

# NOTAS ACERCA DO COMPORTAMENTO DE BARRAGENS DE TERRA SOB ACÇÕES SÍSMICAS

Remarks on the behaviour of earth dams under the action of earthquakes

por

JOSÉ DE BRITO FOLQUE\*

EMANUEL MARANHA DAS NEVES\*\*

FERNANDO ALMEIDA GUEDES DE MELO\*\*\*

RESUMO - Passa-se em revista os principais métodos de cálculo da estabilidade de barragens de terra em relação a solicitações sísmicas. Dá-se particular atenção ao método proposto por Newmark e apresenta-se uma nova formulação em que, com base nas características reoló-gicas do material constituinte, se aponta as vias para calcular a deformação residual de uma barragem.

SYNOPSIS - The principal methods for calculating the stability of earth dams with regard to earthquake actions are briefly described. Particular attention is paid to the method proposed by Newmark, and a new formulation is presented, which, based on the rheologic cha-racteristics of the material that constitutes the dam, points out the way to compute the residual displacements of a dam.

O problema do comportamento de barragens de terra quando subme-tidas à acção dum sismo deve ser encarado sob três aspectos funda-mentais:

a) Determinação da aceleração do terreno de fundação da barra-

---

\*Eng<sup>o</sup>.Civil, Chefe da Divisão de Fundações do LNEC

\*\*Eng<sup>o</sup>.Civil, Especialista em Geotecnia do LNEC

\*\*\*Eng<sup>o</sup>.Civil, Especialista em Geotecnia do LNEC

gem devida ao sismo,

- b) Cálculo das acelerações induzidas no corpo da barragem,
- c) Estudo do comportamento do material sob a acção das solicitações dinâmicas resultantes.

Os dois primeiros pontos não constituem objectivo deste trabalho. Acrescenta-se apenas que a aceleração a considerar para o terreno de fundação terá de basear-se no estudo da sismicidade da região e que, quanto ao segundo ponto, se dispõe hoje em dia de teorias razoáveis para calcular a "resposta" em termos de acelerações de barragens de terra sujeitas a sismos com movimentos predominantemente horizontais. Estas teorias, embora baseando-se em regra em equações constitutivas do tipo elástico linear, dão mesmo assim informações aceitáveis sobre a "resposta". Como exemplo podem citar-se os trabalhos de Ambraseys (1), Chopra e al. (2) e Frazier (3).

Neste trabalho fazem-se algumas considerações acerca do último dos três pontos atrás referidos.

A avaliação da segurança duma barragem de terra quando actuada por um sismo tem sido abordada por algumas vias e segundo processos mais ou menos elaborados.

Um processo muito generalizado e ainda hoje utilizado consiste em estudar o equilíbrio estático resultante da introdução, no sistema de forças actuante antes do sismo, duma força horizontal obtida quer pela aplicação dum dado coeficiente sísmico, quer a partir do conhecimento da aceleração em cada elemento de volume da barragem.

Não se entra pois em linha de conta com as diferenças de comportamento do solo quando em regime estático ou dinâmico.

Mais recentemente tem-se procurado uma maior aproximação da realidade tentando conhecer quais as características reológicas do comportamento do solo para solicitações vibratórias e introduzindo-as no cálculo da estabilidade. Essas características podem ser determinadas por intermédio de ensaios laboratoriais conduzidos com solicitações que tentam reproduzir as dos sismos.

Fazendo intervir num cálculo de equilíbrio estático a resistência do solo medida nas condições atrás referidas é possível de determinar um coeficiente de segurança.

Um cálculo conduzido desta maneira pressupõe, para que o coefi

ciente de segurança tenha o significado habitual, que a força sísmica actuante se mantenha com um valor constante ao longo do tempo, o que é muito mais pejorativo para o material do que aquilo que realmente sucede. Por isso estes métodos, designados usualmente por pseudo-estáticos, conduzem a sobredimensionamento das obras.

Como durante um sismo os maciços são submetidos a forças que, apenas em curto intervalo de tempo se sobrepõem às já instaladas, pode admitir-se que ao longo duma provável superfície de escorregamento o material plastifique durante esse intervalo de tempo.

Raciocinando em termos do que anteriormente ficou exposto resultaria para esta situação um coeficiente de segurança não satisfatório e, implicitamente, a zona do maciço definida por essa superfície deslocar-se-ia relativamente à parte restante.

Embora se instale para todos os efeitos uma situação de rotura (traduzida por um coeficiente de segurança inferior à unidade) dado o curto prazo de actuação dum sismo, a situação evanesce rapidamente e o efeito do abalo traduz-se apenas num deslocamento residual. Seed<sup>(4)</sup> e Newmark<sup>(5)</sup> fazem sobre o assunto clarividentes considerações concluindo que mesmo que as tensões venham a exceder nesse curto intervalo de tempo as de cedência, elas podem não causar danos significativos na barragem.

O julgamento da grandeza dos deslocamentos deste tipo, a prever para uma dada barragem, poderá então servir de base para o dimensionamento da obra.

Um dos métodos que se enquadra bem nesta formulação é o proposto por Newmark que em seguida se analisa.

Considere-se uma barragem que durante o intervalo de tempo  $t_0$  sofre um abalo sísmico que lhe comunica uma aceleração  $a$  (Fig. 1) e

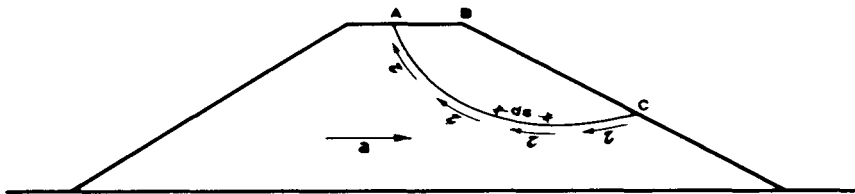


Fig. 1

seja  $\overline{AC}$  uma superfície potencial de deslizamento. A parte inferior à superfície  $\overline{AC}$ , actuada pela aceleração  $a$  durante o intervalo de tempo  $t_0$ , entrará em movimento com uma velocidade constante e de valor  $a \cdot t_0$  (Fig. 2).

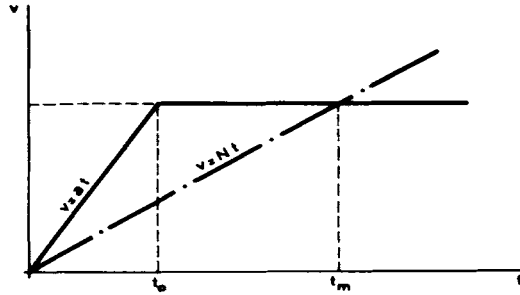


Fig. 2

Considera o autor que a plastificação da superfície  $\overline{AC}$  é simultânea com a aplicação da força sísmica. Sendo assim, as forças transmitidas à cunha ABC não podem exceder o valor  $T$  dado por

$$T = \int_A^C z \, ds$$

Se  $m$  a massa da referida cunha tem-se que

$$T = m N$$

em que  $N$  será a aceleração do elemento que se pretende estudar. Nestas condições o movimento desse elemento dá-se com velocidade obedecendo à lei

$$v = Nt$$

representada no diagrama da figura 2. É de notar que o movimento acelera mesmo para valores  $t > t_0$  o que significa que continuam mobilizadas as forças  $z$  até haver igual velocidade das partes superior e inferior, isto é, até cessar o seu movimento relativo, facto que se verifica para  $t = t_m$ .

Admitindo que o sismo se limita ao que ficou descrito a defor-

mação da barragem será dada pela diferença dos deslocamentos de cada uma das partes.

Assim tem-se que a cunha ABC no tempo  $t_m$  desloca-se de

$$\delta_1 = \frac{1}{2} N t_m^2$$

No mesmo intervalo de tempo o corpo da barragem deslocar-se-á de

$$\delta_2 = \frac{1}{2} a t_o^2 + a t_o (t_m - t_o)$$

O deslocamento relativo será pois

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_1 - \delta_2 = \frac{1}{2} N t_m^2 - \left[ \frac{1}{2} a t_o^2 + a t_o (t_m - t_o) \right] \\ &= \frac{1}{2} N t_m^2 + \frac{1}{2} a t_o^2 - a t_o t_m \end{aligned}$$

Para  $t = t_m$  as velocidades igualam-se e vem

$$V = a t_o = N t_m$$

donde  $t_m = \frac{V}{N}$  e  $t_o = \frac{V}{a}$  e o deslocamento relativo será dado por

$$\delta = \frac{V^2}{2N} + \frac{V^2}{2a^2} - \frac{V^2}{N}$$

Vem portanto que, conhecida a máxima velocidade do solo (deduzida da aceleração máxima que por hipótese é conhecida) resta determinar o valor da tensão de plastificação  $Z$  ao longo da superfície de escorregamento para obter  $N$  e consequentemente  $\delta$ , grandeza do deslocamento residual da barragem ao longo da superfície de escorregamento.

As decisões a tomar sobre o dimensionamento da obra basear-se-ão no julgamento do valor de  $\delta$ .

O ponto mais questionável desta formulação de Newmark reside no facto de postular plastificação completa do material durante todo o prazo de actuação do impulso o que quer dizer que durante esse in-

tervalo de tempo, geralmente muito curto, não se entra em consideração com efeitos de viscosidade do solo. Admitiu-se pois que uma massa de solo sujeita à acção de forças sísmicas plastificaria, entrando em movimento para cima da zona plastificada como se estivesse livre de ligações retardadoras do seu movimento. No fundo trata-se do estudo cinemático do movimento relativo de dois corpos com ligação plástica, situação que se deve afastar muito da realidade.

Parece interessante, em face disto, tentar uma abordagem do problema com alguns pontos de contacto com o método de Newmark mas de formulação algo diferente.

Seja uma barragem de que se conhece o círculo crítico de deslizamento AB (Fig. 3).

Admite-se que são conhecidas as acelerações induzidas por um sismo para várias alturas resultando a distribuição de forças sísmicas representada por ① na fig. 3.

Pode-se determinar, para cada fatia, as forças horizontais que provocariam a plastificação do material utilizando como primeira aproximação o método de Fellenius (distribuição ② na fig. 3).

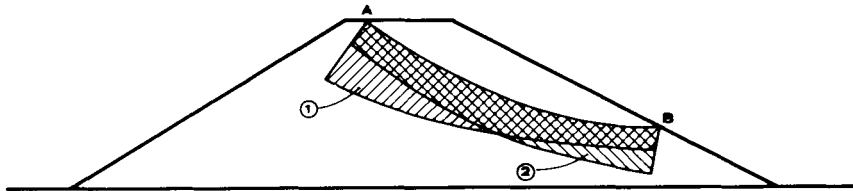


Fig. 3

Se a área ② for superior à área ① não haverá plastificação geral devido ao sismo ao longo de AB, sendo as deformações resultantes certamente pequenas. A estabilidade é então demonstrável, neste caso, por raciocínios do tipo dos usados nos métodos pseudo-estáticos

Pelo contrário, se a área ② for inferior à área ① gerar-se-á uma situação de plastificação total ao longo da superfície AB. Para melhor analisar este último caso admita-se um ensaio conduzido com uma

tensão de corte constante  $\tau_c$  e igual à tensão de plastificação. O ensaio conduzirá a um diagrama do tipo do que se apresenta na figura 4

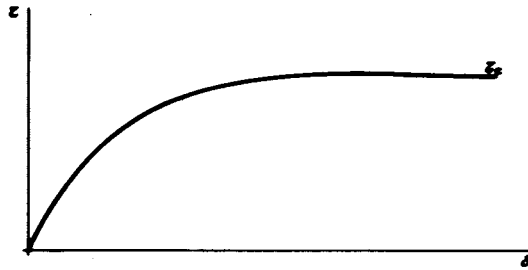


Fig. 4

Seja  $\tau_1$  o valor médio correspondente à distribuição ① da figura 3. Consoante  $\tau_1$  seja menor, igual ou maior que  $\tau_c$ , assim se obtém, num diagrama de deformação com o tempo, as curvas da figura 5.

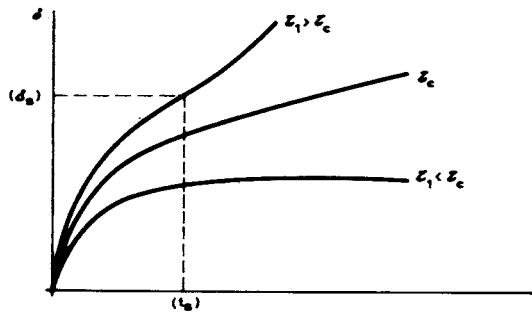


Fig. 5

Arbitrando o tempo do sismo ( $t_s$ ) a deformação tangencial para o caso considerado ( $\tau_1 > \tau_c$ ) é conhecida directamente a partir do diagrama e será  $\delta_s$ . Esta curva seria determinada em laboratório sobrepondo, num provete consolidado anisotròpicamente para tensões análogas às instaladas prèviamente no maciço, uma tensão deviatóri

ca de grandeza e frequência análoga à introduzida por uma força sísmica.

É porém possível resolver o problema mesmo que não se disponha dos resultados destes ensaios admitindo, com essa finalidade, certas hipóteses. Com efeito a derivada da curva ( $\delta$ ,  $t$ ) para  $\tau = \tau_c$ , obtida por ensaio de corte a tensão constante e regime estático, dá a viscosidade do material:

$$\tau_c = \eta \frac{d\gamma}{dt}$$

Para  $\tau = \tau_1$  e admitindo que a viscosidade independe da tensão de corte tem-se

$$\eta = \frac{\tau_1}{\frac{d\gamma}{dt}} \quad \text{donde}$$

$$d\gamma = \frac{\tau_1}{\eta} dt \quad \text{e portanto}$$

$$\gamma = \frac{\tau_1}{\eta} t$$

Será este o deslocamento residual que é de esperar ao longo da superfície de deslizamento e em cujo valor se poderá basear o dimensionamento da obra.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBRASEYS, N.M. — On the seismic behavior of earth dams. Proc. of the World Conf. on Earthquake Eng. Tokyo, Japan, 1960.
- CHOPRA, A.K., DIBAJ, M., CLOUGH, R.W., PENZIEN, J., SEED, H.B., — Earthquake analysis of earth dams. 4ª Conferência Municipal de Engenharia Sísmica. Santiago do Chile, 1969.
- FRAZIER, G.A. — Vibrational characteristics of three-dimensional solids, with applications to earth dams. PhD Thesis, Montana State University, 1969.
- SEED, H.B. — Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proc. of the A.S.C.E. Vol. 92 No. SM 1 Jan. 1966.
- NEWMARK, N.M. — Effects of earthquakes on dams and embankments, Gêo technique, June, 1965.