrum, 1963)

inclusivé a possibilidade de  $\delta_{\max} > \rho_{\max}$  desde que uma parte da construção suba (caso possível em fundações de grandes tanques de combustíveis). É também possível  $\delta_{\max} > \rho_{\max}$  no caso de argilas expansivas.

QUADRO IV  
INCLINAÇÕES E ASSENTAMENTOS FINAIS – CÓDIGO DE EDIFÍCIOS, U.R.S.S., 1955

Item N.º	Descrição do valor normal	Subsolo	
		Areia e argila rija	Argila em estado plástico
1	Inclinação de caminhos de guias, bem como apoios para pontes de carros-guias	0,003	0,003
2	Diferenças de assentamento de pilares de fundação de edifícios civis e industriais: a) – para estruturas aporricadas de aço e de betão armado b) – para vigas de cabeça de pilares com revestimento de tijolo c) – para estruturas para as quais não resultam tensões adicionais em resultado do assentamento diferencial das fundações L – distância entre eixos de fundações	0,002 L 0,007*L 0,005 L	0,002 L 0,001 L 0,005 L
3	Deflexão relativa de paredes inteiramente de tijolo: a) – para habitações de vários andares e edifícios civis até $L/H < 3$ até $L/H > 3$ L – comprimento da parte flexível da parede H – altura da parede desde a base da fundação b) – para edifícios industriais de um andar	0,0003 0,0005 0,004	0,0004 0,0007 0,004
4	Inclinação de fundações de ensoleiramento geral ou em forma de anel, de estruturas altas e rígidas (chaminés, torres de água, silos, etc.), nas condições de carga mais desfavoráveis	0,004	0,004

\* Segundo Feld (1957) deverá ser 0,001 L.

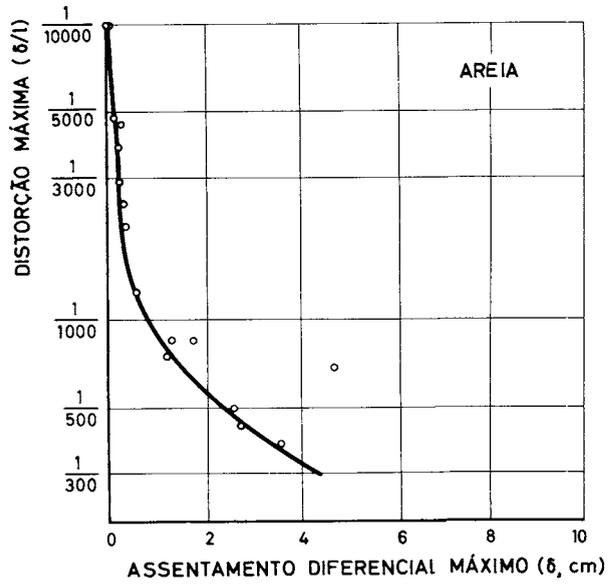


Fig. 6 – Assentamento de estrutura em areia. (in Bjerrum, 1963)

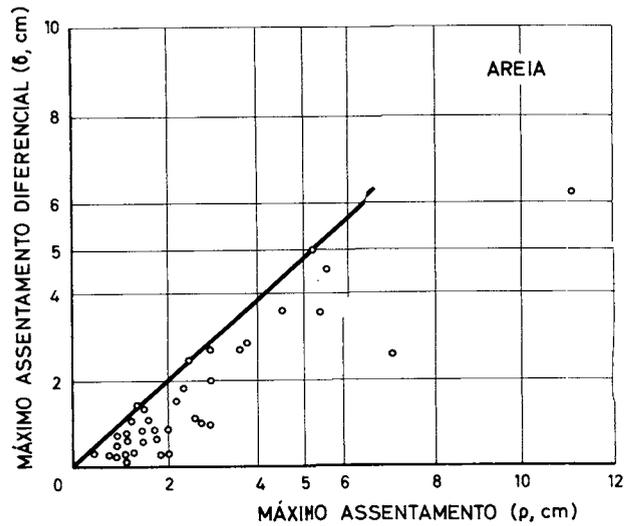


Fig. 7 – Máximo assentamento diferencial versus máximo assentamento para edifícios em areia. (in Bjerrum, 1963)

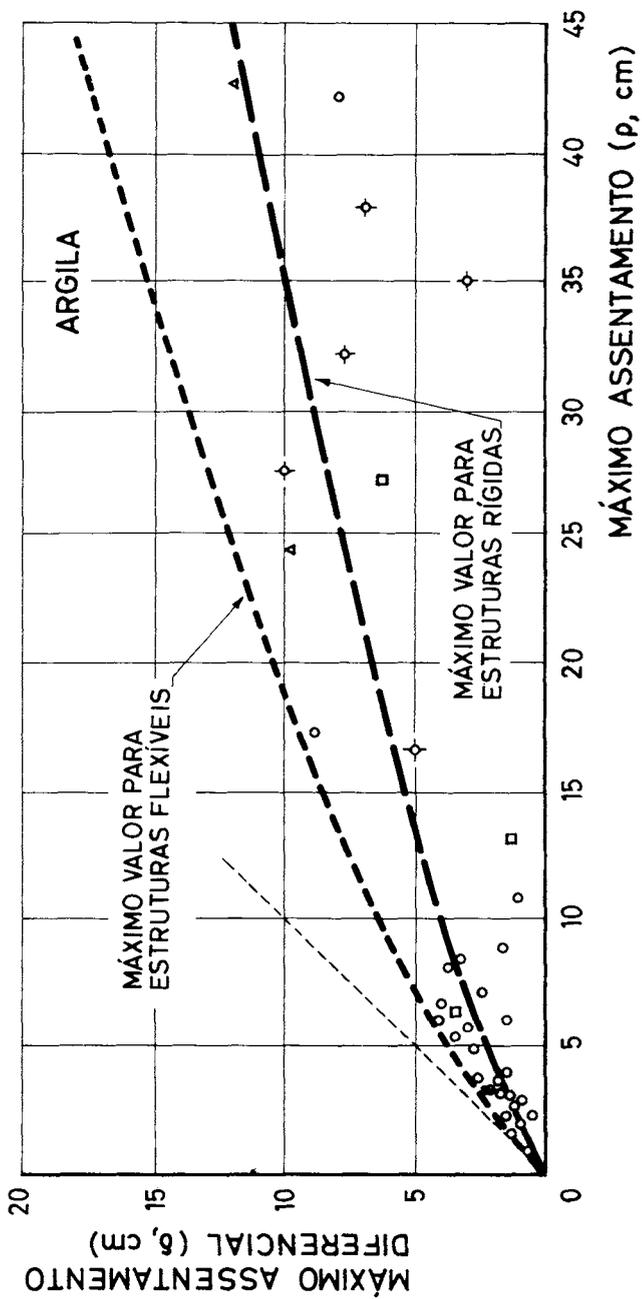


Fig. 8 - Máximo assentamento diferencial versus máximo assentamento para edifícios em argila. (in Bjerrum, 1963)

3.6 – Em 1957, Polshin e Tokar na 4.<sup>a</sup> Conferência Internacional de Mecâdos Solos e Engenharia de Fundações, apontam os dois critérios clássicos de cálculo de fundações, (a) estabilidade, (b) assentamento: o último critério implica que o assentamento  $\rho$  seja inferior a um assentamento limite  $\rho_{lim}$ . Referem os métodos de cálculo usados para cálculo de assentamentos na Rússia e o seu grau de precisão, prevendo que só em 20% dos casos o assentamento real excederá o calculado.

A observação em obra dos assentamentos dos edifícios durante um período superior a 25 anos permitiu conhecer:

- a) – inclinação: relação entre a diferença de assentamento entre dois pontos e a sua distância (rotação, conforme 2)

$$\tan \Theta = \frac{\rho_A - \rho_B}{AB}$$

- b) – deflexão relativa (razão de deflexão): relação entre deflexão e o comprimento da parte deflectida ( $\Delta/l$ );

- c) – assentamento médio sob o edifício.

Com base num trabalho de recolha cuidadosa de elementos e medições em obra, foram elaborados dois quadros que sumarizam os limites admitidos para assentamentos pelo código da construção de edifícios e estruturas industriais, de 1955, da U.R.S.S. (Quadros IV e V).

QUADRO V  
ASSENTAMENTO MÉDIO FINAL - CÓDIGO DE EDIFÍCIOS, U.R.S.S., 1955

Item N.º	Tipo de edifício e tipo de fundação	Assentamento médio cm
1	Edifícios com paredes inteiramente de tijolo sobre fundações contínuas e separadas, com paredes de comprimento L e de altura H (H contado desde a base da fundação): L/H > 2,5 L/H < 1,5	8 10
2	Edifícios com paredes de tijolo reforçadas com betão armado ou cintas de tijolo (não dependente da relação L/H)	15
3	Edifícios aporticados	10
4	Fundações sólidas de betão armado de altos fornos, chaminés, silos, torres de água, etc.	30

3.7 - A advertência de Terzaghi (ver 3.3) não impediu que autores tais como Sower (1936 - ver 3.9), Singh (1967), Johnson e Kavanagh (1968), Lamb e Whiteman (1969 - ver 3.8), Habib (1973) e outros fizessem figurar nos seus manuais limites de assentamento que incluem os casos de fundações em argila. Alguns códigos ou normas apresentam mesmo tais valores com carácter oficial. É o caso russo (ver 3.6), indiano e israelita, por exemplo. Contudo a advertência em causa deve ser cuidadosamente lembrada pelo engenheiro de fundações sempre que tais valores forem utilizados.

Singh (1967) refere que uma estrutura pode ser danificada por um assentamento uniforme, ou mais frequentemente por um assentamento diferencial das fundações. Cita a norma IS:1904-1961\* a qual limita os assentamentos como segue:

- Assentamentos distorcionais (distorção)
  - condições normais. . . . . 1/500
  - quando se deseje evitar qualquer dano . . . . . 1/1000
- Assentamentos diferenciais máximos
  - argilas . . . . . 4,0 cm
  - areias. . . . . 2,5 cm
- Assentamento total máximo
  - fundações isoladas - argilas . . . . . 6,5 cm
  - areias . . . . . 4 cm
  - ensoleiramento - argilas . . . . . 6,5 a 10 cm
  - areias . . . . . 4 a 6,5 cm

Johnson e Kavanagh (1968), discutem o problema do assentamento permissível citando e transcrevendo diversos autores. Apresentam os três critérios (assentamento total, inclinação, distorção) referindo que só o assentamento total é independente da rigidez da estrutura. Sugerem um assentamento total máximo permissível de 1" (2,54 cm) para solos arenosos e em todos os casos de assentamentos rápidos. Sugerem 3" (7,62 cm) sempre que haja consolidação lenta.

O assentamento total a considerar não deve incluir os assentamentos verificados a curto prazo nem aqueles correspondentes às fundações, elementos do andar térreo, ou aterros prévios.

---

\* Indian Standards

As sobrecargas ocasionais ou que não permaneçam tempo suficiente para provocar assentamentos relativamente consideráveis também não devem ser contadas para cálculo dos assentamentos.

Citam ainda o Israel Standard Code of Practice que especifica:

Assentamentos diferenciais

- para pórticos abertos de aço e estrutura de betão armado . . . . . 0,002L a 0,005L
- para filas de pilares com paredes de blocos de betão . . . . . 0,0005L a 0,001L

3.8 - Lamb e Whiteman (1969, pág. 201) discutem a questão do assentamento admissível, indicam o assentamento total, a inclinação e o movimento diferencial (distorção angular  $\delta/l$ ) transcrevendo quadro e figuras dos trabalhos de Sower e Bjerrum. Para tanques de aço para armazenamento de fluidos indicam ainda:

- a) - alguns tanques que assentaram mais de 60" (1,5 metros) continuam em serviço;
- b) - outros porém com assentamentos de 7" (17,8 cm) romperam estruturalmente;
- c) - no projecto de fundações de tanques são usualmente admitidos assentamentos entre 1 a 18 polegadas (2,54 a 45,7 cm).

Refere ainda que radares de precisão podem ser inutilizados com  $\delta/l = 1/50000$ .

Vardé, Nunez, Bolognesi e Moretto (1971) com base em experiência na Argentina, concluíram que são admissíveis assentamentos distorcionais de 1/30 entre a periferia e o centro de tanques de armazenamento de líquidos, e de 1/100 a 1/150 entre pontos da periferia, desde que o enchimento seja cuidadoso durante a prova hidráulica dos tanques (1.º enchimento) por forma a permitir uma adaptação da estrutura e do solo. Como é sabido o assentamento em solos homogéneos é maior no centro que na periferia, havendo sempre um assentamento diferencial  $\delta$ . Se for dada à base do depósito uma contra-flecha  $\delta/2$ , o assentamento diferencial  $\delta$  corresponde a uma flecha  $\delta/2$ . Esta inversão da flecha exige uma previsão cuidadosa dos assentamentos e um enchimento adequado para ajustamento do conjunto estrutura-solo da fundação.

QUADRO VI  
ASSENTAMENTO PERMISSÍVEL

Tipo de movimento	Factores limitantes	Assentamento máximo
Assentamento total	Drenagem	15,2 a 30,5 cm
	Acesso	30,5 a 61 cm
	Probabilidade de assentamento não uniforme:	
	Estruturas de paredes de alvenaria	2,54 a 5,08 cm
Estruturas aporricadas	5,08 a 10,16 cm	
Chaminés, silos e placas	7,82 a 30,5 cm	
Inclinação	Estabilidade contra o derrubamento	Depende da altura e largura
	Inclinação de chaminés e torres	0,004
	Rolamento de camiões, etc.	0,01
	Armazenamento de mercadorias	0,01
	Operação de máquinas em teares de algodão	0,003
	Operação de máquinas-turbogeneradores	0,0002
	Carris de grua	0,003
	Drenagem de pavimentos	0,01-0,02
Assentamento diferencial	Muros altos e contínuos de tijolo	0,0005-0,001 l
	Edifícios industriais de um andar, em tijolo; paredes fendilhando	0,001-0,002 l
	Fendilhamento de estuques (gesso)	0,001 l
	Edifícios aporricados de betão armado	0,0025-0,004 l
	Edifícios de paredes contínuas de betão armado	0,003 l
	Pórticos contínuos, de aço	0,002 l
Pórticos simples, de aço	0,005 l	

NOTA - l = distância entre colunas adjacentes ou entre quaisquer dois pontos que assentam diferentemente. Os valores mais elevados aplicam-se para assentamentos mais regulares e estruturas mais tolerantes. Valores mais baixos aplicam-se para assentamentos irregulares ou estruturas críticas.

A distorção de 1/30 permite assentamentos totais de 50 cm no centro e 25 cm na periferia considerando  $\delta/2$ .

A distorção de 1/100 ou 1/150 permite assentamentos totais na periferia variando entre 12 e 24 cm.

3.9 – Sower (1963), apresentou uma síntese de muito interesse baseada nos trabalhos publicados à data e ainda em estudos realizados no George Institute of Technology. O Quadro VI corresponde a essa síntese e nele é sugerido, para cada caso, o tipo de deformação a considerar (assentamento total, inclinação, ou assentamento diferencial) bem como o valor aceitável.

*(continua na GEOTECNIA 19)*