

Modelagem Numérica do Fluxo na Barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves – Açu/RN

Lisyanne de Vasconcelos Freire

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, Brasil, lisyannefreire@gmail.com

Andriele Nascimento de Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, Brasil, andriele.eng@gmail.com

Olavo Francisco dos Santos Júnior

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, Brasil, olavo@ct.ufrn.br

Osvaldo de Freitas Neto

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, Brasil, osvaldocivil@ct.ufrn.br

RESUMO: No presente trabalho, buscou-se estudar o comportamento da Barragem Eng. Armando Ribeiro Gonçalves (Barragem do Açu) no que diz respeito ao desenvolvimento de poropressões e o desempenho dos elementos de vedação e drenagem. A Barragem está localizada no estado do Rio Grande do Norte, na Bacia do Piranhas-Açu e no final de sua construção, o talude de montante sofreu uma ruptura. Depois do acidente, a barragem foi reconstruída e instrumentada. A instrumentação instalada compreende, dentre outros equipamentos, piezômetros de tubo aberto e piezômetros pneumáticos. Foram feitas modelagens numéricas para o estudo da variação das poropressões no maciço da barragem, considerando a influência das diversas estruturas drenantes e impermeabilizantes para a etapa operação do reservatório, considerando o fluxo estacionário. Foi feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos, os resultados de outras pesquisas, que usaram softwares diferentes, e os dados de instrumentação.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Numérica, Instrumentação, Barragem do Açu.

1 INTRODUÇÃO

A Barragem Eng. Armando Ribeiro Gonçalves, é uma obra geotécnica de expressiva notoriedade e importância no Rio Grande do Norte e no Nordeste pelo seu porte e complexidade. Está localizada na bacia do Piranhas-Açu, a seis quilômetros a montante da cidade de Açu, e dista 250km da cidade de Natal. O reservatório promove o abastecimento de diversas cidades e o suprimento de água ao Projeto de Irrigação do Baixo Açu, com o aproveitamento hidroagrícola das terras aluviais, abrangendo uma área de cerca de 25.000 hectares.

A região da obra é composta por um complexo granítico migmatítico, cinza, com características xistosas e pontos bastante alterados. Na região das ombreiras, possui uma cobertura de solo residual com afloramentos de rochas graníticas. No leito do rio, é coberto por uma camada de cerca de 26 metros de areia grossa, com bolsões de pedregulho fino. O maciço apresenta-se estruturalmente pouco e medianamente fraturado. Essas fraturas são preenchidas por quartzo-feldspatos.

A construção teve início em maio de 1979. No projeto original, a barragem era de terra, com o maciço zoneado, núcleo central impermeável. Com extensão de cerca de 2440

metros, coroamento na cota de 62 metros e altura máxima de 40 metros acima do leito do rio. Para impedir o fluxo sob a barragem foi projetado um diafragma plástico impermeabilizante apoiado no embasamento cristalino que atingia profundidades de até 27 metros, como ilustra a Figura 1.

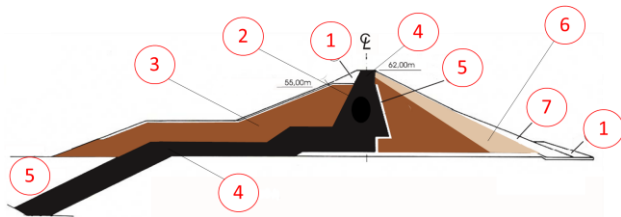


Figura 1. Seção-Tipo Original da Barragem (Rocha, 2003)

- 1 - Enrocamento / Dreno de Pé
- 2 - Transições
- 3 - Pedregulho com Areia Argilosa
- 4 - Argilas e Siltes Arenosos
- 5 - Areia
- 6 - Pedregulho Areno-Siltoso
- 7 - Seixo Rolado com Pedregulho

Em Dezembro de 1981, quando o aterro estava com cerca de trinta e cinco metros de altura, há cinco metros do nível final de projeto, ocorreu a ruptura do talude de montante da barragem. A superfície de ruptura se desenvolveu de forma ininterrupta, com extensão de aproximadamente seiscentos metros. O relatório de campo apresentou a forma composta da superfície de ruptura: curva dentro do maciço, evoluindo para a configuração horizontal e plana no trecho entre o núcleo e o septo, Figura 2.

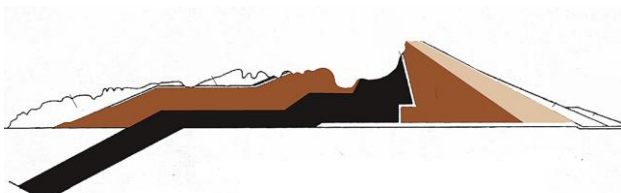


Figura 2. Seção transversal da barragem após ruptura (Rocha, 2003)

O acidente deslocou uma massa de solos e enrocamento de mais de 800.000m³. Conforme consta no trabalho de Rocha (2013), o relatório sobre a ruptura publicado pelo DNOCS aponta como agente causador as sobrepressões neutras

desenvolvidas no material argiloso que constitui o núcleo e a parte inferior da berma de montante.

Na reconstrução da barragem, o material escorregado foi compactado, formando um tapete de 600m sobre a trincheira de vedação e o maciço da barragem passou a ser homogêneo. O material utilizado no maciço foi um pedregulho areno-argiloso com Cascalho Grosso.

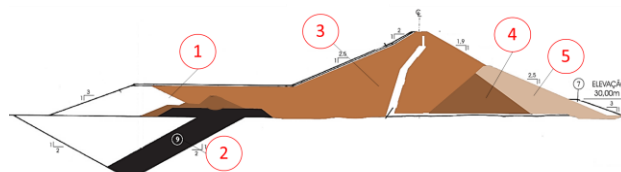


Figura 3. Seção-Tipo da Barragem Central, Após a Ruptura

- 1 - Ensecadeira construída com solo proveniente da remoção de materiais
- 2 - Septo, formado por material argiloso
- 3 - Pedregulho areno argiloso com cascalho grosseiro
- 4 - Pedregulho areno argiloso remanescente da construção original
- 5 - Pedregulho areno siltoso e areia siltosa com pedregulho

2 ANÁLISE NUMÉRICA DE FLUXO

A análise considerou o estado de fluxo estacionário e para tanto utilizou-se o programa SEEP/W. Como consta no trabalho de Rocha (2003), em Agosto de 1984, 16 meses após o término da obra, começaram a surgir poropressões diferentes de zero. Este fato era indicativo de estabelecimento das condições de fluxo permanente. A fase de operação da barragem deu-se em Fevereiro de 1985 e as últimas leituras foram registradas no final do ano de 1999.

Para a análise, foi escolhida uma seção da barragem central (Estaca 53+00), na qual se encontram instalados três piezômetros pneumáticos, no corpo da barragem. No ano de 1997, período utilizado como referência, os valores de poropressão registrados praticamente não mudaram, como se pode ver na Figura 4, e o nível d'água manteve-se constante, na cota 58 metros.

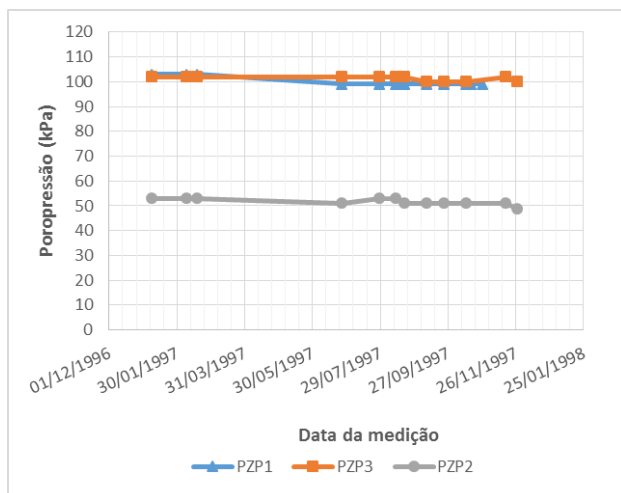


Figura 4. Gráfico das leituras dos piezômetros da seção 53+00, no ano de 1997

2.1 Seção Transversal Usada nas Análises

A Figura 5 mostra a seção modelada, com os cinco materiais utilizados. A Tabela 1 traz os dados de entrada utilizados para a análise no programa SEEP/W.

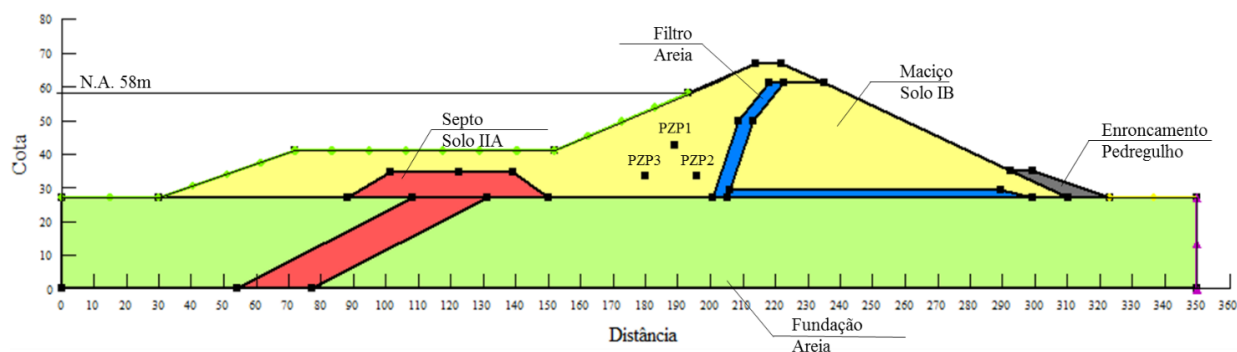


Figura 5. Seção 53+00 utilizada para análise de fluxo

Tabela 1. Descrição dos parâmetros de entrada

Material	Modelo	K (m/s)	K (m/dia)	Θ_{sat}	θ_r	k_v/k_h	Tipo
Maciço (Solo IB)	SAT/UNS	10^{-8}	$8,64 \times 10^{-4}$	0,4	0,08	0,1	Pedregulho Areno Argiloso
Fundação (Areia)	SO	5×10^{-5}	4,32	-	-	0,1	Areia
Septo (Solo IIA)	SAT/UNS	10^{-9}	$8,64 \times 10^{-5}$	0,41	0,082	0,1	Argila Siltosa
Filtro (Areia)	SAT/UNS	5×10^{-5}	4,32	0,45	0,045	1	Areia
Enrocamento	SAT/UNS	10^{-3}	$8,64 \times 10^1$	0,47	0,047	1	Pedregulho

Onde: SAT/UNS – Saturated/Unsaturated
SO – Saturated Only

2.2 Condições de Contorno e Malha de Elementos Finitos

As condições de contorno utilizadas foram uma superfície equipotencial à montante com carga total igual a 58m, devido à coluna de água do reservatório, e à jusante, uma outra equipotencial com carga total igual a 27m, correspondendo, portanto, apenas à cota altimétrica.

A malha dos elementos finitos é composta por elementos quadrados e triangulares, apresentando 15067 nós e 14798 elementos, e foi elaborada conforme manual do SEEP/W. Cada elemento apresenta comprimento de 1m. Um detalhe da malha utilizada encontra-se na Figura 6.

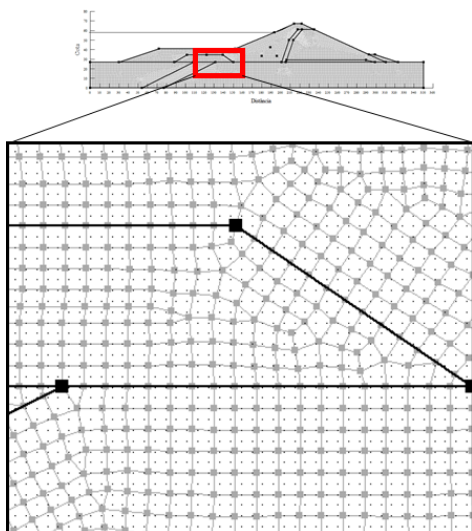


Figura 6. Detalhe da Malha de Elementos Finitos

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pelos resultados obtidos a partir da modelagem, pode-se avaliar o comportamento da barragem e de suas estruturas. A Figura 7 mostra as equipotenciais. Na Figura 8, vê-se com mais detalhe a perda de carga no septo. Essa perda de carga expressiva comprova o funcionamento dessa estrutura e diminui a possibilidade de ocorrência de fenômenos como o piping e a condição movediça no pé do talude de jusante.

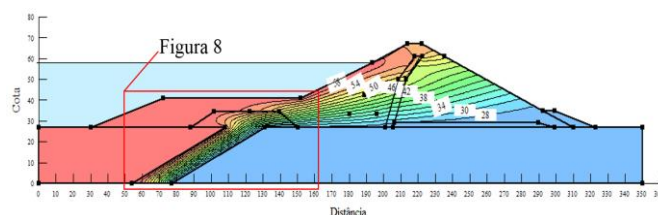


Figura 7. Equipotenciais obtidas pela simulação numérica

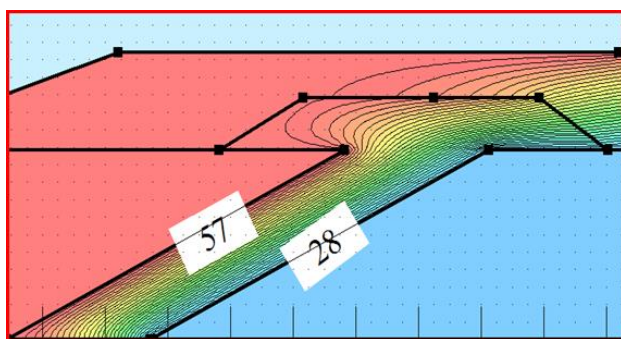


Figura 8. Detalhe da Perda de Carga no Septo

Rocha (2003) relata uma perda de carga

média de 33,80 metros de montante para jusante no período de 18/02/85 a 21/08/87, quando o nível d'água do reservatório encontrava-se na cota média de 59m. A análise comportamental do septo foi feita através da comparação do nível d'água no reservatório com os níveis piezométricos dos poços medidores de nível d'água instalados à jusante da obra.

De acordo com a análise numérica, percebe-se no septo uma perda de carga de vinte e nove metros para o nível d'água na cota de cinquenta e oito metros. Essa análise é coerente com os dados da instrumentação, disponíveis no trabalho de Rocha (2003). Dessa forma, pode-se comprovar o funcionamento eficiente dessa estrutura.

A Figura 9 representa a carga total em função da distância, ao longo do contato entre o maciço e a fundação. Pode-se ver de forma mais clara a perda de carga significativa entre as abscissas 110 e 130, onde encontra-se o septo.

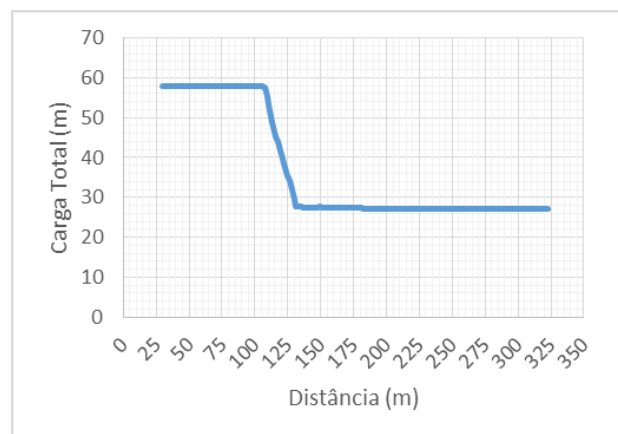


Figura 9. Gráfico da Perda de Carga no Contato entre o Maciço e a Fundação, em Função da Distância

Foi analisado também a distribuição das poropressões. A Figura 10 mostra a distribuição obtida pela modelagem.

Na Tabela 2 encontram-se os valores de poropressões medidos, os resultantes da simulação numérica feita no SEEP/W e os obtidos por Moreno (2011), que avaliou a mesma seção com o programa CODE_BRIGHT. Se comparados aos dados da instrumentação, os resultados da simulação numérica apresentaram certa divergência. No entanto, isto também ocorre no trabalho de Moreno (2011) que analisou a mesma seção

com o programa CODE_BRIGHT e no trabalho de Oliveira (2014), que utilizou o GEO5.

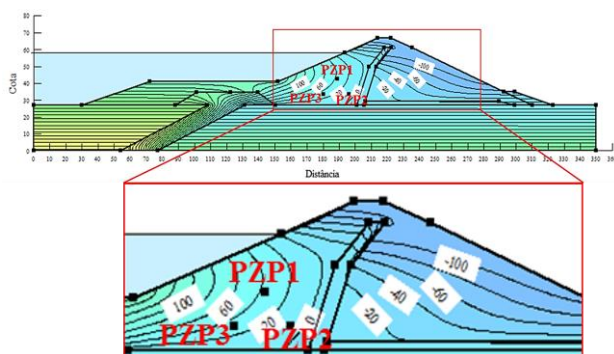


Figura 10. Distribuição das Poropressões com Detalhe do Maciço da Barragem. Valores em kPa.

Tabela 2. Comparação entre Valores Medidos pela Instrumentação e os Obtidos na Modelagem pelo SEEP/W e pelo CODE_BRIGHT (Moreno, 2011)

Piezômetro	Poropressão (kPa)		
	Medida	Calculada (SEEP/W)	Calculada (CODE_BRIGHT)
PZP1	103	35,22	54
PZP2	53	5,28	-18
PZP3	102	30,39	50

Oliveira (2014), alterou os valores dos coeficientes de permeabilidade em até cem vezes, com o intuito de obter, com a simulação, valores próximos aos dados de instrumentação para os piezômetros PZP2 e PZP3. Mas, os valores de permeabilidade adotados resultaram em poropressão no piezômetro PZP1 correspondentes à metade do valor esperado.

A vazão, outro parâmetro de elevada importância na análise de fluxo, foi avaliada nas seções à montante e à jusante do filtro vertical. Foram posicionadas duas seções no maciço da barragem para obtenção dos valores de vazão apenas no maciço da barragem, como mostrado na Figura 11. Pelos dados de vazão fornecidos pelo software, calcula-se que houve uma redução de 58% da vazão no maciço devido ao desvio para a fundação por meio do filtro.

A Figura 12 mostra os vetores de fluxo desviados do corpo da barragem pelo filtro. Os vetores de fluxo indicam onde está ocorrendo o fluxo, além de evidenciar, pelas setas maiores, onde o fluxo ocorre com maior velocidade. Pela análise da Figura 12, percebe-se que o fluxo

ocorre com maior intensidade no filtro vertical e na fundação do que no corpo da barragem.

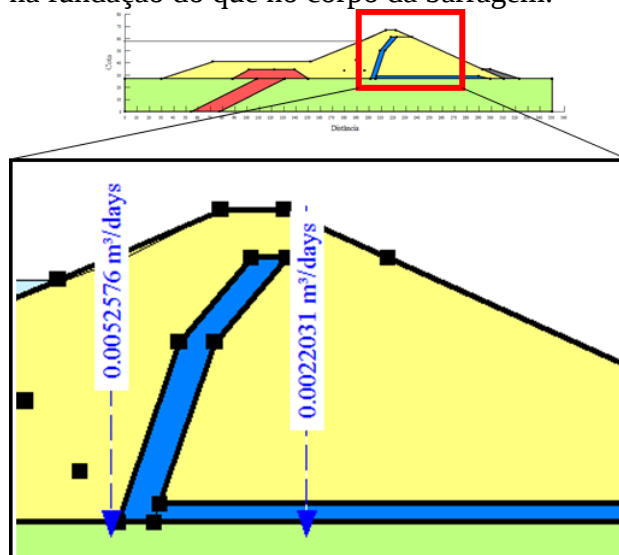


Figura 11. Seções de Fluxo à montante e à jusante do filtro vertical

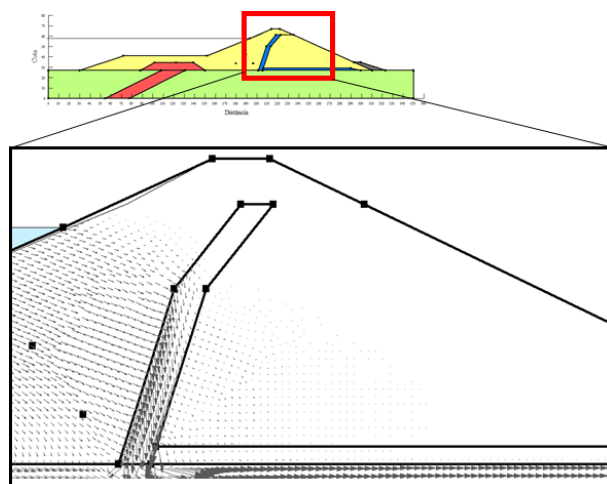


Figura 12. Vetores de Fluxo da Região do Filtro

4 CONCLUSÕES

Com a realização desse trabalho foi possível avaliar o comportamento da barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves no tocante aos elementos de drenagem – filtro horizontal e vertical – e de vedação – septo – da fundação permeável. Pela análise, pode-se perceber o bom funcionamento dessas estruturas.

Os valores de poropressões obtidos na análise de fluxo diferiram dos dados da instrumentação. A mesma dificuldade de

elaboração de um modelo para a barragem em questão foi encontrada nos trabalhos de Moreno (2011) e Oliveira (2014).

Percebe-se que os resultados das modelagens numéricas usando três softwares distintos são qualitativamente semelhantes entre si, mas divergem consideravelmente das leituras dos piezômetros.

Esse fato pode indicar uma possível falha na piezometria ou a ocorrência de uma situação não considerada nos modelos, como por exemplo, efeitos tridimensionais. As causas dessa diferença nos dados será objeto de estudo dos autores em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- CODE_BRIGHT. Espanha: Department of Geotechnical Engineering and Geo-Sciences of Polytechnic University of Catalonia. Software.
- GEO5 version 19. [s.l.]: Fine Civil Engineering Software. Conjunto de Programas.
- GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD (Canadá). Seepage Modeling with SEEP/W. Calgary: [s.n.], 2012.
- Moreno, M. G. M. (2011) *Modelagem Numérica com Acoplamento Hidro-Mecânico da Reconstrução, Enchimento e Comportamento da Barragem de Açú/RN Após o Acidente no Final de Construção*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 236 p.
- Oliveira, D. A. (2014) *Análise do Fluxo d'água na Barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves – Açú/RN*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 110 p.
- Rocha, V. O. (2003) *Barragem Armando Ribeiro Gonçalves: Histórico e Avaliação do Comportamento Atual*, Dissertação de Mestrado, Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 237 p.