

Análise Paramétrica Sobre a Eficiência de Sistemas de Controle de Percolação de Barragens em Maciços Permeáveis

Felipe Marçal Barbosa de Melo Góis
UnB, Brasília, Brasil, felipembgois@gmail.com

André Pacheco de Assis
UnB, Brasília, Brasil, aassis.p@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho apresenta e analisa tecnicamente, em termos de vazão total e de gradientes de saída, os principais sistemas para controle de fluxo nas barragens assentadas em fundações permeáveis. Para tal, foi realizada uma análise paramétrica sobre a eficiência dos sistemas no controle da percolação, em que foram variadas as geometrias das soluções escolhidas e também a relação entre as permeabilidades da camada permeável da fundação e do maciço compactado da barragem. As análises contidas neste trabalho foram executadas por meio do software SEEP/W, componente do pacote GeoStudio responsável pela análise de percolação, que utiliza o Método dos Elementos Finitos em suas análises.

PALAVRAS-CHAVE: Percolação, Fundações Permeáveis, Sistemas de Controle, Barragens.

1 INTRODUÇÃO

O cenário das hidrelétricas brasileiras passou por grandes mudanças nas duas últimas décadas. Entre elas, observou-se a nítida transição dos empreendimentos hidrelétricos do Sudeste para outras regiões do Brasil, como o Norte e o Centro-Oeste. Estas mudanças têm tornado os novos aproveitamentos cada vez mais desafiadores, tanto pela crescente exigência em relação à questão socioambiental, quanto pela busca por obras cada vez mais baratas e eficientes. Dentre os inúmeros fatores que influenciam os projetos de barragens nestas regiões, destaca-se a análise da percolação através do maciço compactado e da fundação, já que a presença de camadas aluvionares espessas e rochas permeáveis são bastante comuns. Com a experiência acumulada ao passar dos anos, encontram-se disponíveis inúmeros métodos para o controle do fluxo de água através das barragens. Porém, em diversas situações, as soluções mais convencionais não se enquadram a geologia do local de forma adequada, o que abre espaço para sistemas mais novos e inovadores tecnicamente. Neste sentido, este trabalho visa agregar conhecimento a respeito

dos sistemas de controle de fluxo e detalhar suas características principais, bem como apresentar as vantagens e desvantagens na escolha de um ou outro sistema.

2 ANÁLISE PARAMÉTRICA

A análise paramétrica realizada neste trabalho teve como objetivo o estudo do comportamento do fluxo ao serem introduzidas diferentes soluções de controle em uma seção típica fictícia, com condições desfavoráveis de percolação. Foram analisadas as características das soluções em relação a vazões que passam pela seção e ao gradiente de saída no pé da barragem, tomados aqui como indicadores de comportamento da barragem em termos de eficiência de controle de percolação.

Foram analisadas três soluções: trincheira de vedação (*cut-off*), tapete de montante e soluções de controle delgadas. No último caso estão incluídas as paredes diafragma, as trincheiras de lama (*slurry trench*), as estacas secante e as colunas de *jet grouting*, já que todas estas soluções são similares no que se diz respeito à modelagem numérica, e obedecem o mesmo

princípio geométrico de controle do fluxo. A maior diferença entre elas se dá nos processos executivos e nas espessuras adotadas para cada situação. Porém, para análise no programa SEEP/W, que utiliza modelagem em duas dimensões por meio de elementos finitos, a introdução destas soluções é feita da mesma forma. Assim, não ocorre erro significativo em admitir as soluções como correspondentes.

2.1 Seções típicas adotadas

A seção típica adotada para a análise paramétrica possui 102,0 m de altura, com taludes de montante e jusante de 1V:2H e crista de 6,0 m. Foi adotado filtro vertical e horizontal com dimensões 1,0 e 2,0 m, respectivamente. O nível d'água à montante está na cota 100,0 m, e, conseqüentemente, a carga hidráulica na seção é de 100 mca (1 MPa). Também foi adotada a ausência de água à jusante, considerando o nível d'água de jusante na cota da fundação. A fundação é composta por duas camadas, uma permeável, onde o valor do coeficiente de permeabilidade é variável para cada análise, e a outra considerada impermeável. As duas camadas apresentam espessura igual a 100,0 m cada. A Figura 1 apresenta a seção típica adotada para condição natural.

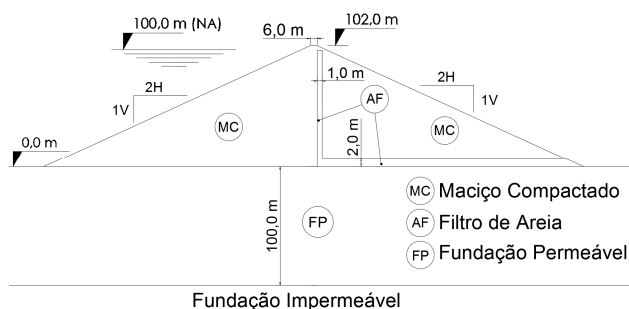


Figura 1. Seção típica adotada para análise (fora de escala para melhor visualização) (Góis, 2015).

Nas análises que utilizam o cut-off como solução de controle, foi adotada inclinação dos taludes da trincheira de 1V:1,5H e comprimento da base igual a 6,0 m. Já para as soluções delgadas, foi adotada espessura de 1,0 m para evitar que o elemento da malha fique com dimensões muito pequenas, o que poderia ocasionar problemas nos resultados.

Finalmente, para o tapete de montante, foi adotada espessura de 5,0 m e a aplicação do

mesmo material utilizado no maciço compactado para o preenchimento do tapete. Vale ressaltar que as geometrias adotadas das seções típicas são hipotéticas, baseadas em geometrias usuais utilizadas em projetos de barragens. Não foram realizados cálculos para verificação de estabilidade de taludes, porém, como o foco do projeto é a análise de diferentes situações de percolação, o cálculo de estabilidade não se faz necessário para esta finalidade. As seções típicas adotadas para cada um dos sistemas de controle podem ser observadas na Figura 2.

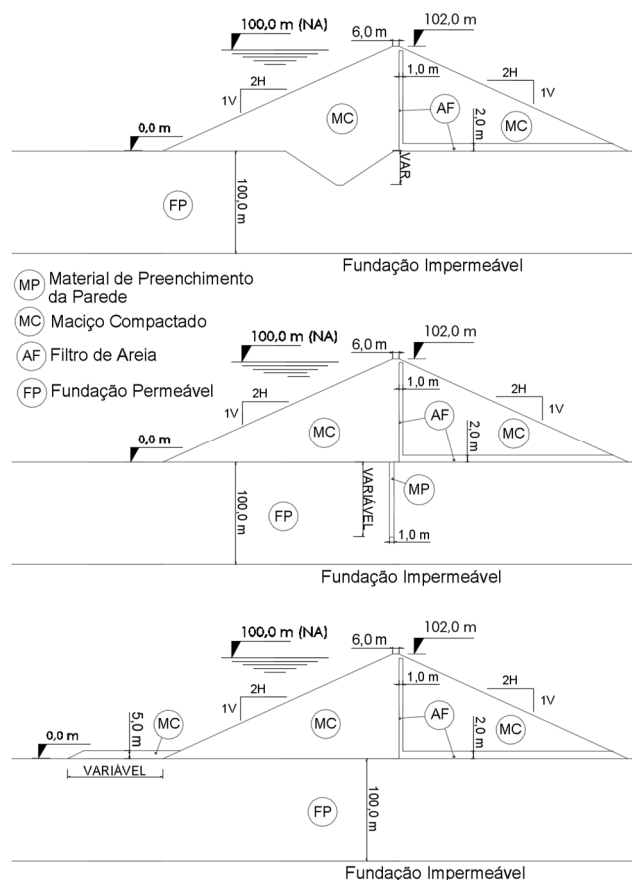


Figura 2. Seções típicas adotadas para análises dos sistemas de controle (fora de escala para melhor visualização) (Góis, 2015).

2.2 Descrição da análise

Inicialmente, foram realizadas modelagens da seção base, sem nenhum tipo de solução de controle de percolação, variando somente a relação entre a permeabilidade da fundação e a permeabilidade do maciço compactado. Foram adotadas três relações entre as permeabilidades: 10, 100 e 1000. Ou seja, no primeiro caso, a permeabilidade da fundação é 10 vezes maior do

que a permeabilidade do maciço compactado; no segundo caso, 100 vezes maior; e no terceiro caso, 1000 vezes.

Finalizadas as análises da seção base, deu-se início ao estudo das soluções de controle. Para cada solução, foram executadas análises com as mesmas relações entre as permeabilidades da seção base, variando também a profundidade da solução de controle ou o comprimento, no caso do tapete de montante.

Nos estudos de cut-off e das soluções delgadas, para cada relação, foram propostas três profundidades, $1/3.H$, $2/3.H$ e $1.H$, onde H corresponde à carga do reservatório, que coincide com a espessura da camada de fundação permeável. Já no estudo do tapete de montante, foram previstos comprimentos de tapete iguais a 1, 3, 5 e 10 vezes o valor da carga do reservatório.

Foram executadas ao todo 33 análises. A Tabela 1 mostra o resumo das análises executadas.

Tabela 1. Total de análises executadas (Góis, 2015).

Relação entre permeabilidades da fundação e do maciço compactado (k_f / k_m)	Seção Base	Cut-off	Solução Delgada	Tapete de Montante
10	1	3	3	4
100	1	3	3	4
1000	1	3	3	4
Total de Análises =	3	9	9	12

Além da geometria das seções, também são necessários os valores de coeficientes de permeabilidade de cada material para modelagem no software. Estes foram adotados como constantes para um mesmo material, com exceção do maciço compactado, onde foi adotada anisotropia de 10%. A Tabela 2 apresenta os valores dos coeficientes de permeabilidade utilizados em todos os materiais do modelo, baseados em Cruz (1996), Fell *et al* (2015), US Bureau of Reclamation (1973) e em obras onde foram utilizados materiais similares. Deve-se observar também que o valor do coeficiente de permeabilidade do maciço compactado foi fixado e o coeficiente da

fundação permeável variou para cada análise, como já explicitado anteriormente.

Tabela 2. Coeficientes de permeabilidade médios utilizados para todos os materiais (Góis, 2015).

Material	k (cm/s)	k (m/s)
Maciço Compactado	1×10^{-6}	1×10^{-8}
Fundação Permeável	variável	variável
Fundação Impermeável	1×10^{-6}	1×10^{-8}
Areia Média (Filtro)	1×10^{-2}	1×10^{-4}
Material de Preenchimento das Soluções de Controle Delgadas	6×10^{-7}	6×10^{-9}

3 RESULTADOS

Para cada caso modelado, foram computados os valores obtidos para a vazão do filtro vertical e horizontal, a vazão total que passa pela seção e o gradiente de saída no pé da barragem, um indicador para avaliar o potencial de piping da barragem, pelo processo de erosão regressiva. Aqui serão apresentados somente os resultados referentes às vazões totais na seção e aos gradientes de saída. Para os demais resultados ver Góis (2015).

3.1 Seção Base

Como já observado anteriormente, foram executadas modelagens para a condição natural, variando a relação entre permeabilidades da fundação e do maciço compactado. O arranjo dos equipotenciais para o caso onde a permeabilidade da fundação é 10 vezes maior do que a do maciço é apresentado na Figura 3.

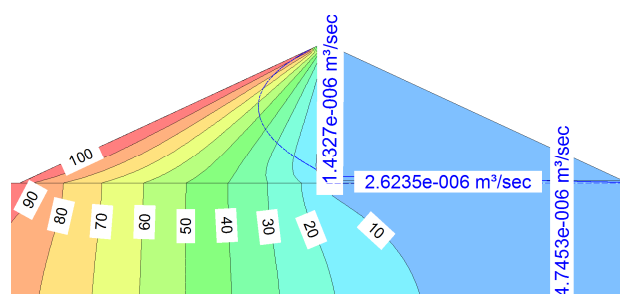


Figura 3. Equipotenciais e valores de vazão para condição natural - $k_f/k_m = 10$ (Góis, 2015).

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para a seção base.

Tabela 3. Resultados obtidos para seção base (Góis, 2015).

Seção Base		
k_m / k_f	Vazão Total da Seção (m³/s)	Gradiente de Saida
10	4.8E-06	0.1
100	2.8E-05	0.3
1000	2.1E-04	0.4

Nas seções seguintes serão apresentados os resultados obtidos com a introdução das soluções de controle, e comparando-os com os resultados apresentados na Tabela 3 poderá ser avaliada a efetividade de cada sistema.

3.2 Trincheiras Vedantes (*Cut-Offs*)

No estudo das trincheiras vedantes, deve ser ressaltado que a escolha por este sistema se mostra viável para situações onde a camada permeável não excede 30,0 m de profundidade. Porém, para fins de estudo de fluxo, podem ser adotadas profundidades maiores do que a de referência, já que a viabilidade econômica não está sob análise neste caso.

Outro ponto importante a destacar é a possibilidade de analogia entre as características do fluxo da seção típica proposta neste projeto e o comportamento do fluxo em seções quaisquer, nas quais a altura da seção e a espessura da camada permeável da fundação sejam diferentes do adotado. Isto se dá principalmente pois as características que governam o comportamento do fluxo em seções com *cut-off* são: a carga do reservatório; a relação entre as permeabilidades do maciço e fundação; e a espessura da camada permeável que é interceptada pela trincheira.

Assim como nas análises da seção base, foram levantados para as modelagens com a introdução do *cut-off* os valores de vazão total que passa pela seção e o gradiente de saída no pé da barragem. Para analisar a eficiência do sistema, foi utilizada a seguinte fórmula para cálculo das reduções de vazão:

$$\text{Redução da vazão base} = 1 - \frac{Q_{\text{tratado}}}{Q_{\text{base}}} \quad (1.1)$$

onde Q_{tratado} é a vazão obtida com a introdução da solução de controle e Q_{base} é a vazão em condições naturais de percolação. O gráfico que

mostra a eficiência das trincheiras na redução das vazões totais está apresentado na Figura 4.

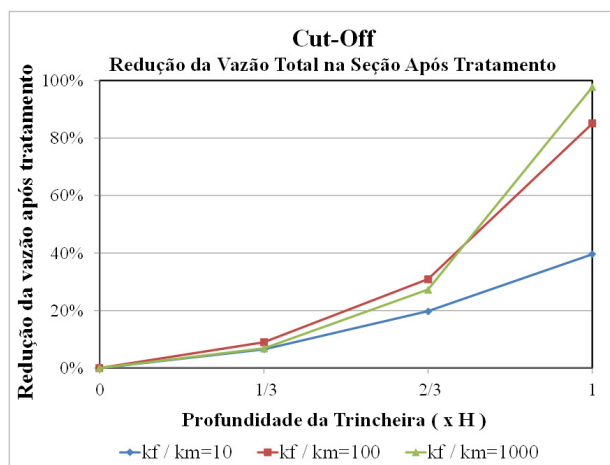


Figura 4. Redução de vazão total na seção após tratamento – Trincheiras de vedação (*cut-off*) (Góis, 2015).

A Figura 4 mostra redução na vazão de acordo com o aumento da profundidade da trincheira, em qualquer situação da fundação. Porém, percebe-se que a escolha deste sistema se torna mais interessante com o aumento da permeabilidade da fundação em relação ao maciço compactado, como pode ser observado na curva $k_f/k_m=1000$. Tal fato também pode ser confirmado por meio da curva $k_f/k_m=10$, que tem reduções pouco expressivas nas vazões.

Percebe-se que, apesar de proporcionar certa redução das vazões, as trincheiras parciais não apresentam efetividade no controle de percolação, principalmente em relação às trincheiras que interceptam toda a camada permeável. A Figura 4 apresenta valores máximos de redução da vazão natural por volta de 30 % para os *cut-offs* parciais. Já para as trincheiras totais, a redução proporcionada nunca fica abaixo de 85% nos casos onde a permeabilidade da fundação é no mínimo 100 vezes maior do que a do maciço.

Vale ressaltar que, para a aplicação em barragens, onde as incertezas de projeto são grandes e as soluções são muitas vezes bastante onerosas, os sistemas que apresentam reduções de vazão abaixo de 70-75% não são considerados de boa efetividade.

Por meio da Figura 4, também torna-se clara a percepção de que, quanto maior for a permeabilidade da fundação em relação ao maciço, mais efetiva é a introdução do *cut-off* na

seção. Visto isso, tem-se que, para uma fundação apenas 10 vezes mais permeável que o maciço compactado, a aplicação das trincheiras é pouco efetiva, com redução máxima de 40% da vazão natural. Sendo assim, nos casos onde a fundação não apresenta coeficiente de permeabilidade muito superior ao maciço, a opção por aplicar outro tipo de sistema pode ser mais interessante.

Com relação à redução dos gradientes hidráulicos de saída, apresentados na Tabela 4, as trincheiras de vedação parciais não apresentam eficiência alguma. Ou seja, os valores obtidos para a condição natural e para as situações onde a trincheira de vedação não intercepta toda a camada permeável são basicamente os mesmos. Porém, com a aplicação da trincheira total, o gradiente de saída é reduzido, atingindo valores menores do que 0,1.

Tabela 4. Gradientes hidráulicos de saída - *Cut-off* (Góis, 2015).

k_m / k_f	Seção Base	Z=0.33H	Z=0.66H	Z=1.H
	Gradiente de Saída			
10	0.1	0.1	0.1	< 0.1
100	0.3	0.3	0.3	<0.1
1000	0.4	0.4	0.4	<0.1

3.3 Soluções delgadas

Como visto anteriormente, os quatro sistemas englobados nesta seção (paredes diafragma, *slurry trench*, estacas secante e *jet grouting*) são modelados no SEEP/W da mesma forma, já que o programa realiza análises bidimensionais e é impossível diferenciar geometricamente as soluções nestas condições. Com isso, o agrupamento destas soluções em uma só seção não ocasiona nenhum tipo de interferência na análise dos resultados, já que os únicos parâmetros que sofreriam variações entre as soluções são: o coeficiente de permeabilidade do material de preenchimento e a espessura da solução. Caso fossem adotados diferentes parâmetros para cada uma das quatro soluções, pouco se diferenciariam os resultados entre si, já que a variação entre os parâmetros é muito pequena. Sendo assim, para fins de análise estas soluções serão apresentadas como uma só.

Assim como na análise das trincheiras de vedação, foram realizadas análises para três profundidades das soluções delgadas: $1/3.H$,

$2/3.H$ e $1.H$, onde H corresponde à profundidade da camada permeável, que neste caso é igual à carga do reservatório.

Como nas trincheiras vedantes, o comportamento do fluxo com a introdução das soluções delgadas é também bastante variável em função da interceptação total ou parcial da camada permeável da fundação. Logo, novamente se confirma que a aplicação parcial destas soluções não é eficiente no que se diz respeito à redução de vazões e à perda de carga.

A Figura 5 apresenta o gráfico de redução das vazões totais, onde pode ser observada semelhança com o aspecto do gráfico de efetividade dos *cut-offs*.

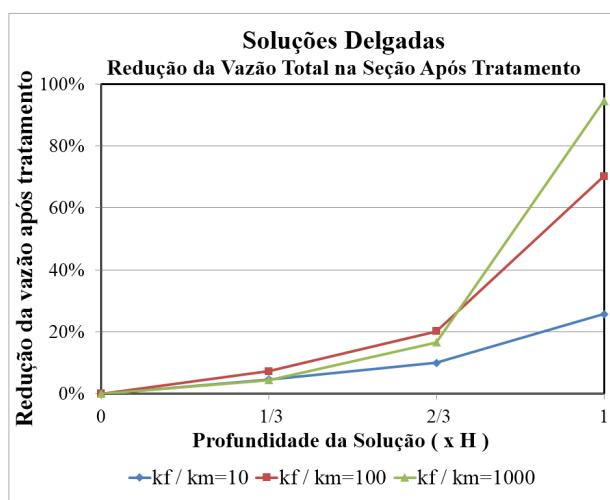


Figura 5. Redução de vazão total na seção após tratamento – Soluções de controle delgadas (Góis, 2015).

Ao contrário das trincheiras de vedação, as soluções delgadas só apresentam resultados realmente satisfatórios em casos onde a permeabilidade da camada da fundação é superior a 100 vezes a do maciço compactado. A porcentagem de vazão natural reduzida com a introdução da solução delgada para camadas muito permeáveis supera 90% ($k_f/k_m = 1000$), enquanto que para fundações 100 vezes mais permeáveis que o maciço, essa redução gira em torno de 70%.

No caso das soluções delgadas parciais, se nota com grande clareza que a efetividade dos sistemas é muito baixa. Portanto, não se deve utilizar desta solução para controle de fluxo, com exceção das situações onde a condutividade hidráulica da camada permeável decresce substancialmente com a profundidade. Nestes casos, devem ser realizadas análises adicionais

com maior detalhamento da fundação, a fim de verificar a verdadeira efetividade da aplicação de uma solução parcial.

Os valores de gradientes de saída obtidos com a introdução das soluções delgadas estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Gradientes hidráulicos de saída - Soluções delgadas (Góis, 2015).

k_m / k_f	Seção Base	$Z=0.33H$	$Z=0.66H$	$Z=1.H$
	Gradiente de Saída			
10	0.1	0.1	0.1	0.1
100	0.3	0.3	0.3	0.2
1000	0.4	0.4	0.4	0.1

Ao analisar a Tabela 5 percebe-se que os gradientes hidráulicos de saída com a introdução da solução de controle parcial não se alteram em relação à condição natural de fluxo. Ou seja, as soluções delgadas parciais também não são efetivas na redução de gradientes hidráulicos. Já quando as soluções delgadas avançam por toda a fundação permeável, os gradientes hidráulicos de saída são reduzidos. Porém, é possível perceber que a eficiência das soluções na redução de gradientes só se mostra positiva para grandes diferenças de permeabilidade entre fundação e maciço, gerando pouca ou nenhuma redução para valores de k_f/k_m menores que 100.

É muito importante destacar que, diferentemente das trincheiras de vedação, estas soluções não apresentam grandes restrições executivas para grandes profundidades, podendo interceptar camadas com cerca de 70 m de espessura. No caso do *jet grouting*, a execução pode ser ainda mais dinâmica, podendo ser executadas cortinas no eixo da seção da barragem ou da ensecadeira, após todo o aterro ser concluído.

As soluções delgadas também apresentam custo final elevado, inviabilizando sua aplicação em casos onde as condições de fluxo não são muito críticas. Cabe ao projetista estudar a relação custo-benefício da aplicação destas soluções e a observação do tempo disponível de execução do serviço, o que pode muitas vezes inviabilizar a escolha de determinado sistema.

3.4 Tapete de montante

Os tapetes de montante vêm sendo aplicados em projetos de barragens há bastante tempo e em diversas situações. O sistema consiste na aplicação de um tapete de baixa permeabilidade com comprimentos predefinidos na região à montante, sob o reservatório. Estes tapetes podem ser de dois tipos: tapete de argila compactada ou geomembrana (mantas impermeáveis de PEAD ou PVC). Para as análises executadas nesta seção foi adotado um tapete de montante de argila compactada com espessura de 5 m, onde foi variado o comprimento do tapete para cada valor de relação entre permeabilidades da fundação e maciço. Foram previstos comprimentos de 1, 3, 5 e 10H, onde H corresponde à carga do reservatório. Deve-se ressaltar que, para efeitos comparativos, a escolha por um ou outro tipo de tapete não é importante, já que a modelagem da solução no SEEP/W é basicamente a mesma. Com isso, os resultados que serão apresentados nesta seção são verdadeiros para qualquer um dos tipos de tapete.

A Figura 6 apresenta o gráfico de redução das vazões com a introdução do tapete.

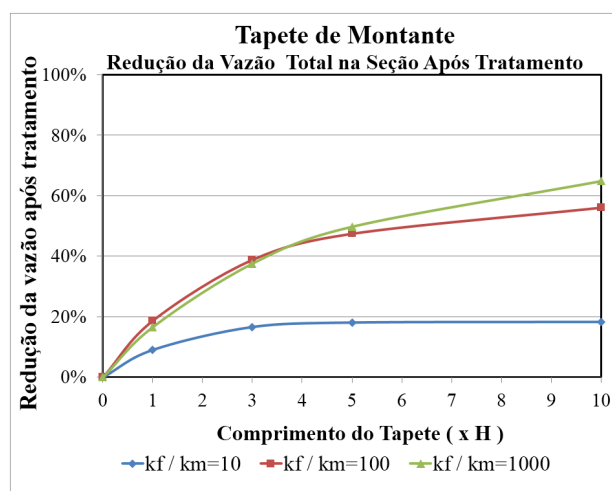


Figura 6. Redução de vazão total na seção após tratamento – Tapete de Montante (Góis, 2015).

A curva $k_f/k_m=10$ mostra que a efetividade do sistema nesta condição é nula, já que a redução de vazões não chega a 20% em nenhum ponto da curva. Conclui-se então que a introdução do tapete para baixas diferenças de permeabilidade entre fundação e maciço é pouco ou nada efetiva.

Para as situações onde a permeabilidade da fundação é maior, os valores obtidos no gráfico

se elevam. Contudo, é perceptível que, quando comparado com os outros sistemas de controle, o tapete de montante apresenta valores de redução de vazões bem baixos. Mesmo com comprimento de tapete igual a 10 vezes a carga do reservatório, o valor de redução de vazão na seção é de 56% em casos onde a fundação é 100 vezes mais permeável que o maciço e 65% onde ela é 1000 vezes mais permeável.

É válido dizer que, para o dimensionamento dos filtros, uma redução de 50% da vazão corresponde a 50% de redução na espessura do filtro para um mesmo material. Porém, em grande parte das vezes, a aplicação do tapete para reduzir esta quantidade de vazão natural é mais cara do que o material que foi reduzido do filtro. Cabe então ao projetista identificar e analisar economicamente as diferentes situações para obter um sistema otimizado.

A Tabela 6 apresenta os gradientes de saída obtidos com a introdução do tapete de montante e mostra que estes valores não se alteram nas análises que têm comprimento de tapete igual ou inferior a 5.H.

Tabela 6. Gradientes hidráulicos de saída - Tapete de Montante (Góis, 2015).

k_m/k_f	Seção Base	L=1.H	L=3.H	L=5.H	L=10.H
	Gradiente de Saída				
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
100	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
1000	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3

A redução dos gradientes para comprimento de tapete igual a 10H é também muito pouco significativa. Nesta condição, a solução reduz apenas 0,1 dos gradientes obtidos na condição natural para $k_f/k_m=1000$ e $k_f/k_m=100$, não reduzindo nada para $k_f/k_m=10$. Ou seja, o tapete de montante não é uma solução de controle viável no que se diz respeito à redução dos gradientes hidráulicos de saída, mesmo em casos onde a fundação é muito mais permeável do que o maciço.

Destaca-se também que os tapetes de montante vêm sendo muito empregados no Brasil, principalmente nas obras em regiões de rochas sedimentares como os arenitos, devido a um custo relativamente baixo de execução. Outro atrativo para esta larga utilização é a

facilidade de aplicação, principalmente no que se diz respeito às geomembranas de PEAD e PVC. Porém, os resultados obtidos nesta seção sugerem que a escolha por este sistema deve ser feita com cautela, analisando com detalhes as condições de fluxo de cada local.

4 CONCLUSÕES

A partir desta análise paramétrica foi possível confirmar que a aplicação das soluções de controle se torna mais atrativa quando a camada da fundação é bem mais permeável do que o maciço compactado da barragem. A efetividade dos sistemas é substancialmente aumentada quando a fundação apresenta permeabilidade 1000 vezes superior a do aterro. Esta relação é atingida em barragens apoiadas sobre solos arenosos e arenitos, onde os coeficientes de permeabilidade da fundação podem ser extremamente altos, da ordem de 10^{-3} cm/s.

Em contra partida, os sistemas apresentaram baixa efetividade em casos em que a fundação tem coeficiente de permeabilidade cerca de dez vezes o observado no maciço. Nestes casos, devem ser analisadas soluções alternativas de acordo com o problema apresentado. Filtros invertidos de pé podem conter os gradientes hidráulicos caso estes sejam elevados, por exemplo. Já em casos onde as vazões são um pouco mais altas, pode-se prever um filtro sanduíche horizontal ou até mesmo um aumento da drenagem interna, evitando assim soluções mais onerosas.

As soluções de controle também apresentam boa efetividade para os casos onde a relação de permeabilidades entre fundação e maciço fica entre os valores extremos apresentados.

Por meio dos resultados obtidos, conclui-se também que o comportamento de soluções como as trincheiras vedantes e as soluções delgadas é muito parecido para casos onde ocorre a interceptação apenas parcial da camada permeável da fundação. Nestas condições, estes sistemas são muito pouco efetivos, apresentando baixas ou insignificantes reduções nas vazões e gradientes hidráulicos de saída. Contudo, foi observada uma ótima efetividade desses sistemas nas situações em que eles se estendem através de toda a camada permeável,

proporcionando condições adequadas de controle das vazões e gradientes, e concentrando também toda a perda de carga da seção na região adjacente à solução.

Por outro lado, os tapetes de montante não apresentaram resultados satisfatórios, principalmente quando comparados com os resultados das outras alternativas. Apesar de proporcionar um deslocamento dos equipotenciais para montante, fazendo com que a perda de carga ocorra parcialmente sob o reservatório, o tapete de montante apresentou baixas reduções de vazão e gradientes hidráulicos. A efetividade do sistema ainda é mais reduzida para menores comprimentos de tapete, não sendo recomendada a adoção de comprimentos menores que 10H.

Neste trabalho foram apresentadas as diferentes soluções de controle de percolação disponíveis, bem como as características de fluxo obtidas para a aplicação destas soluções em condições geológicas distintas. A observação técnica destas características, aplicada em cada situação específica, é extremamente importante na escolha de uma solução final adequada. Contudo, é fundamental o entendimento de que as soluções de controle não podem ser escolhidas com base em um único aspecto. Deve-se também ser analisado o custo da solução, o tempo disponível para sua execução e o impacto deste no cronograma da obra, as condições geológico-geotécnicas locais, a disponibilidade de materiais para utilização, entre outros fatores. Ao serem atendidos todos esses detalhes, evitam-se soluções desnecessárias ou mal projetadas, melhorando assim o desempenho geral das barragens ao longo de sua vida útil.

REFERÊNCIAS

- Cruz, P.T. (1996) *100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto*, Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.
- Fell, R. *et al.* (2015) *Geotechnical Engineering of Dams*, 2nd ed., CRC Press, London, UK.
- Góis, F.M.B.M. (2015) *Sistemas de Controle de Percolação em Maciços Permeáveis, com Ênfase em Soluções de Jet Grouting*, Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 104p.
- US Bureau of Reclamation (1973) *Design of Small Dams*, 2. ed., Department of the Interior, Washington, USA.