

## EVOLUÇÃO DO ESTUDO DA TEORIA DA DISTRIBUIÇÃO DOS VAZIOS

KARLA MONIQUE OLIVEIRA DE SOUSA<sup>1\*</sup>, VANDA TEREZA COSTA MALVEIRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Acadêmica do curso de Engenharia Civil, UVA, Sobral-CE, monique.karla@hotmail.com

<sup>2</sup>Professora Adjunta do Curso de Engenharia Civil, UVA, Sobral-CE, tmalveira@hotmail.com

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016

29 de agosto a 2 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

**RESUMO:** A necessidade de conhecer o processo de erosão interna, problema que pode causar ruptura em barragens, se desenvolve devido ao carreamento excessivo de material compactado devido ao fluxo existente no maciço, consequência da falta ou funcionamento inadequado de filtros. O professor Araken Silveira (1964), dando continuidade aos estudos de Terzaghi (1926), desenvolveu uma teoria para determinação da distribuição dos vazios, a partir da qual é possível simular o carreamento das partículas de um solo. Tal metodologia permite determinar as distâncias percorridas pelas partículas do solo. Este trabalho apresenta a cronologia da evolução de teoria dos vazios e a importância de cada trabalho no dimensionamento de drenos eficientes, essencial para dimensionamento de drenos de barragens, garantindo sua segurança contra erosão interna.

**PALAVRA-CHAVE:** Percolação, filtro, barragens.

**ABSTRACT:** It is very important the internal erosion process, a problem that can cause accidents in dams, due to transport of material of the embankments, when submitted to excess of seepage or due to bad performance of the filters. Professor Araken Silveira (1964), continuing the studies of Terzaghi (1926) developed a theory to determine the optimal void distribution, from which it is possible to define the maximum path of a soil particle in this condition.. This paper presents the chronology of the void theory of evolution and the importance of each study in the design of efficient drains, necessary to design of internal drains for embankments and its control against internal erosions.

**KEYWORDS:** Seepage, filter, dams.

### INTRODUÇÃO

Os solos são compostos por partículas de variadas dimensões, e a disposição destas variam de acordo com o grau de compactação em que se encontram, podendo variar do estado fofo para um estado denso. Geralmente, pode-se dizer que os vazios formados entre as maiores partículas, são preenchidos pelas partículas menores e assim sucessivamente. Os critérios de projeto de filtros, usualmente praticados na engenharia, são baseados em relações entre um ou mais diâmetros característicos dos solos e dos materiais dos granulares para filtros, afim de obter filtros eficientes, que evitam rupturas de barragens. Tais critérios de dimensionamento têm base empírica, e são provenientes de estudos desenvolvidos por meio da execução de repetidos experimentos sobre materiais granulares e solos compactados no maciço, de modo a se estabelecer intervalos de granulometrias ideais para drenagem do excesso das poropressões destes materiais.

### MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se neste item alguns trabalhos realizados relativos à teoria da distribuição de vazios, a evolução e contribuição de cada estudo.

1 Fuller e Thompson

Proposição de curva granulométrica e arranjo de partículas no estado mais denso, a partir de avaliações teóricas com base em esferas uniformes. Em 1907, Fuller e Thompson desenvolveu uma

equação para descrever a gradação da densidade máxima para um determinado tamanho máximo agregado. Equação 1:

$$P = (d/D)^n \times 100 \quad \text{Fonte: Fuller e Thompson (1907).} \quad (1)$$

P é por cento mais fino do que um tamanho de agregado, d é o tamanho do agregado sendo considerado, D é o tamanho máximo agregado, n é o parâmetro que ajusta curva de finura ou aspereza (para a densidade máxima de partícula de 0,5 N ≈ segundo Fuller e Thompson).

## 2 Terzaghi

O “Critério clássico de Terzaghi”, como é conhecido, foi o primeiro critério adotado em projetos de filtros em barragens, tendo sido utilizado como base para inúmeros estudos posteriores. Nessas estruturas, os filtros devem ser dimensionados para atender aos seguintes critérios básicos (TERZAGHI, 1926):

**Critério de retenção:** as dimensões dos vazios existentes entre os grãos do filtro devem ser suficientemente pequenas de forma a possibilitar a retenção de partículas do material protegido. Inicialmente, tal premissa era referida como “critério de estabilidade” ou “critério de *piping*”. Esta condição é garantida através da relação entre os diâmetros D15 (material do filtro) e d85 (material do maciço), de acordo com a equação 2:

$$D15/d85 \leq 4 \quad (2)$$

**Critério de permeabilidade:** O filtro deve apresentar condutividade hidráulica suficiente para prover à estrutura condições para drenagem das águas provenientes do interior do maciço. Esta condição é garantida através da relação entre os diâmetros D15 (material do filtro) e d85 (material do maciço), de acordo com a equação 3:

$$D15/d85 \geq 4 \quad (3)$$

## 3 Silveira

Método para determinação da distribuição dos vazios para o estado denso do filtro e método para análise de carreamento. Os diâmetros dos vazios no estado denso (Figura 1), determinado por Silveira (1964), a partir da equação 4:

$$\begin{aligned} & [(d_i + d_j + d_k) \cdot d_i \cdot d_j \cdot d_k]^{1/2} \\ & [(d_i + d_j + d_{vd}) \cdot d_i \cdot d_j \cdot d_{vd}]^{1/2} + [(d_i + d_{vd} + d_k) \cdot d_i \cdot d_{vd} \cdot d_k]^{1/2} + [(d_{vd} + d_j + d_k) \cdot d_{vd} \cdot d_j \cdot d_k]^{1/2} \end{aligned} = \quad (4)$$

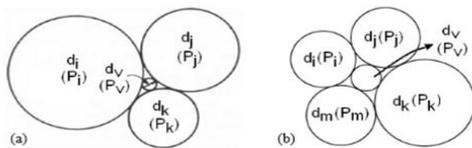


Figura 1; Fonte: Silveira (1964).

Relações entre os diâmetros dos grãos para os agrupamentos considerados por Silveira (1964) onde d1 é o menor diâmetro da relação. Como mostra a tabela 1

Relações dn/d1
(d1/d1:d2/d1:d3/d1:d4/d1:d5/d1)
1:2:4:8:16
1:2:4:6:8
1:2:3:4:5

Tabela 1; Fonte: Silveira (1964).

#### 4 De Mello

Indica considerações dos métodos de Silveira (1964 e 1966), na determinação da granulometria do filtro em termos de massa, para filtros bem graduados. Propõe avaliação da granulometria em termos de números de partículas. Para que um material seja estável internamente, o diâmetro D15g de sua fração mais grossa deve ser, no máximo, quatro a cinco vezes maior que o d85f da fração fina do mesmo solo. A verificação, faz-se necessária a divisão da curva granulométrica do material em duas, a partir de um ponto de descontinuidade arbitrário.

#### 5 Wittmann

Modelo de caminho de fluxo em forma de canais de poros com larguras irregulares. Wittmann (1980), utilizando um modelo estatístico de partículas esféricas com granulometrias e densidades diferentes, estabeleceu uma equação empírica para avaliação do diâmetro dos poros. Equação 5:

$$Pav = 0,455 * e * D17 * [U]^{1/6} \quad \text{Fonte: Pimenta (2013).} \quad (5)$$

Onde e é índice de vazios do solo, D17 é diâmetro das partículas correspondentes a 17% passante e U, coeficiente de uniformidade do solo.

#### 6 Kenney et al – 1985

Modelo de rede de vazios, estimativa do número de confrontos, até a retenção da partícula da solo base no interior do filtro, para vazios aleatórios, modelagem com base na granulometria do filtro em termos de número de partículas. Em resumo, o procedimento proposto por Kenney e Lau (1985, 1986) consiste no cálculo de uma razão H/F estabelecida a partir de pontos estabelecidos na curva granulométrica do material avaliado. Os pares de valores H/F definem a curva de forma do material, sendo é considerado internamente estável caso apresente valores  $H/F \geq 1$ , sendo que  $F \leq 20\%$  e  $F \leq 30\%$  para solos com fração grossa bem graduada (com  $Cu > 3$ ) e solos com fração grossa uniforme (com  $Cu < 3$ ), respectivamente.

#### 7 Honjo e Veneziano

Modelo de transporte de partículas com base na conservação de massa nas fases sólida e líquida. Honjo e Veneziano (1989), que realizaram uma série de análises estatísticas sobre resultados de experimentos anteriores, relataram que a razão de retenção D15/d85, estabelecida por Terzaghi, é o parâmetro mais adequado para dimensionamento de filtros para solos sem coesão.

#### 8 Soria et al

Resultados experimentais em concordância com a teoria geométrico-probabilística são apresentados. Realizaram estudos experimentais para a obtenção da curva de distribuição de vazios de materiais granulares através de uma nova concepção prática da Teoria Geométrica Probabilística, em que consiste no cálculo do tamanho dos vazios do solo pode ser feito a partir da sua distribuição granulométrica, que consistiu de sucessivos testes de percolação em diferentes materiais granulares, em diferentes espessuras.

#### 9 Witt

Modelo de redes de poros tridimensional: esferas como os poros; e tubos como as constrições.

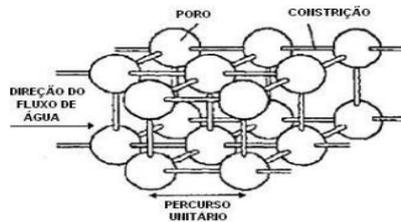
#### 10 Humes

Indica restrições da utilização da granulometria em termos de números de partículas apresentada por De Mello (1977). Propõe avaliação da granulometria em termos das áreas de superfície das partículas. Conforme Lau (1985, 1986) foi desenvolvido com base em experimentos realizados especificamente sobre materiais granulares com coeficientes de uniformidade  $Cu < 12$ . Assim, tal restrição deve ser considerada, podendo eventualmente representar uma limitação do critério. Humes (1995) determina, ainda, que a metodologia de análise do carreamento pode ser uma boa ferramenta para avaliar a susceptibilidade à instabilidade interna.

## 11 Schuler

Modelo de Rede Cúbica de Poros: rede regular de poros interconectados por seis constrições de modo similar à proposta de Witt (1993). Schuler (1996) estudou a DV de um solo para diversos valores de índice de densidade e verificou que as curvas porosimétricas determinadas apresentaram sempre os mesmos formatos, independentemente do ID do material.

Figura 2:



Modelo de rede tridimensional de poros, proposto por Schuler (1996). Fonte: Schuler (1993).

## 12 Giroud

O arranjo mais denso das partículas pode ser encontrado até mesmo em materiais sem a máxima compactação.

## 13 Indraratna e Vafai

Modelo de canais de poros: aprimoramento do modelo de transporte de partículas, mostrando que a menor dimensão do "canal de poros" determina a dimensão das partículas do solo que poderão ser carregadas.

## 14 Indraratna e Locke

O modelo de Indraratna e Vafai (1997) é aprimorado por meio da incorporação do Modelo de Rede Cúbica de Poros. Adotaram a hipótese de que os maiores diâmetros da DV de um filtro, tal que  $d_{vd} < d_v < d_{vf}$ , tendem a se expandir de modo linearmente proporcional ao decréscimo da compactidade deste filtro. Os autores admitiram, ainda, que o menor vazio de uma DVf (estado fofo) tem a mesma dimensão que o menor vazio da DVd (estado denso), independentemente da densidade do filtro.

## 15 Locke et al

Método para avaliar a evolução do processo de carreamento e mudança das propriedades ao longo do tempo, formulação para cálculo da distribuição dos vazios para dada densidade relativa. A fórmula determina uma DV para determinado índice de densidade, ID, dadas suas distribuições dos vazios para os estados fofo e denso. A formulação considera a divisão das DVf e DVd em  $n$  partes iguais. Equação 6:

$$d_{vi} = D_{vdi} + i/n(1 - ID)(D_{vfi} - D_{vdi}) \quad \text{Fonte: Locke et al (2001).} \quad (6)$$

$i = 0, 1, 2, \dots, n$  = números inteiros que representam as  $n$  porções da DVf e da DVd,  $d_{vi}$  é o diâmetro médio do vazio da  $i$ -ésima porção da DV,  $D_{v\text{máxfi}}$  e  $D_{v\text{máxd i}}$  são os maiores vazios das DV's nos estados fofo e denso, correspondentes às percentagens de ocorrência  $i/n\%$ . (LOCKE ET AL, 2001).

## 16 Indraratna e Raut

Determinação do  $D_{v95}$ : diâmetro dominante dos vazios. Em vista das dimensões características estabelecidas para os vazios de um filtro e para as partículas de um solo qualquer, e considerando-se que as partículas do solo maiores que  $d_{v95}$  não influenciam no processo de filtragem, Raut e Indraratna (2008) estabeleceram que, para uma combinação solo-filtro eficaz,  $d_{v35}$  deve ser menor que  $d_{*85}$  para assegurar que pelo menos 15% das partículas do solo sejam retidas no início do processo, de modo a permitir a estabilização do filtro Equação 7:

onde  $d_{85}$  é o diâmetro  $d_{85}$  da curva granulométrica do solo ajustada, desconsiderando-se as partículas maiores que  $d_{95}$ . Destaca-se, o fato de este levar em consideração alguns parâmetros fundamentais no processo de filtragem, como os diâmetros das partículas e o coeficiente de uniformidade  $C_u$  dos materiais, e a distribuição dos vazios e o índice de densidade do filtro.

## CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta uma evolução de pesquisas realizadas para consolidar Teoria de Vazios com base na determinação de parâmetros relacionando a granulometria adequada para drenos e transições. Estes parâmetros enfatizam a importância da granulometria em seus aspectos dimensionais tanto no diâmetro das partículas quanto na superfície específica destas. Estas relações são necessárias para dimensionamento de sistemas de drenagem que protegem as estruturas hidráulicas de terra compactada contra erosões internas.

## REFERÊNCIAS

- De Mello, V. F. B. Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams. *Geotechnique*, vol. 27, no.3, 1977. 279-355 p.
- Filho, M. A. P. Análise da erosão interna de solos em barragem com base na distribuição de vazios. Belo Horizonte: UFMG, 2013. 124f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes).
- Fuller, W. B.; Thompson, W. E. The laws of proportioning concrete. *Transactions on American Society of Civil Engineers*. Vol. 59. 1907.
- Giroud, J. Granular filters and geotextile filters. *Proceedings of Geofilters '96*, LAFLEUR, J. & ROLIN, AL. (editors), Bitech Publications, Montreal, 1996. 565-680 p.
- Honjo, y.; Veneziano, D. Improved filter criterion for cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, vol. 115, no. 1, 1989. 75-94 p.
- Humes, C. Considerações sobre a determinação da distribuição de vazios de filtros de proteção de obras geotécnicas. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1995. 209p.
- Indraratna, B.; Raut, A. K. Enhanced criterion for base soil retention in embankment dam filters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, vol. 132, no.12, 2006. 1621-1627 p.
- Kenney, T. C.; LAU, D. Stability of particle grading of compacted granular filters. Dept. of Civil Eng. , University of Toronto. 1984. 23p.
- Locke, M.; Indraratna, B.; Adikari, G. Time-dependent particle transport through granular filters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 2001. 521 p.
- Sória, M.; ARAMAKI, R.; VIVIANI, E. Experimental determination of void sizes curves. *Proc. Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*. Rotterdam, 1993. 42-48 p.
- Schuler, U.; Brauns, J. Behavior of coarse and well-graded filters. in: Brauns, Heibaum, Schuler (Hrsg): *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, Balkema, Rotterdam, 1993.
- Silveira, A. Algumas considerações sobre filtros de proteção - Uma Análise do Carreamento. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo, 1964.
- Terzagui, K. Soil physical basis of mechanics of earth structures. F. Deuticke, Wien. 1926.
- Witt, K. Reliability study of granular filters. *Proc., Filters in Geotech., and Hydraul. Eng.*, BRAUNS, J.; HEIBAUM, M. & SCHULER, U. (editors): Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1993. 35-41 p.
- Wittmand, L. The process of soil-filtration - its Physics and the approach in engineering practice. *Proceedings of the 7th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Brighton, UK, vol. 1. 1979. p. 303-310.