

# EROSÃO INTERNA EM SOLOS COESIVOS. FILTROS DE PROTECÇÃO\*

Piping phenomena in cohesive soils. Protective filters

por  
JOSÉ FOLQUE\*\*

RESUMO – Passa-se em revista a mais recente bibliografia sobre a questão com vista a estabelecer a posição actual do problema. Apresentam-se resultados de ensaios em curso no LNEC para comprovação das teorizações propostas e em que particular atenção é dada a uma análise crítica da determinação das características mecânicas intervenientes.

SYNOPSIS – The state-of-the-art of the problem, taking as a basis the more recent published studies, is presented. Searching the confirmation of the proposed theories a series of tests are under way at LNEC in which particular attention is given to a critical review of the available experimental methods for the determination of the involved mechanical characteristics.

## INTRODUÇÃO

Os fenómenos de erosão interna causados por percolação de água em maciços terrosos – frequentemente designados por “piping”, devido a influência da bibliografia de língua inglesa, e recentemente também muitas vezes denominados “sufusão”, nos trabalhos oriundos de países de Leste – são conhecidos de há muito e bem dominados no que respeita ao seu mecanismo e medidas para os contrariar quando os solos em que potencialmente possam ocorrer não possuem coesão. É o caso das areias limpas ou quase limpas, sendo particularmente sensíveis ao fenómeno as areias finas e uniformes.

A mais comum das medidas adoptadas para evitar a ocorrência de “piping” é a disposição de filtros de protecção nos locais de ressurgência

---

\* Manuscrito recebido em Janeiro 1977. A discussão do trabalho está aberta durante um período de três meses.

\*\* Investigador. Chefe da Divisão de Fundações do LNEC.

dos fluxos. Estão bem estudadas e constituem matéria pacífica as regras de dimensionamento e de definição da granulometria dos filtros a utilizar, quando os maciços a proteger são constituídos por solos incoerentes, como acima ficou dito. Por extensão em relação à qual se tinha consciência que era indevida mas do lado da segurança, durante muitos anos foi prática de rotina proteger os maciços coerentes usando filtros projectados usando as mesmas regras que se utilizavam no projecto de filtros destinados à protecção de solos incoerentes. Mas, insiste-se, era nítida a consciência que, ao proceder deste modo, se projectava um filtro com composição granulométrica exagerada, do lado da segurança, em relação à missão a desempenhar. Particularmente grave se tornava a questão quando o maciço a proteger continha percentagens elevadas de argila, pois então tornava-se extremamente difícil e muito oneroso preparar camadas de filtro obedecendo às condições granulométricas correspondentes às regras mencionadas. Muitas vezes mesmó, embora não explicitamente, era-se forçado à complacência, afrouxando o controlo para dar lugar à aceitação (supostamente ignorada) de granulometrias mais grosseiras do que as exigidas nas Especificações de obra.

Há alguns anos o problema começou a ser estudado com sistemática e nesta data encontra-se em plena evolução. No Laboratório Nacional de Engenharia Civil, tal como em outros organismos similares estrangeiros, estão em curso estudos sobre a matéria. Do 1.º Relatório que no LNEC se preparou sobre o assunto, exclusivamente dedicado à revisão crítica da bibliografia disponível, apresenta-se neste artigo um largo extracto. Juntam-se alguns resultados de ensaios preliminares realizados dentro de um programa de extensão e confirmação das formulações teóricas que se encontram propostas e em discussão.

## 2 – POSIÇÃO ACTUAL DO PROBLEMA

### 2.1 – *Generalidades. As recomendações empíricas de origem americana*

O “piping”, ou sufusão, processa-se em solos coesivos de forma algo diferente da que ocorre em solos incoerentes. Nomeadamente, às forças estabilizadoras que actuam uma partícula somam-se forças de aderência às partículas vizinhas. Por isso a sufusão, ao contrário do que acontece em solos incoerentes, será sempre, ou quase sempre, antecedida de peptização, formando-se

agregados de partículas, agregados esses que serão passivos de arraste se a sufusão se vier a dar. É fácil intuir que, com muito maior peso do que no caso de solos incoerentes, intervém neste processo o estado de tensão, sendo a grandeza da tensão efectiva um condicionante fundamental da possibilidade de ocorrência de peptização e, no caso de ela se dar, da dimensão dos agregados de partículas que se formam. Por isso há muito foi reconhecido que a missão do filtro, no caso de material-base coerente, era desempenhada mais por ele actuar como sobrecarga do que por funcionar como “peneiro” de malha fina, adjacente ao material de base e filtrando a água de percolação com retenção das partículas sólidas. Estas circunstâncias são evocadas por Lehr e Stanescu (1967), Pacheco Silva (1973) e Kovacs (1973) embora com análise da questão de índole qualitativa. Consideram estes Autores que para materiais de base com teor em argila ( $5\mu$ ) superior a 15 a 25% já as regras clássicas de filtros para materiais incoerentes não são aplicáveis e que é sobretudo o peso do filtro que o faz desempenhar o seu papel. Mas, com muito maior impacto porque os estudos apresentados são de formulação qualitativa, serão de levar em conta as propostas de Zalavski e al. (1965), Kassif e al. (1965), Ranganathan e Zacharias (1968) e ainda de Wolski (1970), propostas que adiante serão tratadas com mais pormenor. Para já sublinhe-se que de acordo com estes Autores a possibilidade de “piping” e o seu mecanismo é relacionado quantitativamente com a resistência à tracção do solo-base e depende portanto, obviamente, da sua granulometria, composição e estado de tensão.

Apesar de já não ser recente a consciência da inadequação (por anti-económica) das regras de filtros formuladas para solos incoerentes ao caso de solos coerentes, só há relativamente pouco tempo se iniciaram estudos do tipo dos que ficaram citados, com aproximação racionalista e formulação quantitativa. Ainda em trabalho recente (1973) Cedergreen, passando em revista as recomendações em uso nos Estados Unidos, apontava as seguintes regras do U S Army Corps of Engineers, aplicáveis quando o solo a proteger é constituído por argilas plásticas: não é necessário respeitar a regra clássica (para solos incoerentes) que fixa a dimensão mínima do material do filtro; pode-se usar um material com  $D_{15}$  de 0,4mm, contando que o filtro seja bem graduado e tenha um coeficiente de uniformidade inferior a 20. Tendo em atenção a craveira do seu Autor e a data de publicação, poder-se-á concluir que esta revisão de Cedergreen constitui o “state of the art” da prática actual americana nesta matéria.

## 2.2 – A formulação de Zaslavski, Kassif e Zeitlen

De acordo com as propostas destes Autores (Zaslavski e al. – 1965; Kassif e al. – 1965), como já ficou referido, o fenómeno de sufusão é estritamente condicionado pela resistência à tracção do solo-base. Estas propostas partem do estudo do equilíbrio de uma partícula (ou agregado de partículas) situada na superfície de separação do filtro e do material de base (Fig. 1). A partícula considera-se actuada pelas forças:

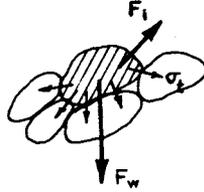


Fig. 1

$F_w$  – peso próprio

$F_j$  – força de percolação

$T_t$  – resultante das resistências à tracção,  $\sigma_t$ , que fazem aderir a partícula às partículas vizinhas

A força  $F_j$  é evidentemente uma força instabilizadora. A força  $F_w$  pode ser estabilizadora ou instabilizadora, conforme a direcção e sentido do fluxo. A força  $T_t$  será sempre estabilizadora.

Omitir-se-ão aqui os pormenores de cálculo, que essencialmente consiste em somar vectorialmente as forças estabilizadoras, proceder de igual forma para as forças instabilizadoras, e estabelecer um coeficiente de segurança por comparação das duas resultantes. Um cálculo para situação bastante desfavorável – nomeadamente, fluxo normal à superfície de separação e com sentido descendente (somando-se portanto à acção de gravidade) – leva a um coeficiente de segurança em relação ao “piping” por “arranque” das partículas dado por

$$F = b \sigma_t / \gamma_w \cdot j \cdot d \quad (1)$$

em que:

$b$  – coeficiente sem dimensões relacionado com a geometria das partículas (aparece na formulação para dar conta da forma da partícula real, na medida em que ela diferir da forma esférica assumida no cálculo).

$\sigma_t$  – tensão de resistência à tracção

$\gamma_w$  – peso específico da água

$j$  – gradiente de saída

$d$  – dimensão média da partícula

Tenha-se em atenção que  $j$ , gradiente de saída na transição do maciço para um filtro de poro  $d_p$  não é o gradiente médio  $i$  que rege a percolação no maciço mas sim um gradiente com grandeza que é, em regra, muito superior a  $i$ . O filtro é assim uma arma de dois gumes: colocado para proteger o maciço da erosão interna e, sobretudo, para actuar como sobrecarga que dificulta a sua peptização, vai por outro lado aumentar o gradiente na saída e portanto as forças que tendem a provocar arrastes.

A observação e experiência laboratorial, num caso de geometria simples para tornar possível o seu cálculo exacto, nomeadamente, numa massa que sofre “piping” por escoamento para um orifício circular de diâmetro  $d_p$  mostram que os arrastes começam nos bordos do orifício e progridem até que o “piping” se desenvolve num *hemisfério* que tem por plano diametral o orifício de saída. Sendo  $q$  o caudal através do orifício o gradiente  $j$  será dado por

$$q = S \cdot j \cdot k \quad (2)$$

em que  $S$  é a área da superfície do hemisfério. Donde

$$j = q/S \cdot k = 2q/\pi d_p^2 \cdot k \quad (3)$$

E sendo  $Q$  o fluxo total num tubo de fluxo de secção unitária (caudal aparente) fluxo que irá escoar-se por  $n$  orifícios, será  $q = Q/n$  e portanto

$$j = 2Q/\pi n \cdot d_p^2 \cdot k \quad (4)$$

substituindo  $j$  (dado por (3)) na expressão (1) vem

$$F = b \cdot \sigma_t \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot k / 2\gamma_w \cdot d \cdot q \quad (5)$$

O fluxo será crítico,  $q_{cr}$ , quando  $F = 1$ . Donde

$$q_{cr} = b \cdot \sigma_t \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot k / 2\gamma_w \cdot d \quad (6)$$

### 2.3 – A formulação de Wolski

Wolski e al. (1970) estudaram o problema sobretudo para dar conta das questões relativas a filtros adjacentes a núcleos argilosos, esbeltos, inseridos em barragens zonadas. A sua concepção do mecanismo da sufusão é praticamente

coincidente com a que ficou exposta em 2.2. Isto, claro está, em linhas gerais, pois existem de facto algumas substâncias diferentes de pormenor:

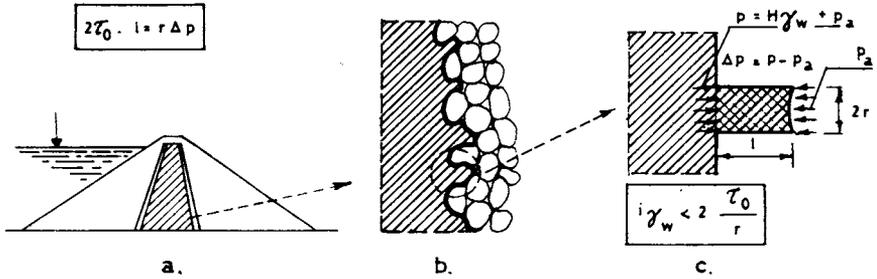


Fig. 2

Para os Autores o “piping” de uma massa argilosa constituindo o núcleo de uma barragem dá-se de acordo com o seguinte processamento: considerando um poro do filtro de raio  $r$  a sufusão consistirá na extrusão da massa argilosa para o interior do filtro, formando-se um cilindro de raio  $r$  e comprimento  $L$  (Fig. 2). Sendo  $\zeta_0$  a tensão de fluência da massa argilosa (considerada como um corpo de Bingham) o comprimento  $L$  estabelecer-se-á, em equilíbrio, de forma a satisfazer a condição

$$2\pi r L \zeta_0 = r^2 \Delta p \quad (7)$$

em que  $\Delta p$  é a diferença de pressões entre os dois topos do cilindro. E porque

$$p/L = j \cdot \gamma_w \quad (8)$$

vem

$$j \cdot \gamma_w = 2 \zeta_0 / r \quad (9)$$

Importante é sublinhar que Wolski constatou que  $\zeta_0$  era correlacionável com o índice de plasticidade, IP. E por estudo experimental de diversas granulometrias de filtros construiu o nomograma que se apresenta na Fig. 3.

Pela aplicação do nomograma da Fig. 3 depreende-se que para um caso, por exemplo, em que a esbeltez do núcleo é 3,2, isto é, o  $i$  médio no núcleo é de 3,2, e admitindo que o  $j$  atinge valores de 60 vezes o  $i$  médio (por fissuração parcial do filtro, concentrações de fluxos em zonas preferenciais, etc.) conclui-se que um filtro com  $D_{17}$  de 0,4 mm e um coeficiente de uniformidade de 50 poderá ser adoptado (o solo do núcleo tem IP = 15%).

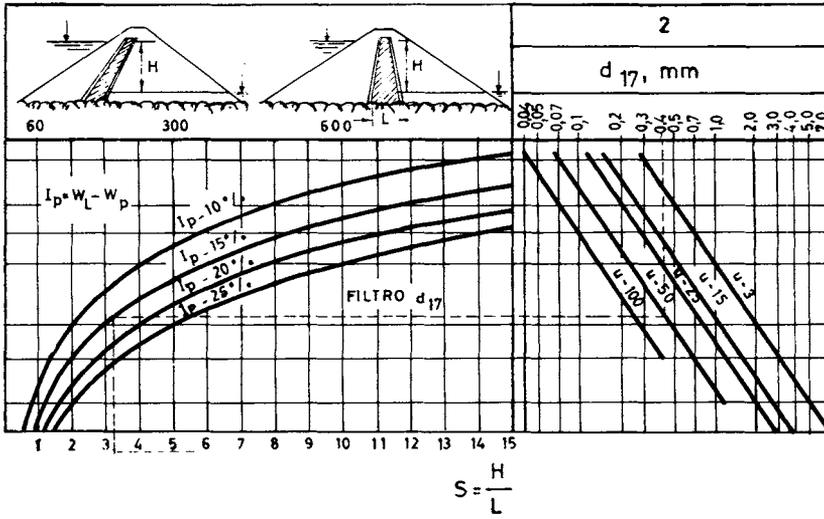


Fig. 3

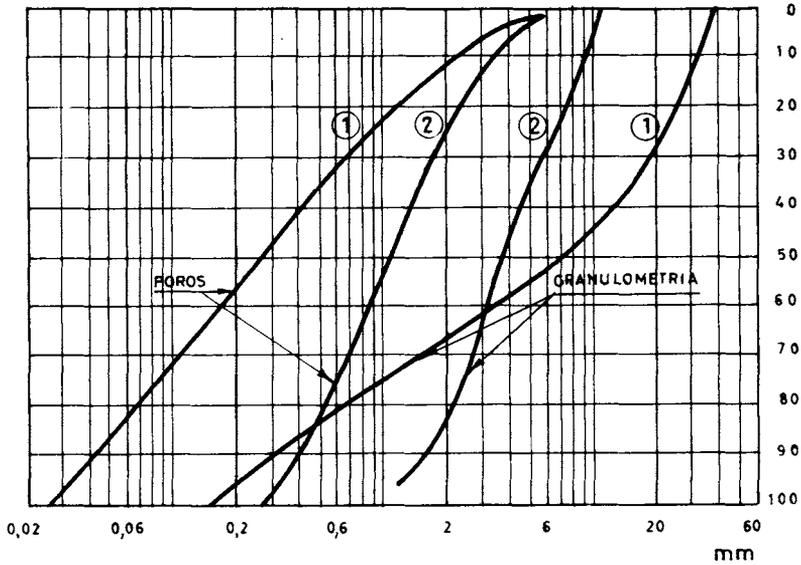


Fig. 4

Note-se que, de acordo com o monograma, seria indiferente adoptar o filtro mencionado ou, por exemplo, um filtro com  $D_{17}$  de 2mm e  $u=3$ , mais uniforme e aparentemente mais grosseiro. Isto pode parecer estranho em primeiro exame, mas compreender-se-á melhor que não há incongruência no facto atentando na Fig. 4 onde se compara a granulometria dos dois filtros citados: o filtro mais fino em  $D_{17}$ , dada a sua extensão granulométrica ( $u=50$ ), atinge diâmetros de partículas (e consequentemente de poros) bastante maiores do que o filtro mais grosseiro em  $D_{17}$ . Para reforçar esta asserção compara-se também na Fig. 4 a distribuição de poros dos dois filtros citados. Chega-se à interessante constatação de que, na região dos maiores diâmetros, região obviamente determinante do fenómeno, são praticamente coincidentes as dimensões de poros dos dois filtros, donde eles exibirem a mesma eficiência na contenção do “piping”.

#### 2.4 – Os trabalhos de Ranganathan e Zacharias

Ranganathan e Zacharias (1968) efectuaram estudos comparativos de dois tipos bastante diferentes de solos coesivos e apontam interessantes conclusões. Assim, constataram que, para uma classificação *qualitativa*, grandezas tais como a resistência à compressão simples nas condições de colocação, o peso específico aparente, o teor de humidade de colocação, os limites de consistência, constituem óptimos índices para julgar da maior ou menor susceptibilidade de um solo à sufusão.

Dos estudos de Ranganathan e Zacharias uma outra conclusão, certamente mais importante, se pode ainda tirar. Trata-se de um aspecto da questão que, de certa forma e embora só parcialmente, põe em causa a formulação de Zaslavski e al. e a proposta de Wolski. Com efeito, constataram os Autores que, em igualdade de resistência à compressão simples – e portanto em igualdade de resistência ao corte – o gradiente crítico (mínimo gradiente que provoca “piping”) não é o mesmo para os diferentes solos. Ter-se-á então de concluir que, para aplicar as formulações de Zaslavski e Wolski, será necessário medir directamente a resistência à tracção (Zaslavski) ou a tensão de cedência “binghamiana” (Wolski). Ora como se sabe estas grandezas são de muito difícil determinação laboratorial.

Outra importante conclusão dos estudos de Ranganathan e Zacharias prende-se com o efeito de tempo. A ocorrência de “piping” é um fenómeno que

pode sofrer consideráveis retardamentos, quer dizer, a aplicação de um certo gradiente pode não causar sufusão mantendo-se o gradiente durante um intervalo de tempo apreciável, mas vir a causá-la a longo prazo. Consta-se porém que, mesmo a curto prazo, a premonição da ocorrência de “piping” é possível, pois há um acréscimo súbito do coeficiente de permeabilidade quando o gradiente hidráulico aplicado atinge o gradiente crítico (Fig. 5).

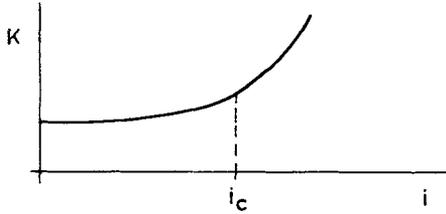


Fig. 5

### 3 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO; ENSAIOS EFECTUADOS NO LNEC

#### 3.1 – *Um exemplo de projecto de filtro*

Para tornar mais clara a aplicação das formulações teóricas descritas e também para julgar da sua justeza em face de ensaios efectuados no LNEC, que adiante se descreverão, haverá interesse em apresentar um exemplo de projecto de filtro.

Seja um solo com LL de 35%, LP de 20% (e portanto  $IP = 15$ ) apresentando um coeficiente de permeabilidade  $k = 10^{-6}$  cm/s e  $\varphi' = 30^\circ$ . Porque se vai lidar com resistências ao corte em termos de tensões efectivas tomar-se-á  $c = 0$ , o que é prudente e evitará ter de discutir a controversa problemática da coesão em tensões efectivas.

Considere-se que se usa para o filtro material de elementos arredondados, com dimensão praticamente uniforme. Numa secção plana (Fig. 6) este material, idealizado como se fosse constituído por esferas, está representado pelos respectivos círculos máximos, em disposição relativa que conduz à máxima compacidade. Para um número muito elevado de partículas,  $N$ , a área total ocupada (poros incluídos) será a de um rectângulo de lados, respectivamente  $\sqrt{N}.d$  e  $\sqrt{N}.d. \sin 60^\circ$ . Esta área valerá portanto

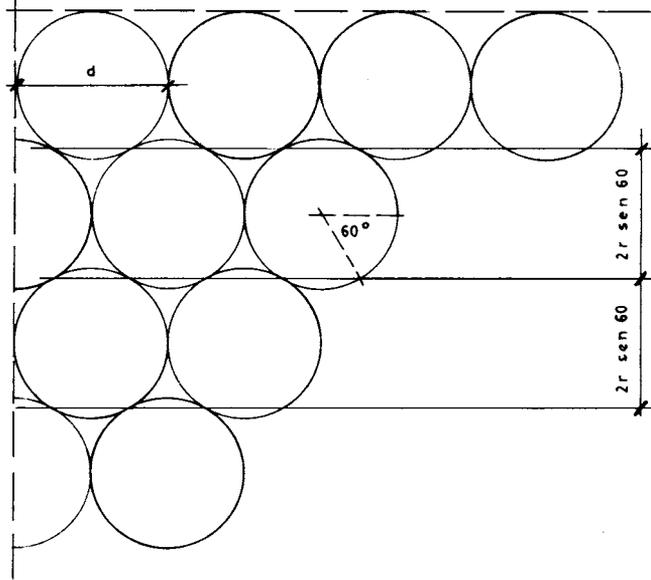


Fig. 6

$$A_t = N d^2 \text{ sen } 60 = 0,87 N d^2 \quad (10)$$

A área ocupada pela parte sólida, isto é, pelo conjunto de esferas, é evidentemente

$$A_s = N \cdot \pi d^2 / 4 = 0,79 N d^2 \quad (11)$$

Donde a área de poros ser

$$A_p = A_t - A_s = 0,08 N d^2 \quad (12)$$

Definindo porosidade superficial como a relação

$$S = A_p / A_t \quad (13)$$

virá  $S = 0,09$ . Quer dizer que, dentro da precisão consentida pelas aproximações feitas, pode-se concluir que a porosidade superficial de um conjunto de esferas equidimensionais com arrumo de máxima compacidade tem um valor da ordem de 0,1.

Interessará agora determinar qual a dimensão de cada poro. Como se deprende do exame da Fig. 6 uma partícula participa na formação de 6 poros

com 1/3 de participação (3 partículas determinam 1 poro). Donde virá que N partículas determinam  $6N/3$ , isto é, 2N poros. Então virá que a área de poros

$$A_p = 0,08 N d^2$$

corresponde a 2N poros. Cada poro terá portanto uma área

$$A_p(1) = 0,04 d^2 \quad (14)$$

Considerando cada poro assimilável a um círculo de diâmetro  $d_p$  virá

$$\begin{aligned} \pi d_p^2/4 &= 0,04 d^2 \\ d_p &= 0,22 d \end{aligned} \quad (15)$$

(Note-se que A. da Silveira (1965) preconiza para esta grandeza a relação  $d_p = 0,155 d$ , porque toma o poro como assimilável ao círculo inscrito no espaço entre partículas; afigura-se mais prudente, para o fim em vista, tomar o valor dado por (15)).

Posto isto considere-se que o filtro, constituído por material uniforme, esferiforme, tem dimensão da ordem de  $d = 1$  cm. É então de contar com uma dimensão de poro da ordem de  $d_p = 0,2$  cm.

Considerando agora o maciço a proteger tome-se um caso em que o  $i$  médio é de 4. Virá num tubo de fluxo de secção unitária ( $1 \text{ cm}^2$ ) um caudal de exurgência

$$Q = 4 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$$

Lembrando que a porosidade superficial do material do filtro tem o valor 0,1, porque a área de cada poro é de  $\pi \times 0,2^2/4 \approx 0,03 \text{ cm}^2$ , o número de poros,  $n$ , na secção unitária será

$$\begin{aligned} n \times 0,03 &= 0,1 \\ n &\approx 3 \end{aligned}$$

O caudal de descarga em cada poro será portanto

$$q = Q/3 = 4 \cdot 10^{-6}/3 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Tendo presente que o gradiente de saída é dado pela expressão (3)

$$j = 2q/\pi d_p^2 \cdot k$$

virá

$$j \approx 20$$

Passe-se agora à computação da resistência à tracção do material a proteger. Atente-se a que ele tem a curva intrínseca OA (fig. 7). Considere-se que na zona adjacente ao filtro a tensão média é  $\sigma_m$ .

O círculo BC corresponde ao estado de tensão que leva à ruptura do material quando a tensão média é  $\sigma_m$ .

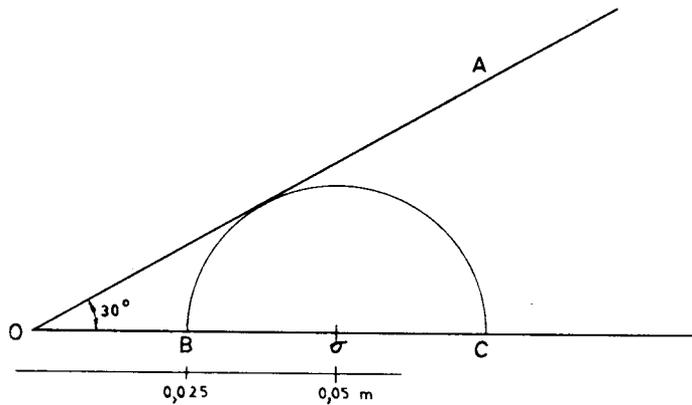


Fig. 7

A resistência à tracção poderá ser achada considerando uma translação da origem das coordenadas (levando a origem para  $\sigma_m$ ). E portanto a resistência à tracção,  $\sigma_t$ , será dada pelo segmento  $B\sigma_m$ . Com  $\varphi = 30^\circ$  e  $\sigma_m = 0,05 \text{ kg/cm}^2$  ter-se-á  $\sigma_t = 0,025 \text{ kg/cm}^2$ .

Para calcular o diâmetro da partícula que pode ser arrastada recorde-se que ter-se-á que tomar  $F = 1$  na expressão (1)

$$F = b\sigma_t/\gamma_w \cdot j \cdot d$$

Tomando  $b = 1$  e substituindo pelos valores anteriormente calculados vem

$$d = 0,025/0,001 \times 20 \approx 1,2 \text{ cm}$$

Como se vê só partículas bastante grosseiras poderiam ser arrastadas. Para o filtro adoptado, com  $d_p = 0,2 \text{ cm}$ , o coeficiente de segurança virá

$$F = 0,025/000,1 \times 20 \times 0,2 \approx 6$$

O que quer dizer que o gradiente de saída crítico,  $j_{cr}$ , será de  $6 \times 20 = 120$ ; e o gradiente médio crítico,  $i_{cr}$ , será de  $6 \times 4 = 24$ .

### 3.2 – Ensaios efectuados no LNEC

Utilizando um solo com as características que foram tomadas na elaboração do exemplo apresentado em 3.1, isto é,  $LL = 35\%$ ,  $LP = 20\%$ ,  $\varphi' = 30^\circ$  e  $k = 10^{-6}$  cm/s, efectuaram-se ensaios para determinação do gradiente que provocaria “piping” nas condições correspondentes às da montagem que adiante se descreve. Prepararam-se provetes a partir de amostras compactadas no óptimo Proctor que foram montados em edómetros. Nesses edómetros substituiu-se a placa porosa inferior por uma placa de perspex com numerosos furos de 1 mm de diâmetro; esta placa exibia portanto uma permeabilidade muito superior à do provete. A placa porosa superior foi substituída por uma placa com um único furo de 2 mm de diâmetro, simulando-se assim um poro de um filtro tal como o que foi considerado no exemplo referido.

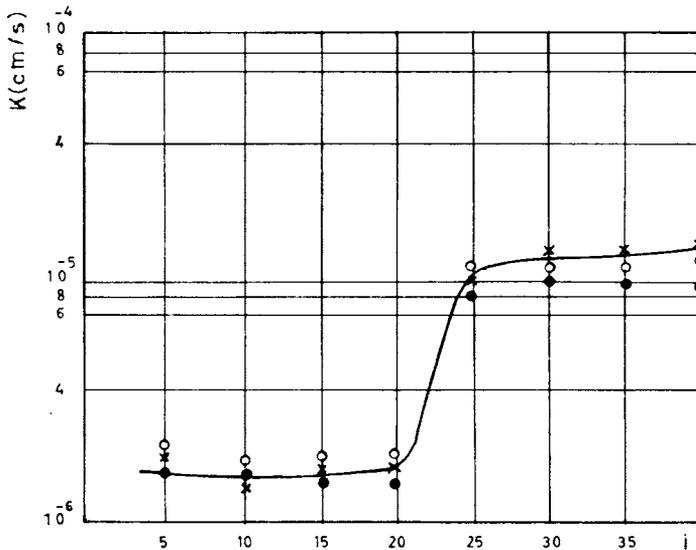


Fig. 8

Provocou-se percolação por fluxo ascendente, para sucessivos escalões de gradientes hidráulicos. Aguardava-se, com carga hidráulica constante, que o fluxo estabilizasse.

A placa porosa superior era sobrecarregada de forma que, deduzidas à sobrecarga as forças ascendentes de percolação,  $i/\gamma_w$ , se garantisse uma tensão efectiva sobre o provete de  $0,05 \text{ kg/cm}^2$ ; recorde-se que esta foi a tensão  $\sigma_m$  considerada na elaboração do exemplo apresentado em 3.1.

Era suposto que para gradientes elevados se detectaria o início do “piping” por turbidez da água percolada, podendo até seguir-se extrusão de solo através da placa superior. Nenhum destes fenómenos ocorreu porém, mesmo para gradientes superiores a 50.

Para cada gradiente aplicado media-se o coeficiente de permeabilidade. Os resultados de três ensaios estão apresentados na Fig. 8. Examinando essa figura constata-se que há um súbito aumento da permeabilidade para o gradiente 25. Tendo em atenção os resultados a que chegaram Ranganathan e Zacharias poderá aceitar-se que este gradiente corresponda à instalação do “piping”, que se viria a manifestar com maior evidência se o fluxo fosse mantido a longo prazo. Esta conclusão é suportada pelas computações do exemplo apresentado em 3.1 pois elas mostraram que o gradiente médio crítico, de acordo com a formulação utilizada (Zaslavki e al.), seria de 24.

Os resultados apresentados na Fig. 8 correspondem a uma série de ensaios que inicia um programa de estudos cujas linhas gerais se reputa de interesse transcrever; são elas:

- melhorar os métodos de determinação de tensões de resistência à tracção e de tensão de cedência “binghamiana”;
- estudar a influência do grau de compactação na problemática do “piping”;
- confirmar, numa vasta gama de solos, o critério proposto por Ranganathan e Zacharias para detecção do gradiente crítico;
- estudar, numa larga variedade de solos, a influência da tensão de contacto na ocorrência de peptização.

#### 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Afigura-se que, para fins de ordem prática, mesmo dentro dos condicionismos existentes, é já possível fixar regras de aplicação baseadas nos conheci-

menos existentes. Designadamente parece que se deverão realçar os que a seguir se apontam.

a) – Para obras de pequena importância serão de adoptar as recomendações empíricas do U S Army Corps of Engineers. Recapitulando virá que será de usar como camada de filtro de transição, em contacto com um maciço coerente contendo partículas da dimensão argila ( $5\mu$ ) em percentagem superior a 15 e 25%, um material com  $D_{15}$  da ordem de 0,4m e com um coeficiente de uniformidade inferior a 20.

Tenha-se em atenção que é em relação às obras de pequenas dimensões que maior acuidade podem assumir os fenómenos de empoamento, e consequente peptização e arraste, devidos a ser baixo o estado de tensão na zona do maciço onde emergem as linhas de fluxo. Por isso o filtro deve ser concebido e dimensionado de forma a constituir uma apreciável sobrecarga nessa zona crítica. Recordar-se que tudo indica, no estado actual de conhecimentos, que é mesmo esse o seu principal papel.

b) – Para obras de mediana importância recomenda-se que se inicie o estudo usando a proposta de Zaslavski e al. Usando o gradiente de saída que se tiver calculado durante a elaboração das computações daquela proposta deverá depois aplicar-se a proposta de Wolski. Adoptar-se-á, na hipótese de os dois métodos não terem conduzido ao mesmo filtro, aquele que exibir maior finura (menores poros) na zona de maiores dimensões granulométricas.

c) – Para obras de grande importância preconiza-se que se proceda como ficou recomendado em b) para ante-projectar um filtro. Esse filtro deverá depois ser estudado em laboratório montando-o em dispositivo em que fique a contactar material da base a proteger, material que deverá ser compactado nas condições de obra. O dispositivo de ensaio deverá permitir a aplicação de tensões de contacto na inter-face filtro-base que reproduzam também as condições de obra e estará preparado para instalar gradientes bastante elevados. Como critério de detecção do gradiente crítico recomenda-se o método proposto por Ranganathan e Zacharias, de determinação do gradiente que provoca um aumento súbito do coeficiente de permeabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CEDERGREEN – *Seepage control in earth dams, in Capit. "Prevention of piping failures"*  
– Casagrande Volume, 1973.

- KASSIF, G., D. ZASLAVSKI e J. G. ZEITLEN – *Experimental analysis of filter requirements for compacted clays* – VI Intern. Conf., on Soil Mechanics, Vol II, Montreal, 1965.
- KOVACS e al. – *Changes in the materials of earth dams and their influence on permeability* – Research Institute for Water Resources Development, Public. n.º 7, Budapeste, 1973.
- Lehr, H. e E. STANESCU – *Investigation of safeguard against piping in earth dams* – III Asian Regional Conf. on Soil Mechanics, Haifa, 1967.
- PACHECO SILVA, F. – *Considerações sobre filtros de protecção* – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Public. n.º 990, S. Paulo, 1973.
- RANGANATHAN e ZACHARIAS – *Interaction of density, soil type and time on piping resistance of cohesive soils* – III Budapest Conf. on Soil Mechanics, Budapeste, 1968.
- SILVEIRA, A. – *An analysis of the problem of washing through in protective filters* – VI Intern. Conf., on Soil Mechanics, Vol. II, Montreal, 1965.
- WOLSKI, W. e al. – *Protection against piping of dams cores of flysch origin cohesive soils* – X Intern. Congress on Large Dams, Montreal, 1970.
- ZASLAVSKI, D. e G. KASSIF – *Theoretical formulation of piping mechanism in cohesive soils* – Geotechnique, Setembro, 1965.