

Segurança nas barragens Gangorra e Itaúna contra erosão interna

Safety for the Gangorra and Itaúna dams against internal erosion

Bruna Tayna Macedo

Fideles

brunatayna_eng@hotmail.com

Universidade Estadual Vale do Acaraú – UVA

Vanda Tereza Costa

Malveira

tmalveira@hotmail.com

Universidade Federal do Ceará – UFC

Resumo

As barragens de terra são estruturas suscetíveis a percolação de água, podendo sofrer processos de erosão interna, fenômeno no qual as partículas finas do solo são carregadas pelo fluxo da água para o interior da estrutura, podendo levar a uma perda de solo. O estudo desses processos nas barragens localizadas no semiárido do estado do Ceará é importante, tendo em vista a vulnerabilidade maior dessas estruturas devido aos períodos prolongados de seca e aos cenários de enchimento dos reservatórios, contribuindo para o desgaste do solo. A estrutura responsável por reter as partículas do solo e paralisar processos de erosão interna são os filtros granulares, com isso, torna-se necessário o bom dimensionamento das granulometrias dos materiais do filtro. Os critérios de verificação usualmente utilizados, como o critério de Terzaghi, adotado em projetos de barragens analisadas, entretanto, não se adequam a todos os tipos de filtros, uma vez que se restringem a solos pouco graduados. Métodos recentes, que incorporam o dimensionamento dos vazios dos drenos, resultam em uma abordagem mais realista. O presente trabalho analisa o critério por tamanho de vazios de Indraratna e Raut (2008), juntamente com o critério de Terzaghi, realizando simulações acerca desses dois critérios e aplicando-as a Gangorra e Itaúna, duas barragens localizadas no estado do Ceará. Os resultados mostram que a teoria dos vazios na associação com o estado de compactação para descrever o comportamento dos filtros é mais eficiente que os critérios convencionais de Terzaghi, apontando a vulnerabilidade para um dos casos analisados.

Palavras-chave: Barragens de terra. Erosão interna. Filtros.

Abstract

Embankment are structures susceptible to seepage that can cause internal erosion processes, a phenomenon in which the fine particles of the soil are carried by the flow into the structure, which can lead to soil loss. The study of the processes in the dams located in the semi-arid state of Ceará is important, due to the greater vulnerability of the structures in prolonged periods of drought and reservoir filling scenarios, contributing to soil wear. A structure responsible for retain as soil particles and paralyzing internal erosion processes are the granular filters, which makes it necessary to good design of the granulometry of the filter materials. The selection criteria usually used, such as the Terzaghi criterion, adopted in dams projects analyzed, are not suitable for all types of filters, since they are restricted to low graded soils. Recent methods that incorporate drainage void sizing result in a more realistic approach. The present work analyzes the criterion for the size of the voids of Indraratna and Raut (2008), together with the Terzaghi criterion, where they perform simulations on the two criteria, and apply two dams located in the state of Ceará, Gangorra and Itaúna. The results show that the theory of voids in the association with the state of compression to describe the behavior of the filters are more efficient in the conventional Terzaghi criteria, pointing out a vulnerability for one of the cases analyzed.

Keywords: Embankment. Internal erosion. Filters.

1 Introdução

Barragens são obras construídas transversalmente a um rio e que têm diversas finalidades, dentre as quais, destacam-se: a geração de energia elétrica, a irrigação agrícola, o abastecimento humano, a dessedentação de animais, a recreação, o controle de rejeitos e a regularização de vazões.

De acordo com Franco (2008), a grande quantidade de água que essas estruturas armazenam pode levá-las a uma condição de vulnerabilidade diante de qualquer falha, seja no projeto, seja na execução, resultando numa grave condição

de risco a vidas e propriedades localizadas a jusante. Nas barragens de terra, esse risco torna-se maior, visto que a percolação da água no interior da estrutura pode acarretar o arraste de partículas de solo pelo seu interior, podendo ocasionar processos de erosão interna que, junto aos galgamentos, são responsáveis por grande parte das causas de ruptura de barragens no mundo (Pimenta Filho, 2013). O prolongamento do processo de erosão, juntamente com o aumento do fluxo de percolação da água, pode culminar em *piping*, um dos fenômenos frequentemente originados devido à erosão interna, e que já foi constatado em algumas barragens no mundo (Pimenta Filho, 2013). A percolação é um processo natural, mas que deve ser controlado, sendo importante conhecer os parâmetros de dimensionamento de filtros, já que o controle do processo de erosão depende, fundamentalmente, da eficiência de um sistema de drenagem interna, no qual esses filtros granulares estão inseridos (Dias, 2015).

No que se refere ao dimensionamento usualmente adotado em projetos de filtros granulares em barragens, existem critérios baseados em métodos empíricos, os quais desprezam, muitas vezes, o funcionamento do filtro no decorrer da sua vida útil e limitam o dimensionamento. Além disso, esses critérios levam em conta a granulometria dos solos, mas desprezam alguns parâmetros fundamentais no processo de retenção do solo, como os vazios do filtro, que vão de fato assegurar que as partículas do solo não sejam carregadas.

Estudos recentes envolvem modelos probabilísticos e consideram a teoria dos vazios para simular o comportamento do filtro como material protetor do solo no interior da barragem e os critérios de verificação que incluem essa teoria no dimensionamento, como os critérios de Raut e Indraratna (2008). Logo, é importante estudar e avaliar esses critérios, visto que processos de erosão interna ainda hoje são constatados em algumas barragens que possuem sistemas de drenagem interna, o que pode deflagrar um cenário de perigo real para o ambiente a qual que pertencem.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo verificar e analisar o comportamento de filtros mediante critérios que envolvam as granulometrias dos materiais, como também o tamanho dos vazios, avaliando, assim, a segurança geotécnica dessas estruturas.

2 Referencial Teórico

2.1 Erosão Interna

Entre os principais causadores de rupturas em barragens no mundo destaca-se a erosão interna, o que torna relevante o estudo desse problema no âmbito da engenharia geotécnica para que possam ser avaliadas e implementadas medidas a favor dessas obras para a sociedade. Segundo a *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 2013), a erosão interna ocorre quando partículas do solo dentro de uma barragem de aterro são carregadas para jusante pelo fluxo de água percolado. Ela começa quando as forças erosivas impostas pelas cargas hidráulicas excedem a resistência dos materiais da barragem ao arraste. Os processos de formação da erosão interna são constituídos de seis etapas, que vão desde o início até a ocorrência da fratura.

2.1.1 Fases de um processo de erosão interna

- Início da Erosão Interna

A primeira condição para que a erosão interna ocorra é o desprendimento de partículas. A água que escoar através da barragem, ou que flui em fendas, deve fornecer energia suficiente para separar as partículas da estrutura do solo (ICOLD, 2013) e dar início à erosão interna.

Existem quatro mecanismos que podem iniciar uma erosão, são eles: escoamentos concentrados, que, segundo a *Federal Emergency Management Agency* (FEMA, 2015), podem ocorrer quando caminhos de fluxo preferenciais se desenvolvem em aterros, suas fundações ou contatos entre o preenchimento de estruturas de concreto ou rocha, devido a uma determinada abertura em solo através da qual, segundo ICOLD (2013), podem ocorrer vazamentos concentrados, cujas paredes podem ser erodidas pelo fluxo da água;

A erosão regressiva, segundo ICOLD (2013), existe em duas formas: o *piping*, que se inicia de jusante a montante da barragem, formando um canal ou “tubo” de erosão, pelo qual o fluxo percola com vazões consideráveis; e o *sinkhole*, formado a jusante do núcleo da barragem, que está inadequadamente protegido por um filtro ou zona de transição, formando-se geralmente na direção subvertical;

- A Sufusão (suffusion)

Ocorre quando a água flui através de solos instáveis internamente e arrasta as partículas finas do maciço entre os vazios das partículas maiores, deixando para trás um esqueleto formado por partículas mais grosseiras (FEMA, 2015). Finalmente, a erosão de contato, que ocorre quando um solo grosso está em contato com um solo fino e um fluxo de água, paralelo ao contato desses solos, faz com que o fino seja carregado para dentro do material granular (ICOLD, 2013).

- Continuação

A erosão iniciada continuará, a menos que as forças de erosão sejam reduzidas ou a passagem das partículas erodidas seja impedida de alguma forma, como pela ação de um filtro (ICOLD, 2013).

- Progressão

De acordo *Deutsches Talsperrenkomitee e.V.* (DTK, 2007), é a fase na qual ocorre o alargamento do “tubo”, o aumento da pressão dos poros e a infiltração tem sua intensidade aumentada.

- Detecção

Trata-se da fase em que se tem a capacidade de detectar o processo da erosão interna propriamente dita, sendo possível intervir (DTK, 2007).

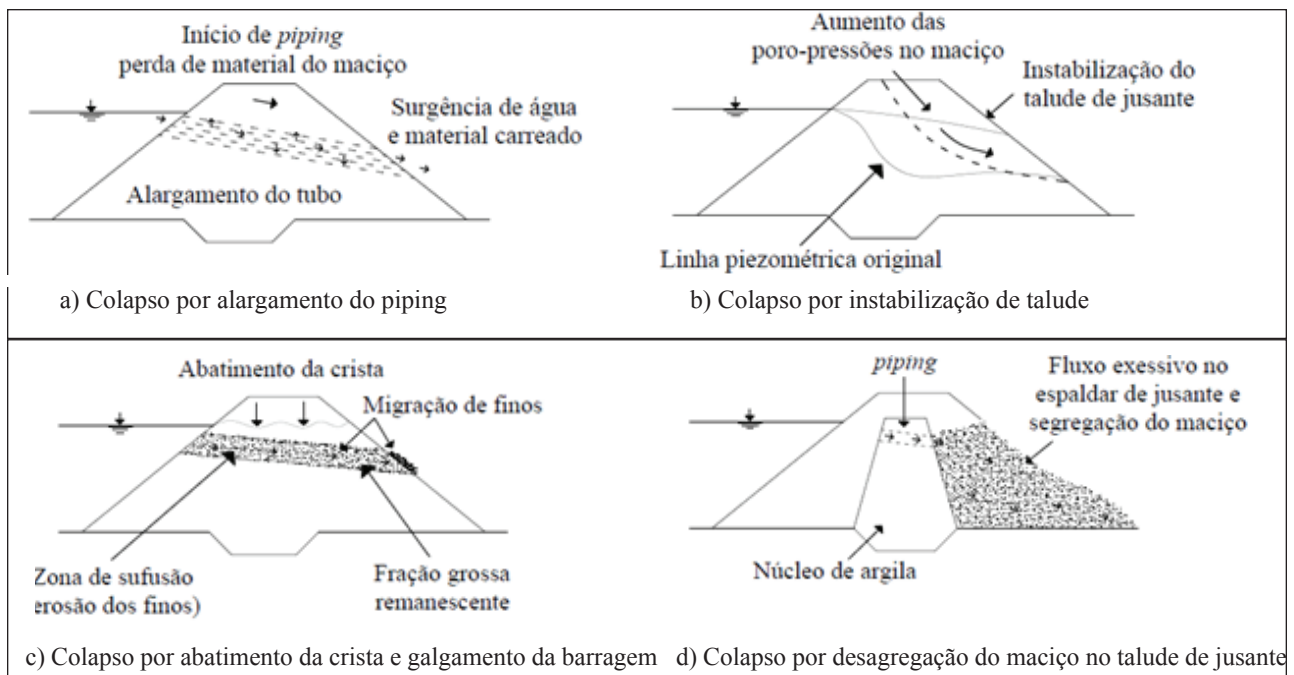
- Intervenção

Caracterizada pela capacidade de parar esse processo nas suas três primeiras fases e antes da formação de uma fratura (DTK, 2007).

- Fratura

Trata-se da fase final de erosão interna, e pode ocorrer por quatro formas distintas (Fig.1): alargamento excessivo do tubo de erosão, instabilidade do talude de jusante, galgamento, e desagregação do talude de jusante.

Figura 1 – Modos de ruptura.



Fonte: Adaptado de Pimenta Filho (2013).

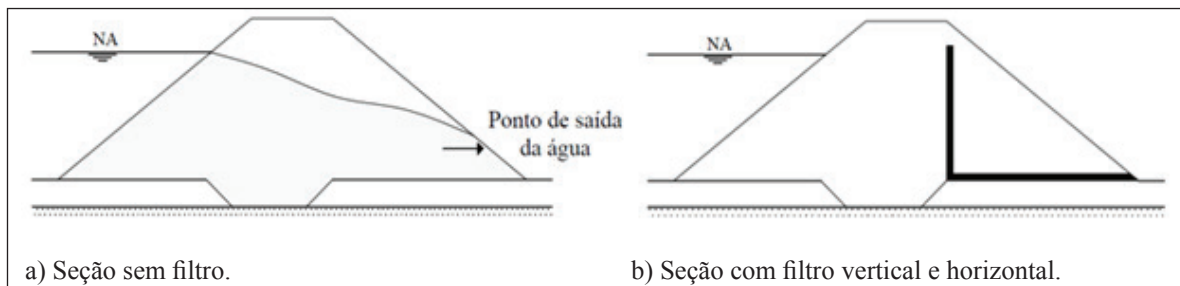
Conforme ICOLD (2013), o início da ruptura é quase certo de ocorrer se a erosão iniciada continuar, se a barragem não possuir filtros, se não forem detectadas percolações na superfície de jusante do maciço e, ainda, se não ocorrerem intervenções eficientes para conter a erosão. As exceções ocorrerão se o reservatório tiver capacidade pequena ou se seu nível de água ficar abaixo do início do canal de desenvolvimento da erosão.

2.2 Filtros granulares

O sistema de drenagem interna, em geral, tem grande importância para o funcionamento de uma barragem de terra. Se bem dimensionadas, tais estruturas se manterão funcionando corretamente, de modo que esse sistema funcione como uma camada filtrante, permitindo que a água possa escoar e o material sólido seja retido. Se os filtros forem dimensionados de forma correta, com as verificações necessárias da granulometria do material a ser utilizado na construção, poderá ser evitada a formação de *piping*.

Segundo Massad (2003), inicialmente, as barragens eram construídas sem filtro, como mostra o item “a” da Fig. 2, fazendo com que a água emergisse pelo talude de jusante o que ocasionava, muitas vezes, o *piping*. O engenheiro geotécnico Terzaghi foi o primeiro a propor projetos de filtros. A solução encontrada por ele para combater o problema de erosão foi uma combinação de filtro vertical e horizontal que intercepta o fluxo de água antes que chegue ao talude de jusante, o que está ilustrado no item “b” da Fig. 2.

Figura 2 – Seção de uma barragem sem filtro e com filtro



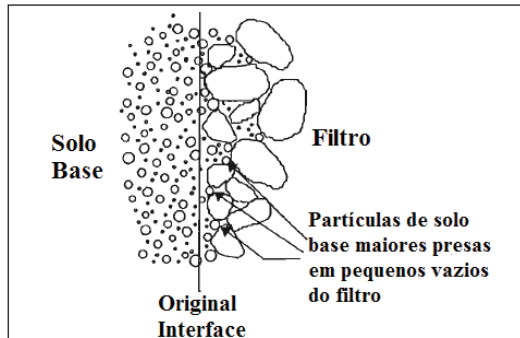
Fonte: Adaptado de Massad (2003).

Os filtros são comumente constituídos por materiais granulares e sua função é reter partículas e evitar o carreamento do solo do maciço, além de promover a drenagem da água, permitindo sua percolação. Raut (2006) define filtro como um arranjo estrutural que é projetado para proteger os solos da erosão devido à infiltração. Com isso, seu projeto busca determinar granulometrias adequadas à proteção da granulometria do maciço, contendo vazios suficientemente grandes para permitir o escoamento da água e suficientemente pequenos para conter as partículas de solo base (sb).

2.2.1 Mecanismo de filtragem

A importância do processo de filtragem pode ser percebida principalmente no contato do filtro com o sb (solo base). Devido às forças de percolação da água, algumas partículas finas podem ser transportadas através do filtro. No entanto, em um filtro estável, essas partículas serão bloqueadas pelos seus vazios, e formarão vazios menores que, posteriormente, reterão partículas de sb menores. Com isso, o processo continua até se obter uma interface estável, sem perda adicional de partículas. A Figura 3 mostra uma “zona de autofiltragem” estável, em uma condição na qual sua distribuição de vazios não permite que ocorra carreamentos relevantes de partículas de sb, um modelo cujo filtro atende positivamente à proteção do solo do maciço (LOCKE, 2001; PIMENTA FILHO, 2013).

Figura 3 – Interface estável durante a infiltração



Fonte: Adaptado de Locke (2001)

2.3 Critério de Terzaghi

O engenheiro geotécnico Karl Von Terzaghi é considerado por alguns autores como precursor no assunto de dimensionamento de filtros ao propor o critério que se destaca ainda dentro da área geotécnica e que é utilizado em diversas práticas da engenharia.

Pimenta (2013) afirma que foi Terzaghi quem lançou o primeiro critério largamente adotado em projeto de filtros, tendo sido utilizado como base para diversos estudos posteriores. Terzaghi e Peck (1962) explicam esse critério, que se resume a dois aspectos básicos: retenção e drenagem. Os autores estabeleceram que um material satisfaz os requisitos de um filtro se estiver obedecendo a esses aspectos, a partir de limites entre as granulometrias do solo a ser protegido (sb) e o filtro (material protetor).

Para garantir a Retenção: as dimensões dos vazios formados entre os grãos do filtro devem ser suficientemente pequenas, de forma a possibilitar a retenção do material a ser protegido. Terzaghi admitiu que, para a retenção das partículas finas do solo ser eficaz, deveria ser obedecida a razão descrita na Eq. (1), na qual o diâmetro, D_{15} (mm), corresponde a 15% das partículas mais grossas do filtro, que não deve ser maior que quatro vezes o diâmetro correspondente a 85% passante da camada mais fina do sb, d_{85} (mm).

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4 \quad (I)$$

Para garantir a drenagem, o filtro deve apresentar condutividade hidráulica suficiente para proporcionar à estrutura condições para drenagem das águas provenientes do interior do maciço. Para esse aspecto ser atendido, a razão estabelecida na Eq. (2) deve ser cumprida. O diâmetro D_{15} (mm) corresponde a 15% das partículas mais finas do filtro e o d_{15} (mm) é o diâmetro correspondente a 15% das partículas mais grossa do sb.

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} \geq 4 \quad (II)$$

Este critério falha com solos de granulometria contínua, restringindo-se a solos de granulometria uniforme. Além disso, no requisito de retenção, são consideradas apenas as granulometrias mais grossas do filtro e as mais finas do solo, desprezando as demais partículas existentes. O *United States Bureau of Reclamation* (USBR, 2002) acrescenta que, nesse critério, o filtro não deve ter mais de 5% passantes na peneira de número 200 (0,075mm), no que se limita a porcentagem de finos nas areias do filtro, e que as curvas granulométricas dos materiais devem ser o mais paralelas possível, reduzindo a descontinuidade nas granulometrias dos materiais na interface maciço compactado e dreno.

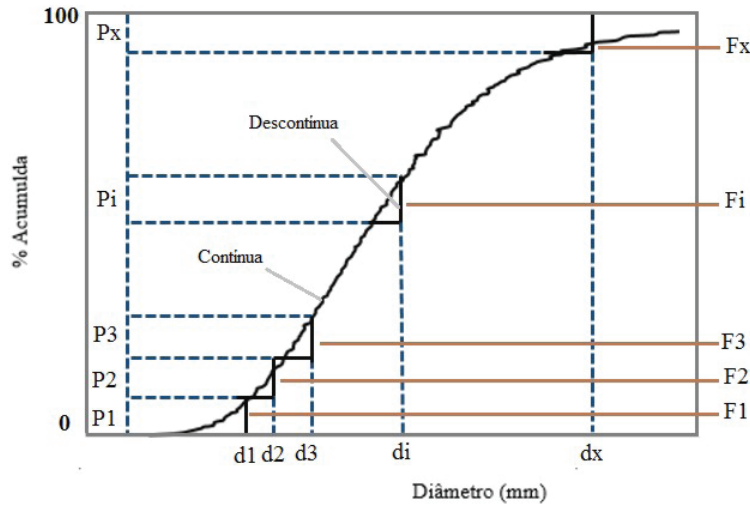
2.4 Determinação da Curva de Distribuição de Vazios

O dimensionamento consiste em determinar uma distribuição de vazios ideal para as areias do filtro, pois é o tamanho dos vazios, e não o das partículas, que vai controlar a erosão do maciço. Apesar do processo de carreamento das partículas ser inevitável, o objetivo é que o filtro seja dimensionado de forma que, no decorrer da percolação da água, se estabilize no processo de “autofiltragem”, formando uma zona de interface estável no contato do maciço de terra com os drenos. A curva de vazios, neste trabalho, será identificada como DV (distribuição de vazios).

Foi Silveira, em 1964, o primeiro a propor a análise de filtros de proteção com base na distribuição de vazios (porosimetria) através de um modelo geométrico e probabilístico. Segundo o mesmo autor, para se obter a distribuição de vazios de materiais granulares, é necessário considerar algumas hipóteses fundamentais: cada diâmetro das partículas terá uma probabilidade de ocorrência, associada à sua curva de distribuição granulométrica em massa; os grãos terão forma esférica; as posições ocupadas pelos grãos serão independentes umas em relação às outras; e o filtro estará em seu estado de máxima compactação (estado denso).

As curvas de distribuição granulométrica são representadas por um gráfico semi-logarítmico, obtido a partir de ensaios de granulometria, com cada porcentagem passante (ordenadas) em função dos seus diâmetros das partículas sólidas (abscissas), supondo-se uma função de distribuição contínua. Para determinação das curvas de vazios, é necessário transformar essa distribuição contínua em discreta, passando do contínuo para o descontínuo. Assim, a curva inicial é subdividida em x partes, sendo cada parte definida por um diâmetro médio D_x e uma correspondente porcentagem acumulada F_x associada a uma probabilidade de ocorrência P_x , conforme ilustra a Fig. 4.

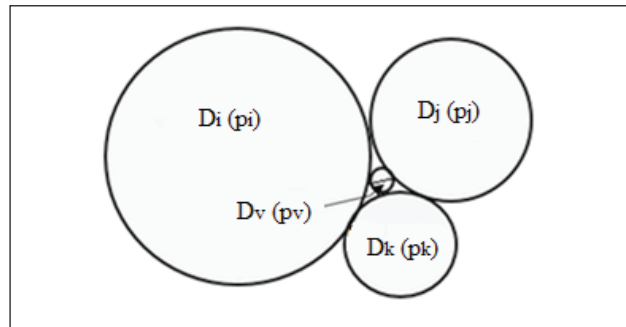
Figura 4 – Discretização das curvas de distribuição granulométrica



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2008)

Para obter a curva de distribuição de vazios para o estado de máxima compactação, Silveira (1964) propôs que três diâmetros genéricos do filtro - D_i , D_j e D_k - aleatórios e tangentes, dois a dois, formem entre si uma circunferência inscrita que representa o maior diâmetro de vazio D_v , estando associados a uma probabilidade de ocorrência, como mostra a Fig. 5.

Figura 5 – Esquemas de vazios de filtros no estado denso adotado por Silveira (1964)



Fonte: Adaptado de Pimenta Filho (2013)

Cada vazio pode ser formado pela associação aleatória dos grãos de três diâmetros, ou seja, tendo três diâmetros iguais, dois diâmetros iguais e um diferente, ou tendo três diâmetros distintos, sendo a quantidade de agrupamentos possíveis, de três a três grãos, obtidas por meio de análise combinatória (PIMENTA FILHO, 2013).

2.4.1 Cálculo do Diâmetro de Vazio (D_v)

Silveira (1965 *apud* Raut, 2006), o diâmetro da maior circunferência que pode caber dentro do arranjo das três partículas tangentes do filtro D_v , pode ser determinado por uma equação. Foram Musso e Federico (1983) que propuseram a Eq. (3) como alternativa para calcular o diâmetro de vazios D_v , a qual apresenta uma maior facilidade de resolução.

$$\left(\frac{2}{D_i}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_j}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_k}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_v}\right)^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2}{D_i}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_j}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_k}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_v}\right)^2 \right]^2 \quad (III)$$

A probabilidade de ocorrência do tamanho do vazio D_v depende das probabilidades individuais das três partículas que constituem o arranjo. A probabilidade P_v é dada pela Eq. (4), em que P_i , P_j , P_k são as probabilidades de ocorrência das partículas i , j , k , e em que r_i , r_j , r_k são o número de vezes que os diâmetros médios D_i , D_j e D_k aparecem.

$$p_v = \frac{3!}{r_i!r_j!r_k!} (p_i)^{r_i} \cdot (p_j)^{r_j} \cdot (p_k)^{r_k} \quad (\text{IV})$$

2.5 Dimensionamento de filtros por tamanho de vazios

Alguns autores criticam o critério de Terzaghi por o considerarem conservador, principalmente em solos como os bem graduados. Locke (2001) afirma que os mecanismos de filtração não podem ser descritos a partir desse critério de base empírica. De acordo com Raut (2006), cada granulometria de um filtro tem suas próprias características e comportamento durante a filtração, por isso, o critério de Terzaghi torna-se conservador e limitado ao tentar simular tais comportamentos. Além do que, segundo Pimenta Filho (2013), são os vazios do filtro que influenciam diretamente no processo de filtragem, e não o tamanho dos seus grãos, tornando mais adequada a abordagem em termos de distribuição de vazios.

2.5.1 Diâmetro de controle

Em sua pesquisa sobre a teoria de vazios, Silveira (1964) analisou o problema do carreamento das partículas do solo, comparando pontos entre a curva de distribuição de vazios e a curva granulométrica do material base. A distância percorrida por uma partícula de solo base de diâmetro d depende dos vazios existentes no interior do filtro. Essa partícula será carregada sempre que encontrar um vazio do filtro, D_v , maior que o tamanho da sua partícula, $d < D_v$, e será retida quando um vazio D_v for menor que o tamanho da sua partícula, $D_v < d$. Dessa forma, foi analisada a probabilidade de uma partícula encontrar um vazio menor que seu tamanho e ser retida, estabelecendo um nível de confiança P^* .

Estudos posteriores sobre carreamento constataram que a probabilidade de uma partícula de solo base, com tamanho maior do que o vazio correspondente a frequência de ocorrência de 95%, d_{v95} , não penetrar nenhum vazio do filtro é de 95%, o que indica pouquíssimas chances de alguma partícula de solo base com essa dimensão passar por algum vazio do filtro. Assim, partículas de solo base maiores que d_{v95} não influenciam o processo de filtragem e podem ser desprezadas no dimensionamento de filtros, classificando o d_{v95} como o diâmetro de vazio autofiltrante ou autoestabilizador (SILVEIRA, 1964; LOCKE *et al.* 2001; RAUT, 2006). Raut (2006) também notou que as partículas de solo base menores que d_{v35} não podem ser retidas por um filtro granular, a menos que os vazios se tornem progressivamente mais finos por efeito de autofiltração. Com isso, o d_{v35} , segundo Raut (2006), pode ser dado como o diâmetro de vazio de controle.

Através de vários ensaios realizados na Universidade de Wollongong, na Austrália, e a partir de numerosos dados de ensaios disponíveis na literatura, Raut e Indraratna (2008) propuseram um critério para concepção de filtros granulares baseado nos conceitos da curva de vazios, critério no qual são utilizados os diâmetros de controle e autofiltrante, definidos a partir dos estudos de Locke *et al.* (2001) e Raut (2006).

Com base nesse critério, para que haja o correto dimensionamento é necessário que a granulometria do solo base seja ajustada desconsiderando toda fração maior que d_{v95} , ou seja, em cada curva granulométrica do maciço o valor da porcentagem passante equivalente ao diâmetro autofiltrante, d_{v95} , é identificado. Esse valor é usado como fator de correção, dividindo todas as porcentagens passantes da granulometria do sb.

Raut e Indraratna (2008) estabeleceram que, para uma combinação de solo-filtro eficaz, d_{v35} deve ser menor do que d_{85}^* , conforme Eq. 5, pois assim assegurará que, pelo menos, 15% das partículas sejam retidas no início do processo.

$$\frac{d_{v35}}{d_{85}^*} \leq 1 \quad (\text{V})$$

O diâmetro d_{85}^* equivale ao diâmetro correspondente a 85% do material que passa na curva granulométrica ajustada do solo base.

Tendo em vista que os autores desse critério realizaram diversas verificações em diferentes combinações de solo base e filtro, e comparações com diversos critérios usualmente utilizados na prática, afirmam que o modelo associado a Eq. 5 é o mais confiável para verificações da efetividade de filtros granulares. Além disso, os autores ressaltam que ele deve ser usado em conjunto com os critérios já praticados na engenharia, e não em substituição.

3 Estudo de Caso

As barragens selecionadas para o estudo foram Gangorra e Itaúna localizadas no estado do Ceará, em operação, respectivamente, desde 1999 e 2001, e de importância significativa para a infraestrutura hídrica das regiões a que pertencem. Os dados granulométricos de cada barragem selecionada foram obtidos a partir dos seus relatórios de projetos disponibilizados pela Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH) do estado do Ceará. A barragem Itaúna está localizada no município de Chaval, próxima à barragem Gangorra, que está localizada no município de Granja. As duas estão representadas em mapa do estado do Ceará na Fig. 6.

Figura 6 – Localização das barragens selecionadas: Itaúna e Gangorra, no estado do Ceará (coordenadas geográficas obtidas pelo Google Maps)



Fonte: Adaptado de Portal Hidrológico do Ceará (COGERH)

3.1 Caracterização do estudo

As características gerais das barragens Gangorra e Itaúna, estão indicadas na Tab. (1) conforme seus respectivos relatórios finais.

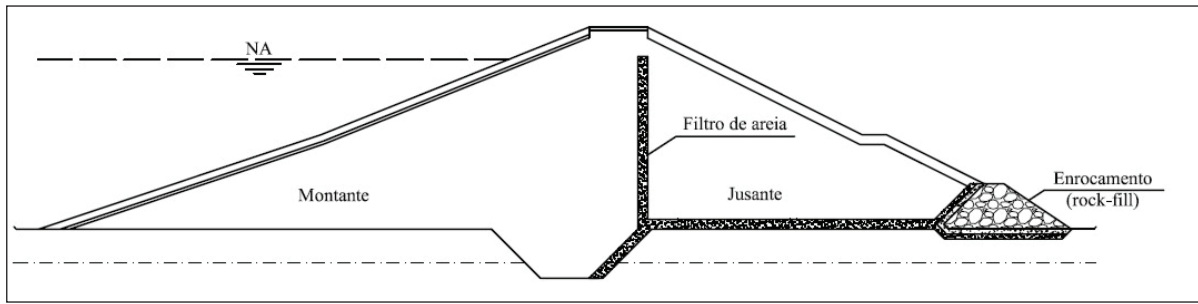
Tabela 1 – Características gerais das barragens Gangorra e Itaúna

	GANGORRA	ITAÚNA
Cidade	Granja	Chaval
Riacho	Gangorra	Timonha
Acumulação (hm³)	46,20	77,50
Altura máxima (m)	20,66	17,95

Fonte: Ceará (1996; 1997)

Segundo o relatório final da barragem Gangorra (CEARÁ, 1996), seu maciço de terra possui uma seção trapezoidal ao longo de um eixo reto e seu sistema de drenagem interna é composto por um filtro vertical e um filtro horizontal, que se estende por toda a superfície de jusante da barragem e se prolonga até o enrocamento de pé (rock-fill), ambos com um metro de espessura. A Figura 7 apresenta a seção tipo transversal da barragem Gangorra.

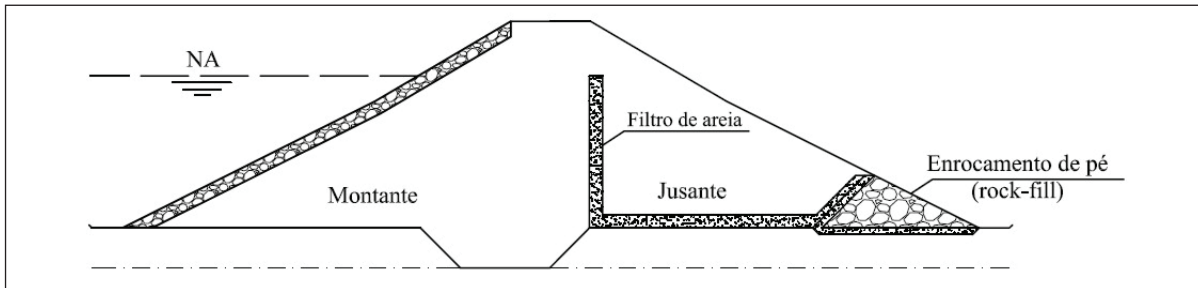
Figura 7 – Seção tipo da barragem Gangorra



Fonte: Adaptado de Ceará (1996)

Segundo Ceará (1997), o maciço da barragem Itaúna constitui-se de terra compactada homogênea, com seção trapezoidal e predominância de material argiloso; seu sistema de drenagem interna é constituído por um filtro vertical e um tapete drenante, os dois com um metro de espessura, e um enrocamento de pé. A Figura 8 apresenta a seção tipo transversal da barragem Itaúna.

Figura 8 – Seção tipo da barragem Itaúna

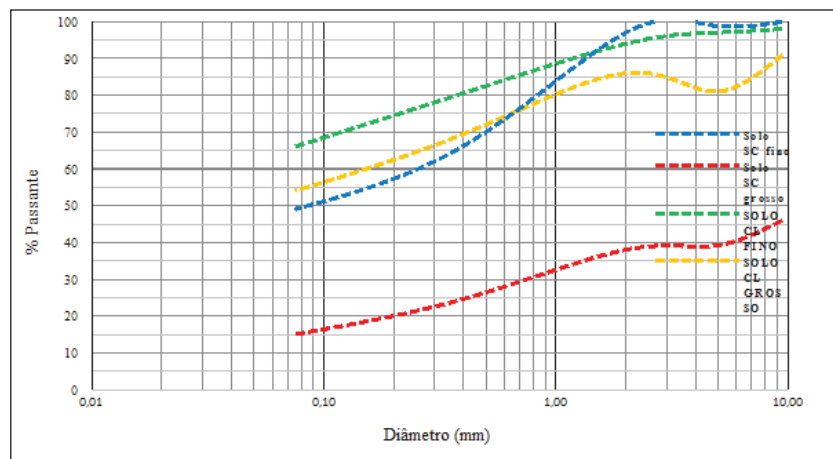


Fonte: Adaptado de Ceará (1997)

3.2 Caracterização granulométrica dos materiais

O maciço de terra da barragem Gangorra é composto pelos solos SC (areia argilosa) e CL (argila de baixa plasticidade), totalizando 43 amostras dos dois solos. No entanto, tendo em vista os diferentes tipos de solo utilizados nos maciços das barragens selecionadas e a quantidade das suas amostras, optou-se em selecionar as curvas granulométricas limites, separando as porcentagens máximas e mínimas de cada tipo de solo (ARAÚJO, 2017), obtendo, assim, as curvas extremas com os limites fino e grosso, representados por SC FINO, SC GROSSO, CL FINO e CL GROSSO, conforme Fig. 9.

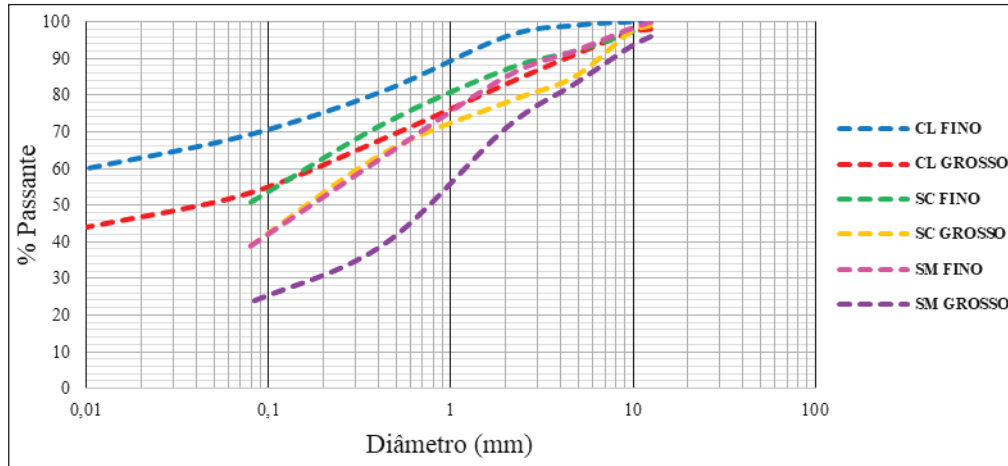
Figura 9 – Limites granulométricos do solo SC e CL da barragem Gangorra



Fonte: Autora (2017).

O maciço de terra da barragem Itaúna é composto pelos solos CL (argila de baixa plasticidade), SC (areia argilosa) e SM (areia siltosa), totalizando 15 amostras dos três solos, sendo o solo com maior predominância o argiloso (CL). Foram selecionadas as curvas granulométricas limites para as verificações, obtendo, assim, as curvas extremas com os limites fino e grosso, conforme metodologia recomendada por Araújo (2017), representados por SC FINO, SC GROSSO, CL FINO, CL GROSSO, SM FINO E SM GROSSO, conforme Fig. 10.

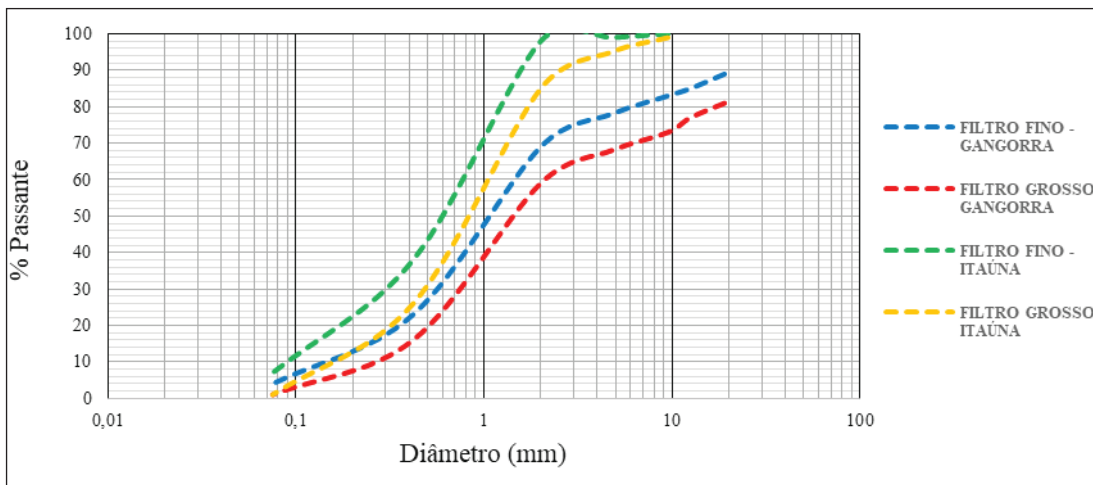
Figura 10 – Limites granulométricos do solo CL, SC e SM da barragem Itaúna



Fonte: Autora (2017)

O filtro da barragem Gangorra é composto por areias classificadas como quartzo-feldspáticas de granulação média a grossa. A jazida utilizada é composta por três amostras de areia; já o filtro da barragem Itaúna é composto por areias classificadas como SP (areias mal graduadas). A jazida utilizada é composta por cinco amostras de areias. Dentre as referidas amostras, também foram separadas as porcentagens máximas e mínimas para obtenção das curvas granulométricas limites do filtro, representadas por Filtro Fino e Filtro Grosso, conforme Fig.11.

Figura 11 – Limites granulométricos dos filtros das barragens Gangorra e Itaúna



Fonte: Autora (2017).

4 Simulação

A partir das curvas granulométricas com os limites finos e grossos já estabelecidos para o filtro e para os solos, a simulação consistiu na obtenção das curvas de vazios dos filtros das barragens Gangorra e Itaúna e, em seguida, a

aplicação do método de Terzaghi e Peck (1962) e Indraratna e Raut (2008) para verificar a eficácia de cada combinação de solo e filtro, além da análise entre os resultados.

Para obtenção da curva de distribuição de vazios do filtro, é necessário que, inicialmente, a curva granulométrica do filtro seja discretizada, como descrito no item II.IV, dividindo-a em dez partes iguais equivalentes a uma porcentagem de ocorrência, P_x , de 10%. Cada faixa foi definida por um diâmetro médio D_x , que estava, conseqüentemente, associado à porcentagem de ocorrência de 10%. Os diâmetros médios obtidos para as barragens Gangorra e Itaúna estão descritos na Tab. (2).

Tabela 2 – Diâmetros médios das granulometrias das barragens Gangorra e Itaúna

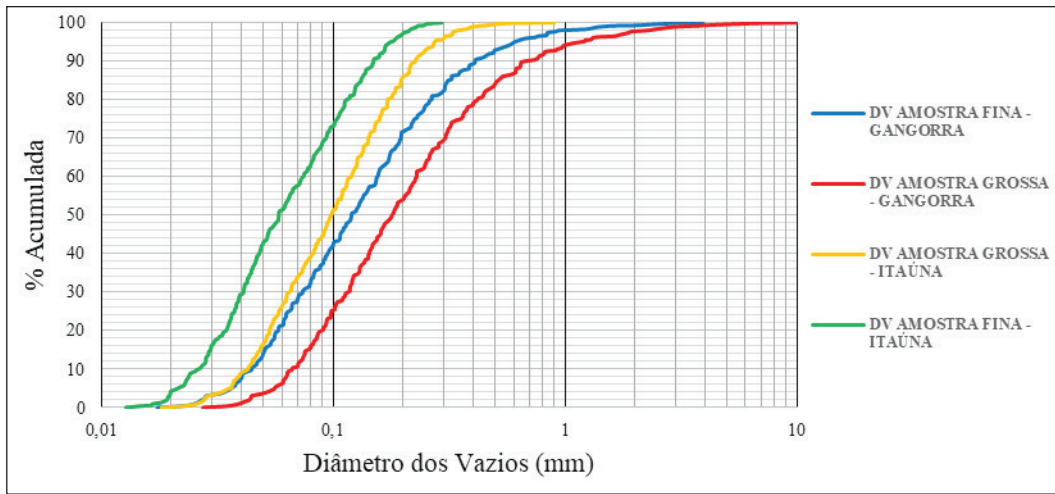
D_x	Gangorra		Itaúna	
	FINO	GROSSO	FINO	GROSSO
D1	0,18	0,11	0,12	0,08
D2	0,40	0,26	0,24	0,13
D3	0,63	0,46	0,41	0,23
D4	0,93	0,68	0,57	0,38
D5	1,30	0,95	0,75	0,53
D6	1,85	1,30	1,03	0,69
D7	4,10	1,80	1,30	0,87
D8	8,35	4,05	1,55	1,18
D9	25,35	13,05	2,15	1,50
D10	10,40	25,30	5,80	1,90

Fonte: Autora (2017)

A partir dos dez diâmetros médios encontrados, foram obtidas 220 combinações, com arranjos de três diâmetros médios aleatórios: 10 combinações com 3 diâmetros (D_i, D_i, D_i); 90 combinações com 2 diâmetros iguais e um diferente (D_i, D_i, D_j); e, finalmente, 120 combinações com 3 diâmetros distintos D_i, D_j e D_k . Os diâmetros de vazios, D_v , resultantes da combinação dos diferentes arranjos, foram calculados utilizando a Eq. (3) e, para o cálculo da probabilidade de ocorrência dos vazios, foi utilizado a Eq. (4).

Com os valores das probabilidades de ocorrência dos vazios encontrados, os mesmos foram transformados em probabilidades acumuladas, organizadas a partir do menor para o maior valor D_v , assim, as curvas de distribuição de vazios para o estado denso foram obtidas, sendo função da probabilidade acumulada (eixo das ordenadas) pelo diâmetro de vazios (eixo das abcissas), em escala logarítmica. As curvas com os limites fino e grosso de vazios foram caracterizadas como DV Amostra Fina e DV Amostra Grossa. A Figura 12 mostra as curvas de vazios dos filtros das barragens Gangorra e Itaúna.

Figura 12 – Curva de distribuição de vazios para os filtros das barragens Gangorra e Itaúna



Fonte: Autora (2017).

4.1 Terzaghi e Peck (1962)

Como já detalhado anteriormente, o critério de Terzaghi se baseia em dois aspectos básicos no quesito da efetividade do filtro: retenção e drenagem. No entanto, neste trabalho, as verificações se resumem ao conceito de retenção do solo do maciço; logo, a simulação consistiu na verificação apenas da Eq. (1): critério de retenção. Os valores obtidos para o diâmetro do filtro D_x (mm), e o diâmetro correspondente ao solo, d_v (mm), de cada barragem selecionada, estão descritos na Tab. (3).

Tabela 3 – Valores obtidos para o critério de retenção de Terzaghi para as barragens Gangorra e Itaúna

	Gangorra			Itaúna	
	Solo SC	Solo CL	Solo SC	Solo CL	Solo SM
	0,390	0,390	0,240	0,240	0,240
	1,060	0,670	1,600	0,650	2
	0,368	0,582	0,150	0,369	0,120

Fonte: Autora (207)

4.2 Indraratna e Raut (2008)

A simulação do critério de Indraratna e Raut (2008) consistiu na implementação dos conceitos da teoria de vazios e na utilização da Eq. (5) para verificação da eficácia do filtro quanto à retenção do solo. Em cada uma das barragens escolhidas, as curvas granulométricas do maciço são ajustadas d_{v95} como descrito no item II.V.I, gerando duas novas curvas granulométricas, uma ajustada em relação d_{v95} curva do DV Amostra Fina, e outra ajustada em relação d_{v95} da curva do DV Amostra Grossa.

A partir das curvas granulométricas ajustadas foram identificados os valores que correspondem ao tamanho de 85% na curva, ou seja, d^*_{85} . Após isso, o valor do diâmetro de controle, d_{v35} , foi retirado da curva de vazios da DV Amostra Fina e confrontado com d^*_{85} de cada curva granulométrica ajustada d_{v95} da DV Amostra Fina, fazendo igualmente em relação a DV Amostra Grossa para cada uma das barragens escolhidas. Com isso, foram estabelecidas quantidades de combinações entre solo e filtro para cada barragem: oito combinações para a barragem Gangorra e 12 combinações para a barragem Itaúna, como ilustrado na Tab. (4).

Tabela 4 – Combinações de solo/filtro para as barragens Gangorra e Itaúna

COMBINAÇÃO	GANGORRA		ITAÚNA	
	FILTRO	MACIÇO	FILTRO	MACIÇO
1	DV FINO	SC FINO	DV FINO	SC FINO
2	DV FINO	SC GROSSO	DV FINO	SC GROSSO
3	DV GROSSO	SC FINO	DV GROSSO	SC FINO
4	DV GROSSO	SC GROSSO	DV GROSSO	SC GROSSO
5	DV FINO	CL FINO	DV FINO	CL FINO
6	DV FINO	CL GROSSO	DV FINO	CL GROSSO
7	DV GROSSO	CL FINO	DV GROSSO	CL FINO
8	DV GROSSO	CL GROSSO	DV GROSSO	CL GROSSO
9	-	-	DV FINO	SM FINO
10	-	-	DV FINO	SM GROSSO
11	-	-	DV GROSSO	SM FINO
12	-	-	DV GROSSO	SM GROSSO

Fonte: Autora (2017)

5 Resultados e Discussões

5.1 Gangorra

Pode-se observar na Tab (3) os valores obtidos das curvas durante a simulação pelo critério de retenção de Terzaghi, Eq. 1, que também estão indicados na Tab. (5). De acordo com esse critério, o filtro foi considerado eficiente na retenção do solo SC e do solo CL da barragem Gangorra, visto que a relação de retenção foi menor que 4, estando o filtro dentro do limite permitido de acordo com Terzaghi.

Tabela 5 – Verificação da efetividade do filtro pelo critério de Terzaghi da barragem Gangorra

	Maciço	Verificação
0,368	SOLO SC	Eficaz
0,582	SOLO CL	Eficaz

Fonte: Autora (2017)

Para o critério por tamanho de vazios, de Indraratna e Raut (2008), após a obtenção da curva de vazios do filtro da barragem Gangorra, durante a etapa de simulação, a qual está indicada na Fig. 12, os valores para os diâmetros d_{v35} e d_{v95} foram então retirados da curva de vazios e estão apresentados na Tab. (6).

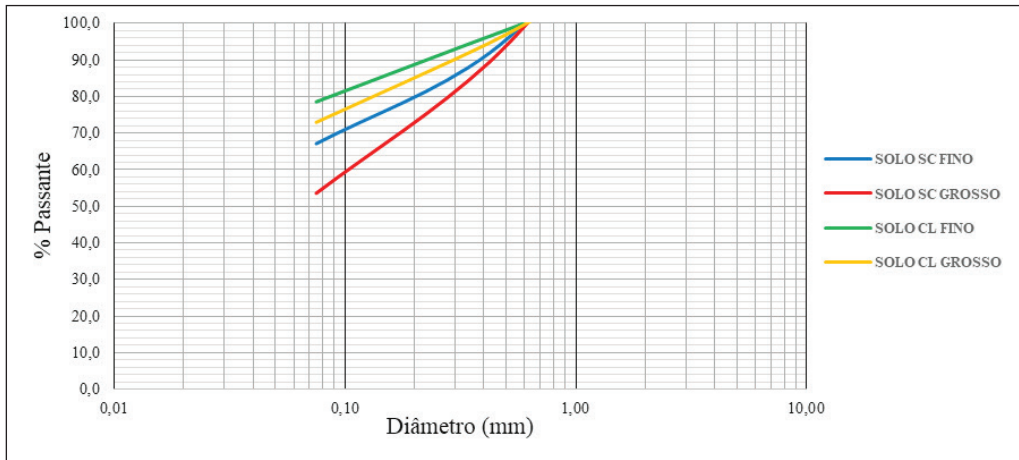
Tabela 6 – Valores de d_{v35} e d_{v95} para a curva de vazios do filtro da barragem Gangorra

	DV AMOSTRA FINA	DV AMOSTRA GROSSA
d_{v35}	0,082	0,140
d_{v95}	0,600	1,200

Fonte: Autora (2017)

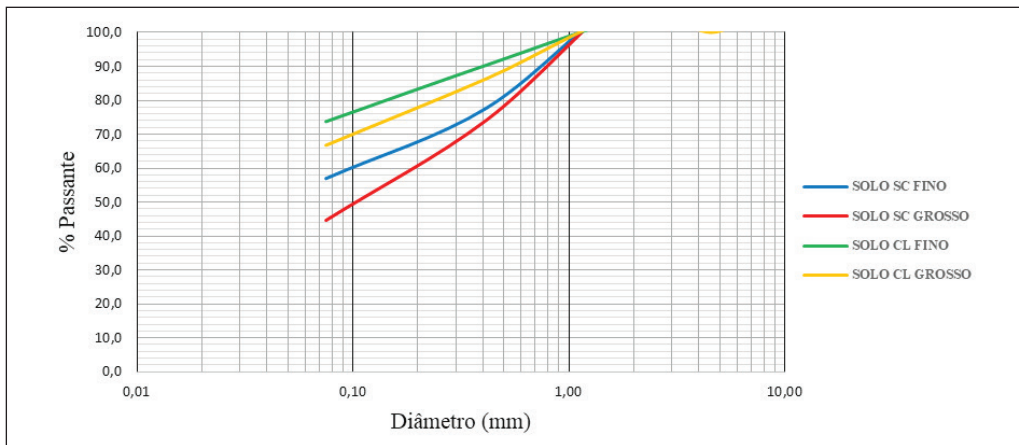
As curvas granulométricas ajustadas dos solos do maciço em função do diâmetro autofiltrante (RAUT E INDRARATNA, 2008), d_{v95} , estão representadas nas Fig. 13 e 14, com ajuste dos solos SC e CL em relação às curvas de vazios de amostra fina e de amostra grossa do filtro, respectivamente.

Figura 13 – Curvas granulométricas ajustadas dos solos SC e CL da barragem Gangorra em relação a DV Amostra Fina do filtro



Fonte: Autora (2017).

Figura 14 – Curvas granulométricas ajustadas dos solos SC e CL da barragem Gangorra em relação a DV Amostra Grossa do filtro.



Fonte: Autora (2017).

Percebe-se, pela sua curva granulométrica, que houve uma considerável redução nos tamanhos das partículas de solo após o ajuste granulométrico, já que toda fração maior que d_{v95} foi desconsiderada, comparado às curvas iniciais apresentadas no item IV.III. A eliminação das partículas mais finas, mais suscetíveis ao carreamento, resulta nas curvas de solos que realmente importam para a verificação da efetividade do filtro, segundo o critério de Indraratna e Raut (2008).

Observa-se também que o ajuste provocou uma tendência de aproximação entre as curvas do maciço e do dreno, o que foi notado principalmente para o solo SC, no qual a curva inicial não apresentava essa aproximação pela posição de suas curvas granulométricas. Os resultados obtidos da aplicação do critério de retenção de Indraratna e Raut (2008), definido pela Eq. (5), estão descritos na Tab. (7).

Tabela 7 – Verificação da efetividade do filtro da barragem Gangorra

Combinação	Filtro	Maçiço	d_{v35}	d^*_{85}	$\frac{d_{v35}}{d^*_{85}} \leq 1$	Verificação
1	DV FINO	SC FINO	0,082	0,290	0,283	Eficaz
2	DV FINO	SC GROSSO	0,082	0,350	0,234	Eficaz
3	DV GROSSO	SC FINO	0,140	0,600	0,233	Eficaz
4	DV GROSSO	SC GROSSO	0,140	0,650	0,215	Eficaz
5	DV FINO	CL FINO	0,082	0,150	0,547	Eficaz
6	DV FINO	CL GROSSO	0,082	0,200	0,410	Eficaz
7	DV GROSSO	CL FINO	0,140	0,240	0,583	Eficaz
8	DV GROSSO	CL GROSSO	0,140	0,390	0,359	Eficaz

Fonte: Autora (2017)

Observa-se, na Tabela 7, que o filtro pode ser considerado como eficiente na retenção do solo para essas combinações entre os solos SC e CL da barragem Gangorra e a curva de vazios do filtro resultantes, envolvendo tanto as granulometrias mais grossas quanto as mais finas.

5.2 Itaúna

Pode-se observar na Tab. (3) os valores obtidos das curvas durante a simulação, pelo critério de retenção de Terzaghi, Eq. (1), que também estão indicados na Tab. (8). De acordo com esse critério, pode-se observar que o filtro foi verificado como efetivo no quesito de retenção dos solos SC, CL e SM.

Tabela 8 – Verificação da efetividade do filtro pelo critério de Terzaghi da barragem Itaúna

$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4$	Maçiço	Verificação
0,150	SOLO SC	Eficaz
0,369	SOLO CL	Eficaz
0,120	SOLO SM	Eficaz

Fonte: Autora (2017)

Observa-se, na Fig. 11, no entanto, que o filtro da barragem Itaúna possui amostras com mais de 5% passante na peneira de nº 200. Essa quantidade de finos no filtro pode interferir na sua efetividade durante o funcionamento, o que pode ser evitado com uma lavagem de finos durante a execução da estrutura.

Já para o critério por tamanho de vazios, após a obtenção da curva de vazios do filtro da barragem Itaúna durante a etapa de simulação, os valores para os diâmetros d_{v35} e d_{v95} estão apresentados na Tab. (9), conforme apresentado na Fig. 12.

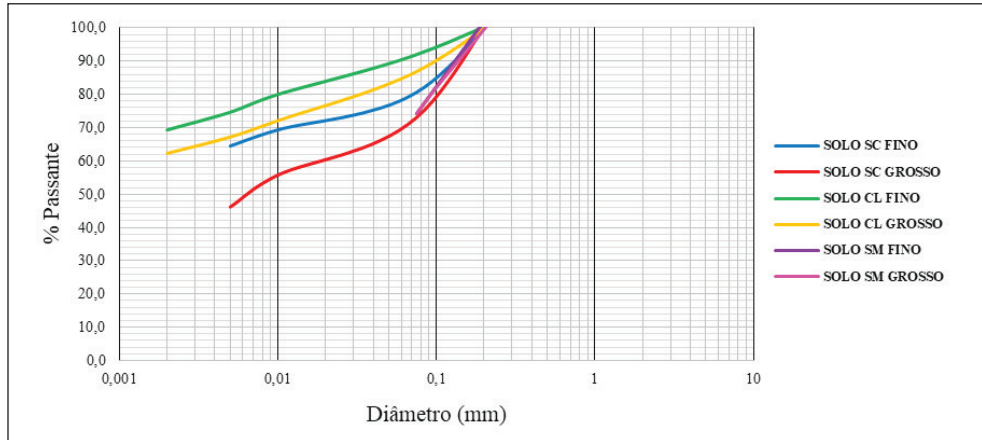
Tabela 9 – Valores de d_{v35} e d_{v95} para a curva de vazios do filtro da barragem Itaúna

d_{v35}	DV AMOSTRA FINA	DV AMOSTRA GROSSA
d_{v95}	0,044	0,071
	0,19	0,28

Fonte: Autora (2017)

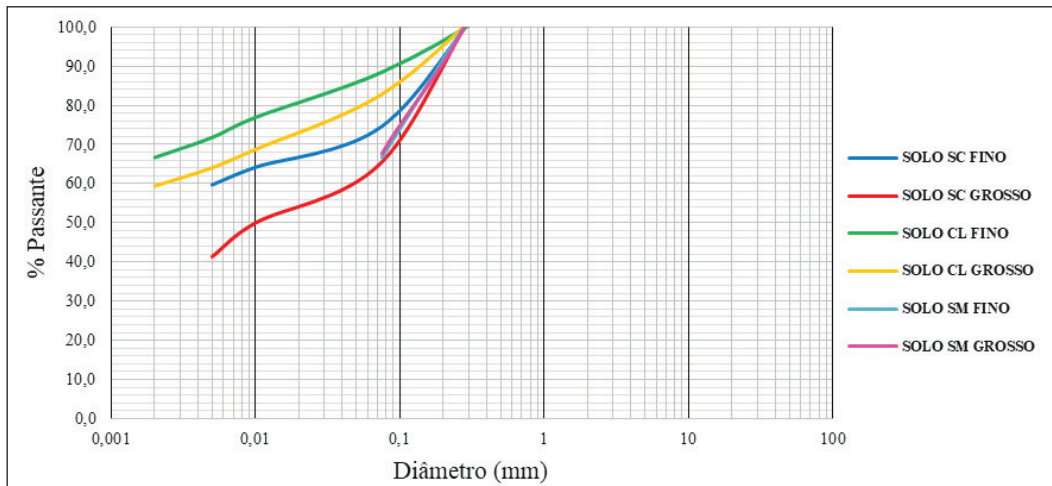
As curvas granulométricas ajustadas dos solos do maciço em função do diâmetro autofiltrante, d_{v95} , estão representadas nas Fig. 15 e 16 com ajuste dos solos SC, CL e SM em relação às curvas de vazios de Amostra Fina e de Amostra Grossa do filtro, respectivamente.

Figura 15 – Curvas granulométricas ajustadas dos solos SC, CL e SM da barragem Itaúna em relação a DV Amostra Fina do filtro.



Fonte: Autora (2017).

Figura 16 – Curvas granulométricas ajustadas dos solos SC, CL e SM da barragem Itaúna em relação a DV Amostra Grossa do filtro.



Fonte: Autora (2017).

Observa-se que ocorre a redução no tamanho das partículas na curva com o ajuste granulométrico para os solos da barragem Itaúna, bem como a aproximação entre as curvas limites. Tais observações no solo SM foram mais acentuadas, onde se percebe que as curvas limite ficaram quase sobrepostas. Os resultados obtidos da aplicação do critério de retenção de Indraratna e Raut (2008), definido pela Eq. (5), estão destacados na Tab. (10).

Tabela 10 – Verificação da efetividade do filtro da barragem Itaúna

Combinação	Filtro	Maciço	d_{v35}	d^*_{85}	$\frac{d_{v35}}{d^*_{85}} \leq 1$	Verificação
1	DV FINO	SC FINO	0,044	0,091	0,484	Eficaz
2	DV FINO	SC GROSSO	0,044	0,13	0,338	Eficaz
3	DV GROSSO	SC FINO	0,071	0,14	0,507	Eficaz
4	DV GROSSO	SC GROSSO	0,071	0,16	0,444	Eficaz
5	DV FINO	CL FINO	0,044	0,025	1,760	Ineficaz
6	DV FINO	CL GROSSO	0,044	0,06	0,733	Eficaz
7	DV GROSSO	CL FINO	0,071	0,04	1,775	Ineficaz
8	DV GROSSO	CL GROSSO	0,071	0,09	0,789	Eficaz
9	DV FINO	SM FINO	0,044	1,2	0,0367	Eficaz
10	DV FINO	SM GROSSO	0,044	1,21	0,0364	Eficaz
11	DV GROSSO	SM FINO	0,071	1,5	0,0473	Eficaz
12	DV GROSSO	SM GROSSO	0,071	1,5	0,0473	Eficaz

Fonte: Autora (2017)

Observa-se, conforme a Tab. (10), que o filtro é considerado ineficaz nas combinações de solo e filtro que envolvem o solo CL fino, tanto para as granulometrias mais grossas quanto para as mais finas da barragem Itaúna.

6 Conclusão

O estudo permitiu comparar diferentes resultados pelos critérios de Terzaghi, e Indraratna e Raut; compreender melhor os parâmetros envolvidos no processo de filtragem, e o objetivo essencial do dimensionamento de filtros: impedir e prevenir que ocorra um carreamento do solo do maciço compactado, o que poderia ocasionar a erosão.

O trabalho concluiu, de acordo com a metodologia de Terzaghi, que o filtro da barragem Gangorra é eficaz na retenção de todos os solos SC e CL. Para a barragem Itaúna, o filtro também pode ser considerado eficaz na retenção de todos os solos: SC, CL e SM. Nota-se que esse critério, à sua época, era suficiente, e ainda hoje é utilizado como base para dimensionamentos. No entanto, o estudo mostra que é limitado, visto que as granulometrias não são todas postas à verificação da retenção, mas apenas as granulometrias mais grosseiras do filtro e as mais finas do solo.

O critério por tamanho de vazios mostra-se mais completo ao dimensionamento, pois todas as granulometrias limites são postas à verificação, demonstrando que os vazios realmente participam do processo de filtragem, além de levar em conta parâmetros importantes, como o estado de compactação do filtro, devendo ser usado para dimensionamento do filtro. Observou-se que todas as combinações entre solo e filtro da barragem Gangorra verificadas a partir da metodologia de vazios foram consideradas eficazes para prevenir carreamento de solo e evitar processo de erosão interna que apresente na barragem.

Na barragem Itaúna, o trabalho concluiu, através da metodologia por tamanho de vazios, que todas as combinações de maciço e filtro como eficazes, exceto as combinações que envolvem o solo CL fino, que foram consideradas como ineficazes - tanto pelas granulometrias mais grosseiras, como pelas granulometrias mais finas do filtro. Sendo assim, de acordo com este critério, na barragem Itaúna apresenta uma maior possibilidade de ocorrer um processo de erosão interna. Dessa forma, recomenda-se para essa barragem a inspeção rotineira para verificar sinais de iniciação de erosão interna, como percolação pelo talude de jusante ou no pé do maciço, e, caso haja necessidade, que sejam feitos os devidos monitoramentos e intervenções para garantir a segurança da barragem.

O presente estudo envolveu vários conceitos e definições acerca de erosão interna, dimensionamento e verificações de filtro em uma barragem de terra, podendo ser utilizado para estudos posteriores, incorporando outros estados de compactação para a curva de vazios, ou fazendo análise com outros critérios lançados após os estudos básicos de Terzaghi

e contribuindo, cada vez mais, para o estudo de novos métodos que garantam a segurança de estruturas de barragens de terra, evitando consequências graves e perigosas, como processos de erosão interna.

Referências

- ARAÚJO, A. A. F. **Segurança geotécnica de filtros contra erosão interna em barragens de terra**. 2017. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, 2017.
- ASSESSMENT of the risk of internal erosion of water retaining structures:dams, dykes and levees, intermediate report of the european working group of ICOLD. **Germany**: Technische Universität München, 2007. Disponível em: <<https://www.wb.bgu.tum.de/fileadmin/w00boi/www/Publikationen/Berichtshefte/Band114.pdf>>. Acesso em: 4 set. 2016
- AVALIAÇÃO de pequenas barragens. **Manual de Irrigação, Brasília**: Bureau of Reclamation Brasil, 2002. 74 p.
- CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Projeto executivo da barragem Gangorra em Granja**. Fortaleza, 1996.
- CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Projeto executivo da barragem Itaúna**. Fortaleza, 1997.
- COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Portal hidrológico do Ceará**. Disponível em: <<http://www.hidro.ce.gov.br/>>. Acesso em: 2 mar. 2017
- DIAS, F. M. S. C. R. **Filtros em barragens de aterro**: caracterização da sua permeabilidade. 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.
- EVALUATION and monitoring of seepage and internal erosion. **Oklahoma**: Federal Emergency Management Agency, 2015. Disponível em: <<https://www.fema.gov/media-library-data/1436889238781-1b63946bfc27bab5d85f7f95a66ce35/FEMAP1032.pdf>>. Acesso em: 4 jan. 2017.
- FRANCO, C. S. S. P. de A. **Segurança de barragens: aspectos regulatórios**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado da Escola de Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.
- INTERNAL erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations. **Bulletin LXIV internal erosion processes and engineering assessment**, Paris,v.1, 2013.
- LOCKE, M. R. **Analytical and laboratory modelling of granular filters for embankment dams**. 2001. 334 f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Faculty of Engineering, University of Wollongong, Wollongong, 2001. Disponível em: <<http://ro.uow.edu.au/theses/1819>> Acesso em: 07 dez. 2016.
- LOCKE, M. R.; INDRARATNA, B.; ADIKARI, G. Time-dependent particle transport through granular filters. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, p. 521-529, 2001.
- MASSAD, F. **Obras de terra**: curso básico de geotecnia. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 216 p.
- MUSSO, A; FREDERICO, F. **Un metodo geometrico-probabilistico per la verifica dei filtri**. 1983. Disponível em: <http://www.associazionegeotecnica.it/sites/default/files/rig/RIG_1983_4_177.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2016.
- PIMENTA FILHO, M. de A. **Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios**. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- RAUT, A. K. **Mathematical modelling of granular filters and constriction-based filter design criteria**. 2006. 229 f. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Wollongong, Wollongong, 2006. Disponível em: <<http://ro.uow.edu.au/theses/44>>. Acesso em: 1 set. 2016.
- RAUT, A. K.; INDRARATNA, B. Further advancement in filtration criteria through constriction-based techniques. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 134, p. 883-887, 2008.
- RIBEIRO, K. D. **Distribuição de vazios, determinada pela teoria geométrica probabilística, e sua influência na caracterização físico hídrica dos solos**. 2008. 171 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- SILVEIRA, A. **Algumas considerações sobre filtros de proteção**: uma análise do carreamento. 1964. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1964.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecânica dos solos na prática da engenharia**. Tradução A. J. da Costa Nunes e M. de L. C. Campello. 1. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1962.

Sobre os autores

Bruna Tayna Macedo Fideles

Engenheira Civil, Universidade Estadual Vale do Acaraú – UVA; Técnica em Eletrotécnica, Instituto Federal do Ceará; foi aluna de iniciação científica do grupo de pesquisas GEOIDRI (Otimização de projetos geotécnicos na infraestrutura do estado do Ceará).

Vanda Tereza Costa Malveira

Engenheira Civil, Universidade Federal do Ceará (1983); Mestre e Doutora em Engenharia Civil, área de Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará (1993 e 2009). Foi engenheira do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas e professora da Universidade de Fortaleza. Atualmente é professora Adjunta, com DE da Universidade do Vale do Acaraú, na área de Solos; pesquisadora no grupo GEOIDRI (Otimização de projetos geotécnicos na infraestrutura do estado do Ceará).