

# LIQUEFACÇÃO DE SOLOS ARENOSOS\*

## Liquefaction of sandy soils

por  
JOSÉ FOLQUE\*\*

RESUMO - Com base nos mais recentes "states-of-the-art" passam-se em revista as mais importantes questões da problemática de liquefacção de areias. Resumem-se métodos exactos e métodos simplificados para determinar a susceptibilidade à liquefacção. Faz-se referência aos fenómenos de indução e dissipação de pressões neutras. Aponta-se a discrepância entre as técnicas refinadas de ensaios laboratorial e análise de resultados e a pequena fiabilidade dos ditos resultados no que se refere à aplicação a casos práticos devido à pequena representatividade das amostras.

SYNOPSIS - A review of the most recent states-of-the-art allows a comprehensive revision of the questions involved in the major problems of liquefaction. Exact and simplified procedures of determining the liquefaction potential are revised. The question of induction and dissipation of pore pressures is dealt with. Criticism is presented concerning the discrepancy between the sophisticated technics used in laboratory tests and the small reliability of the results due to inadequate "representative" samples.

---

\* Manuscrito recebido em Novembro de 1979. A discussão do trabalho está aberta durante um período de três meses.

\*\* Investigador do LNEC

## 1 - INTRODUÇÃO

Os estudos experimentais e quantitativos da liquefacção de solos arenosos devida a solicitações cíclicas começaram há uma vintena de anos. Neste intervalo de tempo, relativamente curto, tem sido espantosa a proliferação de estudos realizados contando-se por centenas os trabalhos publicados sobre o assunto. Efectuar uma recensão bibliográfica da matéria torna-se assim tarefa extremamente árdua. Acontece porém que uma revisão crítica da questão pode ser bastante facilitada porque entretanto alguns autores têm publicado excelentes "state of the art".

Aproveitar alguns dos mais recentes "state of the art" e, a partir deles, passar em revista os trabalhos que representam os enfoques mais actualizados e as tendências mais modernas é esforço que se afigura oportuno e com interesse. Ao mesmo tempo apresentar-se-ão comentários críticos a procedimentos preconizados, alguns muito em voga, que se afiguram controvertíveis.

## 2 - O FENÓMENO LIQUEFACÇÃO

A liquefacção de areias soltas sob a acção de cargas estáticas é um fenómeno bem tratado na Mecânica dos Solos clássica. O seu estudo aprofundado e sistemático foi feito por Casagrande (1936) em termos que, até à data, tudo leva a crer que se possam considerar definitivos.

Já outro tanto não sucede com os mecanismos causais (e o próprio comportamento antecedente) de liquefacção de areias sob solicitações cíclicas; esta matéria tem sido estudada intensamente e as suas implicações não parecem ainda bem esclarecidas.

Reveladora do fundo dubitativo existente é a própria ambiguidade terminológica existente. Seed (1976) num "state of the art" recente sentiu a necessidade de levantar questões terminológicas em nota introdutória.

Propôs a fixação da seguinte terminologia:

a) - Liquefacção - denota uma condição em que o solo exhibe deformação contínua com tensão constante residual de valor muito baixo ou mesmo nulo o que se deve ao aparecimento e manutenção de elevadas tensões na água dos poros que reduzem a um valor muito baixo a tensão efectiva; o aparecimento de pressões intersticiais elevadas que leva a este tipo de liquefacção "verdadeira"

pode ser causado quer por solicitações estáticas quer por solicitações cíclicas.

b) – Liquefacção inicial – designa uma condição em que a pressão da água intersticial, no decurso de aplicação de tensões cíclicas, atinge no fim de cada ciclo o valor da tensão total de confinamento; a constatação de liquefacção inicial independe de implicações no que concerne às deformações que o solo subsequentemente exhibirá; contudo define uma condição que é uma útil base para estudo de várias possíveis formas de comportamento ulterior do solo.

c) – Liquefacção cíclica – refere-se a uma condição em que a aplicação de solicitações cíclicas causa estado de liquefacção inicial e em que subsequentes solicitações cíclicas provocam deformações limitadas, ou devido à resistência remanescente do solo ou porque esta dilata, a pressão intersticial cai e o solo estabiliza para as cargas aplicadas.

Convirá ter presente que outros Autores (Casagrande, Castro) designam a “liquefacção cíclica” por “mobilidade cíclica” e Seed, Arango e Chan (1975) propõem o termo “liquefacção inicial com deformação limitada”.

Para explicar a ocorrência de liquefacção Seed (1976) propõe um mecanismo que se apresenta algo questionável. A seguir é ele resumido e comentado.

Tenha-se presente que os estados de tensão em jogo nos fenómenos envolvidos são os que se representam na fig. 1: no elemento A, sujeito inicialmente a um estado anisotrópico de tensão, sobrevêm tensões tangenciais cíclicas, reversíveis, com predominância em grandeza das tensões tangenciais horizontais.

Atente-se agora na Fig. 2 que representa o andamento do índice de vazios com a tensão média (ou tensão principal máxima num elemento lateralmente confinado). No ponto A os ciclos iniciais de solicitação tendem a fazer diminuir o volume do solo (o que ocorreria em situação drenada processando-se a variação de índice de vazios  $\Delta e$ ). Em situação não drenada esse efeito é contrariado pela água dos poros que entra em pressão; a correspondente diminuição de tensão efectiva originaria a expansão BC do elemento de solo donde se segue que este mantém o volume constante mas sofre um acréscimo de pressão intersticial  $\Delta u$ . Se o solo for constituído por areia solta dar-se-á liquefacção verdadeira e subsequentes ciclos de solicitação provocam deformação incessante do solo com pressão residual efectiva,  $\delta'_p$  muito reduzida. Se a areia for compacta os ciclos subsequentes da solicitação provocarão dilatação com anulação (ou substancial redução de  $\Delta u$ ) cessando a deformação por o solo atingir equilíbrio visto ser capaz de resistir sem deformações adicionais a esses ciclos de solicitação; donde a designação de “liquefacção inicial com deformação

limitada". Não explicita Seed que o esquema apontado só terá lógica se para os primeiros ciclos de solicitação predominarem as tensões volumétricas sobre as distorcionais. De facto só assim se explicará que haja tendência para diminuir o volume do solo. Por outras palavras, se houvesse desde o início predominância das componentes distorcionais o solo deveria logo exhibir dilatância e não sofreria liquefação inicial. Esta demonstração não é feita parecendo portanto que o esquema explicativo proposto necessita de contribuições complementares (ou de revisão completa).

Castro (1976) não adianta explicações físicas para o processo expondo-o fenomenologicamente. Apresenta a questão nos seguintes termos: de acordo com

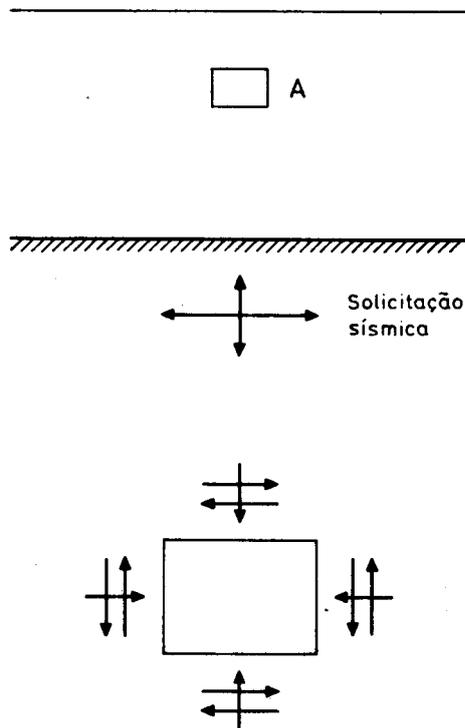


Fig. 1

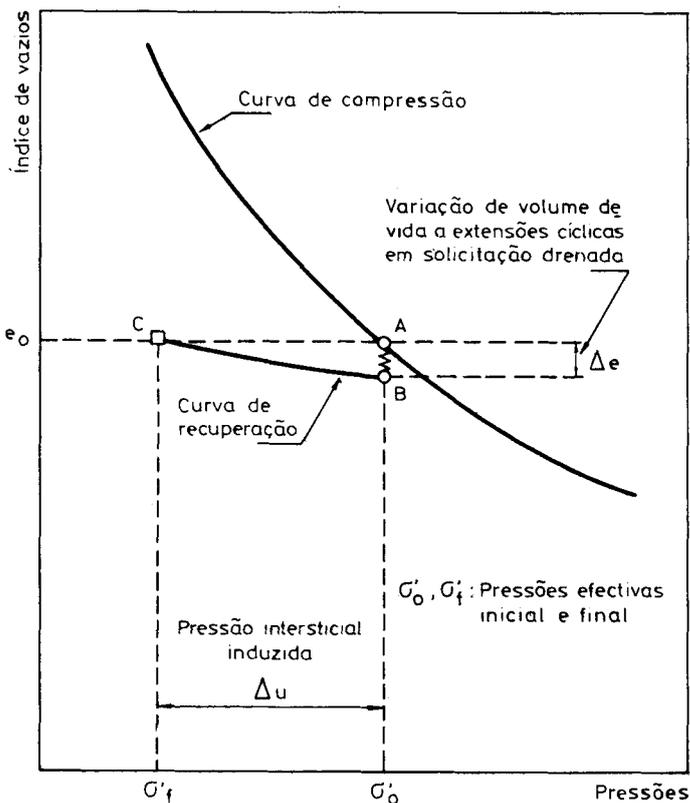


Fig. 2

a Fig. 3 tome-se um elemento de volume de areia solta (ponto C), solicitado monotónica ou ciclicamente: as pressões intersticiais crescem e o solo liquefaz. Seja um elemento de volume de solo denso (ponto D); solicitado monotonicamente o seu estado de tensão efectiva desloca-se para a direita (desenvolvimento de tensões neutras negativas); solicitado ciclicamente acumula deformações com o desenvolvimento de pressões intersticiais positivas.

Parece que por enquanto não há possibilidade, com os conhecimentos disponíveis, de ter melhor introspecção no processo. Mas as circunstâncias apontadas mostram como são precários os conhecimentos básicos da problemática envolvida. Obviamente que o tratamento fenomenológico é sempre possível mas tendo presentes as limitações que o seu carácter imediatista lhe confere.

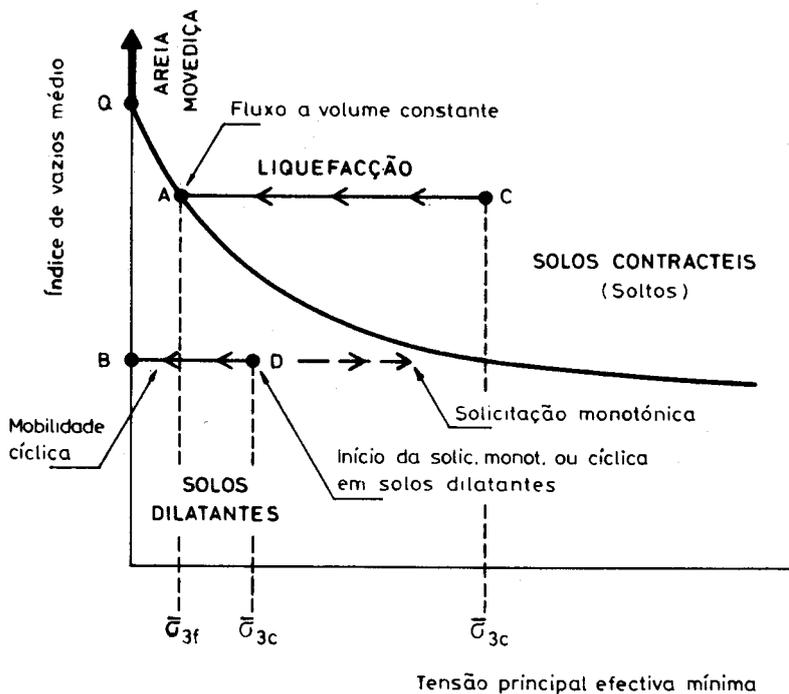


Fig. 3

Para o caso de liquefação verdadeira (areias soltas) o esquema explicativo proposto não suscita questionação: quer as solicitações volumétricas quer as distorcionais originam incrementos da pressão de água intersticial. Assim se explica que Finn, Lee e Martin (1976) tenham adiantado, admitindo o mencionado esquema, uma proposta de cálculo analítico de previsão das pressões neutras desenvolvidas para um certo espectro de solicitação. A parte experimental do método resume-se à determinação dos parâmetros de equações constitutivas das areias, equações que servem de base à aludida previsão. No âmbito de experiências de laboratório as pressões previstas coincidem com as medidas em amostras ensaiadas nas mesmas condições que foram tomadas para os cálculos de previsão. É assunto a que se voltará mas para já há que apontar o talvez despropositado requinte, tendo em atenção a prática da Engenharia, de um método com este cariz.

### 3 - MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO DE DEPÓSITOS ARENOSOS

Os métodos para avaliação da susceptibilidade à liquefacção de depósitos arenosos por acção de solicitações sísmicas podem classificar-se em três grandes grupos.

*a)* - Métodos em que, quer as tensões cíclicas induzidas na massa terrosa, quer o número de ciclos significativos e a sua distribuição no tempo, são computados usando vias simplificadas.

*b)* - Métodos em que as tensões cíclicas induzidas no solo e sua "história" são deduzidas por determinação da resposta da massa terrosa a uma dada solicitação cíclica imposta ao substracto.

*c)* - Métodos empíricos baseados na comparação das características geotécnicas de um dado local a estudar com as características de locais onde liquefacções têm ocorrido.

Os métodos *a)* e *b)* requerem ensaios de laboratório, sobre amostras representativas, para averiguar o comportamento do solo quando sujeito às tensões cíclicas calculadas. Os resultados são usualmente apresentados sob a forma de interdependência da relação tensão cíclica/tensão de "overburden" e do número de ciclos necessário para provocar a liquefacção (ou deformação apreciável e reputada inconveniente). Estes os dados que se comparam com os deduzidos dos cálculos a que em *a)* e *b)* se fez menção.

Por serem de uso mais generalizado comentar-se-ão só os métodos *a)* e *c)*.

- Métodos em que se calculam, por via simplificada, as tensões cíclicas induzidas no solo - O mais divulgado destes métodos foi proposto por Seed e Idriss (1971) e consiste fundamentalmente em considerar que uma série de ciclos de tensão uniformes é equivalente nos seus efeitos à sequência irregular de impulsos causados pelo sismo. O maciço é discretizado em elementos colunares considerados como vigas a trabalhar ao corte. A expressão que dá a grandeza da tensão cíclica,  $\zeta$ , induzida num ponto do maciço é

$$\zeta = 0,65 \gamma h/g \cdot a_{\max} \cdot r_d \quad (1)$$

em que  $\gamma$  e  $h$  são, respectivamente, o peso específico e a profundidade do ponto considerado;  $a_{\max}$  denota a máxima aceleração induzida pelo sismo à superfície do terreno;  $r_d$ , grandeza com valor inferior à unidade, é um coeficiente que traduz o efeito de profundidade para o qual se apresentam valores preconizados na Fig. 4.

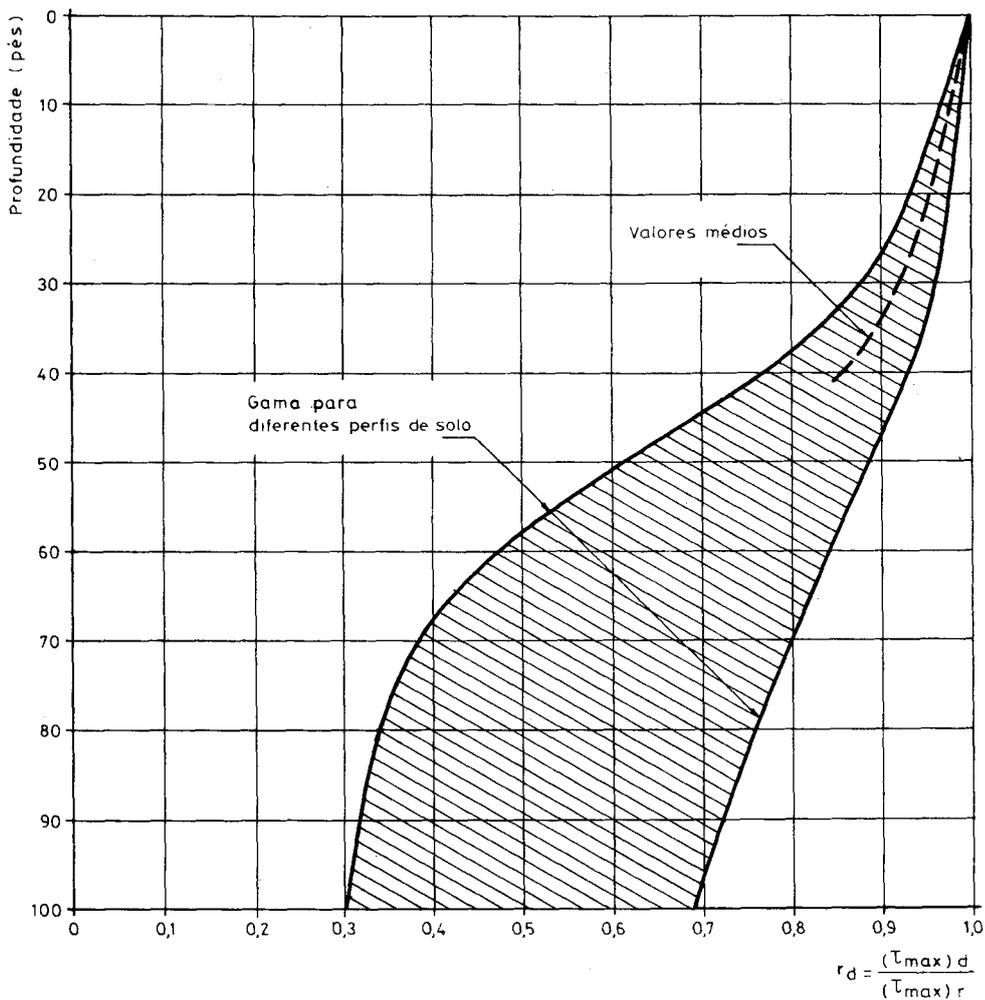


Fig. 4

No que se refere à máxima aceleração há correlações estabelecidas entre esta grandeza, a magnitude e a distância ao foco (Seed, Murarka, Lysmer e Idriss, 1975). As Figs. 5, 6 e 7 apresentam correlações entre acelerações à superfície e distâncias ao foco para diversos tipos de terreno (rocha, solo rijo, solo incoerente profundo) e para um sismo de magnitude 6,5.

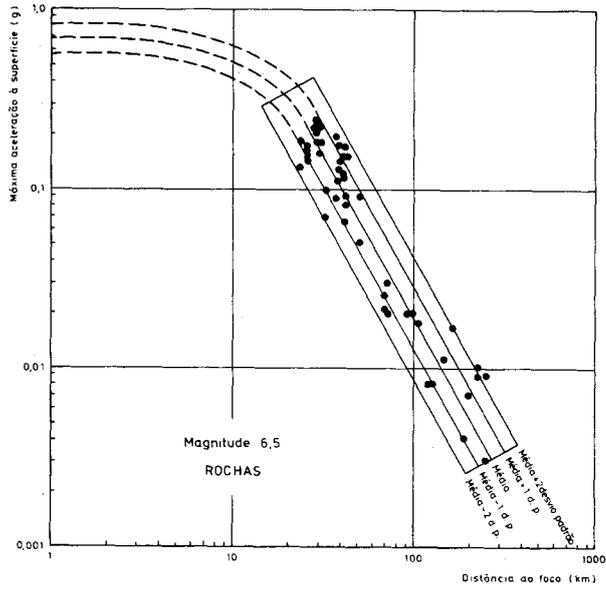


Fig. 5

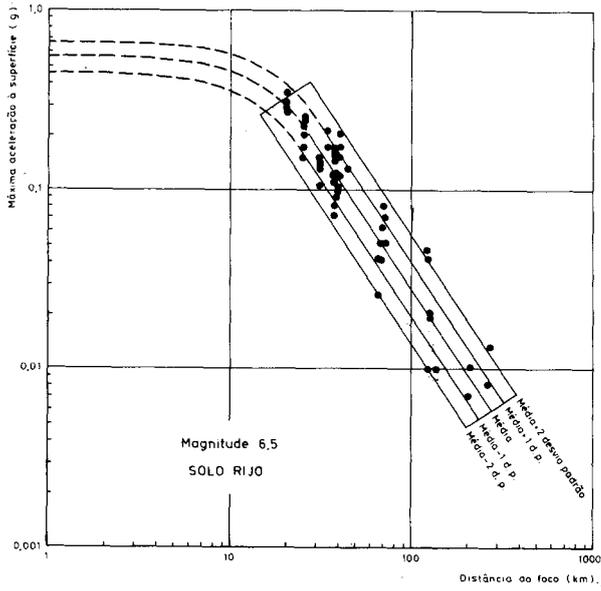


Fig. 6

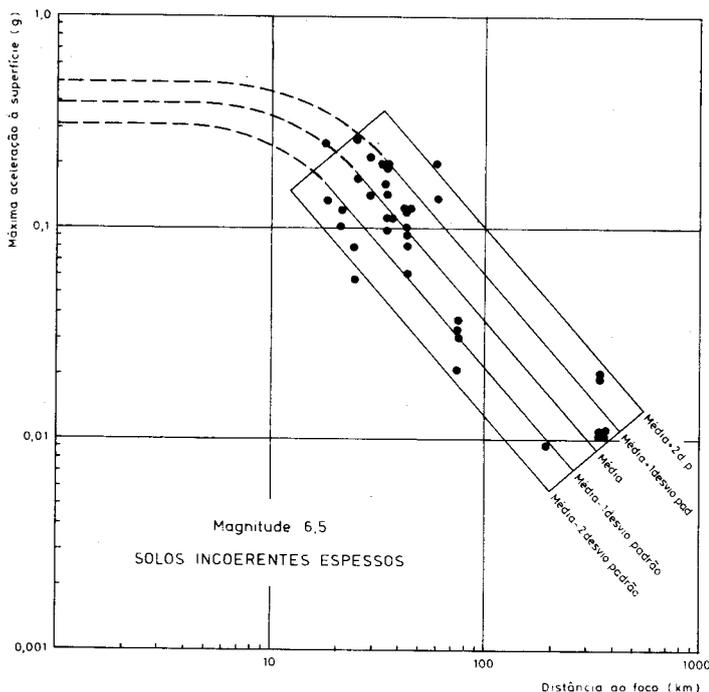


Fig. 7

No que se refere ao número de ciclos equivalentes, função como é óbvio da magnitude, é proposta a correlação da Fig. 8. Esta proposta resulta de uma análise estatística de oscilogramas reais registados. O método usado para achar o número de impulsos uniformes que produz o mesmo efeito de uma série de impulsos irregulares está resumido na Fig. 9. Se se tomar uma sequência como se mostra na Fig. 9a) facilmente se deprende que os quatro ciclos irregulares da sequência com valor máximo  $\zeta_M$  têm efeito equivalente a 5,1 ciclos de valor uniforme  $0,65 \zeta_M$ .

O prosseguimento da análise do problema em questão requer um estudo de laboratório para avaliar o comportamento de amostras representativas quando sujeitas às solicitações calculadas. Trata-se de averiguar se há ocorrência de liquefacção verdadeira e, caso contrário, se as deformações induzidas serão ou não aceitáveis. Este tema, ensaios de laboratório, será tratado adiante com maior desenvolvimento.

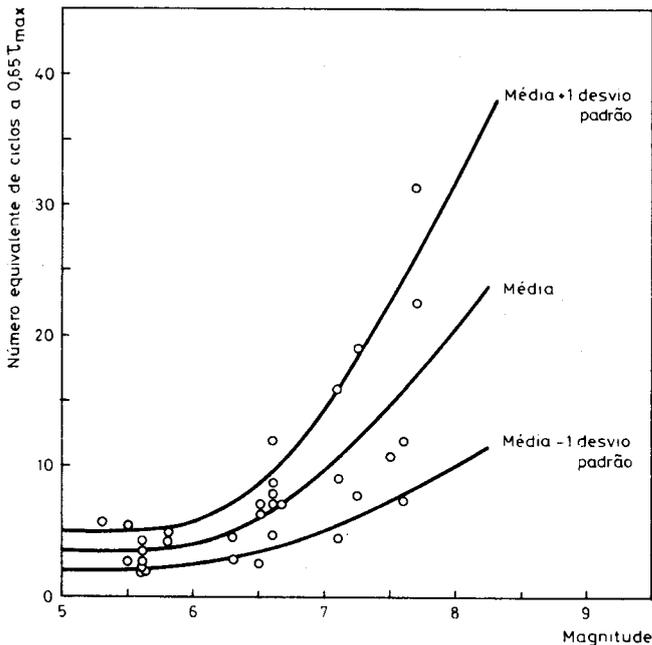
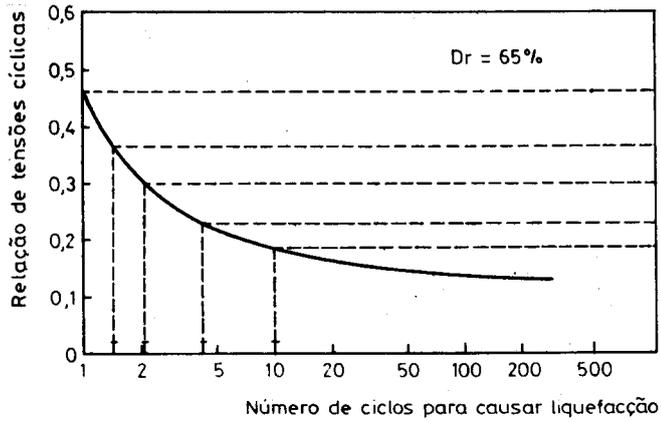


Fig. 8

- Métodos empíricos baseados em comparação com locais onde ocorreu liquefacção - O sismo de Niigata de 1964 foi indubitavelmente a escorva para o surto de estudos relativos a liquefacção de areias a que nos últimos anos se tem assistido. Diversos investigadores japoneses, logo a seguir ao sismo, procederam a um levantamento, reproduzido na Fig. 10, de resultados em termos de ensaios SPT que são característicos de solos em que ocorreram ou não significativas liquefacções. Na mesma figura realça-se a proposta de Ohsaki (1966) para fundamentar um método empírico, muito simples, de resolução de problemas práticos: solos situados à direita da curva de Ohsaki não sofreriam liquefacção, solos à esquerda da mencionada curva seriam susceptíveis de a sofrer.

Como primeira reacção há que comentar que muito pequena garantia existe em relação à fiabilidade deste método para um local diferente de Niigata e para sismos com intensidades diferentes. Posteriormente porém uma mais vasta colectânea de resultados foi sendo compilada que permitiu basear a proposta de Seed e Peacock (1971) apresentada na Fig. 11. Nela se correlaciona a relação de tensão cíclica, que causa liquefacção  $\zeta/\sigma'_o$ , com densidades relativas medidas por ensaio SPT. Tenha-se presente que o valor  $N_1$  do ensaio SPT

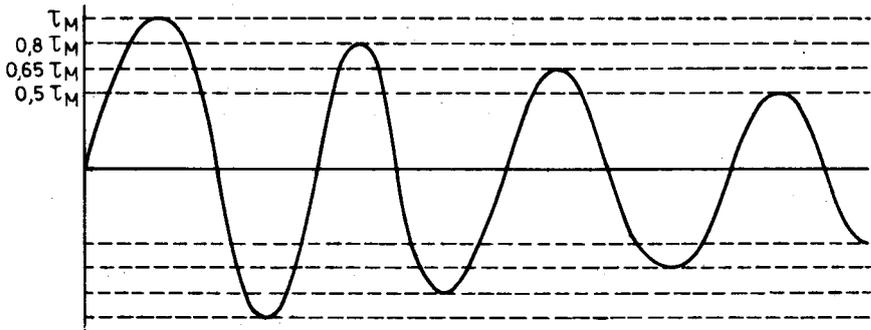


1 ciclo a  $\tau_M = 1,4$  ciclos a  $0,8\tau_M$

1 ciclo a  $\tau_M = 2,1$  ciclos a  $0,65\tau_M$

1 ciclo a  $\tau_M = 4,2$  ciclos a  $0,5\tau_M$

*Fig. 9*



**EQUIVALÊNCIA:**

1 com  $\tau_M \longrightarrow 2,1$  com  $0,65\tau_M$

1 com  $0,8\tau_M \longrightarrow \frac{2,1}{1,4} = 1,5$  com  $0,65\tau_M$

1 com  $0,65\tau_M \longrightarrow 1$  com  $0,65\tau_M$

1 com  $0,5\tau_M \longrightarrow \frac{2,1}{4,2} = 0,5$  com  $0,65\tau_M$

**SEQUÊNCIA IRREGULAR  $\longrightarrow$**

$\longrightarrow 2,1 + 1,5 + 1 + 0,5 = 5,1$  com  $0,65\tau_M$

*Fig. 9-a*

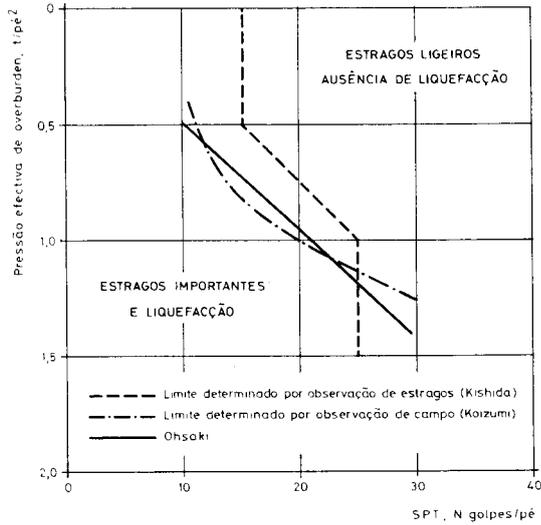


Fig. 10

é o valor corrigido para a profundidade de acordo com a clássica proposta de Gibbs e Holtz, isto é,  $N_1$  será dado por

$$N_1 = C_N \cdot N \quad (2)$$

em que

$$C_N = 1 - 1,25 \log \frac{\sigma'_o}{\sigma'_1} \quad (3)$$

$\sigma'_o$  – tensão efectiva de “overburden” no ponto em que é feito o ensaio  
 $\sigma'_1 = 1 \text{ t/pé}^2$

A relação de tensão cíclica correspondente a um dado sismo será dada por (4) que obviamente coincide com a expressão (1) dividida por  $\sigma'_o$ .

$$\frac{\zeta}{\sigma'_o} = 0,65 \frac{a_{\text{máx}}}{g} \cdot \frac{\sigma_o}{\sigma'_o} \cdot r_d \quad (4)$$

em que

- $a_{\text{máx}}$  – máxima aceleração induzida pelo sismo à superfície do terreno
- $\sigma_o$  – tensão total de “overburden” à profundidade considerada
- $\sigma'_o$  – tensão efectiva à mesma profundidade
- $r_d$  – factor de redução variando desde 1 à superfície até 0,9 à profundidade de 30 pés

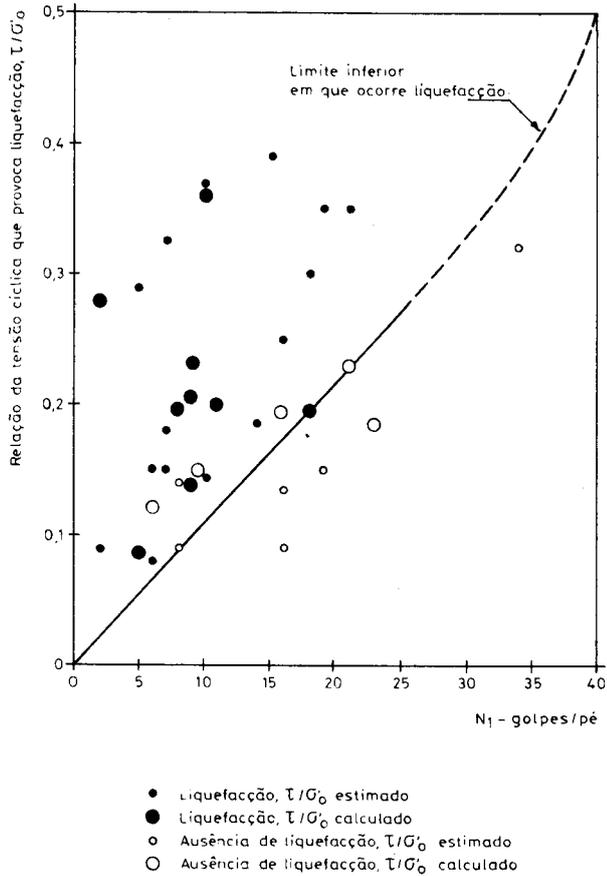


Fig. 11

A curva da Fig. 11 está baseada fundamentalmente em sismos com magnitude por volta de 7,5.

Seed (1976) reconhece que certas críticas podem ser feitas ao método. Nomeadamente:

- a parte superior da curva de correlação está fundamentada em poucos pontos
- o método ignora factores importantes tais como a duração do sismo.
- o ensaio SPT pode não ser um bom indicativo das características da areia que governam a sua resistência à liquefação.

À primeira das objecções só há que responder que, para defesa de futura utilização do método, dados complementares têm de ser recolhidos. A segunda

refere-se a deficiências gerais de métodos deste tipo mas que, exactamente por eles serem empíricos, podem ser consentidas se o suporte experimental, de situações reais observadas for adequado. No que se refere às potencialidades para o fim em vista do ensaio SPT Seed faz notar que um certo número de características são concomitantes nos seus efeitos quer nos resultados dos ensaios SPT quer na resistência à liquefacção. Nomeadamente ambas as grandezas são afectadas do mesmo modo por:

- a densidade relativa
- o arranjo estrutural
- o "envelhecimento" do depósito
- o valor de  $k_0$

Uma outra objecção ao método pode ir buscar-se ao facto de o ensaio SPT ser um ensaio de realização frequentemente eivada de erros associados a descuidos e negligências no modo operativo. Obviamente uma cuidada supervisão poderá minimizar estas circunstâncias. Mais força terá uma objecção derivada do facto de o SPT ser um ensaio intrinsecamente não normalizável e bastante grosseiro. Não se compreende como todos os esforços que no domínio de um método com esta conformação se tenham de desenvolver não hão-de tomar por base um ensaio de melhor fiabilidade, designadamente o ensaio CPT (ensaio de penetração estática).

#### 4 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFACÇÃO

O primeiro tipo de ensaio a ser usado e aquele que ainda hoje se encontra mais difundido é o ensaio triaxial em que a uma tensão de confinamento se sobrepõe uma solicitação cíclica distorsional.

Mais recentemente começou a dar-se preferência, nos laboratórios em que estudos desta índole são efectuados com carácter de investigação avançada, a ensaios de corte simples; e ainda com maior refinamento a ensaios de torção em amostras constituídas por uma camada cilíndrica (Cho e al., 1976).

São numerosas as vantagens teóricas do ensaio de corte simples que apresenta por outro lado o inconveniente de ser de técnica operacional mais complicada.

No que respeita à infracção de condições de identidade entre o que se

passa num provete em ensaio triaxial e um elemento de volume do maciço avultam as seguintes discrepâncias:

- heterogeneidade do estado de tensão devida a concentrações junto das placas de topo e base
- rotação de 90° da direcção da tensão principal máxima durante o ciclo de solitação
- constrangimento das deformações podendo a amostra apresentar “estrangulamento”, o que invalida os resultados.

Os ensaios de corte simples reproduzem melhor as condições *in situ*. Em especial a boa representatividade é assegurada usando, em ensaios de mesa vibratória, amostras com uma grande relação comprimento/altura. As singularidades ocorrentes nos topos da amostra são irrelevantes para a resposta que é dominada pelo comportamento da maior parte da massa da amostra que se distribui ao longo do seu comprimento.

Os resultados dos ensaios triaxiais são usualmente apresentados sob a forma da relação  $\frac{\sigma_{ad}}{2 \sigma_3}$  entre a máxima tensão cíclica aplicada e a tensão de confinamento. Nos ensaios de corte simples é habitual apresentar os resultados sob a forma da relação  $\frac{\zeta_h}{\sigma'_o}$ , tensão tangencial aplicada no plano horizontal e tensão normal efectiva inicial no mesmo plano. É óbvio que as duas relações não são idênticas. Admitindo que o ensaio triaxial decorre sem sensíveis constrangimentos de deformação e sem efeitos marcados de concentrações de tensões nos extremos da amostra, os resultados dos dois ensaios podem ser correlacionados:

$$\frac{\zeta_h}{\sigma'_o} = C_r \frac{\sigma_{ad}}{2 \sigma_3}$$

Extensas pesquisas experimentais têm fundamentado o valor a tomar para  $C_r$ :

- para  $k_o = 0,4$  .....  $c_r = 0,6$  a  $0,7$   
 para  $k_o = 1,0$  .....  $c_r = 1,0$

Como comentário adicional a este problema interessará notar que Cho e al. (1976) afirmam, em crítica cerrada aos ensaios laboratoriais, que somente o ensaio de torção em camada cilíndrica pode fornecer resultados válidos. De passagem será de sublinhar que não dizem estes autores como obter amostras representativas de um maciço real para o tipo de ensaios que propõem.

Uma outra afirmação com interesse nesta problemática é feita por Castro (1976) que põe sérias reservas à ocorrência de liquefacção inicial *in situ* mesmo quando amostras “representativas” a exibem em ensaios de laboratório: a liquefacção em laboratório seria consequência de fortes redistribuições de índices de vazios, ocorrentes em amostras mas que não há evidência que ocorram em maciços reais.

## 5 – FACTORES QUE INFLUENCIAM AS CARACTERÍSTICAS DE LIQUEFACÇÃO DE SOLOS *IN SITU*

Tem sido habitual estudar o comportamento de solos arenosos em relação à liquefacção em termos da sua densidade relativa. É frequente encontrar resultados, apontados como válidos para todas as areias, em que se apresenta a relação  $\zeta/\sigma'_o$ , versus densidades relativas. O que equivale a afirmar que qualquer areia, desde que atinja uma determinada densidade relativa, tem um determinado comportamento no que se refere à liquefacção. Contudo, basta uma breve reflexão para mostrar a grosseira simplificação praticada quando assim se afirma: a densidade relativa serve de índice quantificador do comportamento de uma dada areia dentro do campo de variabilidade dos seus comportamentos em função da compacidade; mas não se pode pretender que um dado valor da densidade relativa tenha o mesmo significado para todas as areias, podendo uma areia mal granulometrada de  $D_r = 0,8$  ter pior resposta que uma areia bem granulometrada de  $D_r = 0,5$ .

Tem custado a ultrapassar esta sobre-simplificação estabelecida em torno do conceito de densidade relativa. Na actualidade continuam alguns investigadores a fazer da dita grandeza uma utilização pouco fundamentada. Já se encontra porém, noutros autores, bem explícita a ideia que a densidade relativa não tem as virtualidades descritivas inicialmente admitidas. Mesmo para uma dada areia, e no que respeita à liquefacção, reconhece-se hoje que a compacidade não é determinante única do comportamento. Seed (1976) aponta os seguintes principais factores que condicionam o comportamento de um solo arenoso em relação à liquefacção:

- Compacidade
- Características mineralógicas das partículas
- Estrutura

- Idade do depósito (fenómenos de envelhecimento)
- História prévia de tensões com realce para sismos anteriores
- Estado de tensão horizontal e sobreconsolidação

A ponderação destas circunstâncias levanta perplexidades sobre a validade dos ensaios que até agora se têm efectuado com amostras recompactadas em laboratório. É óbvio, pela análise da listagem apresentada, que ensaios significativos terão de ser efectuados sobre amostras indeformadas colhidas no maciço. Ora é sabido que é praticamente impossível colher tais amostras em maciços arenosos. Põe-se assim a questão da incongruência entre as técnicas refinadas que têm sido desenvolvidas para ensaios de laboratório e a incapacidade desses ensaios para aplicação a casos práticos atendendo a carência em amostras representativas. Parece que, pelo menos por enquanto, se estará confinado a tratar o problema em termos semi-quantitativos e nesta óptica pode-se questionar se ensaios menos refinados não serão suficientes.

## 6 – A INDUÇÃO E DISSIPACÃO DE PRESSÕES NEUTRAS EM DEPÓSITOS ARENOSOS

Um desenvolvimento recente na problemática de liquefacção consiste em tentativas de estudos quantitativos das pressões intersticiais induzidas e dissipadas durante o sismo e após ele.

Conhecida a compressibilidade do solo em carga e descarga e a sua dilatação (variação de volume associada a esforços distorcionais) é possível calcular as tensões neutras induzidas pelos ciclos de solitação imposta, o que implica o estabelecimento de equações constitutivas para o solo. Admitindo por outro lado que o fluxo é unidirecional ascendente (ou radial) e conhecido o coeficiente de permeabilidade é possível calcular a taxa de dissipação das pressões neutras a um certo nível e a sua transferência para níveis adjacentes.

Se as camadas superiores à camada em que a liquefacção ocorre são compressíveis e têm permeabilidade baixa o fluxo ascendente poderá fazer com que a liquefacção se propague podendo ocorrer aí algumas horas após o sismo.

Se a permeabilidade do solo é alta a dissipação de pressões intersticiais pode acompanhar a sua taxa de indução tornando-se a liquefacção um fenómeno que só dura o que durar o sismo.

Os estudos efectuados permitiram fundamentar em bases quantitativas um método de tratamento para minimizar os efeitos da liquefacção: o uso de estacas de brita que promovem a rápida dissipação das pressões neutras associadas ao fluxo radial induzido.

## 7 – COMENTÁRIOS FINAIS

Os estudos de liquefacção de areias, quer nas suas potencialidades de análise teórica, quer nas técnicas de ensaio laboratorial, atingiram um grau de desenvolvimento requintado. Isto levou a uma situação que tem algo de paradoxal. Os conhecimentos adquiridos sobre os mecanismos causais do processo mostram que ele é condicionado por características que nos maciços reais apresentam grande variabilidade e extrema dificuldade em ser medidos. Este facto leva a que se tenha de duvidar da eficácia prática dos estudos laboratoriais que é possível realizar. Com efeito não é possível dispor de amostras para ensaios de laboratório que mantenham as características dos maciços que se sabe serem condicionantes do processo. Por outro lado a adopção de um sismo de projecto contém muito de arbitrário pois que ao adoptar um sismograma tipo de um sismo ocorrido não pode deixar de estar presente a ideia que se deve projectar para um sismo futuro, que certamente não será uma reprodução fiel do sismo de projecto. Há assim uma discrepância acentuada entre os requintes dos métodos de análise e ensaio e as aproximações grosseiras inerentes às amostras possíveis e aos sismos adoptados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASAGRANDE (1937) – “Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of earth fills”, Journal of Boston Society of Civil engineers, Janeiro.
- CASTRO (1976) – Factors affecting liquefaction and cyclic mobility, in “Liquefaction problems in Geotechnical Engineering”, ASCE Annual Convention.
- CHO, RIZZO e HUMPHRIES (1976) – Saturated sands and cyclic dynamic tests, “Liquefaction problems in Geotechnical Engineering”, ASCE Annual Convention.
- FINN, LEE e MARTIN (1976) – An effective stress model for liquefaction, in “Liquefaction problems in Geotechnical Engineering”, ASCE Annual Convention.
- OHSAKI (1966) – NIIGATA earthquake (1964) – “Building damages and soil conditions”, Soil and Foundations, Vol. VI, n.º2.

- SEED e IDRIS (1971) – “Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential”, SM9, ASCE, Vol. 97.
- SEED, ARANGO e CHAN (1975) – “Evaluation of soil liquefaction potential during earthquakes”, Report EERC 75-28, University of California, Berkeley.
- SEED, MURAKA, LYSMER e IDRIS (1975) – “Relationship between maximum acceleration, maximum velocity, distance from source and local site conditions”, Report EERC 75-17, University of California, Berkeley.
- SEED (1976) – Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes, in “Liquefaction problems in Geotechnical Engineering”, ASCE Annual Convention.