5 Modelo em Elementos Finitos

A maneira clássica de avaliar problemas de fluxo é através do traçado de redes de fluxo. Contudo, segundo Victor de Mello, citado por Cruz (1996), " Traçar redes de fluxo em barragens é um bom exercício para divertir os filhos, mas essas redes pouco tem a ver com o fluxo que ocorre em barragens". Isso porque o contraste de permeabilidade entre materiais altera significativamente a rede. Além do mais, os ensaios realizados na fase de estudo geralmente não conseguem avaliar de maneira adequada a permeabilidade dos materiais. O ideal é fazer retroanálises com os valores fornecidos pela instrumentação. Atualmente, com a disponibilidade de meios computacionais, uma grande variedade de cenários pode ser analisada e fornecer subsídios para o dimensionamento do problema. Um dos programas computacionais mais difundidos no meio geotécnico para a análise de fluxo é o Seep.

5.1. Modelagem das Seções Instrumentadas

Com o objetivo de avaliar a vazão pelo corpo e fundação da barragem de terra da margem esquerda, modelou-se as 8 seções da barragem com mais de um instrumento utilizando-se o programa SEEP/W, versão GeoStudio 2004.

As seções foram modeladas conforme os desenhos dos anexos 7, 8, 9 e 10. Procurou-se utilizar malha de elementos quadrados sempre que possível. Nos contornos foi utilizada malha de elementos triangulares.

Foram considerados 7 materiais diferentes nas seções. Os materiais e as cores utilizadas em cada um dos materiais no modelo estão descritos abaixo:

- Argila vermelha compactada do corpo da barragem (marrom);
- Argila vermelha de fundação (roxo);
- Solo saprolítico (laranja);
- Basalto (azul);
- Areia dos filtros (cinza);
- Bermas de equilíbrio (verde);
- Rip rap (rosa).

O grid foi dividido em quadrados de 1 m, sendo os elementos quadrados da mesma dimensão. A Figura 24 mostra o modelo da seção 138 + 50.



Figura 24 – Modelagem da Seção da Estaca 138 + 50

A camada impermeável foi considerada na cota de referência do desenho que baseou a modelagem da seção. Nos extremos das seções foram utilizados elementos infinitos.

Como condições de contorno para o fluxo utilizou-se a média do nível do reservatório de janeiro de 1986 a dezembro de 2007, igual a 219, 65 m, e a média do nível d'água à jusante no mesmo período, fornecida pelos medidores de nível de água.

Cada um dos sete materiais tem propriedades distintas com relação à permeabilidade. Para todos eles foi considerado que a permeabilidade não varia com a sucção. As permeabilidades da argila vermelha, solo saprolítico, argila compactada e bermas foram ajustadas em função da comparação entre os valores de carga hidráulica total nos pontos onde há instrumentação, através de um processo iterativo, até que as diferenças entre os valores do modelo e de campo fossem mínimas. Foi considerado como valor de campo para cada piezômetro a média das leituras de janeiro1986 a dezembro de 2006.

Partiu-se dos valores iniciais de permeabilidade mostrados na Tabela 5, para cada material, por terem sido utilizados pela projetista em cálculos preliminares:

Material	Permeabilidade (m/s)		
Argila Vermelha	4,4.10 ⁻⁷		
Solo saprolítico	2,5.10 ⁻⁵		
Argila Compactada	3,4.10 ⁻⁹		
Bermas	8.10 ⁻⁸		
Areia dos Filtros	3.10 ⁻³		
Basalto	1.10 ⁻¹²		
Rip-rap	1.10 ⁻¹		

Tabela 5 – Permeabilidades Iniciais Utilizadas no Modelo

Com esses valores de permeabilidade obtiveram-se valores de carga hidráulica total no modelo superiores 8 m, em média, aos valores de campo. O processo iterativo utilizado para definir a melhor permeabilidade consistia em alterar manualmente as características de permeabilidade de um material, rodar novamente o programa e comparar os valores do modelo com os de campo. Esse método foi aplicado a cada seção modelada. Em todas partiu-se dos mesmos valores iniciais.

Os valores de permeabilidade que se ajustaram melhor à condição de campo foram os da Tabela 6:

Material	Permeabilidade (m/s)	
Argila Vermelha	6.10 ⁻⁶	
Solo saprolítico	5.10 ⁻⁸	
Argila Compactada	5.10 ⁻¹⁰	
Bermas	4.10 ⁻⁷	
Areia dos Filtros	3.10 ⁻³	
Basalto	1.10 ⁻¹²	
Rip-rap	1.10 ⁻¹	

Tabela 6 – Permeabilidades Ajustadas pelo Modelo

As figuras a seguir mostram as 8 seções modeladas e a superfície freática obtida.



Figura 25 – Seção na estaca 123 + 50





Figura 28 – Seção na estaca 127 + 30



Figura 29 – Seção na estaca 129 + 50



Figura 30 - Seção na estaca 132 + 00



Figura 31 – Seção na estaca 135 + 50



Figura 32 – Seção na estaca 138 + 50

No anexo 15 é mostrada a tabela com os valores das cargas hidráulicas no modelo, no campo, os quadrados das diferenças entre modelo e campo para cada conjunto de valores de permeabilidade testado na estaca 123 + 50. A

Tabela 7 mostra os valores calculados no modelo e de campo para todos os piezômetros da barragem de terra da margem esquerda.

Piezômetro	Carga Total (m)			
Flezonieuo	Campo	Modelo	Diferença	
PG-L-1	219,22	216,97	-2,25	
PG-L-2	219,22	216,96	-2,26	
PG-L-3	ххх	ххх	ххх	
PG-L-4	ххх	ххх	ххх	
PG-L-5	212,17	208,73	-3,44	
PG-L-6	204,63	204,91	0,28	
PG-L-7	200,95	201,48	0,53	
PG-L-8	201	198,76	-2,24	
PG-L-9	195,45	196,35	0,90	
PS-L-1	202,66	202,09	-0,57	
PS-L-2	205,09	206,10	1,01	
PS-L-3	193,84	194,53	0,69	
PS-L-4	193,72	194,52	0,80	
PS-L-5	193,74	194,49	0,75	
PS-L-6	191,02	190,36	-0,66	
PS-L-7	190,19	190,33	0,14	
PS-L-8	197,2	199,56	2,36	
PS-L-9	195,86	197,45	1,59	
PS-L-10	200	201,36	1,36	
PS-L-11	199,79	201,36	1,57	

Piezômetro	Carga Total (m)		
T lezoffictio	Campo	Modelo	Diferença
PS-L-12	199,97	201,35	1,38
PS-L-13	199,42	199,85	0,43
PS-L-14	198,96	199,84	0,88
PS-L-15	211,48	212,68	1,20
PS-L-16	207,68	208,66	0,98
PS-L-17	207,85	208,66	0,81
PS-L-18	214,33	215,80	1,47
PS-L-19	ххх	ххх	ххх
PS-L-20	212,56	213,69	1,13
PS-L-21	213,31	216,19	2,88
PS-L-22	214,1	214,74	0,64
PS-L-23	215,24	215,45	0,21
PS-L-24	214,18	213,95	-0,23
PS-L-25	218,07	218,48	0,41
PS-L-26	217,91	218,39	0,48

Tabela 7 Diferenças entre Cargas Totais de Campo e do Modelo

Os valores de permeabilidade encontrados são considerados coerentes. A permeabilidade da argila vermelha e do solo saprolítico estão dentro da faixa de valores do anexo 1. Os ensaios de permeabilidade realizados em corpos de prova da argila vermelha compactada na umidade ótima, em câmara triaxial, variaram de 10⁻⁹ a 10⁻¹¹ m/s. As bermas possuem uma permeabilidade maior que o corpo da barragem por terem sido compactadas sem controle rigoroso e com uma grande variedade de materiais. Sua função era apenas contribuir com a estabilidade. A primeira camada da berma de montante, no primeiro trecho da barragem, consiste em um tapete impermeável. Possui espessura de 1 m, é do mesmo material e foi compactada com o mesmo rigor que o corpo do aterro.

Nos modelos utilizados para obter os valores da Tabela 7 não foi considerada camada de rocha alterada entre o solo saprolítico e o basalto por não se dispor de dados de espessura desse material nas seções modeladas. Sabe-se pelas sondagens realizadas que a espessura de rocha alterada varia desde poucos centímetros, 4 cm, até cerca de 2 m. Em algumas sondagens não foi identificada a camada de rocha alterada. Para avaliar o efeito da

consideração de uma camada de rocha alterada, modelou-se uma seção com camada de rocha alterada com 1 m de espessura entre o solo saprolítico e o basalto nas seções das estacas 135 + 50, 138 + 50 e 127 + 30. Considerou-se o valor de 10^{-3} m/s para a permeabilidade da rocha alterada. O resultado é mostrado na Tabela 8.

Estaca	Piezômetro	Cota Piezométrica (m)			
Lotada		Campo	Sem Camada	Com Camada	
135 + 50	PSL23	215,24	215, 45	215,98	
	PSL24	214,18	213,95	214,85	
138 + 50	PSL25	210,07	210,48	210,49	
	PSL26	209,91	210,39	210,40	
127 + 30	PSL15	211,48	212,68	213,3	
	PSL16	207,68	208,66	209,00	
	PSL17	207,85	208,66	209,21	

Tabela 8 – Cotas piezométricas em função da consideração ou não de camada de rocha alterada

Como pode ser observado na Tabela 8, a influência da consideração de uma camada de rocha alterada entre o solo saprolítico e o basalto denso é muito pequena. Portanto, considera-se adequado o critério adotado de não contemplar essa camada nos modelos das seções.

Após ajustadas as permeabilidades, foi calculada a vazão por metro linear de barragem em cada seção. Obtiveram-se os seguintes valores, Tabela 9:

	-	
Estaca	Vazão (m³/s/m)	
123 + 50	1,53.10 ⁻⁶	
124 + 50	2,47.10 ⁻⁶	
125 + 50	2,80.10 ⁻⁶	
127 + 30	2,54.10 ⁻⁶	
129 + 50	5,30.10 ⁻⁶	
132 + 00	2,73.10 ⁻⁶	
135 + 50	2,77.10 ⁻⁶	
138 + 50	2,15.10 ⁻⁶	

Tabela 9 – Vazão em cada seção do modelo

Os valores obtidos estão próximos aos que foram calculados pela projetista nas seções 129 + 50 e 138 + 50, através do traçado de redes de fluxo, que foram respectivamente 6,85. 10⁻⁶ e 1,24. 10⁻⁶ m³/s/m, relatório 4280.50.8003.E.R0. Não foi possível recuperar os valores de vazão de projeto para as demais seções.

Na seção da estaca 135 + 50, como pode ser observado na Figura 31, a freática atravessa o filtro. Esse problema ocorre no SEEP quando há uma diferença muito grande de permeabilidade entre dois materiais. Nesse caso, a argila compactada possui k = 5.10^{-10} m/s e a areia, k = 3.10^{-3} m/s. Para evitar esse problema, deve-se desenhar o maciço compactado apenas até o início do filtro. Toda a região a jusante do início do filtro deve ser deixada sem malha. Na fronteira entre aterro e filtro, deve ser colocada condição de contorno de carga de pressão nula.

5.2. Cálculo das Vazões pela Barragem

Com os dados de vazão por metro linear de cada seção modelada, calculou-se a vazão total esperada pela Barragem de Terra da Margem Esquerda. A área de influência de cada seção foi definida em função da declividade da fundação e da proximidade de outra seção modelada. Quanto maior a declividade da fundação, menor deve ser o comprimento de influência de cada seção, em função do maior fluxo transversal. Multiplicando-se a vazão por metro linear de cada seção, pelo comprimento de influência, definiu-se a vazão para a região de influência da seção. Os resultados são mostrados na Tabela 10.

Secão	Influência		Vazão	Vazão
Seçau	Estacas	Comprimento (m)	(m³/s/m)	(m³/s)
123+50	123+00 a 124+00	100	1,53E-06	1,53E-04
124+50	124+00 a 125+00	100	2,47E-06	2,47E-04
125+50	125+00 a 126+50	150	2,80E-06	4,20E-04
127+30	126+50 a 128+00	150	2,54E-06	3,81E-04
129+50	128+00 a 131+00	300	5,30E-06	1,59E-03
132+00	131+00 a 133+50	250	2,73E-06	6,83E-04
135+50	133+50 a 137+00	350	2,77E-06	9,68E-04
138+50	137+00 a 142+35	535	2,15E-06	1,15E-03
			Total	5,59E-03

Tabela 10 - Vazões Teóricas

A vazão total pela barragem obtida pelo modelo foi de 5,59.10⁻³ m³/s, que é igual a 335,4 l/min ou 5,6 l/s. Como a barragem possui extensão de 1989 m, a vazão total esperada por metro linear é de 0,17 l/min/m. Segundo Cruz (1996), na maioria das barragens brasileiras a vazão total está compreendida entre 0,1 e 2 l/min/m.

O valor do modelo é muito inferior ao registrado nos medidores de vazão. A média histórica de vazão, soma dos valores dos medidores, é de 45,7 l/s. Esse valor é cerca de 8 vezes superior ao previsto pelo modelo.

No item seguinte será abordado o caso específico do MVL2.

5.3. Modelagem da Seção da Estaca 133 + 50

Devido ao fato de o MVL2 possuir uma alta vazão, 19,4 l/s (média de 1990 a 2007), praticamente toda proveniente de um tubo de drenagem que deságua na região da estaca 133 + 50, decidiu-se modelar essa seção. Como pode ser visto na Figura 19, as vazões no MVL2 são fortemente influenciadas pelo reservatório. Quando houve o deplecionamento em janeiro de 2000 e o reservatório atingiu a cota 215,48 m, a vazão do MVL2 reduziu-se a 1,8 l/s. É sabido que o dreno acima mencionado coleta água de uma região restrita, logo a jusante do fundo da canaleta de drenagem, próximo à estaca 133 + 50. Como não se dispunha de um perfil geológico nessa estaca, utilizou-se o da estaca 132 + 00, que é a mais próxima. Simularam-se vários cenários, considerando uma camada permeável de 1 m de espessura. Primeiro considerou-se essa camada entre o aterro e a argila vermelha. Depois,1 m abaixo do topo da camada de argila, 2 m abaixo do topo, no contato com o solo saprolítico e no interior do solo saprolítico. Os resultados de vazão por metro linear obtidos, em função da posição e permeabilidade da camada são mostrados na Tabela 11. Os valores de vazão no caso da camada permeável estar no contato com o topo do solo saprolítico e no interior do solo saprolítico não são mostrados na Tabela 11 porque nesses casos a superfície freática subia muito e interceptava o filtro vertical. Se isso acontecesse, haveria muita vazão na saída do filtro, o que não ocorre. Portanto, não é possível que a camada permeável esteja nem no topo e nem no interior da camada de solo saprolítico.

A Figura 33 mostra a freática com a camada pemeável na argila e a Figura 34 a freática com a camada no contato com o solo saprolítico. A camada permeável é a verde.



Figura 33 – Seção com a freática na estaca 133 + 50 para a camada permeável no contato argila solo saprolítico



Figura 34 – Seção com a freática na estaca 133 + 50 para a camada permeável no solo saprolítico

Posição da camada permeável	k (m/s)	Vazão (m³/s/m)
	1.10 ⁻¹	8,87.10 ⁻⁵
Entre aterro e argila	5.10 ⁻²	ХХХ
	1.10 ⁻²	8,08.10 ⁻⁵
	1.10 ⁻³	4,64.10 ⁻⁵
1 m abaixo do topo da argila	1.10 ⁻¹	3.10 ⁻³
	5.10 ⁻²	1,83.10 ⁻³
	1.10 ⁻²	4,85.10 ⁻⁴
	1.10 ⁻³	6,67.10 ⁻⁵
2 m abaixo do topo da argila	1.10 ⁻¹	ХХХ
	5.10 ⁻²	1,53.10 ⁻³
	1.10 ⁻²	4,4.10 ⁻⁴
	1.10 ⁻³	6,20.10 ⁻⁵

Tabela 11 – Vazões na estaca 133 + 50

Como pode ser observado na Tabela 11, não há diferenças significativas entre as posições da camada permeável no interior da camada de argila. Concluí-se, portanto, que a camada permeável esteja no interior da argila. Sabese que o dreno que deságua na região da estaca 133 + 50 possui uma extensão não superior a 50 m, mas desconhece-se seu comprimento exato. Dessa forma, considerando a vazão de 4.10^{-4} m³/s/m, decorrente de uma permeabilidade de 1.10^{-2} m/s, a vazão esperada seria 4.10^{-4} x 50 = 0,02 m³/s = 20 l/s. O valor de permeabilidade de 1.10^{-2} m/s é elevado, mas factível.

Segundo a formulação proposta por Indraratna et al (2003), a vazão em uma junta aberta é dada pela seguinte formulação:

$$q = \frac{e^{3} \rho g}{12 \mu} \left[\frac{1}{\rho g} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial x} \right]$$

onde:

q – vazão (m³/s/m);

e - abertura da fratura (m);

 ρ - densidade do fluído que percola (1000 kg/ m³ para a água);

g - aceleração da gravidade (10 m/s²);

 μ - viscosidade dinâmica do fluído (1,12.10⁻³ Pa s para a água);

P - pressão da água (Pa);

Z - carga de elevação (m);

x - comprimento em que há a perda de carga.

Considerando que a fratura seja horizontal e portanto apenas perda de carga de pressão, a expressão se reduz a:

$$q = \frac{e^3}{12\mu} \left[\frac{\partial P}{\partial x} \right]$$

Para o caso analisado, a perda de pressão é de aproximadamente 6 m.c.a, 60 kPa. O comprimento em que essa perda ocorre é de aproximadamente 70 m. Para a vazão de 4.10⁻⁴ m³/s/m, seria necessária uma abertura de junta igual a:

$$e^{3} = 4.10^{-4}.12.1, 2.10^{-3}.\frac{70}{60000} \rightarrow e = 1, 9.10^{-3} m = 1, 9mm$$

Esse cálculo mostra que o valor de vazão obtido é totalmente factível.

Utilizando-se a fórmula de Allen Hazen, a permeabilidade de um solo granular uniforme (coeficiente de uniformidade maior que 2) pode ser expressa pela relação:

 $k = C.D_{10}^{2}$

onde:

k - coeficiente de permeabilidade do solo (cm/s);

C - coeficiente que varia de 100 a 150 (1/cm.s);

 D_{10} - diâmetro efetivo (cm).

Para a permeabilidade de 1.10^{-2} m/s = 1 cm/s, considerando C = 100 (1/cm.s), o diâmetro efetivo seria:

$$1 = 100.D_{10}^{2} \rightarrow D_{10} = \frac{1}{10}cm = 1mm$$

Isso corresponderia a um material pedregulhoso, também factível.

Assim sendo, a existência de uma camada permeável, com k da ordem de 10^{-2} m/s, próxima a estaca 133 + 50, explica a vazão elevada do MVL2.