

ANÁLISE DA PERCOLAÇÃO D'ÁGUA ATRAVÉS DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM CASTANHÃO - CEARÁ

Eloneide Meneses França¹ & Carísia Carvalho Gomes²

RESUMO A Barragem Castanhão, localizada no município de Alto Santo no estado do Ceará, foi construída sobre fundação rochosa, na qual, em alguns trechos, é encontrado grau de fraturamento bastante elevado, o que justifica o estudo detalhado do fluxo pela fundação. Este trabalho tem como objetivo analisar os fluxos através da fundação de uma seção transversal do maciço de concreto da barragem e observar se os valores destes satisfazem os padrões aceitáveis de segurança da obra. Para tanto, foram estudados os dados da investigação geotécnica da subsuperfície, obtendo-se o coeficiente de permeabilidade equivalente a ser aplicado na modelagem. Na modelagem, foram realizadas 4 (quatro) simulações do fluxo através da fundação, utilizando o software SEEP/W – Geo Slope. Como resultado, verificou-se que o comportamento dos fluxos, através da fundação, é satisfatório se comparado com dados referentes a literatura existente sobre fluxo através de fundação de maciços rochosos.

ABSTRACT The Castanhão Dam, located in Alto Santo District in State of Ceará, was built above rocky foundation, in which, in some stretches, presents quite high fracture degree, what justifies the detailed study of the flow through the foundation. This work has as objective analyzes the flows through the foundation of a traversal section of the concrete dam embankment and to observe if its values satisfies the acceptable standard of construction safety. For so much, the data of the subsurface investigation geotechnical were studied, being obtained the equivalent permeability coefficient that was applied in the modeling. In the modeling, 4 (four) simulations were made for the flow through the foundation, using the SEEP/W - Geo Slope software. As a result, it was verified that the flows behavior, through the foundation, is satisfactory if compared with referring data that there is in literature about flow through rocky dam foundations.

Palavras-chave: percolação; barragens; recursos hídricos

1) Engenheira Civil, Mestranda em Recursos Hídricos da UFC, Rua Guarani 1201, Fortaleza, 60520-660 E-mail eloneide@gmail.com

2) Professora Adjunta da Universidade Federal do Ceará -CE- CT, Endereço Rua Silva Jatahy, 400, apto1101 A, 60165-070 E-mail carisia@ufc.br

1. INTRODUÇÃO

Em projetos de barragens, o controle do fluxo pelo maciço, fundação e ombreiras constitui um dos requisitos fundamentais à segurança da obra, Cruz (1996). O estudo do fluxo pela fundação de uma barragem de gravidade, é necessário para a avaliação do comportamento e desempenho em relação às hipóteses formuladas no projeto, a fim de garantir a segurança da obra.

O emprego de modelos matemáticos para simulação do fluxo de uma barragem através da fundação é uma ferramenta importante para esta avaliação, podendo alertar para o desenvolvimento de condições inseguras.

A Barragem Castanhão, localizada na bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe, Município de Alto Santo, Estado do Ceará, forma um lago artificial que cobre uma área de 32,5 mil hectares na cota do vertedouro, possibilitando o armazenamento e a criação de um reservatório com capacidade máxima de 6,7 bilhões de metros cúbicos de água e um volume útil de 4,2 bilhões de m³.

O arranjo geral da barragem é mostrado na Figura 1, e consta essencialmente de uma barragem de terra homogênea nas ombreiras, composta por um maciço de material cascalho-argiloso, um trecho central em CCR (Concreto Compactado a Rolo), um vertedouro, com 12 comportas, uma tomada d'água do tipo galeria, uma casa de válvulas na margem direita, um dique fusível na margem esquerda e 9 diques auxiliares na margem direita.

O açude fica situado na região semi-árida nordestina, com base geológica predominantemente cristalina, onde alguns trechos da fundação apresentam grau de faturamento bastante acentuado, o que justifica o estudo do fluxo pela fundação, AGROSOLOS e HIDROTERRA (1997).

Este trabalho tem como objetivo analisar o fluxo através da fundação de uma seção da Barragem Castanhão, utilizando o *software* SEEP/W – Geo Slope para, com os resultados obtidos, verificar-se se o comportamento da barragem está dentro dos padrões aceitáveis de segurança, com relação aos valores das vazões calculadas através da fundação.



Fonte: ENGETEC (2005)

Figura 1 - Vista aérea da Barragem Castanhão

2. METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada uma revisão teórica, sobre fluxo em fundações de barragens, e os vários métodos utilizados para a análise, como o modelo matemático baseado no método dos elementos finitos. Em seguida, elaborou-se um breve estudo sobre a permeabilidade dos solos e foi feito o levantamento de dados sobre os resultados da investigação geotécnica realizada na Barragem Castanhão.

Por último, descreveu-se o programa SEEP/W e as considerações adotadas para a simulação do fluxo neste trabalho. Foi, então, aplicado este modelo para a obtenção dos valores das vazões através da fundação da barragem para posterior análise das condições de segurança da mesma.

2.1 Fluxo em uma Barragem

No fluxo d'água através de meios porosos, a energia potencial total que faz mover o fluido é constituída pela soma dos potenciais de gravidade, pressão, eletrostático, térmico e de forças de natureza físico-química.

O processo mais usual de análise de percolação em barragens, tanto através do maciço como da fundação, envolve o tradicional traçado gráfico de redes de fluxo. Este método proporciona ao estudante ou profissional grande sensibilidade e compreensão do fenômeno em estudo por exigir,

em seu desenvolvimento inicial, várias tentativas de obtenção do traçado definitivo, visando incorporar todos os aspectos relacionados a diferentes geometrias e materiais envolvidos, especialmente em problemas mais complexos, Souza (2005).

Outras abordagens, porém, podem ser empregadas na obtenção de redes de fluxo através da fundação ou maciço de terra compactada que são os modelos físicos; as analogias com problemas físicos semelhantes, tais como o potencial elétrico ou processo de dissipação de calor por condução e as simulações numéricas, Sousa (2000).

As simulações numéricas, com base no método dos elementos finitos (MEF), serão utilizadas neste trabalho por meio do programa SEEP/W, apresentado no item 2.4.

2.2 Investigação Geotécnica

A investigação geotécnica da barragem Castanhão foi realizada utilizando-se 08 (oito) sondagens à percussão (SP) e apenas 02 (duas) sondagens mistas (SM) (iniciadas a percussão e prosseguidas com rotativa ao ser encontrado material impenetrável à percussão), denominadas de SM-4E e SM-7E. Os locais das sondagens estão indicados na Figura 2.



Figura 2 – Localização das sondagens na fundação do maciço de CCR

Neste trabalho serão utilizados os dados da sondagem SM-4E, cuja seção correspondente no maciço de CCR é mostrada na Figura 3. O resultado da Sondagem Mista SM-4E está mostrado na Figura 4, Engesoft (2000).

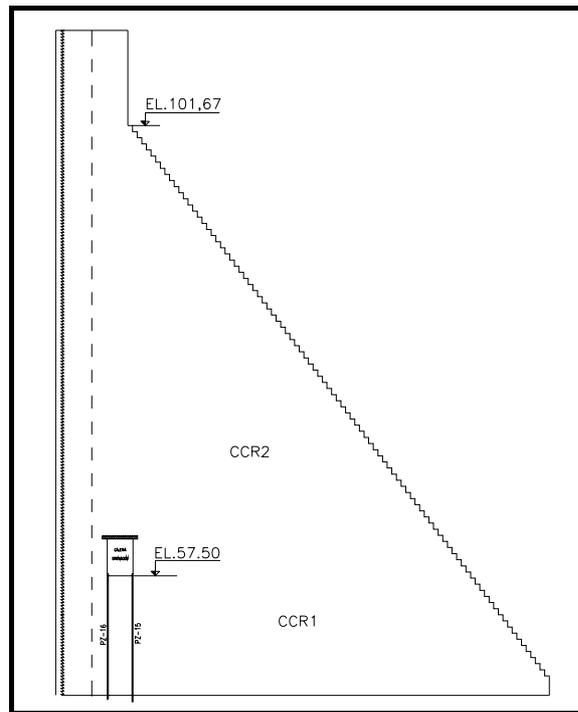


Figura 3 – Seção transversal 16, correspondente a Sondagem Mista SM-4E

Nesta sondagem (SM-4E) nos trechos perfurados em rocha, foram realizados ensaios de perda d'água do tipo "LUGEON". Os ensaios foram realizados em cinco estágios de pressões, no sentido descendente, com obturação simples, nos trechos entre 6,20 a 8,70 m; 8,70 a 11,70 m e 11,70 a 14,80 m, ENGESOFT (2000).

Os resultados são mostrados na Tabela 1, na qual a permeabilidade, de cada trecho, foi calculada como uma média aritmética das várias permeabilidades encontradas no trecho correspondente.

Tabela 1 – Permeabilidade média por trecho

Trecho (m)	Profundidade (m)	$K_{\text{médio}}$ (m/s)
6,20 - 8,70	2,5	6,50 E-07
8,70 - 11,70	3,0	1,01 E-05
11,70 - 14,80	3,1	1,10 E-06

$K_{\text{médio}}$: coeficiente de permeabilidade médio do trecho

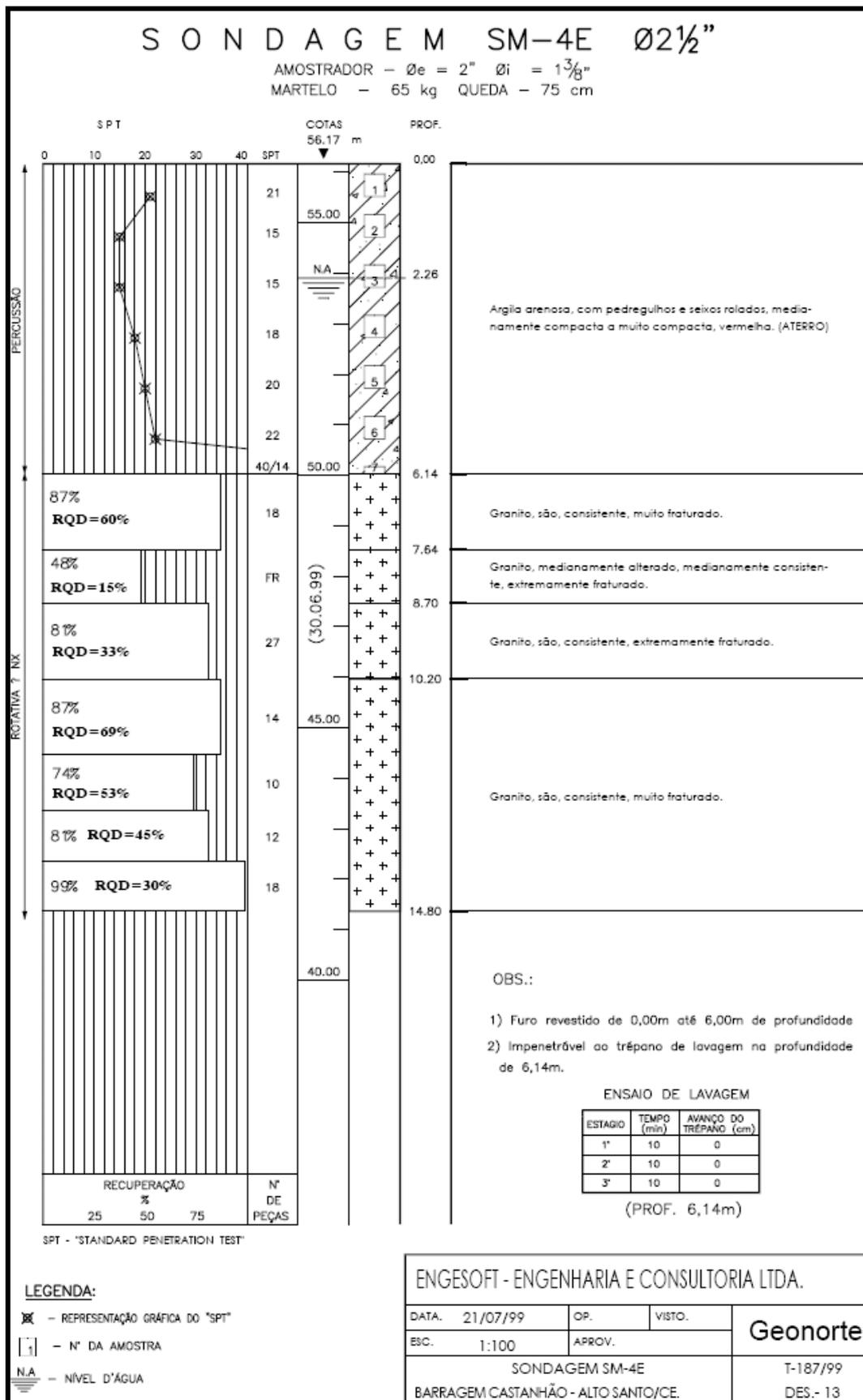


Figura 4 – Perfil de sondagem SM-4E

2.3 Permeabilidade da fundação

A permeabilidade da fundação, ou seja, a facilidade ou dificuldade que o meio oferece à passagem de um fluido por seus poros ou vazios, tem um papel dominante no fluxo (principalmente no trecho inferior da barragem), o fluxo pela fundação pode e na maioria das barragens analisadas é dominante, ou seja, é bastante superior ao fluxo pelo maciço compactado, Cruz (1996).

Em maciços rochosos, o regime de escoamento é governado pela permeabilidade da rocha matriz e pela condutividade hidráulica das fraturas ou descontinuidades, ou seja, a resistência ao fluxo oferecida por meio confinado, Souza (2005). Diversos são os fatores que influenciam a permeabilidade dos maciços fraturados, tais como: permeabilidade da rocha matriz, espaçamento entre descontinuidades, abertura e preenchimento das descontinuidades, tipo de material de preenchimento, rugosidade das paredes da fratura.

Maciços rochosos costumam apresentar geometrias normalmente muito complexas, onde as descontinuidades ocorrem de forma anisotrópica e heterogênea. Desta forma, o uso de modelos matemáticos ou físicos para a análise do fluxo em maciços fraturados se justifica somente se houver disponibilidade suficiente de informações acerca dos parâmetros *in situ*, Louis (1972) *apud* Souza (2005).

A falta de informações sobre parâmetros da rocha gerou a necessidade de uma abordagem mais simplificada sobre a permeabilidade a ser utilizada no presente trabalho, visto que as únicas informações obtidas sobre a rocha foram o RQD (Rock Quality Designation), percentual de recuperação e a permeabilidade da rocha matriz.

De acordo com Quadros (1986) *apud* Souza (2005), a análise da permeabilidade dos maciços rochosos requer, em primeiro lugar, que seja definido se o meio em estudo deverá ser tratado de forma contínua ou descontínua.

Em uma abordagem descontínua, pode-se representar, a permeabilidade média equivalente de um maciço rochosos, como uma função da permeabilidade da rocha; condutividade hidráulica, abertura e espaçamento da fratura, Louis (1972) *apud* Souza (2005).

A abordagem contínua refere-se às situações em que a parcela essencial do escoamento se dá por intermédio de uma extensa rede de fraturamento, e, nesses casos, os blocos rochosos delimitados pelas fraturas podem ser, por analogia, associados aos grãos sólidos impermeáveis de um meio poroso. Assim, a análise de fluxo em tais situações pode considerar o maciço rochoso como um meio “contínuo”, por intermédio do conceito de permeabilidade equivalente, Quadros (1986) *apud* Souza (2005).

Esta foi a abordagem utilizada para a escolha do valor da condutividade hidráulica que é igual a própria condutividade hidráulica da rocha matriz aplicada como dado de entrada nas várias simulações deste trabalho.

2.4 SEEP/W

O SEEP/W é um *software* gráfico, pertencente ao GEO-SLOPE International Ltd. , que opera no Microsoft Windows, e tem como base de cálculo o método de elementos finitos, podendo ser utilizado para modelar a movimentação e distribuição das poro-pressões (pressão devido a presença da água) em meios porosos, tanto em solo como rocha. Com o programa é possível analisar problemas de percolação, tanto simples como de alta complexidade.

SEEP/W é um programa que analisa a percolação de forma geral, para modelos de fluxo saturado e não saturado. É formulado com base na condutividade hidráulica e na água contida numa função de poro-pressão da água. O fluxo em solo não-saturado segue a Lei de Darcy de uma maneira semelhante ao fluxo em solo saturado e é proporcional ao gradiente hidráulico e a condutividade hidráulica (coeficiente de permeabilidade), GEO-SLOPE (2001).

Podem ser utilizados elementos finitos quadriláteros e triangulares e cada um pode ter vários números de nós secundários opcionais para prover interpolação de ordem mais alta de valores de nós dentro do elemento.

As condições de contorno utilizadas na modelagem de percolação são: carga total, fluxo de percolação nodal e fluxo de percolação por área. A condição de contorno da carga no reservatório é uma função do nível de reservatório.

2.5 Aplicação do Modelo

Foram realizadas 4 (quatro) simulações na seção 16 da barragem, correspondentes aos dados de níveis do reservatório e cotas da água à jusante (referentes ao níveis do rio à jusante da barragem) nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril de 2004, conforme mostra a tabela 2.

A figura 5 mostra a distribuição da malha de elementos finitos e as condições de contorno utilizadas neste problema. As condições de contorno representadas pela cor vermelha referem-se à carga total e a azul ao fluxo de percolação nodal. A carga total é adotada igual ao nível do reservatório à montante e o nível d'água à jusante , indicadas na tabela 2. O fluxo de percolação foi considerado zero na face concreto-rocha da barragem e na camada abaixo dos 34 metros de profundidade.

Tabela 2 – Níveis do reservatório e cotas de jusante, França (2006)

Data da leitura	Cota do Reservatório (m)	Cota do Rio à Jusante (m)
23-jan-04	71,33	53,23
17-fev-04	94,30	53,51
29-mar-04	100,37	55,20
20-abr-04	100,74	52,89

A condutividade hidráulica calculada foi a média das condutividades encontradas em cada trecho, correspondente a $3,95 \times 10^{-6}$ m/s. A Figura 6 mostra o gráfico com a distribuição uniforme da condutividade hidráulica com a pressão.

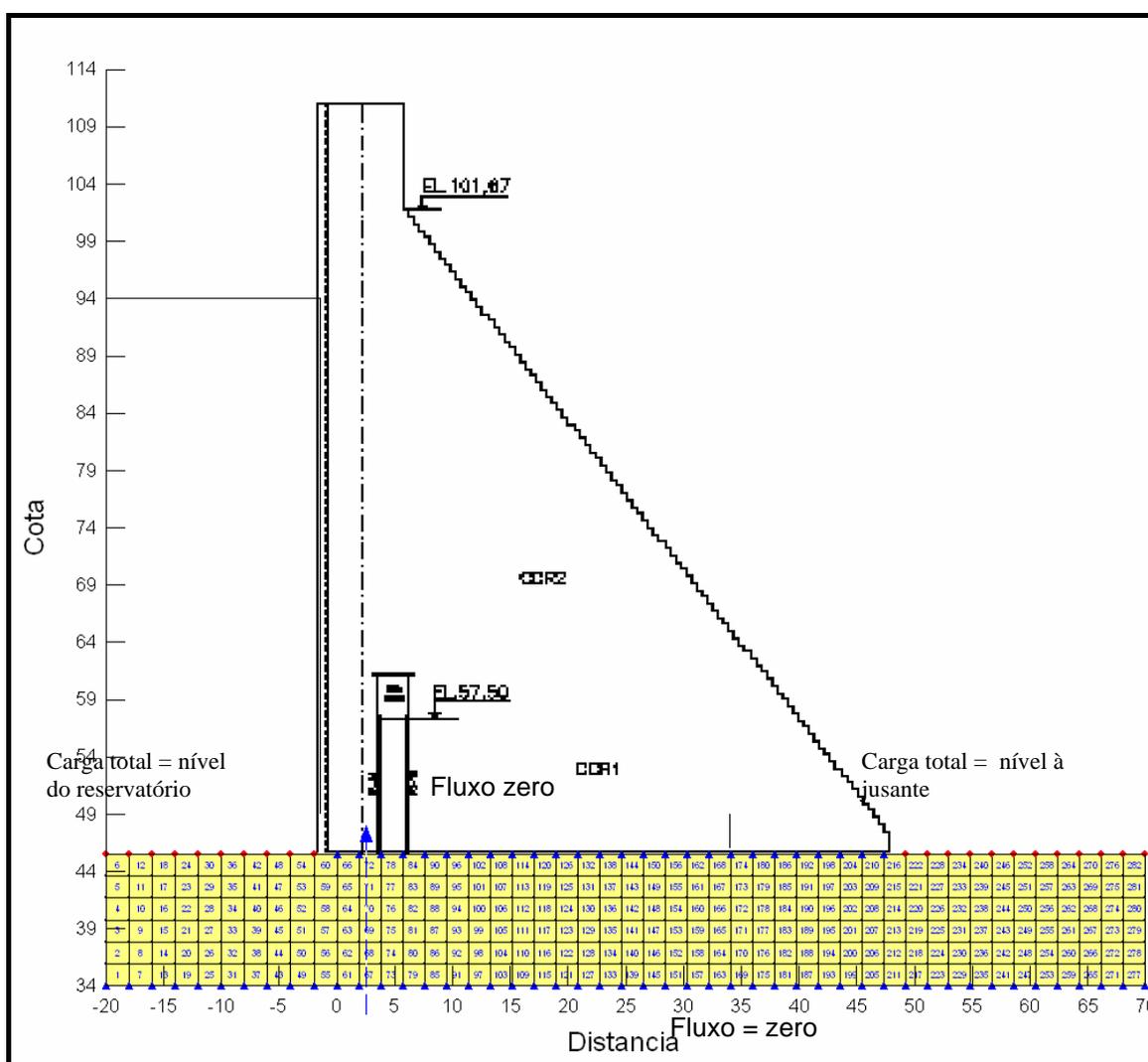


Figura 5 – Definição da malha de elementos finitos e condições de contorno (Seção 16)

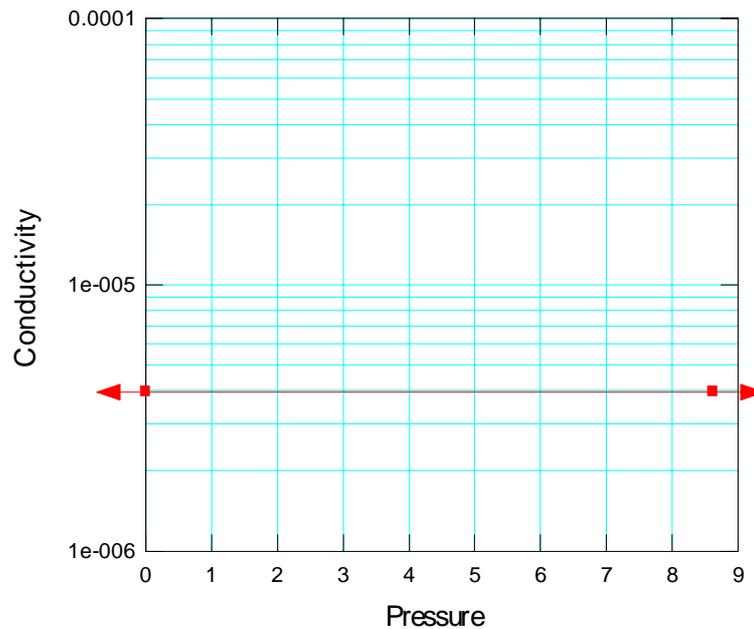


Figura 6 – Gráfico da Condutividade Hidráulica X Pressão

3. RESULTADOS

Os resultados das simulações das redes de fluxo que foram realizadas na Seção 16 do maciço de CCR, correspondente ao local onde se realizou a investigação geotécnica SM-4E, são apresentados nas figuras 7, 8, 10 e 11.

As figuras 7, 8, 10, 11 mostram as redes de fluxo, em que as linhas equipotenciais estão representadas com os respectivos valores indicados e as linhas de fluxo, onde parte constante da vazão total percola através da seção em estudo, estão representadas pelas setas mostradas nas figuras.

A figura 7 mostra a rede de fluxo calculada, pelo programa, para a seção referente ao mês de Janeiro de 2004 e apresentou vazão de aproximadamente, $1,36 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, ou 0,86 l/min (litros por minuto).

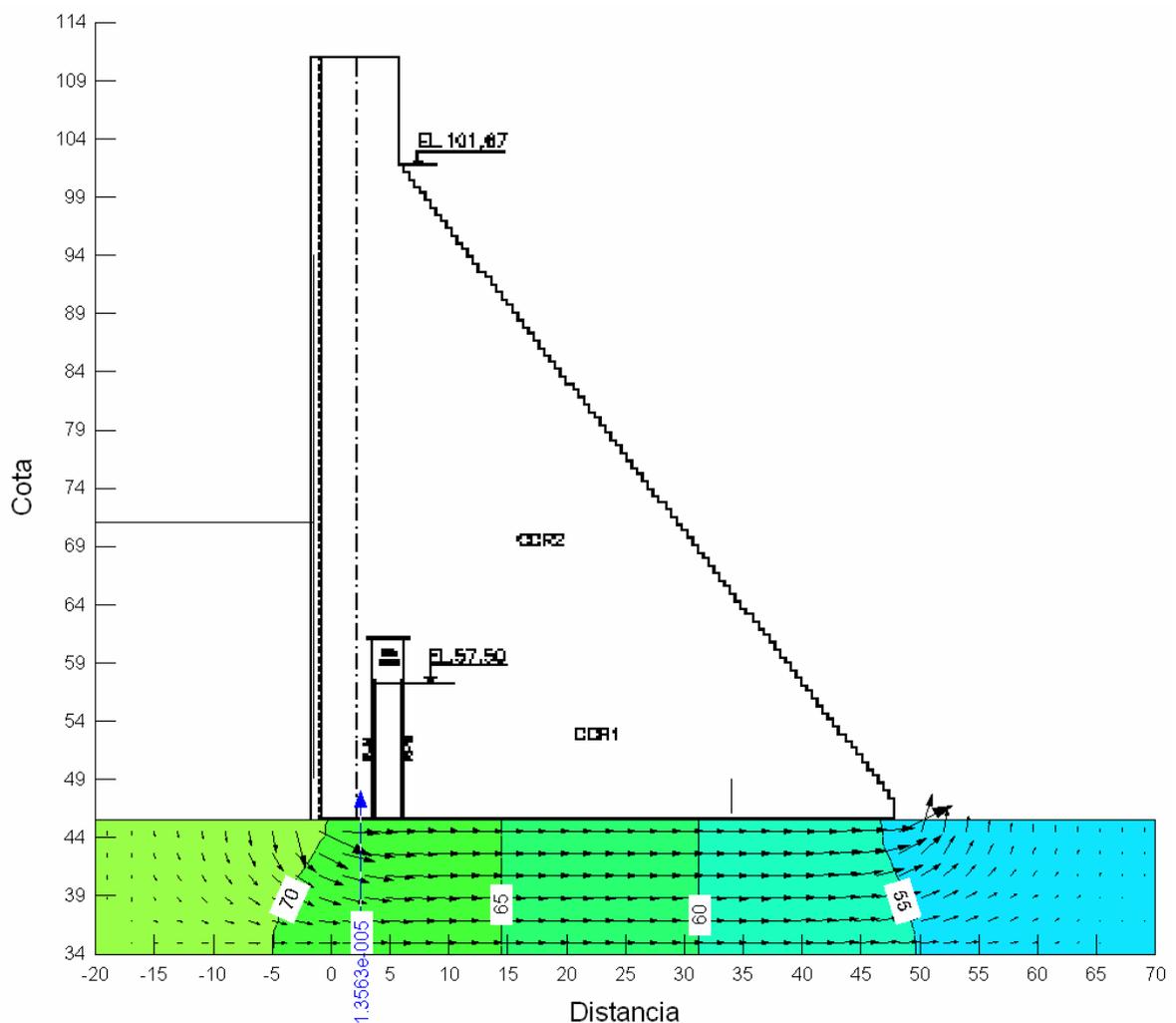


Figura 7 – Simulação da rede de fluxo referente à Janeiro de 2004

O resultado da simulação feita para o mês de Fevereiro de 2004, apresentou linhas equipotenciais de maiores valores que as encontradas na simulação de Janeiro 2004, conforme Figuras 7 e 8. A vazão também mostrou-se maior que a anterior, tendo valor aproximado de $3,03 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, ou 1,82 l/min. A vazão em fevereiro de 2004 aumentou de 2,11 vezes o valor de janeiro.

O aumento da vazão e dos valores das linhas equipotenciais está relacionado com o aumento do nível do reservatório. Neste período, o aumento no nível do reservatório foi considerado significativo, passando de 71,33 m para 94,30 m, o que pode justificar o aumento no fluxo encontrado, ver figura 9.

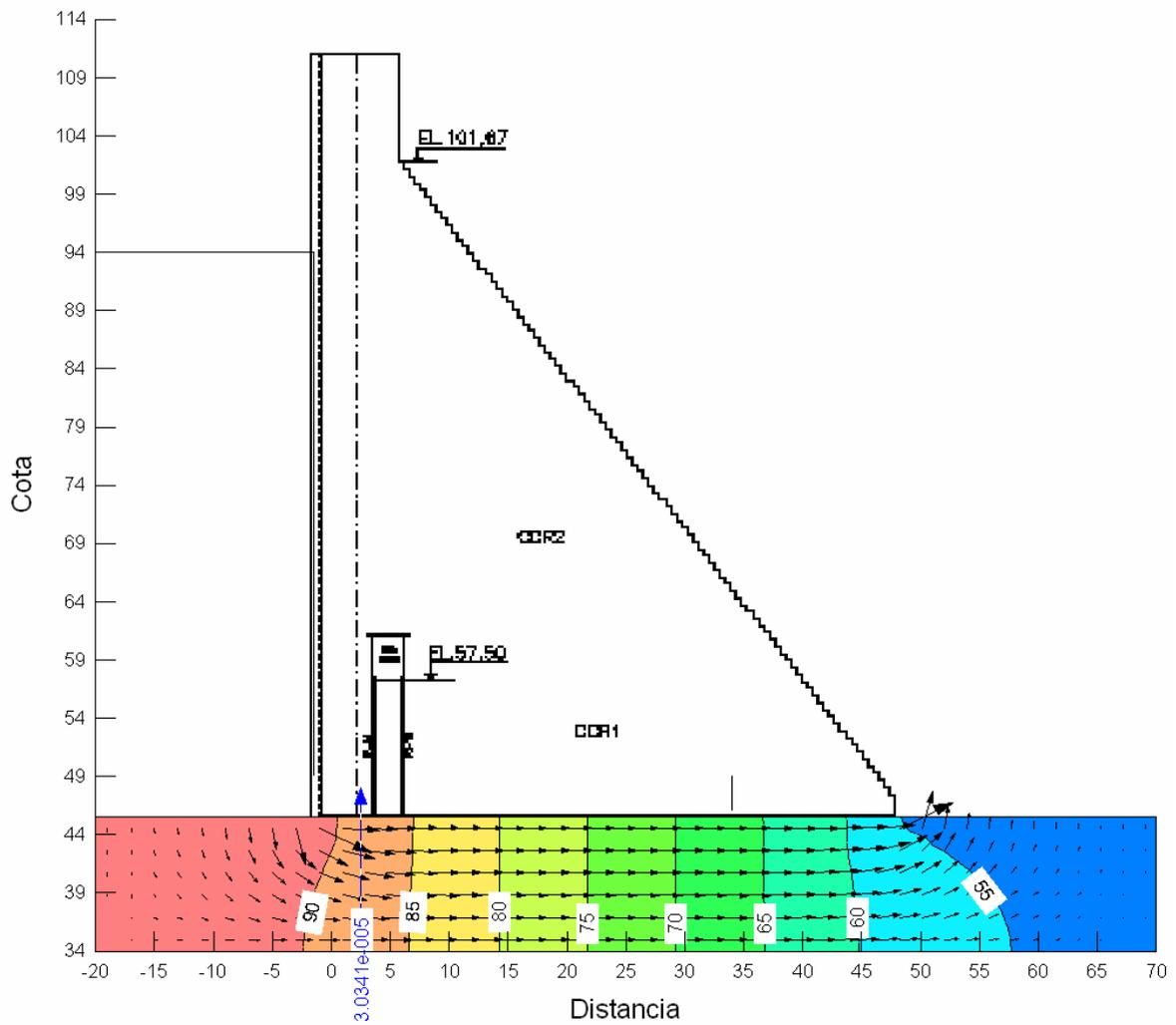


Figura 8 – Simulação da rede de fluxo referente a Fevereiro de 2004

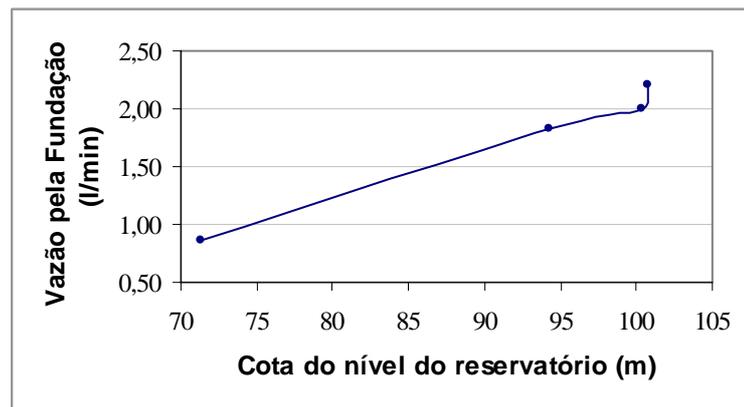


Figura 9 - Gráfico da Cota do Nível do Reservatório X Vazão Pela Fundação

As simulações realizadas nos meses de março e abril de 2004 tiveram resultados semelhantes, conforme se observa nas Figuras 10 e 11. As vazões tiveram respectivamente $3,34 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (2,00 l/min) e $3,67 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (2,20 l/min). Esta semelhança pode está associada ao nível do reservatório nestes meses permanecer praticamente constante, conforme mostram figura 9 e tabela 3.

Com relação às linhas equipotenciais desses meses, observa-se maior semelhança no trecho da fundação à jusante, onde a diferença no nível do reservatório foi pequena (0,37 m), ver tabela 2. No trecho da fundação à jusante percebe-se uma diferença nas linhas equipotenciais, na figura 10 a última linha equipotencial é 60 m e na figura 11 é 55 m, esta diferença neste trecho pode estar relacionada com a condição de contorno utilizada à jusante, em que a cota a jusante foi maior em março do que abril (conforme tabela 2).

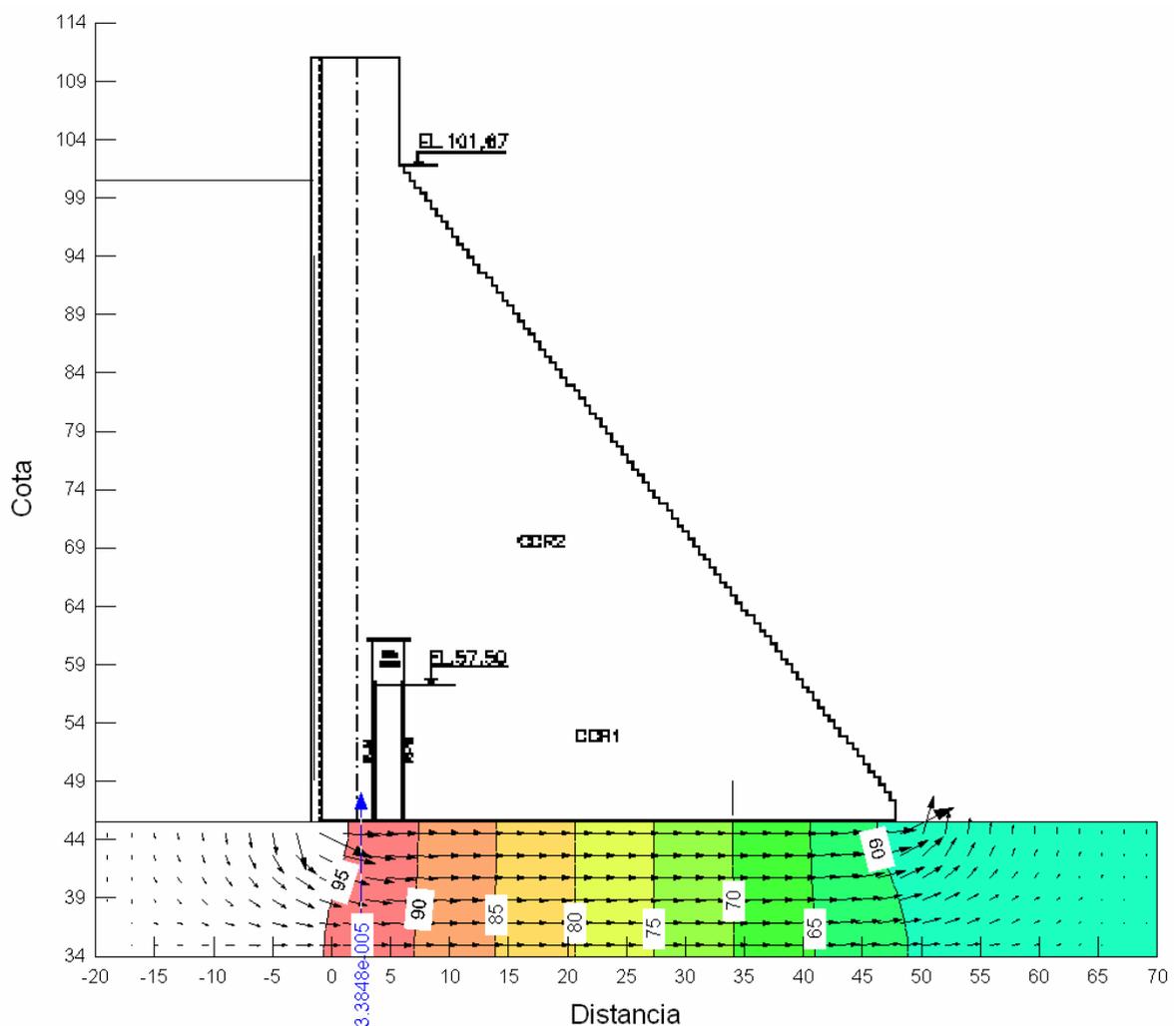


Figura 10 – Simulação da rede de fluxo referente à Março de 2004

Os resultados das simulações de fluxo (Tabela 3) se confrontados com medidas reais de percolação em que o menor valor encontrado foi de 2,00 l/min, Cruz (1996), apresentam-se semelhantes aos registros de vazões usualmente verificados em fundações de barragens.

Tabela 3 – Resultado das simulações de fluxo pela fundação

Data da Leitura	Cota do Reservatório (m)	Vazão pela Fundação (l/min)
23/jan/04	71,33	0,86
17/fev/04	94,3	1,82
29/mar/04	100,37	2,00
20/abr/04	100,74	2,20

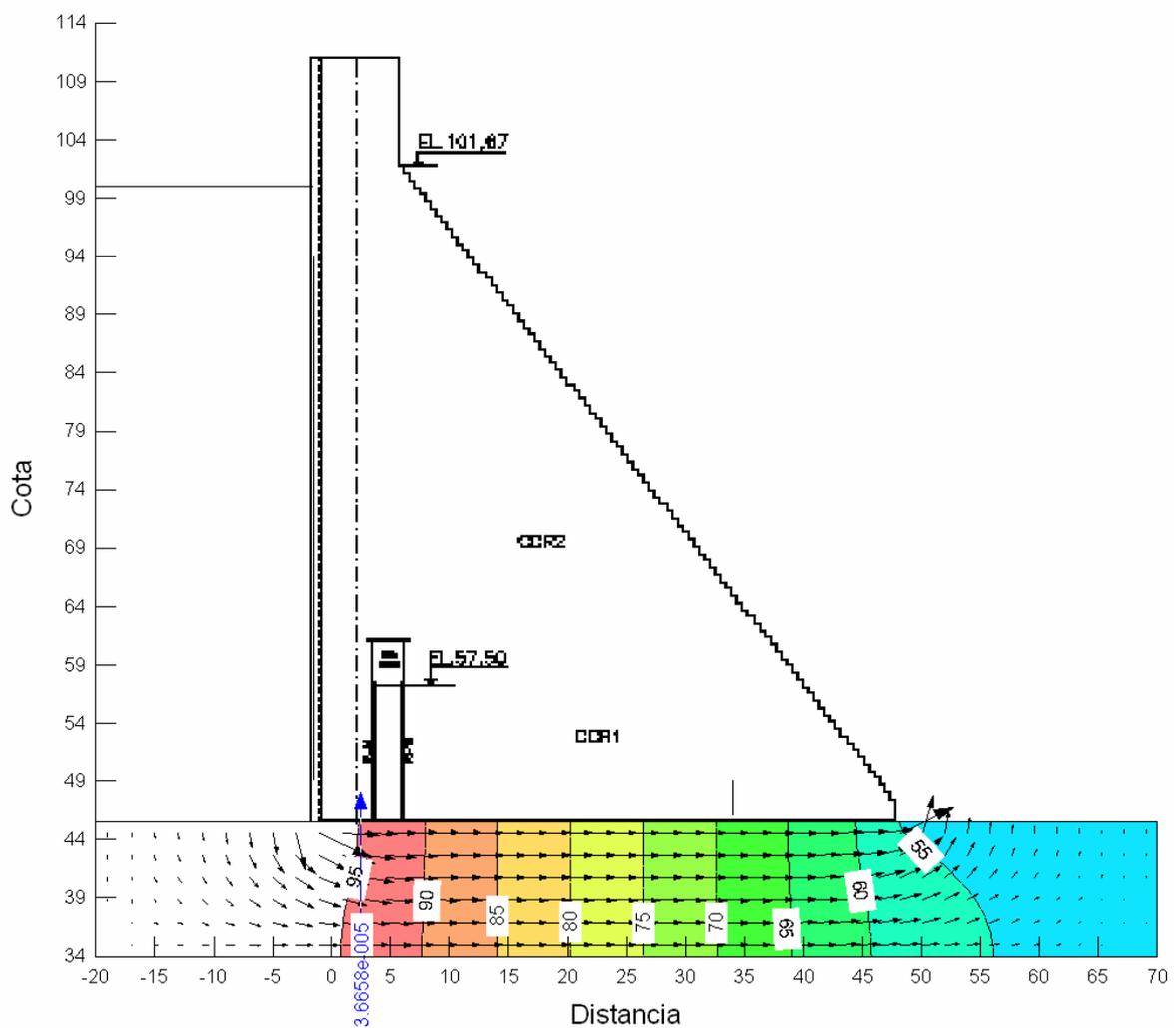


Figura 11 – Simulação da rede de fluxo referente à Abril de 2004

4. CONCLUSÕES

As simulações realizadas na seção em estudo, apresentaram rede de fluxo variando conforme o nível do reservatório à montante, ou seja, a vazão aumenta quando este nível aumenta.

Também foi possível observar aumento nos valores das linhas equipotenciais na fundação da barragem, tanto a montante quanto a jusante da barragem, demonstrando serem maiores quando os níveis do reservatório e do rio a jusante aumentam, o contrario acontece se a as linhas equipotenciais diminuírem.

Os resultados das simulações de fluxo obtidos neste trabalho mostram-se semelhantes a valores encontrados na literatura existente, o que pode demonstrar um bom desempenho da fundação em relação ao fluxo da barragem para os meses e seção em estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao DNOCS, a Engetec e a Engesoft por ceder os dados para a realização desta pesquisa e a Funcap (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por bolsa concedida à primeira autora.

BIBLIOGRAFIA

AGROSOLOS e HIDROTERRA (1997) – *Análise dos serviços de injeção Relatório técnico, maio de 1997*. AGROSOLOS Consultoria de Engenharia L.T.D.A. e HIDROTERRA S. A. Engenharia e Comércio, Alto Santo - CE.

CRUZ, P. T. (1996) “*Permeabilidade e condutividade*”, in *100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto*. Oficina de Textos, São Paulo – SP, pp. 258 – 278.

ENGESOFT (2000) *Investigações de Campo e Estudos Laboratoriais Volume 4 - 2000*. ENGESOFT – Engenharia e Consultoria LTDA, Secretaria dos Recursos Hídricos – Governo do Estado do Ceará, Jaguaribe - CE.

ENGETEC (2005) *Relatório Março – 2005*. ENGETEC – Engenharia Consultoria e Projetos LTDA, DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra a Seca, Alto Santo, CE.

FRANÇA, E. F.(2006) - *Análise da Instrumentação Piezométrica da Barragem Castanhão* – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, pp. 61 -64.

GEO-SLOPE, (2001) *SEEP/W for seep analysis – User’s Guide*. GEO-SLOPE International Ltd. Canadá..

LOUIS, C. (1972) – *Rock Hydraulics*. In *Rocks Mechanics*, ed. L. Müller, Springer-Verlag, Wien, Estados Unidos.

QUADROS, E. F. (1986) – *Determinação da Forma e Orientação do Tensor de Permeabilidade em Maciços Rochosos*. In II Simpósio Sul Americano de Mecânica das Rochas, 1986, Porto Alegre, RS.

SOUSA, P. C. (2000) – *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. Oficina de Textos, São Paulo - SP, 96 p.

SOUZA, V. A. D. (2005) *Simulação do regime de Fluxo no Maciço de Terra Compactada da Barragem Jaburu I* – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, pp. 33 – 34.