

## **A EROSÃO INTERNA DA BARRAGEM DE BALDERHEAD: UMA ANÁLISE EM TERMOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS VAZIOS E DA ANÁLISE DE CARREAMENTO**

Marcos de Ávila PIMENTA FILHO  
Engenheiro Civil, M.Sc. – Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.

Joaquim Pimenta de ÁVILA  
Consultor, M.Sc.– Pimenta de Consultoria Ltda.

Ciro HUMES  
Consultor e Professor, D.Sc.– WorleyParsons Engenharia, Centro Universitário da FEI e Instituto Mauá de Tecnologia.

Terezinha ESPÓSITO  
Engenheira Civil, D.Sc. – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

### **RESUMO**

O problema da filtragem é geralmente abordado em termos de diâmetros dos materiais do solo base e do filtro. Silveira (1964) desenvolveu uma metodologia geométrico-probabilística a partir da qual é possível simular o carreamento de partículas de um solo até encontrar um vazio no filtro que restrinja seu transporte. Este trabalho apresenta uma avaliação sobre o processo de *piping* ocorrido na Barragem de Balderhead sob o ponto de vista da distribuição dos vazios e do carreamento das partículas. Com base nas análises realizadas, verificou-se que parcela considerável das partículas do núcleo da barragem estaria sujeita a carreamentos maiores que a espessura do filtro implantado, fato que apresenta boa concordância tanto em relação ao evento observado em campo como frente ao “Critério Clássico de Terzaghi”.

### **ABSTRACT**

The problem of filtering is generally discussed in terms of the characteristic diameters of base soil and filter materials. Silveira (1964) developed a geometric-probabilistic methodology, from which it is possible to simulate washing particles from a base soil, through a granular filter, until they find a constriction which restricts its transport. This paper presents an evaluation of the piping process occurred in Balderhead Dam, in terms of the constriction size distribution and washing through analysis. Based on that, it was found that a considerable portion of particles of the dam core would be subjected to washing through extents larger than the filter thickness, which indicates reasonable agreement both with the incident observed at the dam and with the "Classical Terzaghi's Retention Criterion".

## 1. INTRODUÇÃO

Processos de erosão interna juntamente com eventos de galgamentos são as principais causas de rupturas de barragens no mundo, conforme dados apresentados por Middlebrooks (1953) e Foster et al. (1998, 2000). Em vista deste e de outros aspectos, os problemas relacionados à filtragem de solos têm extrema relevância na engenharia de barragens.

O problema da filtragem, seja quanto ao dimensionamento ou avaliação de desempenho, é geralmente abordado em termos de diâmetros característicos dos materiais do solo base e do filtro. Embora os critérios usualmente aplicados para o dimensionamento de filtros sejam considerados satisfatórios, estes foram estabelecidos com base em resultados de ensaios de laboratórios e não contam com base teórica que permita avaliar qual é o carreamento das partículas do solo base através dos vazios formados entre os grãos de um filtro. Desta forma, são incapazes de prever as variações de comportamento, eficiência, e características dos materiais ao longo da vida do filtro.

Diante deste cenário, o professor Araken Silveira (Silveira, 1964), visando estabelecer critérios para dimensionamento não apenas granulométrico, mas também em termos das espessuras dos filtros, desenvolveu uma teoria para determinação da distribuição dos vazios, a partir da qual é possível simular o carreamento das partículas de um solo. Esta metodologia geométrico-probabilística permite determinar as distâncias percorridas pelas partículas do solo base até encontrar um vazio no filtro que restrinja seu transporte.

Com base na metodologia acima, bem como nos aprimoramentos propostos por autores diversos, Pimenta Filho (2013) avaliou o caso de *piping* observado na Barragem de Balderhead sob o ponto de vista da distribuição dos vazios do filtro e do carreamento das partículas do núcleo através dos mesmos.

A Barragem de Balderhead tem grande relevância no cenário mundial da geotecnia de barragens, tendo apresentado notório caso de erosão interna, o qual foi objeto de sucessivos estudos, inclusive subsidiando a elaboração de diretrizes para critérios de dimensionamento de filtros para argilas.

As análises de carreamento realizadas por Pimenta Filho (2013) indicaram carreamentos excessivos das partículas do núcleo da Barragem de Balderhead para os cenários mais críticos avaliados, tendo sido considerada como provável a ocorrência de processos de erosão interna nesta barragem, condição que se mostrou em concordância com o evento de *piping* observado na barragem.

Além disso, foi feita uma correlação entre os resultados obtidos e a razão de retenção  $D_{15}/d_{85}$  – “Critério Clássico de Terzaghi” – a qual indicou a coerência deste critério, conforme já esperado.

O presente trabalho apresenta os referidos estudos desenvolvidos por Pimenta Filho (2013). Os itens seguintes apresentam uma descrição geral da Barragem de Balderhead e do evento de falha ocorrido, as características granulométricas dos materiais do núcleo e do filtro da mesma, uma breve revisão bibliográfica sobre o tema em questão, a metodologia aplicada e os resultados das avaliações realizadas.

## 2. BARRAGEM DE BALDERHEAD

Neste item são apresentados um descritivo geral da Barragem de Balderhead e do evento de falha ocorrido e a caracterização granulométrica dos materiais do núcleo e do filtro da barragem, os quais foram utilizados para as análises apresentadas neste trabalho.

As informações apresentadas nos subitens seguintes são provenientes dos trabalhos apresentados por Vaughan et al. (1970) e por Vaughan e Soares (1982).

### 2.1 BARRAGEM DE BALDERHEAD

A Barragem de Balderhead foi construída em meados da década de 60, no Rio Balder, no norte da Inglaterra. Sua crista tem 925 m de comprimento, largura de aproximadamente 8 m e coroamento na elevação 334,7 m, com cerca de 45 m de altura máxima.

A barragem foi concebida em seção mista, contando com um núcleo esbelto composto por frações desde argila até seixos e pedregulhos e configura-se como um material muito bem graduado. O mesmo foi implantado em camadas lançadas com 0,18 m, atingindo a espessura de 0,15 m após a compactação.

Os espaldares são compostos por solo residual de xisto compactado. Na porção de montante de sua seção transversal, um trecho de transição entre este material e o núcleo de argila foi implantado, sendo este composto por solo residual fino de xisto compactado.

A jusante do núcleo da barragem foi implantado um filtro granular de espessura aproximada entre 1,85 m e 2,00 m. A FIGURA 1 apresenta a seção transversal típica da Barragem de Balderhead.

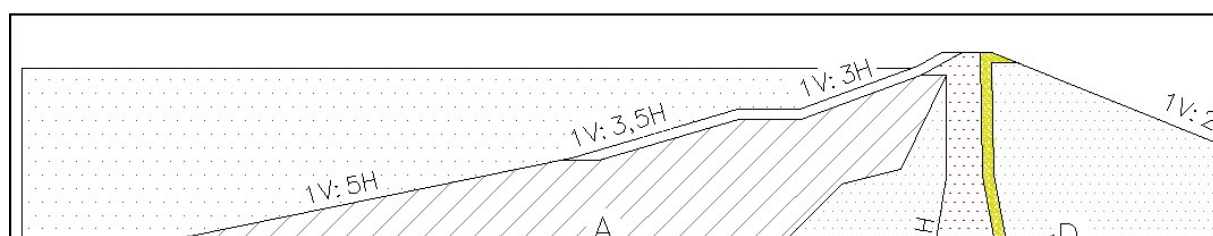


FIGURA 1: Seção típica da Barragem de Balderhead  
(Adaptado de Vaughan et al., 1970)

## 2.2 O EVENTO DE FALHA

Após o primeiro enchimento da Barragem de Balderhead, foi verificada a ocorrência de *sinkholes* em sua crista, fato decorrente do carreamento excessivo de partículas do seu núcleo através do filtro da barragem.

O local onde se estabeleceu o foco dos *sinkholes* foi investigado por meio de sondagens rotativas, entre outros métodos de investigação. A partir dos resultados de tal campanha, foi possível inferir a configuração apresentada na FIGURA 2.a.

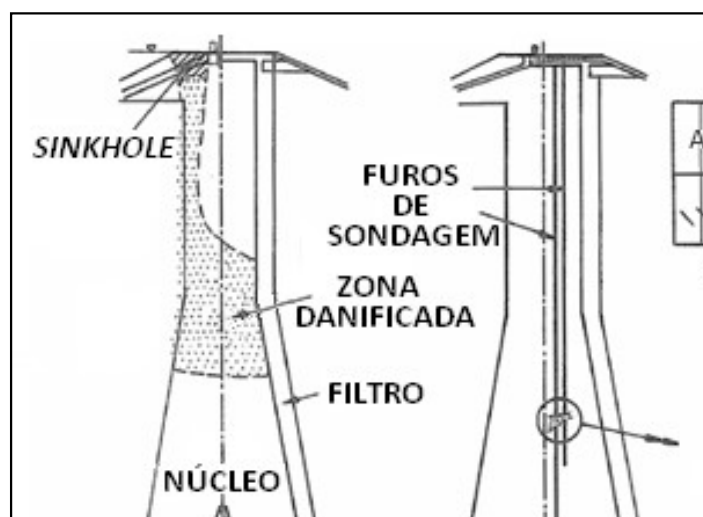


FIGURA 2: Núcleo da Barragem de Balderhead com representação do *sinkhole*, na região afetada pelo evento de *piping* ocorrido (adaptado de Vaughan e Soares, 1982)

Conforme relatado por Vaughan e Soares (1982), a área onde se desenvolveu o *sinkhole* foi preenchida por diferentes camadas de materiais – argila mole, torrões rijos de argila, lentes de areia lavada, indicando segregação do material do núcleo. Outro indício da ocorrência de segregação do material do núcleo são as amostras de areia encontradas em região fora da área de influência do processo de *piping* observado (FIGURA 2.b), já que a única forma com a qual tal fração de areia poderia ser encontrada separadamente naquele local seria por meio da segregação do material do núcleo. A susceptibilidade deste material do núcleo da barragem à instabilidade interna foi constatada nos estudos apresentados por Pimenta Filho (2013).

Conforme relatado por Vaughan e Soares (1982), ficou evidente que o núcleo da barragem entrou em colapso por fratura hidráulica e que a perda de material fino do mesmo, por erosão interna, ocorreu de forma gradual, ao longo dos meses de enchimento do reservatório. Ficou notório que a ineficiência do filtro implantado a jusante do núcleo da barragem permitiu que o carreamento destas partículas ocorresse e o problema se agravasse até que o *sinkhole* se estabelecesse.

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS

Uma vez que o problema verificado na Barragem de Balderhead está diretamente relacionado aos materiais constituintes do núcleo e de seu sistema de drenagem interna, faz-se importante abordar neste item o contexto no qual se inseriu o projeto

e a construção da barragem sob o ponto de vista da caracterização granulométrica destes materiais.

A FIGURA 3 apresenta as curvas granulométricas (em massa) dos materiais envolvidos diretamente nas análises realizadas por Pimenta Filho (2013), incluindo os limites granulométricos estabelecidos para o filtro, na ocasião do projeto da Barragem de Balderhead. Tais materiais são provenientes de amostras coletadas em campanha de investigações realizada na barragem em período pós-falha.

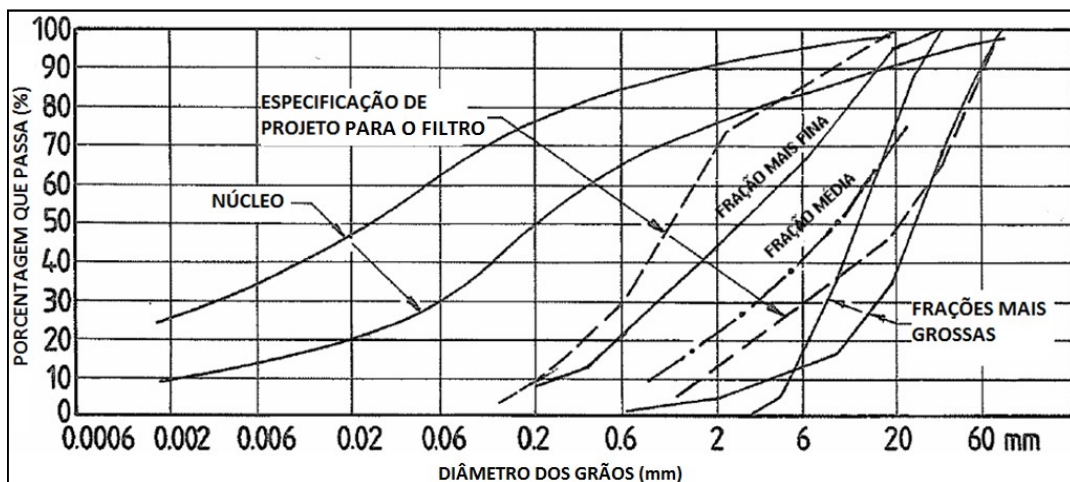


FIGURA 3: Curvas granulométricas dos materiais da Barragem de Balderhead – amostras do núcleo, amostras fina, média e grossas do filtro e especificações para o filtro conforme projeto da barragem (Adaptado de Vaughan e Soares, 1982)

Com relação ao material implantado no núcleo da barragem, o mesmo é muito bem graduado e, embora seja descrito nas bibliografias como uma argila, apresenta predominância das frações silte e areia em sua composição – conforme classificação estabelecida na NBR 6502/95 (ABNT, 1995) – de acordo com as distribuições granulométricas apresentadas na FIGURA 3.

Quanto ao filtro da Barragem de Balderhead, o mesmo foi implantado em calcário duro britado e apresenta granulometrias variáveis, conforme amostrado no *site* da barragem e representado na FIGURA 3.

Na ocasião da elaboração do projeto da Barragem de Balderhead (meados de 1959 e 1960), não se dispunha de um método reconhecidamente efetivo para dimensionamento de filtros para materiais argilosos. Para definição dos materiais utilizados como filtro foram consideradas as granulometrias de materiais utilizados para a Barragem de Selset, implantada entre 1955 e 1960 cerca de 3 km a norte do reservatório de Balderhead, no rio Tees, tendo esta sido construída com o mesmo material de núcleo que a Barragem de Balderhead.

Segundo Vaughan et al. (1970), o critério de projeto do filtro considerou a necessidade de atendimento da razão de retenção “ $D_{15}/d_{85} = 3$ ”, considerando-se a dimensão máxima de partículas do núcleo de 2 cm. No entanto, na construção da barragem, por motivos de segregação ou variações nas características dos materiais, esta razão de retenção se apresentou com valores de até 6 em trechos localizados (FIGURA 3).

Portanto, além da falta de um critério reconhecidamente seguro, as investigações realizadas após o evento de falha observado mostraram a presença de materiais de granulometrias mais grossas que as especificadas pelo projeto (FIGURA 3), não tendo sido possível concluir se o material grosseiro encontrado era decorrente de falha do controle de obra ou se o material sofreu segregação.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este item apresenta uma breve revisão bibliográfica dos aspectos principais da metodologia empregada nos estudos desenvolvidos.

#### 3.1. INTRODUÇÃO

O professor Araken Silveira (Silveira, 1964), visando estabelecer critérios para dimensionamento não apenas granulométrico, mas também em termos das espessuras dos filtros, desenvolveu uma teoria para determinação da distribuição dos vazios, a partir da qual é possível simular o carreamento das partículas de um solo. Esta metodologia geométrico-probabilística permite determinar as distâncias percorridas pelas partículas do solo base até encontrar um vazio no filtro que restrinja seu transporte.

Os subitens seguintes apresentam breve revisão bibliográfica a respeito da teoria da distribuição de vazios proposta originalmente por Silveira (1964) e posteriormente aprimoradas por outros autores, entre os quais cabe destacar; Silveira et al. (1975); Humes (1995); e Locke et al. (2001).

Pimenta Filho (2013) apresentou extensa revisão bibliográfica sobre o tema, bem como procedimento detalhado para a determinação da distribuição dos vazios (porosimetria) dos materiais e da realização das análises de carreamento, em consonância com as metodologias propostas nos trabalhos de referência.

#### 3.2. DISTRIBUIÇÃO DOS VAZIOS

A determinação da distribuição dos vazios dos materiais consiste, basicamente, na determinação:

- a) das “dimensões” dos vazios formados entre os possíveis agrupamentos de grãos de determinado material (eixo “x” da curva de distribuição dos vazios); e
- b) das frequências de ocorrência de tais vazios, as quais estão associadas, de forma indireta, às percentagens passantes dos grãos deste material (eixo “y” da curva de distribuição dos vazios).

Para a determinação dos diâmetros dos vazios, Silveira (1964) e Silveira et al. (1975) propuseram hipóteses de arranjos de grãos formadores dos vazios para diferentes estados de compacidade: estado denso e fofo. A FIGURA 4 ilustra estes arranjos.

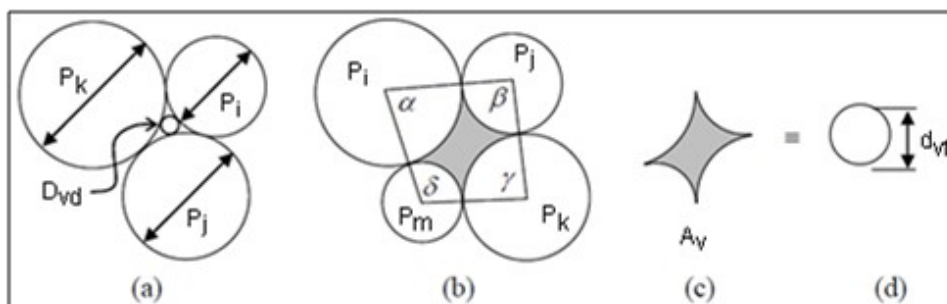


FIGURA 4: Arranjos de partículas de um filtro (a) no estado mais denso e (b) no estado mais fofo; (c) a área formada pelo plano que corta o centro de quatro partículas (estado fofo),  $A_v$ , e (d) o diâmetro equivalente do vazio correspondente à área  $A_v$ . (adaptado de Silveira et al., 1975)

Importante etapa do processo de determinação da curva de vazios de um material é a conversão de sua curva granulométrica, geralmente determinada por meio de ensaios simples de granulometria em termos das massas das partículas, em uma curva granulométrica em termos das áreas de superfície das partículas, conforme constatado por Humes (1995).

A granulometria de um material em termos das massas de suas partículas está associada a uma análise volumétrica destas partículas, a qual resulta em erros consideráveis quando da abordagem da distribuição de vazios, especialmente em casos de materiais bem graduados.

Em uma linguagem prática, Humes (1995) relata: *“Ao invés de pensar no volume total do filtro, imaginemos somente o volume dos seus vazios, ou seja, uma rede de poro-canais. Cada vazio pertencente a um poro-canal é limitado pelas superfícies de três partículas que são tangentes entre si, conseqüentemente a probabilidade de que uma partícula seja fronteira de um vazio é proporcional à sua área lateral, e não ao seu volume, uma vez que os seus pontos internos não participam na formação dos vazios (partículas sólidas ou ocas produzem o mesmo vazio).”*

Uma vez determinada a distribuição granulométrica em termos das áreas de superfície do material em análise, define-se a condição de compactação a ser considerada para se construir a distribuição de vazios deste material. Além das condições extremas de compactidade definidas por Silveira (1964) e Silveira et al. (1975), Locke et al. (2001), em uma extensão da metodologia proposta pelo Prof. Araken Silveira, determinaram uma formulação que permite a determinação da distribuição dos vazios para uma dada densidade relativa, ou Índice de Densidade,  $I_D$ , dos materiais, com base nas distribuições dos vazios para os estados fofo e denso.

Tal abordagem é interessante, visto que, geralmente, os filtros se encontram em estados intermediários de compactação, de acordo com as especificações técnicas e métodos construtivos de cada obra.

### 3.3. ANÁLISE DE CARREAMENTO

Uma vez determinada a curva de distribuição dos vazios do filtro, o problema do carreamento se resume à comparação entre os pontos desta curva e os da curva de distribuição granulométrica do material base (Silveira, 1964).

A distância percorrida por uma partícula de diâmetro  $d$  deste material depende dos vazios existentes no interior do filtro, de modo que ela será carregada sempre que encontrar um vazio de dimensão  $d_v$  tal que  $d < d_v$ , ao passo que será retida nos casos em que se deparar com um vazio de dimensão tal que  $d > d_v$ , conforme ilustrado na FIGURA 5. Tal condição corresponde à etapa de autofiltragem, ou autoestabilização do filtro.

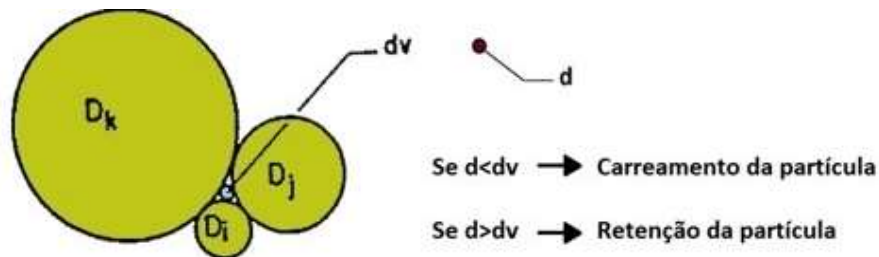


FIGURA 5: Representação esquemática (a) do vazio de controle, de diâmetro  $d_v$ , formado entre os grãos de um filtro em seu estado denso; e (b) da partícula de solo base, de diâmetro  $d$  (Pimenta Filho, 2013)

Além da avaliação simplificada mencionada, considerando-se as dimensões máximas e mínimas dos vazios,  $d_{v\text{máx}}$  e  $d_{v\text{mín}}$ , três situações podem ocorrer, quais sejam (Figuras 5 e 6):

- $d > d_{v\text{máx}}$ : as partículas do material base não penetram o filtro;
- $d < d_{v\text{mín}}$ : as partículas do material base atravessam todo o filtro, qualquer que seja sua espessura;
- $d_{v\text{mín}} < d < d_{v\text{máx}}$ : as partículas do material base penetra o filtro, percorrendo determinada distância,  $S$ , até ser retido por um vazio tal que  $d_v < d$ .

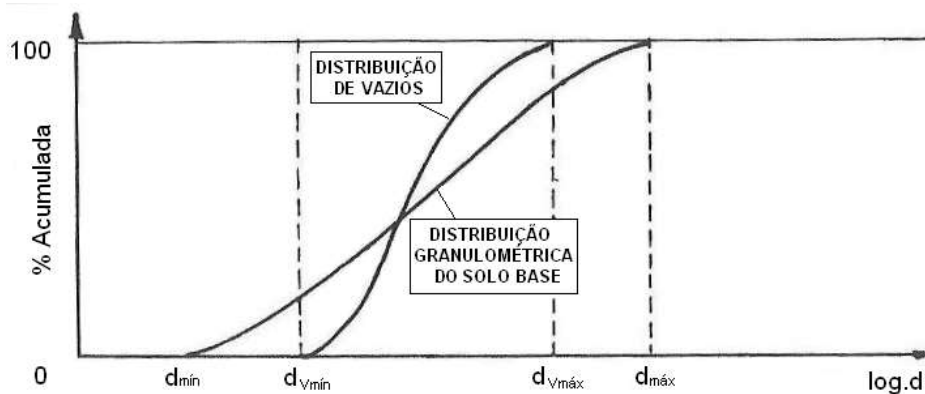


FIGURA 6: Curva dos vazios de um filtro e curva granulométrica de material base (adaptado de Silveira, 1964)

Com base nos conceitos expostos acima, Silveira (1964) estabeleceu formulações probabilísticas a partir das quais, de posse de um determinado nível de confiança,  $P^{**}$ , é possível calcular o número de confrontos,  $n$ , após os quais uma determinada partícula de diâmetro  $d$  encontre um vazio  $d_v < d$ , de modo a ter o seu caminho interrompido. Quanto maior é o nível de confiança adotado, maiores serão os carregamentos calculados.



Para a determinação do percurso total,  $S$ , da partícula através do filtro, Silveira (1964) sugere que cada confronto seja associado a uma distância igual à média geométrica, ou  $D_{50}$ , da curva granulométrica do filtro em questão.

De posse dos percursos das partículas de cada diâmetro, para o nível de confiança adotado, é possível determinar a curva de penetração –  $\log d \times S$  – para um filtro granular qualquer. A FIGURA 7 apresenta um exemplo de curva de penetração obtida por Silveira (1964).

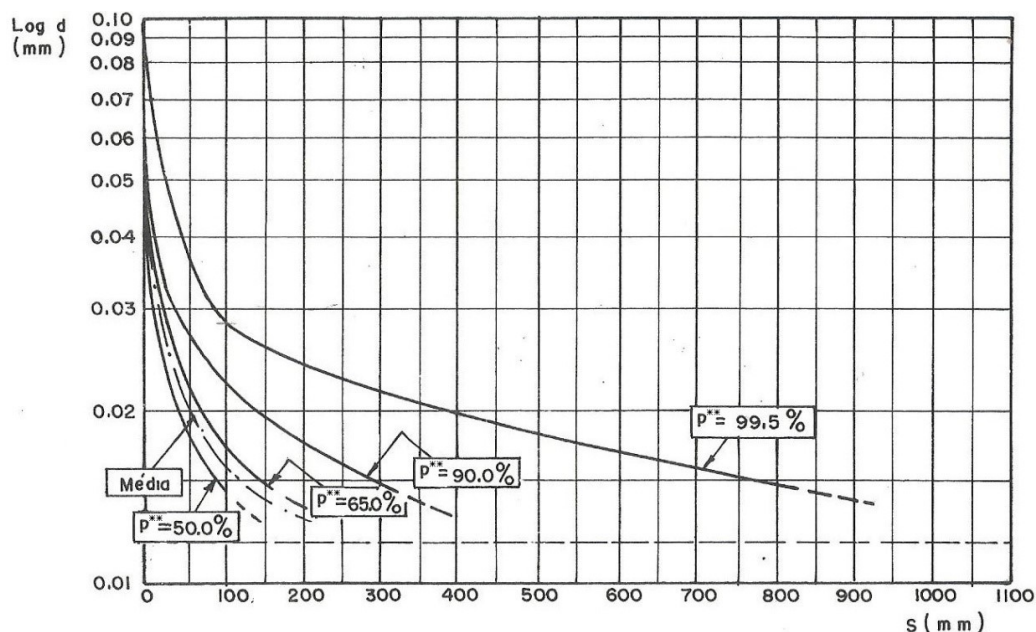


FIGURA 7: Exemplo de curva de penetração (adaptado de Silveira, 1964)

A análise desses dados permite que se verifique se ocorre a retenção das partículas mais grossas do material base, isto é, pode-se ter uma ideia se é previsto que ocorra o efeito de autofiltragem do material. Permite também verificar a partir de qual distância a contaminação do filtro é praticamente nula.

Cabe destacar que a teoria proposta por Silveira (1964) e aprimorada por outros autores em estudos conduzidos desde então até os dias atuais, com cálculo da porosimetria utilizando a distribuição de partículas em termos de suas áreas das superfícies laterais, apresenta boa concordância em relação aos resultados dos inúmeros experimentos práticos realizados em alguns destes trabalhos, como por exemplo Humes (1995) e Raut e Indraratna (2008).

#### 4. METODOLOGIA

Para a avaliação do caso da Barragem de Balderhead, foram realizadas as seguintes atividades principais:

- a) Análise e tratamento dos dados granulométricos dos materiais da Barragem de Balderhead, provenientes da FIGURA 3 (Vaughan e Soares, 1982)
- b) Definição dos cenários de estudo
  - *Materiais de solo base e de filtro*

Visando avaliar as condições extremas relacionadas às dimensões dos vazios do filtro – maiores e menores vazios possíveis – para as análises realizadas neste trabalho considerou-se os materiais caracterizados pelas curvas das frações mais fina (uma amostra) e mais grossas (duas amostras), tendo sido desconsiderada a amostra descrita como “fração média” (FIGURA 3).

As amostras dos materiais do núcleo e do filtro, consideradas nos diferentes cenários das análises realizadas neste trabalho, foram identificadas por: Núcleo Fino; Núcleo Grosso; Filtro Fino; Filtro Grosso 1; e Filtro Grosso 2.

Além das curvas granulométricas acima, com a finalidade de testar a sensibilidade das análises de carregamento, foi também considerada nas avaliações a curva referente ao limite superior (limite grosso) estabelecido para o filtro da Barragem de Balderhead por Pimenta Filho (2013), cujo dimensionamento foi realizado com base nos critérios apresentados em USDA SCS (1986) e revisado em NRCS (1994), em consonância com ICOLD (1994), os quais são considerados critérios usuais da boa prática da engenharia para projetos de filtros em barragens. Esta curva (limite grosso) representa a condição mais conservadora de análise do projeto de filtro realizado por Pimenta Filho (2013).

- *Índice de Densidade (ou densidade relativa) do filtro,  $I_D$*

Foram adotadas densidades relativas de 50% e 70% para os materiais do filtro da barragem de Balderhead. Tais condições de compactação foram adotadas por corresponderem, com razoável representatividade, aos estados “denso e fofo reais”, ou seja, aos valores de densidade relativa extremos entre os geralmente observados em obras de filtros em barragens.

Para o cenário de análise do carregamento do solo através de material equivalente ao limite superior (limite grosso) estabelecido para o filtro da Barragem de Balderhead por Pimenta Filho (2013), considerou-se para este a densidade relativa de 50%. Nota-se que foi considerada a condição crítica deste projeto, tanto em termos de granulometria como da condição de compactação do material.

- *Níveis de confiança,  $P^{**}$*

Com relação ao nível de confiança,  $P^{**}$ , incorporado às análises, foram considerados os valores de 90%, 95% e 99,99%. Destaca-se que a adoção do valor  $P^{**}=95%$  é considerada razoável para a simulação do carregamento provável nas avaliações realizadas, uma vez que a maioria dos intervalos de confiança adotados na prática moderna aplicada situam-se neste nível (Zar, 1984). O nível de confiança  $P^{**}=99,99%$  foi estabelecido como representativo de uma condição conservadora. O nível de confiança  $P^{**}=90%$  está associado a carregamentos menores e foi incorporado às análises apenas com a finalidade de prover uma melhor sensibilidade da variação dos carregamentos em função deste parâmetro.

c) Determinação das curvas de distribuição dos vazios dos materiais de filtro

Para a determinação das curvas de vazios, foi utilizado um programa desenvolvido por ocasião do desenvolvimento dos trabalhos de Raut (2006), na Universidade de Wollongong, da Austrália, que permite a determinação da distribuição dos vazios de um determinado material para dados valores de índice de densidade tendo por base sua distribuição granulométrica em massa, número ou áreas de superfície das partículas, sendo tais variações possíveis definidas de acordo com o interesse de cada estudo. Esta determinação é feita com base nas metodologias de referência, conforme item 3.

d) Determinação das curvas de penetração e elaboração do diagrama de carregamento (análises de carregamento)

O diagrama de carregamento consiste em uma ferramenta criada por Pimenta Filho (2013) para uma representação esquemática dos carregamentos simulados, mostrando, para cada cenário avaliado, os percursos obtidos, para os níveis de confiança considerados, e os diâmetros das partículas que percorreram as maiores distâncias, bem como suas frequências de ocorrência no material do núcleo antes de iniciado o carregamento.

O diagrama de carregamento também apresenta os valores da razão  $D_{15}/d_{85}$  para cada combinação núcleo-filtro avaliada. O objetivo de tal consideração é relacionar os percursos determinados nas análises de carregamento aos valores da razão de retenção estabelecida pelo Critério Clássico de Terzaghi.

e) Análise crítica dos resultados e conclusões.

## 5. RESULTADOS

A TABELA 1 apresenta os cenários considerados nas análises de carregamento realizadas e um resumo dos resultados obtidos.

Cenários Avaliados	Materiais/ Granulometrias Consideradas		Índice de Densidade do filtro, $I_D$ (%)	Resultados das Análises de Carregamento			
	Filtro	Núcleo		Percurso máximo percorrido para $p^{**}=99,9\%$ (cm)	Percurso máximo percorrido para $p^{**}=95\%$ (cm)	Diâmetro $d$ da partícula que percorreu tal percurso (mm)	% passante (em massa) das partículas de diâmetro $d$ do solo base
1	Fino	Grosso	70%	11,3	3,69	0,075	33%
2	Fino	Grosso	50%	14,5	4,73	0,075	33%
3	Grosso2	Fino	70%	601,0	195,5	0,15	73%
4	Grosso2	Fino	50%	616,0	200,4	0,15	73%
5	Grosso1	Fino	70%	147,2	47,9	0,85	87%
6	Grosso1	Fino	50%	159,0	51,7	0,85	87%
7	Grosso2	Grosso	70%	601,0	195,5	0,15	42%
8	Grosso2	Grosso	50%	616,0	200,4	0,15	42%
9	Grosso1	Grosso	70%	147,2	47,9	0,85	69%
10	Grosso1	Grosso	50%	159,0	51,7	0,85	69%
11	Fino	Fino	70%	11,3	3,69	0,075	65%
12	Fino	Fino	50%	14,5	4,73	0,075	65%
13	Grosso2	Fino sem fração pedregulho	70%	601,0	195,5	0,15	84%
14	Grosso1	Fino sem fração pedregulho	70%	147,2	47,9	0,85	100%
15	Fino	Fino sem fração pedregulho	70%	11,3	3,69	0,075	45%
16	Projeto de Filtro Pimenta 2013 - Limite Grosso	Fino	50%	5,0	1,6	0,075	65%
17	Projeto de Filtro Pimenta 2013 - Limite Grosso	Grosso	50%	5,0	1,6	0,075	33%

TABELA 1: Análises de carregamento – cenários avaliados e resumo dos resultados

A FIGURA 8 apresenta o diagrama de carreamento, o qual mostra, para cada cenário avaliado, os percursos obtidos – para níveis de confiança de 95% e 99,99% – e os diâmetros das partículas que apresentaram os maiores carreamentos, bem como as porcentagens passantes (em massa) dessas partículas do núcleo íntegro, ou seja, antes de iniciado o processo de carreamento.

Como mencionado no item anterior, além da determinação dos percursos das partículas, o diagrama de carreamento também apresenta os valores da razão  $D_{15}/d_{85}$  para cada combinação núcleo-filtro avaliada, de modo a permitir relacionar os percursos observados nas análises de carreamento aos valores da razão de retenção estabelecida no critério clássico de Terzaghi.

Cabe mencionar, a título de informação e contexto, que conforme apresentado por Pimenta Filho (2013) e Pimenta et al. (2014) o critério utilizado para o dimensionamento do filtro da Barragem de Balderhead foi inadequado, resultando em curvas limites mais grosseiras que as determinadas de acordo com os critérios praticados pela engenharia nos dias atuais.

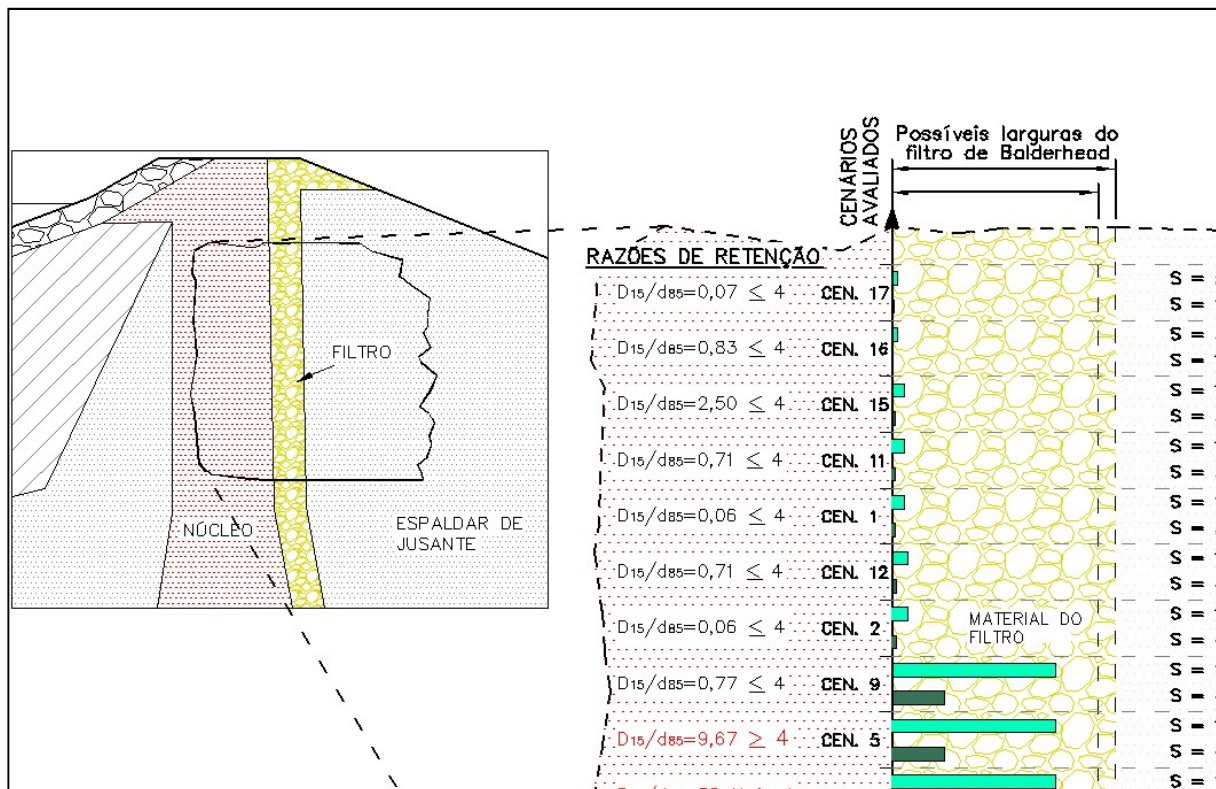


FIGURA 8: Diagrama de Carreamento – representação gráfica dos carreamentos simulados e razões de retenção  $D_{15}/d_{85}$  para cada cenário

A título ilustrativo às análises realizadas, conforme resultados resumidos na TABELA 1 e na FIGURA 8, as Figuras 9 à 12 apresentam as curvas granulométricas dos solos base e filtros e as curvas de distribuição dos vazios dos filtros, bem como as curvas de penetração, para os cenários 13 e 16 estudados, cujas análises estão apresentadas nos subitens 6.1 e 6.2. Os gráficos aplicáveis aos demais cenários analisados foram apresentados por Pimenta Filho (2013).

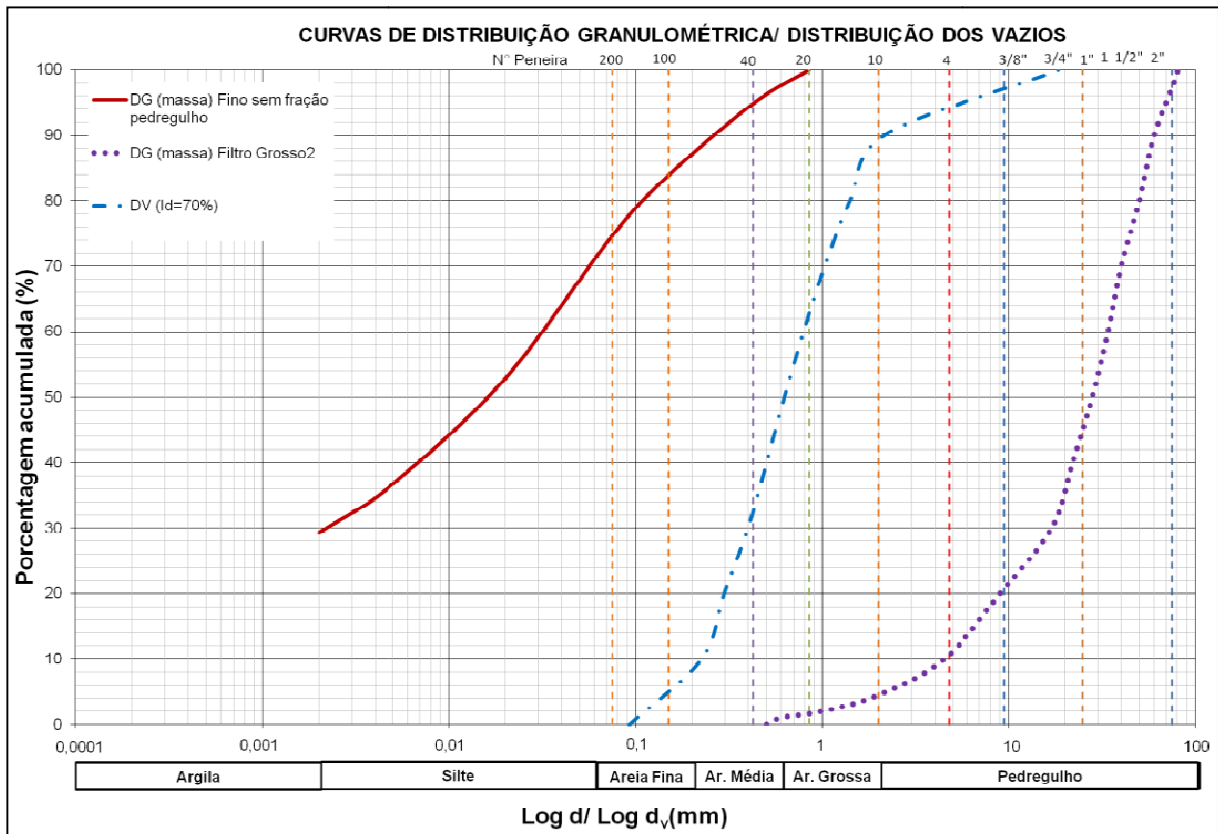


FIGURA 9: Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 13 (amostras “Filtro Grosso2” e “Núcleo Fino sem fração pedregulho”)

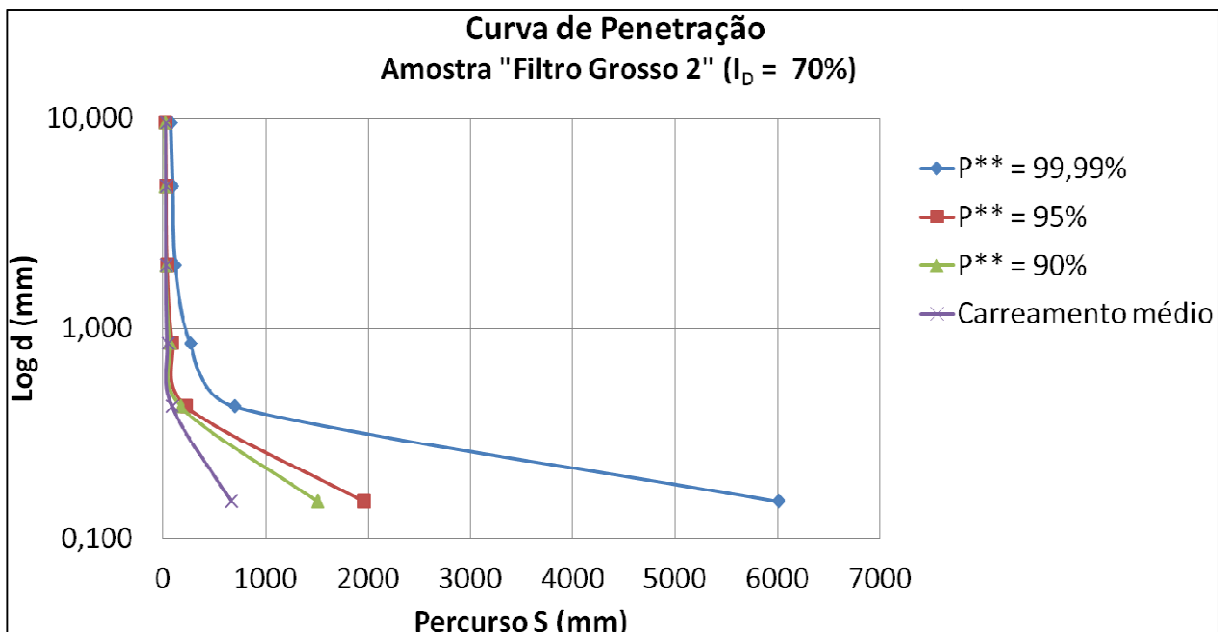


FIGURA 10: Curvas de penetração – Amostra “Filtro Grosso2”, ID = 70%

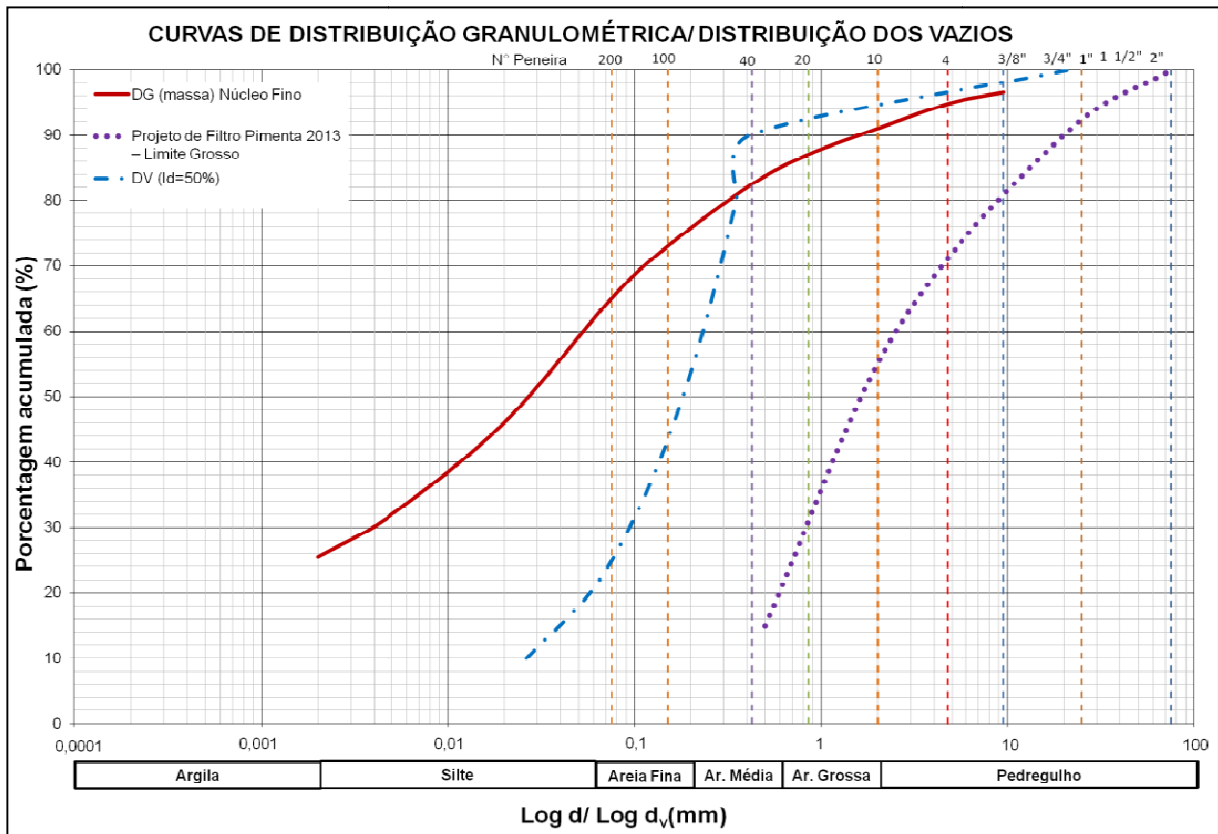


FIGURA 11: Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 16 (amostras “Projeto de Filtro Pimenta 2013 – Limite Grosso” e “Núcleo Fino”)

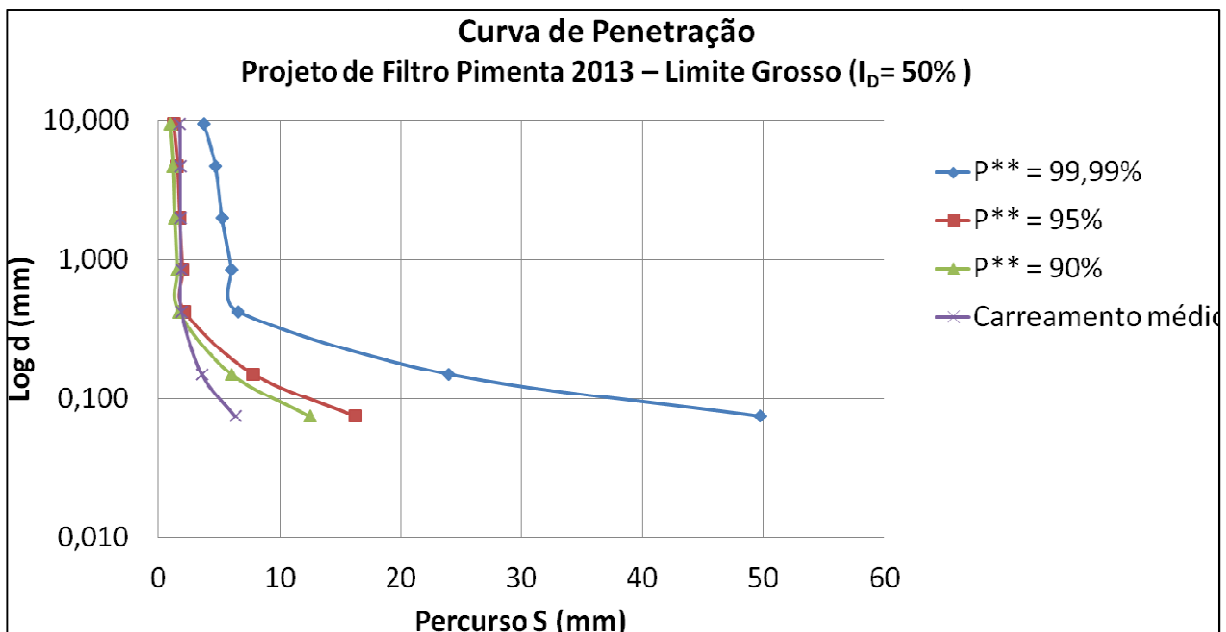


FIGURA 12: Curvas de penetração – Amostra “Projeto de Filtro Pimenta 2013 – Limite Grosso”, ID = 50%

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos resultados apresentados no item 5, podem ser feitas as avaliações apresentadas nos subitens 6.1 ao 6.4, a respeito das análises de carreamento realizadas para os diversos cenários considerados.

## 6.1. CONDIÇÕES CRÍTICAS – CENÁRIOS 3, 4, 7, 8 E 13

Para um nível de confiança  $P^{**}=95\%$ , as avaliações dos cenários 3, 4, 7, 8 e 13 indicaram carreamentos da ordem de 195 a 200 cm para a partícula mais fina do núcleo cujo percurso pôde ser calculado, conforme representado no diagrama de carregamento mostrado na FIGURA 8. Dentre estes resultados, destacam-se os obtidos para os cenários 3, 4 e 13, para os quais 73% a 84% das partículas do núcleo são mais finas que as partículas que apresentaram os carreamentos mencionados. Para estas partículas, as análises indicam carregamento “infinito”.

É importante destacar que o cenário 13, para o qual foi observada a situação mais desfavorável, corresponde a uma condição provável, haja vista a susceptibilidade do material do núcleo “Núcleo Fino” à instabilidade interna (conforme verificado por Pimenta Filho, 2013) e o fato de que as partículas que compõem a fração pedregulho não participam do processo de filtragem.

Portanto, pode-se dizer que, para estes cenários, grande parte (aproximadamente 75% a 85%) das partículas do núcleo localizadas na interface solo-filtro seriam carregadas por percursos iguais ou maiores que a espessura do filtro de Balderhead, o que sugere uma elevada probabilidade de ocorrência de *piping* para tais cenários, independentemente da possibilidade de ocorrência de fratura hidráulica no núcleo da barragem, fato constatado nos trabalhos de Vaughan et al. (1970) e Vaughan e Soares (1982).

Cabe ressaltar que tal conclusão não indica que não houve fratura hidráulica, e sim que o evento de erosão interna poderia ter ocorrido independentemente da ocorrência desse tipo de fenômeno.

Com relação à eficácia do sistema de drenagem, de modo geral, é importante destacar que, uma vez que os carreamentos observados têm valores próximos aos da espessura do filtro (ver subitem 2.1), é possível que, mesmo que ocorresse a estabilização do carregamento, a capacidade drenante do mesmo fosse comprometida, o que provavelmente conduziria a problemas de aumento de poropressão no maciço da barragem, podendo levar à instabilização da mesma num segundo momento.

## 6.2. AVALIAÇÃO DO PROJETO DE FILTRO – CENÁRIOS 16 E 17

De forma independente das análises feitas para os materiais do filtro da Barragem de Balderhead, foi avaliado o limite granulométrico superior estabelecido no dimensionamento do filtro realizado por Pimenta Filho (2013), com base nos critérios apresentados por NRSC (1994), sob a ótica da distribuição de vazios e do carregamento passível de ocorrer através dos mesmos. Neste sentido, considerou-se o filtro da barragem como sendo um material equivalente ao referido limite grosseiro do filtro projetado para o material mais fino do núcleo da barragem.

Para este cenário de análise, considerou-se para este a densidade relativa, ou Índice de Densidade,  $I_D$ , de 50%. Nota-se, portanto, que foi considerada a condição crítica deste projeto, tanto em termos de granulometria (limite grosso) como da condição de compactidade do material (estado mais fofo).

Conforme observado na TABELA 1 e na FIGURA 8, foram calculados carreamentos máximos reduzidos, da ordem de 2 a 5 cm (para níveis de confiança de 95% e 99,99%, respectivamente), para estes cenários, o que se faz coerente, visto que tais metodologias de dimensionamento de filtros apresentam boa aceitação na engenharia geotécnica desde os trabalhos de Terzaghi (1926).

### 6.3. INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO DO FILTRO

O trabalho desenvolvido por Pimenta Filho (2013) não contou com informações sobre a compactação do filtro da Barragem de Balderhead, tendo sido os valores de índice de densidade inferidos. Conforme mencionado no item 4, para as análises de carregamento, foram adotados os índices de densidade,  $I_D$ , de 50% e 70% para os materiais do filtro da barragem de Balderhead. Tais condições de compactação foram adotadas por corresponderem, com razoável representatividade, aos estados “denso e fofo reais”, ou seja, aos valores de  $I_D$  extremos entre os geralmente observados em obras de filtros em barragens.

Para estes valores adotados, notou-se que a variação deste aspecto não repercute de forma relevante nos percursos das partículas do núcleo, sendo a ordem de grandeza mantida. Cabe ressaltar que esta conclusão não deve ser estendida para as demais situações da engenharia de barragens, devendo ser associada ao caso específico da Barragem de Balderhead. Análises devem ser realizadas para cada situação e projeto específico.

Embora tal ressalva deva ser feita, a conclusão sobre a eventual baixa influência do índice de densidade sobre as curvas de penetração, em uma análise de carregamento, apresenta razoável convergência em relação aos relatos de Schuler (1996) e Giroud (1996).

### 6.4. RAZÃO DE RETENÇÃO $D_{15}/D_{85}$ E INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO PEDREGULHO NO PROCESSO DE FILTRAGEM

Pela análise do diagrama de carregamento (FIGURA 8), pode-se observar, de um modo geral, uma boa correlação entre os carreamentos determinados e os valores da razão de retenção  $D_{15}/d_{85}$ , para cada cenário avaliado.

Para as análises 1, 2, 11, 12, 15, 16, 17, as combinações núcleo-filtro apresentaram carreamentos pequenos (ou seja, rápida estabilização do filtro) e valores para a razão de retenção  $D_{15}/d_{85}$  menores ou iguais a quatro, indicando a eficácia do filtro; Para as análises 3, 4 e 13, as combinações núcleo-filtro apresentaram carreamentos próximos ou maiores que a largura do filtro de Balderhead (ou seja, não houve estabilização do filtro) e valores para a razão de retenção  $D_{15}/d_{85}$  maiores que quatro, indicando que o filtro não é eficaz;

Para as análises 7 e 8, as combinações núcleo-filtro apresentaram carreamentos próximos ou maiores que a largura do filtro de Balderhead (ou seja, não houve estabilização do filtro) e valores para a razão de retenção  $D_{15}/d_{85}$  menores que quatro, sugerindo que o filtro fosse eficaz. Esta incoerência se justifica pela presença de pedregulhos na granulometria do “Núcleo Grosso”, as quais não participam do processo de filtragem e, portanto, não devem ser consideradas na curva granulométrica a partir da qual será calculado o  $d_{85}$  – conforme recomendado no



procedimento apresentado por NRCS (1994) para materiais que contenham partículas maiores que 4,75 mm.

A importância da consideração deste aspecto se mostra evidente ao se avaliar os carregamentos e razões de retenção calculados para as análises 3 e 4 (combinações “Núcleo Fino x Filtro Grosso 2”); e 13 (combinação “Núcleo Fino sem pedregulho x Filtro Grosso 2”). As análises indicam carregamentos similares para estes cenários, no entanto valores da razão  $D_{15}/d_{85}$  bem distintas, embora ambas com valores maiores que quatro.

## 7. CONCLUSÕES

Com base na teoria da distribuição de vazios e na aplicação desta metodologia de análise do carregamento à Barragem de Balderhead, em vista do evento de *piping* ocorrido nesta barragem, podem ser apresentadas as seguintes conclusões:

### 7.1. TEORIA DA DISTRIBUIÇÃO DOS VAZIOS E ANÁLISES DE CARREAMENTO

- O problema da filtragem, seja quanto ao dimensionamento ou quanto à avaliação de desempenho, é geralmente abordado em termos de diâmetros característicos dos materiais do solo base e do filtro. Embora os critérios usualmente aplicados para o dimensionamento de filtros com base em tal premissa sejam considerados satisfatórios, estes foram estabelecidos com base em resultados de ensaios de laboratórios e não contam com base teórica que permita avaliar qual é o carregamento das partículas do solo base através dos vazios formados entre os grãos de um filtro.
- A partir da metodologia geométrico-probabilística proposta por Silveira (1964), é possível uma análise teórica mais racional sobre o carregamento de partículas de um solo base através de vazios formados entre os grãos de um filtro. Esta metodologia geométrico-probabilística permite determinar os percursos percorridos pelas partículas do solo base até encontrar um vazio no filtro com dimensão tal que restrinja seu transporte.
- A teoria da distribuição de vazios pode ser utilizada para o cálculo da largura da “zona de pré-filtro” (eventualmente referida também como “zona de autofiltragem”) de um filtro, a qual geralmente corresponde à distância percorrida pela partícula do solo base de diâmetro  $d_{85}$ .
- Adicionalmente à breve revisão bibliográfica apresentada neste trabalho, faz-se relevante mencionar que o Critério de Terzaghi para dimensionamento de filtros, embora considerado seguro, sendo amplamente aplicado na boa prática da engenharia moderna, apresenta certa dose de conservadorismo, de acordo com alguns autores, como Sherard et al. (1984a) e Raut e Indraratna (2008). Segundo Sherard et al. (1984a), no entanto, o fator de segurança de aproximadamente 2 implícito no critério de Terzaghi não repercute em grandes aumentos de custos nas obras.

## 7.2. ANÁLISES DE CARREAMENTO APLICADAS À BARRAGEM DE BALDERHEAD

- Pode-se dizer que, conforme esperado, o critério de dimensionamento de filtros adotado por Pimenta Filho (2013) para o caso da Barragem Balderhead – NRCS (1994), referenciado em ICOLD (1994) como um dos critérios recomendados para o projeto de filtros de barragens – é adequado para o caso em questão, haja vista os resultados das análises de carreamento realizadas sobre o limite mais grosseiro da faixa granulométrica determinada no dimensionamento. Estas análises indicaram carreamentos reduzidos das partículas do núcleo da barragem.

Nota: conforme apresentado por Pimenta Filho (2013) e Pimenta et al. (2014) o critério utilizado para o dimensionamento do filtro da Barragem de Balderhead foi inadequado, resultando em curvas limites mais grosseiras que as determinadas de acordo com os critérios praticados pela engenharia nos dias atuais.

- As análises de carreamento realizadas indicaram carreamentos excessivos das partículas do núcleo da Barragem de Balderhead para os cenários mais críticos avaliados, podendo-se considerar a ocorrência de processos de erosão interna como provável para esses casos, condição que se mostra em concordância com o evento de *piping* observado na barragem.
- Embora relatos feitos por autores que avaliaram o caso da Barragem de Balderhead indiquem a ocorrência de fratura hidráulica e a susceptibilidade à instabilidade interna do núcleo da mesma, as análises apresentadas neste trabalho indicam que se poderia esperar a ocorrência do processo de *piping* na barragem independentemente da ocorrência destes fenômenos.
- Em se considerando as razões de retenção  $D_{15}/d_{85}$  determinadas para os diversos cenários avaliados, pôde-se verificar a boa correlação do Critério Clássico de Terzaghi com os resultados obtidos nas análises de carreamento realizadas. Desta avaliação, pôde-se concluir também sobre o fato de que as partículas mais grosseiras do solo base não participam do processo de filtragem e que é imprescindível que esta fração seja desconsiderada da curva granulométrica deste material quando das análises para a elaboração de projetos de filtros.
- Quanto à influência da compacidade do filtro sobre os percursos percorridos pelas partículas do núcleo, notou-se que a variação deste aspecto não repercutiu de forma relevante nos carreamentos das partículas do núcleo, sendo a ordem de grandeza mantida. Cabe ressaltar que esta conclusão não deve ser estendida para as demais situações da engenharia de barragens, devendo ser associada ao caso específico da Barragem de Balderhead. Embora tal ressalva deva ser feita, a conclusão sobre a eventual baixa influência do índice de densidade sobre as curvas de penetração, em uma análise de carreamento, apresenta razoável convergência em relação aos relatos de Schuler (1996) e Giroud (1996).

## 8. AGRADECIMENTOS

Ao engenheiro Dr. Ashok Raut, por disponibilizar o programa computacional utilizado para a determinação das curvas de vazios.

## 9. PALAVRAS-CHAVE

Distribuição de vazios; filtros granulares; erosão interna; piping; porosimetria; carreamento.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVEIRA, A. Algumas considerações sobre filtros de proteção - Uma Análise do Carreamento. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo, 1964.
- [2] MIDDLEBROOKS, T. A. Earth-dam Practice in United States. Transactions of the American Society of Civil Engineers, Centennial Volume, 1953. 697-721 p.
- [3] FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. Analysis of embankment dam incidents UNICIV. Report nº. R-374, September 1998.. The University of New South Wales, Sydney 2052, Australia. 282 p. 1998.
- [4] FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. The statistics of embankment dam failures and accidents. Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, No.5, National Research Council Canada, Ottawa, out. 2000. 1000-1024 p.
- [5] PIMENTA FILHO, M. A. (2013). Análise da Erosão Interna de Solos em Barragens com Base na Distribuição de Vazios. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes). UFMG, Belo Horizonte.
- [6] VAUGHAN, P. R.; KLUTH, D. J.; LEONARD, M. W.; PRADOURA, H. H. M. Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead Dam and the remedial works adopted from its repair. Transactions, 10th International Congress on Large Dams, Montreal, Canada. Vol. 23. 1970. 122-124 p.
- [7] VAUGHAN, P. R.; SOARES, H.F. Design of filters for clay cores of dams. In: Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers. Vol. 108, GT1, 1982. 17-32 p.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Terminologia – Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.
- [9] SILVEIRA, A.; PEIXOTO, J. T. L.; NOGUEIRA, J. B. On void-size distribution of granular materials. Proc. Of the 5th Pan American Conf. On Soil Mech. And Found. Eng., Buenos Aires, Argentina, 1975. 160-167 p.
- [10] 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. 209 p.

- [11] LOCKE, M.; INDRARATNA, B.; ADIKARI, G. Time-dependent particle transport through granular filters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 2001. 521 p.
- [12] RAUT, A. K.; INDRARATNA, B. Further advancement in filtration criteria through constriction-based techniques. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, vol. 134, n. 6, 2008. 883-887 p.
- [13] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil mechanics. Note nº. 1. Soil Conservation Service. Guide for Determining the Gradation of Sand and Gravel Filters, jan, 1986.
- [14] NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICES. Gradation design of sand and gravel filters. Part 633 National Engineering Handbook, United States Department of Agriculture, Washington, DC, 1994.
- [15] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Embankment Dams – Granular Filters and Drains. Bulletin Nº 95, 1994.
- [16] ZAR, J.H. Biostatistical analysis. New Jersey: Prentice Hall International, 1984 (pp. 43-45).
- [17] RAUT, A. K. Mathematical modelling of granular filters and constriction-based filter design criteria. PhD thesis, University of Wollongong, 2006.
- [18] PIMENTA FILHO, M. A.; ÁVILA, J. P. ESPÓSITO, T. Verificação do Filtro Implantado na Barragem de Balderhead. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 2014.
- [19] TERZAGHI, K. Soil physical basis of mechanics of earth structures. F. Deuticke, Wien. 1926.
- [20] SCHULER, U. Scattering of the composition of soils: an aspect for the stability of granular filters. *Proceedings of Geofilters '96*. Lafleur, J. & Rolin, AL. (editors): Bitech Publications, Montreal, 1996. 21-34 p.
- [21] GIROUD, J. Granular filters and geotextile filters. *Proceedings of Geofilters '96*, LAFLEUR, J. & ROLIN, AL. (editors), Bitech Publications, Montreal, 1996. 565-680 p.
- [22] SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R. Basic properties of sand and gravel filters. In: *Journal of Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, vol. 110, 1984. 684-700 p.