

## PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO E SEUS EFEITOS NA ANÁLISE DE SUBPRESSÃO

**Marieli Biondo Lopes**

Professora do curso de Engenharia Civil da Universidade Comunitária da Região de Chapecó  
marybiondo@hotmail.com

**André P. Assis**

Professor da Universidade de Brasília  
aassis@unb.br

**Camila G. Carraro**

Engenheira Civil, Universidade Comunitária da Região de Chapecó  
caami\_carraro@unochapeco.edu.br

**Marlusa C. Schafer**

Acadêmica do curso de Engenharia Civil da Universidade Comunitária da Região de Chapecó  
marlusacristina@unochapeco.edu.br

**Rafael Cristiano Piton**

Engenheiro Civil, Universidade Comunitária da Região de Chapecó  
rafaelpiton@unochapeco.edu.br

**Bárbara Karina Kronbauer**

Engenheira Civil, Universidade Comunitária da Região de Chapecó  
barbara.kronbauer@unochapeco.edu.br

**Resumo.** *As cortinas de injeção e os sistemas de drenagem são uma alternativa na redução do efeito da subpressão nas bases de barragens de concreto e melhoramento das condições hidráulicas e mecânicas do maciço rochoso. Este trabalho propõe um tratamento de fundação com redução dos furos de injeção e aumento do sistema de drenagem, adotando a metodologia GIN para execução da impermeabilização. Os critérios de dimensionamento de subpressão utilizados foram de Andrade (1988) e Eletrobrás (2003). Em relação à adoção do método GIN para serviços de vedação e impermeabilização de fundações, sugere-se que seja aprofundado tanto os estudos, como a utilização, continuando o que já fora indicado por Oliveira et al. (2001), que um sistema de monitoramento em tempo real dos serviços,*

*unificado com o GIN possuem vantagens e benefícios no controle da eficiência.*

**Palavras-chave:** *Subpressão. Cortina de Injeção. Sistema de drenagem.*

### 1. INTRODUÇÃO

A subpressão é um esforço no sentido de baixo para cima que age em sentido oposto ao efeito do peso próprio da estrutura de concreto e aumenta a instabilidade desta estrutura em relação ao tombamento e deslizamento. Segundo Andrade (1988), o estudo dos efeitos da subpressão foram iniciados em 1888 por Francis, que foi o primeiro também a introduzir os sistemas de drenagem nas fundações para redução desta força.

Para melhoramento das condições das fundações de barragens de concreto, utilizam-se os tratamentos profundos, compostos por cortinas de injeção com calda de cimento e drenagem vertical. As cortinas de injeção funcionam na redução das vazões pela fundação, devido ao aumento do caminho de escoamento. Em maciços rochosos muito fraturados, a penetração da calda auxilia no enrijecimento da fundação, aumentando os parâmetros de resistência mecânica, além dos parâmetros de condutividade hidráulica.

Os furos de drenagem agem diretamente no efeito de subpressão, por reduzir a área do diagrama formado abaixo da base da estrutura de concreto. Assim, com a redução desta área, há a redução da resultante das forças de água, que é a subpressão.

Comumente, utilizam-se tanto as cortinas de injeção, como os furos de drenagem nos projetos hidrelétricos, mesmo que as discussões sobre a necessidade destas cortinas de injeção sejam polemizadas desde 1932, por Terzaghi (COSTA, 1991). Das metodologias existentes e praticadas na execução dos furos impermeabilizantes, destacam-se o método convencional de Houlby (1990) e GIN (LOMBARDI; DEERE, 1993).

Este trabalho tem por finalidade propor um tratamento de fundação otimizado, com redução de furos de injeção e aumento do sistema de drenagem. Esta proposta utilizará o método GIN para injeção, com avaliação de custos provenientes da redução dos furos da cortina. Com o sistema de drenagem, será verificada a eficiência em relação à subpressão, adotando o critério da Eletrobrás (2003) e de Andrade (1988).

## 2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

### 2.1 Características hidráulicas dos maciços rochosos

Segundo Costa (2012), a permeabilidade

dos maciços formados por rochas ígneas é determinada pelo fluxo de suas descontinuidades, uma vez que não há poros neste tipo de material. Cruz (2004) apresenta magnitudes de coeficientes de permeabilidade para diferentes materiais, em que rochas intactas atingem  $k = 10^{-10}$  cm/s, enquanto que em fraturas com aberturas de 0,5 mm, a condutividade é  $k = 10^1$  cm/s.

Nos maciços fraturados, o escoamento é governado pelas descontinuidades principais, denominadas por Andrade (1988) de fraturas portadoras d'água. Assim, o autor afirma que o conhecimento desta família é mais importante no estudo de fluxos, que a determinação da interconectividade do maciço.

O escoamento nos granitos tende à zero em profundidade devido o confinamento, atingindo magnitudes maiores nos primeiros metros, em que as juntas de alívio estão presentes (AZEVEDO; ALBUQUERQUE FILHO, 1998). O fluxo de fluidos por um meio permeável foi condicionado por Darcy, em 1856, determinando que a velocidade de escoamento é proporcional ao seu coeficiente de permeabilidade e gradiente hidráulico, conforme a Eq. (1) (FIORI, WANDRESEN, 2012):

$$v = ki \quad (1)$$

A Lei de Darcy é válida somente para fluxos laminares, e a sua limitação é o número de Reynolds, dado pela Eq. (2), em que  $v$  é a velocidade do escoamento,  $e$  a espessura da descontinuidade portadora d'água e  $\mu$  a viscosidade cinemática do fluido.

$$Re = \frac{v2e}{\mu} \quad (2)$$

Uma vez que o escoamento do maciço rochoso acontece pelas descontinuidades, a condutividade hidráulica neste plano é o cubo

da sua espessura, sendo  $g$  a aceleração da gravidade, Eq. (3):

$$k_f = \frac{ge^3}{12\mu} \quad (3)$$

A determinação do coeficiente de permeabilidade *in situ* é realizada através dos ensaios de perda d'água (EPA) ou ensaios tridimensionais. A pressão de água na base das barragens de concreto favorece o efeito da subpressão, a qual age no sentido de reduzir o peso do barramento, tornando-o menos estável (GUTSTEIN, 2005).

Segundo Levis (2006), no estudo da estabilidade de barragens as únicas variáveis que podem ser modificadas pelo projetista são o peso da estrutura, a resultante da subpressão e a área de contato. Reduzindo-se a resultante da subpressão, reduz-se o consumo de concreto e permite-se obras economicamente mais interessantes.

A diminuição do efeito da subpressão pode ser realizada pela inclusão de furos de drenagem vertical da fundação do barramento, sendo um dos métodos mais eficazes para este fim, afirmado por Andrade (1988).

## 2.2 Tratamento de fundações

Os tratamentos de fundação convencionalmente utilizados são as cortinas de injeção com calda de cimento e, as cortinas de drenagem vertical.

A discussão a respeito da necessidade de utilizar cortinas de injeção como tratamento acontece desde 1932, em que Terzaghi contestava o uso indiscriminado das injeções, salientando meios mais eficazes e econômicos disponíveis (COSTA, 1991). Costa (1981) pontua os critérios para determinação da necessidade ou não das cortinas de injeção, sendo que apenas o método de Lugeon, de 1933 e o método de Vitor de Melo, de 1969, consideram as dimensões do barramento na

tomada de decisão.

O critério dominante na definição de injetabilidade dos maciços rochosos é referente ao coeficiente de permeabilidade, em que Costa (2012) indica para  $k < 10^{-5}$  cm/s, não há necessidade de execução de cortinas de injeção. A proposição do autor corrobora com Mesquita (2008), que afirma que este valor de coeficiente de permeabilidade é indicativo de maciços de condutividade muito baixa.

As cortinas de injeção impermeabilizantes são executadas em fiadas, com número de linhas variando para cada projeto. O método usualmente adotado para o tratamento é o de Houlshby (1990), o qual recomenda a abertura dos furos de forma *split-spacing* e controle de parada por nega.

Levis (2006) recomenda que a distância dos furos primários deve ser menor que duas vezes o raio da seção circular de influência da injeção, sendo estes furos o suficiente para o fechamento da cortina. Os furos secundários, seriam uma verificação e complementação do que foi realizado.

As caldas de cimento utilizadas para injeção possuem relação A/C variando de 0,5:1 a 1:1. As caldas mais grossas (0,5:1) possuem comportamento binghamiano, e com isso, maior coesão, que é uma resistência à fluência. As caldas mais finas (1:1) possuem comportamento newtoniano, com reologia comandada pela viscosidade (LOMBARDI; DEERE, 1993).

Lombardi e Deere apresentaram em 1993 o método GIN - *Grouting Intensity Number*, com o objetivo de uniformizar o traço da calda de injeção, utilizando uma mistura única. Brandão (2014) afirma que o GIN é uma metodologia prática, desenvolvida para aplicação em misturas de cimento que apresentam coesão, ou seja, comportamento binghamiano. A coesão deixa as caldas mais estáveis, necessitando de pressão maior para garantir a penetrabilidade, a qual pode ser melhorada com a adição de aditivos

superplastificantes.

O principal objetivo do GIN, segundo Lombardi (2003) é limitar a pressão de injeção, prevenindo uma combinação excessiva de volumes de calda e pressões elevadas que podem provocar o fissuramento hidráulico. A determinação da curva GIN é dada pela Eq. (4), em que  $p$  é a pressão de injeção e  $V$  o volume injetado. A Fig. 1 apresenta a curva GIN.

$$GIN = pV \text{ (kPa x l/m)} \quad (4)$$

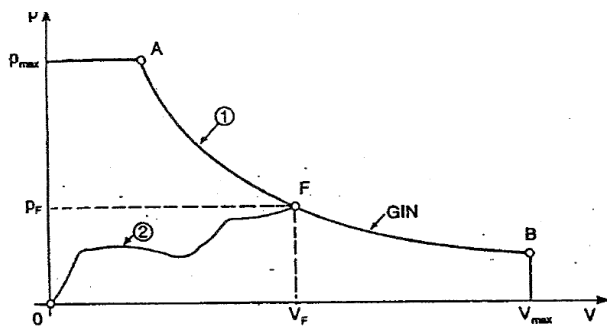


Figura 1. Representação da curva GIN (LOMBARDI; DEERE, 1993).

No Brasil, esta metodologia foi utilizada na UHE Marechal Mascarenhas de Moraes com auxílio de um equipamento para monitoramento em tempo real, desenvolvido por Furnas (OLIVEIRA *et al.*, 2001), com resultados positivos, afirmando que o método possui vantagens, e que necessita de aprofundamento de estudo.

### 3. METODOLOGIA DE PESQUISA

#### 3.1 Modelo de Tratamento Otimizado (MTO)

Através dos resultados da avaliação da condutividade hidráulica antes e depois do tratamento no projeto original de Jirau (Lopes, 2015), idealizou-se um modelo otimizado (MTO). Esta idealização teve por objetivo

reduzir o número de furos da cortina de injeção, aumentando o espaçamento entre furos, e, aumentar os furos de drenagem com a redução do seu espaçamento. A ordem dos furos obrigatórios passou a ser primários e secundários, espaçados a cada 6 m, e os furos de drenagem, espaçados a cada 1,5 m.

A injeção destes furos foi estudada pelo método GIN, através de retroanálise dos consumos de calda originais, determinando uma calda única para todo o projeto. Os volumes das caldas de A/C 0,5:1 e 0,7:1 foram plotados em gráficos de dispersão, juntamente com os dados de pressão. Traçaram-se três curvas GIN aleatórias, escolhendo-se para cada bloco do vertedouro, a curva que mais aproximava dos pontos dispersos.

O volume máximo para limitação das curvas foi determinado para cada bloco da estrutura, em virtude dos volumes reais injetados na cortina, em unidades de l/m. A pressão máxima adotada seguiu a recomendação de Lombardi (1996) de que a pressão máxima deve variar entre duas a três vezes a pressão hidráulica que o maciço está submetido. Por fim, determinou-se um traço único para a cortina.

#### 3.2 Análise da Subpressão

A subpressão na base do vertedouro foi determinada pelo critério da Eletrobrás (2003) e Andrade (1988), considerando o Projeto Original e MTO.

No critério da Eletrobrás (2003), o diagrama de subpressão foi determinado a partir das Figuras 4 e 5, considerando drenagem operante e inoperante. No segundo caso, na existência de uma linha de drenos operantes, a subpressão média foi calculada pelas Equações (5) e (6).

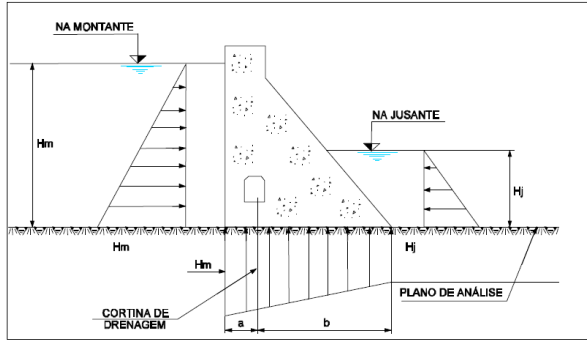


Figura 4. Subpressão com uma linha de drenagem inoperante na montante do barramento (ELETROBRÁS, 2003).

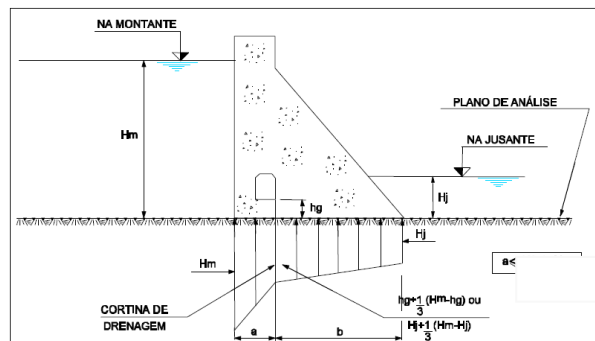


Figura 5. Subpressão com uma linha de drenagem operante na montante do barramento (ELETROBRÁS, 2003).

$$H_{dm} = H_j + \frac{1}{3}(H_m - H_j) \text{ para } H_j \geq h_g \quad (5)$$

$$H_{dm} = h_g + \frac{1}{3}(H_m - h_g) \text{ para } H_j < h_g \quad (6)$$

No método de Andrade (1988), a subpressão média na boca do dreno foi dimensionada pela Eq. (7), em que  $j$  e  $d$  são as distâncias do dreno até os paramentos de montante e jusante,  $Hd$  a carga hidráulica na boca do dreno,  $\lambda$  o fator de forma da drenagem,  $e$  o espaçamento entre os furos,  $\phi d$  o diâmetro e,  $B$  a dimensão da base da barragem. As subpressões montante e jusante foram mantidas conforme a metodologia da Eletrobrás (2003).

$$S_d = \frac{(H_m \cdot j) + (H_j \cdot d) + (j \cdot d \cdot \lambda \cdot H_d)}{(j \cdot d \cdot \lambda) + B} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{e \ln\left(\frac{e}{\pi \phi d}\right)} \quad (8)$$

Foram dimensionadas as subpressões na base do vertedouro para suas situações: a primeira para as cotas de operação normal, com nível de montante de 90 m e jusante, 73 m. A segunda situação, tomaram-se leituras de piezometria após o enchimento do reservatório em 2013, com nível de montante na cota 84,4 m e jusante, 74,2 m. A partir dos diagramas na base, determinou-se a resultante de subpressão para cada caso, verificando a eficiência do MTO.

### 3.3 Características geológicas e de escoamento

Considerando que todo o escoamento da fundação se dá pelas descontinuidades, o coeficiente de permeabilidade oriundo dos ensaios de EPA, denominado de  $k_x$  é igual ao  $k_f$  citado na Eq. (3). Utilizou-se como  $k_x$  o menor valor dos horizontes ensaiados ao longo da fundação do vertedouro, permitindo a determinação da espessura da fratura portadora d'água e, o número de Reynolds da Eq. (2).

### 3.4 Modelagem Numérica

A modelagem numérica foi executada com auxílio do *software* SEEP/W, versão 2016, da GeoSlope®, adotando-se os três materiais referenciados anteriormente: maciço rochoso, cortina de injeção e cortina de drenagem.

Após a resolução da rede de fluxo e cargas de montante, jusante e no dreno para cada seção de análise, os diagramas de pressões de

água foram confeccionadas no AutoCAD® para determinação da resultante de subpressão na base do vertedouro.

#### 4. ANÁLISES E RESULTADOS

##### 4.1 Modelo de Tratamento Otimizado (MTO)

A Figura 6 apresenta o gráfico de dispersão com curvas GIN para o bloco VT-02, e a Fig. 7, a curva escolhida, com intensidade 1500 kPa x l/m.

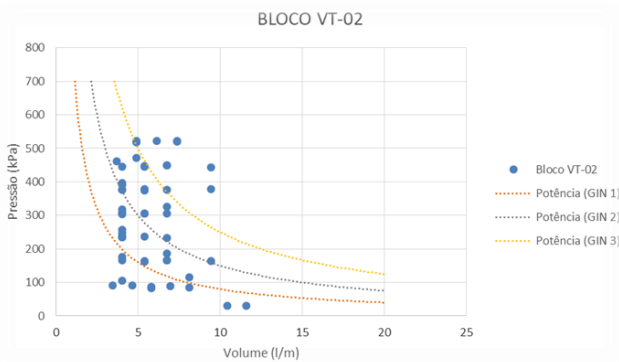


Figura 6. Curvas GIN para o bloco VT-02.

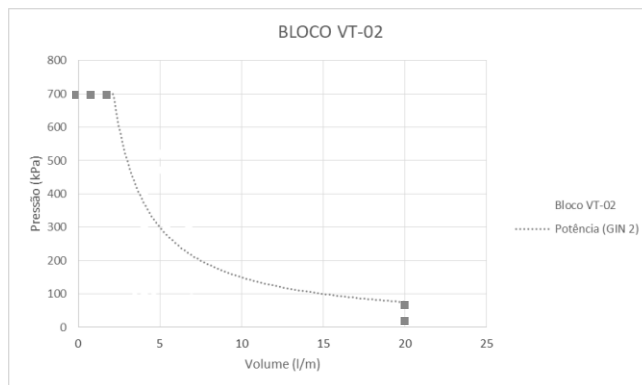


Figura 7. Curva GIN para o bloco VT-02.

A pressão máxima para construção das curvas foi baseada na proposição de Lombardi (1996), de até três vezes a pressão de água a montante ( $P_w$ ). Para esta pesquisa, a relação adotada foi de  $2,5 \times P_w$ , uma vez que nenhum dos resultados do gráfico de dispersão alcançaram as magnitudes de  $3 \times P_w$ . O volume máximo de cada curva, corresponde

ao volume real injetado, variando para cada bloco do vertedouro. A Tabela 1 apresenta as intensidades (GIN) para cada bloco.

Tabela 1. Resumo dos números GIN para cada bloco

Bloco	Pmax (kPa)	Vmax (l/m)	GIN (kPa x l/m)
VT-01	700	20	2000
VT-02	700	20	1500
VT-03	700	40	1500
VT-04	700	50	1500
VT-05	700	350	2000
VT-06	700	600	3000
VT-07	700	750	7000
VT-08	700	450	3000
VT-09	700	250	2500
VT-10	700	160	2000

O traço unificado da calda do MTO foi determinado pela equivalência dos volumes de água e cimento para as relações A/C do projeto de 0,5:1 e 0,7:1, sendo que a maior parte da cortina foi executada com a calda mais fina. A mistura única manteve-se com traço de 0,7:1 igualmente ao Projeto Original. Segundo Brandão (2014), para o método GIN, as relações indicadas variam de 0,6:1 a 0,8:1, devido a maior estabilidade.

Como as cortinas de injeção têm função de reforçar o maciço rochoso nas regiões mais fraturadas, a escolha de caldas mais finas faz com que os parâmetros mecânicos sejam reduzidos ( $\sigma_c$  = Tensão de compressão; E = Módulo de Young) na região injetada. Para estas relações, com cimento CP IV, a resistência à compressão aos 28 dias foi de 27 e 13 MPa para 0,5:1 e 0,7:1, respectivamente. O módulo de Young foi de 5,7 e 1,6 GPa, também para mistura 0,5:1 e 0,7:1. A diminuição na resistência à compressão de foi de 52% e, para o módulo de deformabilidade, 72%.

Em relação aos números GIN propostos

para o MTO, estes são coerentes com os resultados de permeabilidade apresentados por Lopes (2015), mantendo maior intensidade nos blocos de condutividade maior, e menor intensidade e volume nos blocos com baixa condutividade.

Estabelecendo uma avaliação financeira da atividade de injeção, como o MTO desprezou a execução dos furos terciários (uma vez que no projeto original estes furos não apresentaram consumos superiores aos limites do projeto de 30 kg/m), houve redução na perfuração e consumo de cimento da cortina. A diminuição dos consumos de cimento injetados implica em uma redução de 30% no custo final do tratamento de vedação.

Outro objetivo do MTO é aumentar os furos de drenagem para redução do efeito da subpressão na base da barragem. A redução da resultante da subpressão permite a redução do peso e área do concreto, viabilizando economicamente o projeto. Nesta pesquisa, os furos de drenagem foram aumentados, o que provoca também aumento no custo da perfuração deste sistema. Analisando-se o custo de todo o tratamento (cortina de injeção e sistema de drenagem), há uma elevação no custo final de 13%.

Ressalta-se que o aumento no custo final do tratamento de fundação devido à cortina de drenagem precisa ser comparado com a possível redução do volume de concreto da estrutura, o que torna benéfica a utilização do MTO. O método GIN possui vantagens em relação ao método convencional por evitar o fissuramento hidráulico e unificar a mistura utilizada no processo de injeção, porém seus estudos e aplicações no Brasil precisam ser aprimorados.

#### 4.2 Análise da subpressão

Os diagramas de subpressão pelos métodos da Eletrobrás (2003) e Andrade (1988) são apresentados nas Figuras 8 e 9. Os resultados

da Fig. 8 referenciam-se às cotas de 90 m e 73 m dos reservatórios montante e jusante, respectivamente. Os resultados da Fig. 9 basearam-se às cotas 84,4 m e 74,2 m dos reservatórios montante e jusante, incluindo-se as leituras piezométricas de 2013 após a geração da primeira turbina e nível mínimo de operação.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados de subpressão e resultante de subpressão para cada análise efetuada. As cargas de água na montante e jusante, para todos os casos estudados, seguiram as indicações de Eletrobrás (2003). A variável foi o dimensionamento das cargas médias no sistema de drenagem, em que os diagramas Projeto Original e MTO foram determinados pelo método de Andrade (1988) e o diagrama Eletrobrás (2003) pelo seu próprio critério.

As cortinas de injeção não foram consideradas nesta avaliação.

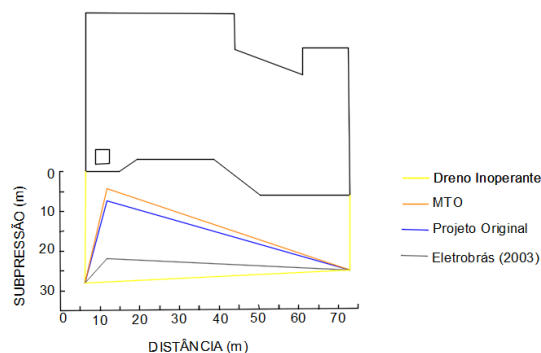


Figura 8. Diagrama de subpressão em condições normais de operação – cotas máximas.

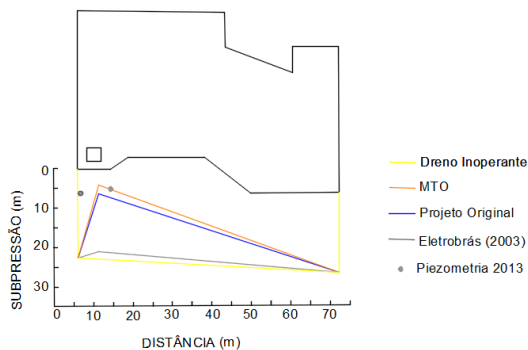


Figura 9. Diagrama de subpressão em condições normais de operação – cotas mínimas.

Tabela 2. Resultados de subpressão – cotas máximas

Diagrama	Montante (m)	Dreno (m)	Jusante (m)	U (kN/m)
Dreno Inoperante	28		19	1678
MTO	28	4,4	19	897
Projeto Original	28	7,1	19	996
Eletrobrás	28	22	19	1486

Tabela 3. Resultados de subpressão – cotas mínimas

Diagrama	Montante (m)	Dreno (m)	Jusante (m)	U (kN/m)
Dreno Inoperante	22,4		20,2	1528
MTO	22,4	4	20,2	906
Projeto Original	22,4	6,2	20,2	980
Eletrobrás	22,4	20,9	20,2	1469
Piezometria	6,4	5,3		

Comparando-se o MTO com o projeto original, o aumento do número de furos de drenagem, com conseqüente redução do espaçamento reduz o efeito da subpressão em 10% para as cotas máximas e, 8% nas cotas mínimas. Em relação ao maciço natural (sem cortina de drenagem ou sistema inoperante), a redução para as cotas máximas é 46% e 41% para o MTO e Projeto Original,

respectivamente. A modificação da linha de drenagem é eficiente, considerando que a alteração no espaçamento afeta diretamente o fator de forma  $\lambda$ , que é inversamente proporcional à subpressão. Para esta pesquisa, os fatores de forma encontrados foram 0,83 e 2,5 para o Projeto Original e MTO.

### 4.3 Características geológicas e de escoamento

A Tabela 4 apresenta as características da descontinuidade principal e suas propriedades de escoamento.

Tabela 4. Características geológicas e de fluxo

Projeto	Espessura (mm)	Velocidade (m/s)	Re
Projeto Original	11	$4 \times 10^{-6}$	$8,7 \times 10^{-8}$
MTO	11	$4,6 \times 10^{-6}$	$9,9 \times 10^{-8}$

A partir dos resultados da Tabela 4, conclui-se que a espessura da maior descontinuidade da fundação do vertedouro é 11 mm, por onde o escoamento da água é realizado. Conseqüentemente, o número de Reynolds possui pequena magnitude, confirmando o escoamento laminar para este trabalho.

### 4.4 Modelagem numérica

Inicialmente, a modelagem numérica foi efetuada para os três modelos hidrogeológicos na condição de maciço homogêneo e isotrópico.

Adotou-se uma malha de elementos na fundação do vertedouro de  $2 \times 2$  m Fig. 10, refinada na região do tratamento. O modelo foi discretizado com 8.916 nós e 8.818 elementos quadriláteros e triângulos. As condições de contorno foram impostas pela carga de montante ( $H_m$ ) e jusante ( $H_j$ ) para a cota normal máxima e mínima. A carga dos drenos ( $H_d$ ) foi aplicada para o critério da



Eletrobrás (2003) e Andrade (1988), em ambas cotas de análise e, considerando a isotropia e anisotropia do maciço rochoso. Os Itens 5.2.5.1 a 5.2.5.4 apresentam as análises de cada seção estudada.

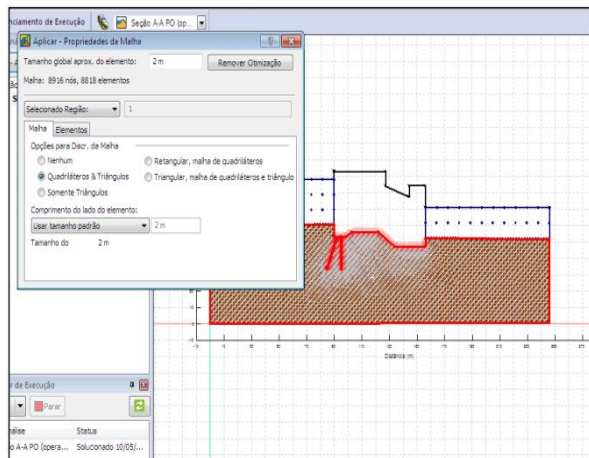


Figura 10. Malha de elementos finitos adotada no SEEP/W.

#### 4.5. Seção A-A

A Seção A-A Fig. 11 apresenta uma linha de injeção e uma linha de drenagem, sendo uma seção típica de tratamento de fundação de barragens de concreto.

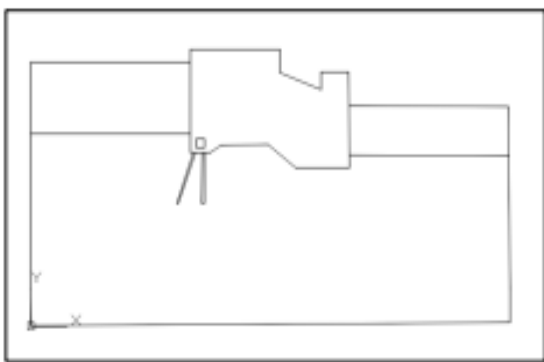


Figura 11. Seção de análise A-A.

A primeira análise realizada para esta seção foi em relação à redução da magnitude de subpressão pela adoção do MTO. Quando avaliados os resultados teóricos, a redução foi

de aproximadamente 9% no caso de maciço rochoso isotrópico, e 10% (média aproximada de 10%) no caso do maciço anisotrópico. Na modelagem numérica, a redução foi de 6% e 9% (média aproximada de 7%), para os maciço isotrópico e anisotrópico, respectivamente. Salienta-se a importância do sistema de drenagem na influência direta da diminuição dos esforços da água na base do vertedouro, confirmando a eficiência da proposta do MTO para esta finalidade.

Analisando-se os métodos Eletrobrás (2003) e Andrade (1988), novamente confirma-se que o primeiro critério é mais conservador, e que o segundo apresenta uma subpressão 37% inferior no caso do MTO. A introdução da anisotropia não afetou os resultados obtidos pelo critério da Eletrobrás (2003), por não considerar o fator de forma  $\lambda$ , diferentemente daquilo que foi encontrado para o critério de Andrade (1988). No Projeto Original, a adoção da anisotropia, aumentou 32% da carga do dreno e, no MTO, 25%. Consequentemente, a resultante final da subpressão foi elevada em 6% no Projeto Original e, 3% no MTO. Entretanto, nenhum destes valores ultrapassou àqueles encontrados para Eletrobrás (2003).

#### 4.6. Seção B-B

A Figura 12 demonstra a seção típica B-B, contemplando três linhas de injeção e uma linha de drenagem.

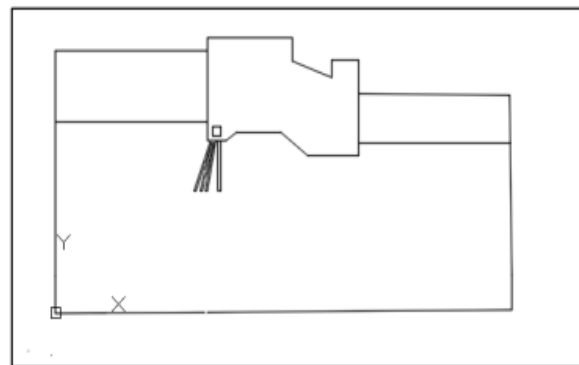


Figura 12. Seção de análise B-B.

Corroborando com as análises realizadas para a Seção A-A, a adoção do MTO como projeto de fundação da barragem, reduziu na Seção B-B em média 10% nos esforços teóricos (considerando o maciço homogêneo isotrópico e anisotrópico) e, 7% nos resultados encontrados por modelagem numérica. O critério de Eletrobrás (2003) apresenta aumento da subpressão entre 37% e 32%, para o MTO e Projeto Original, respectivamente. E, por fim, a inclusão da anisotropia aumenta o esforço de subpressão em 6% no Projeto Original e 3% no MTO, assim como na Seção A-A.

Avaliou-se nesta seção, o efeito das linhas de injeção, as quais foram aumentadas de uma para três linhas. Nos resultados finais da modelagem numérica, para os casos de Projeto Original e MTO (nas cotas normal máxima e mínima) e, adotando isotropia e anisotropia, os resultados finais apresentaram uma diferença 0,5%. Para isso, considera-se esta diferença sem representatividade, e que para esta pesquisa, a adoção de linhas de injeção não afetou a subpressão. Isso se deve, pelo baixo coeficiente de permeabilidade do maciço rochoso, e que, uma vez inserida uma calda para impermeabilização das fraturas existentes, esta não se torna eficaz. A redução da subpressão em 7% e 10% se dá pela alteração da malha de drenagem, conforme atribuído por Andrade (1988).

#### 4.7. Seção C-C

A Figura 13 demonstra a seção típica C-C, contemplando apenas a cortina de drenagem.

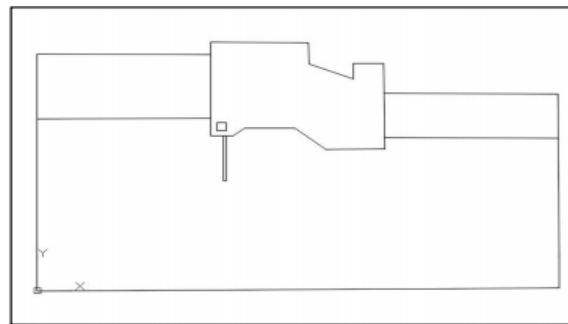


Figura 13. Seção de análise C-C.

Esta seção representa uma seção localizada entre os furos de injeção, em que os bulbos da calda não se sobrepõem, deixando passagem livre do fluxo. Assim, somente a cortina de drenagem faz a função de tratamento de fundação. Através dos resultados teóricos e por modelagem numérica, conclui-se que para esta situação, os efeitos da subpressão não serão alterados, quando comparados com uma seção que contempla a cortina de injeção (Seção A-A e B-B). A diferença entre os resultados foi de 1%, sendo irrelevante para esta pesquisa. Salienta-se, mais uma vez, que a cortina de injeção não apresentou eficácia direta no efeito da pressão d'água na base do vertedouro e que a proposta MTO de redução de furos de injeção e aumento dos furos de drenagem é válida e funcional.

#### 4.8. Seção D-D

Esta análise refere-se ao maciço natural (sem tratamento de fundação) e também do sistema inoperante, citado por Eletrobrás (2003). Nesta condição, a subpressão é 45% superior quando comparada com às demais seções (A, B e C) pelo método de Andrade (1988) e 17% para o critério de Eletrobrás (2003). Com isso, afirma-se a necessidade de um tratamento de fundação adequado e, no caso da UHE Jirau, um sistema de drenagem operante por ser este o principal responsável

pela manutenção da segurança do barramento no que tange aos efeitos da subpressão.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A execução de uma cortina de injeção otimizada reduz os custos do tratamento de vedação em virtude da diminuição das perfurações e consumo de cimento. Para assegurar que o tratamento seja eficiente, sendo possível executar apenas os furos primários e secundários como obrigatórios (excluindo-se os terciários), é indispensável uma investigação geológico-geotécnica efetiva e de qualidade.

O aumento do número de furos de drenagem encarece o custo do tratamento de fundação, porém, com a redução dos efeitos de subpressão, o volume de concreto utilizado na estrutura também pode ser reduzido, estabilizando os custos aumentados da perfuração.

Para um maciço de fundação com baixa condutividade hidráulica, as cortinas de injeção diminuem simbolicamente a velocidade e vazão do escoamento. Isso reafirma a manutenção de apenas furos primários e secundários como obrigatórios, mantendo os terciários e eventuais para os casos de consumo acima do limite de projeto.

Não é possível comprovar nesta pesquisa a eficiência do GIN comparado com o método convencional de execução de injeção, salientando que as curvas foram traçadas com quantitativos reais, por retroanálise. Esta metodologia apresenta vantagens como unificação da calda, evitando a abertura demasiada das descontinuidades. Porém, no Brasil, é necessário avançar os estudos e aplicação para comprovação da eficiência. Salienta-se que trabalhos como o de Oliveira *et al* (2001) já foram idealizados no intuito da aplicação do GIN, juntamente com monitoramento da injeção em tempo real, com bons resultados.

Os resultados da subpressão foram melhorados com o aumento do fator de forma da drenagem, uma vez que esta carga relaciona-se o gradiente hidráulico do modelo e não com o coeficiente de permeabilidade, como afirmado por Andrade (1988). Como a fundação do vertedouro possui boas características hidráulicas, a cortina de injeção auxilia apenas na velocidade e vazão do escoamento. A drenagem age independente da condição do maciço de fundação e potencializa a otimização do projeto do barramento.

## 6. REFERÊNCIAS

Andrade, R.M. (1988). **Mecânica do escoamento em maciços fraturados**, Engevix, Rio de Janeiro, 324 p.

Azevedo, A.A., Albuquerque Filho, J.L. (1998). Águas subterrâneas, **Geologia de Engenharia**, ABGE, São Paulo, 111-130 p.

Brandão, A.C.M. (2014). **Tratamento de fundações da barragem do Escalão Principal do Baixo Sabor**, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 110 p.

Costa, W. (2012). **Geologia de Barragens**, Oficina de Textos, São Paulo, 352 p.

Costa, W. (1991). Tratamento de impermeabilização de fundações de barragens: será mesmo necessário? **XIX Seminário Nacional de grandes barragens**, CBDB, Aracajú, 315-330 p.

Costa, W. (1981). Condicionantes estruturais no tratamento de fundações de barragens, **XIV Seminário Nacional de grandes barragens**, CBDB, Recife.

Cruz, P.T. (2004). **100 Barragens**

- Brasileiras**, Oficina de Textos, São Paulo, 647 p.
- Eletrobrás (2003). **Critério de projeto civil de Usinas Hidrelétricas**, CBDB, Rio de Janeiro, 278 p.
- Energia Sustentável do Brasil (2017). **A usina**, ESBR, Disponível em <<http://www.energiasustentaveldobrasil.com.br/a-usina>>, Acesso em 25 de abril de 2017.
- Energia Sustentável do Brasil (2009a). *Relatório Técnico nº 1020-JI2-RT-USC/GG-002-00*, ESBR.
- Energia Sustentável do Brasil (2009b). *Relatório Técnico nº 1020-JI2-RT-USC/GG-00001-00*, ESBR.
- Energia Sustentável do Brasil (2009c). *Relatório Técnico nº 1020-JI2-RT-USC/GG-00011-00*, ESBR.
- Fiori, A.P., Wandresen, R. (2014). **Tensões e Deformações em Geologia**, Oficina de Textos, São Paulo, 255 p.
- Gutstein, D. (2005). **Estudo das tensões em fundações de barragens de gravidade de concreto pelo método dos elementos finitos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 278 p.
- Houlsby, A.C. (1990). **Construction and design of cement grouting**, John Wiley & Sons, New York, 466 p.
- Levis, S.D. (2006). *Verificação da eficácia dos sistemas de vedação e drenagem em fundações de barragens de concreto*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 195 p.
- Lombardi, G. (2003). Grouting of rocks masses, **3<sup>rd</sup> International conference on grouting and grout treatment**, New Orleans, 164-197 p.
- Lombardi, G. (1996). Selecting the grouting intensity, **International Water Power & Dam Construction**, Vol. 3, 62-66 p.
- Lombardi, G., Deere, D (1993). Diseño y control del inyectado empleando el principio “GIN”, *Water Power e Dams Construction*, México.
- Lopes, M.B. (2015). **Análise da eficiência do sistema de vedação da fundação em granito de uma barragem de concreto**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 162 p.
- Mesquita, J.B. (2008). **Maçãos rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação geomecânica**, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 287 p.
- Oliveira, D. *et al.* (2001). Injeção de cimento com monitoramento em tempo real, **XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Fortaleza, 257-269 p.
- Oliveira, A. *et al.* (1975). *Ensaio de perda d'água sob pressão: Diretrizes*, ABGE, São Paulo, 16 p.