

# ***DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA NOS REJEITOS DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO – CASO DA BARRAGEM DO PONTAL, EM ITABIRA, MINAS GERAIS***

Danilo Carvalho de Almeida<sup>1</sup> & Celso de Oliveira Loureiro<sup>2</sup>

**Resumo** - Barragens de rejeito são imprescindíveis em atividades minerárias que adotam procedimentos de concentração de minério, por via úmida, e que, conseqüentemente, geram resíduos que necessitam ser armazenados adequadamente. Particularmente, o processo de concentração de minério de ferro requer grandes estruturas de contenção devido ao volume elevado de material processado e de rejeito gerado. O rejeito do minério de ferro é constituído basicamente por sílica e finos de hematita, com granulometria similar à da areia fina. Devido à alta concentração de matéria sólida destes rejeitos, as barragens acumulam uma grande quantidade de sedimentos, podendo esgotar, em pouco tempo, todo o seu volume de reserva. Em virtude da dimensão espacial destes sistemas de contenção, assim como da constituição porosa e do grau de saturação do meio, e, conseqüentemente, da capacidade de armazenamento e de condução de água, todo este pacote de rejeito pode ser considerado como um aquífero artificial. Motivado por esta hipótese, estudou-se a capacidade potencial de armazenamento e de fornecimento da água destes aquíferos artificiais. Em particular, estudou-se o caso da barragem do Pontal, depositária dos rejeitos de concentração do minério de ferro extraído no Complexo Minerador de Itabira, da empresa Vale, em Minas Gerais.

**Abstract** – Tailings ponds are indispensable in any mining activity adopting ore concentration methods, which generate solid-liquid wastes that need to be adequately stored. In a special way, iron ore concentration processes require large contention structures due to the volume of material being processed and the quantity of waste generated. Iron ore waste is composed basically of silica and fines of hematite, with a granular distribution similar to fine sand. Due to the concentration of solid material in these wastes, the tailings dams accumulate a high quantity of sediments, filling up, in a short period of operation, its whole reservation volume. Because of the spatial dimension of these contention systems, as well as its porous constitution and its degree of water saturation, and, consequently, its capacity for water storage and flow, these waste packages could be considered as artificial aquifers. Motivated by this hypothesis, a study was conducted on the potential capacity for water storage and water supply of these artificial groundwater reservoirs. The study was directed specifically to the case of the Pontal Tailings Pond, storing the wastes produced by the iron ore concentration unit of the Itabira Mining Complex, owned by the Vale Company, in Minas Gerais.

**Palavras-Chave** – Barragem de Rejeito, Aquíferos Artificiais, Barragem do Pontal

---

<sup>1</sup>Geólogo, Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno 842, 7º andar, Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30.110-060, Tel.: (31) 3835-6358. e-mail: daniloop@uai.com.br.

<sup>2</sup>Professor, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno 842, 7º andar, Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30.110-060, Tel.: (31) 3409-1884. e-mail: celso@desa.ufmg.br.

## 1. INTRODUÇÃO

Na atividade de mineração, todo o processo de concentração mineral, cuja rota é por via úmida, gera uma quantidade significativa de rejeitos, os quais necessitam de uma disposição controlada, realizada em função das suas características reológicas e composição química.

Esses rejeitos são materiais remanescentes do processo de beneficiamento e concentração de minérios em instalações industriais, cujas características granulométricas dependem do minério bruto a ser extraído e do processo industrial de beneficiamento, podendo abranger uma ampla faixa de materiais, desde grosseiros até solos de granulometria muito fina (Pereira, 2005).

Na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, encontram-se importantes jazidas de minério de ferro, cuja exploração gera um volume considerável de rejeitos que, invariavelmente, são depositados em barragens de contenção, também conhecidas como barragens de rejeito.

Essas barragens podem ser dimensionadas para dupla função: fornecer água para o processo industrial e reter todo o rejeito produzido no processo de concentração do minério, ou então somente para a contenção dos rejeitos. De uma forma ou de outra, seu dimensionamento procura atender todo o tempo de vida útil da mina.

Após anos de disposição, restará nessas barragens uma grande parte do seu volume assoreado e um pequeno lago de amortecimento para o escoamento superficial. Nesse contexto, em função do volume de material sedimentado e das propriedades hidrodinâmicas, poder-se-ão formar relativos aquíferos artificiais, permitindo o aproveitamento dos recursos hídricos ali armazenados.

As jazidas de ferro no Quadrilátero Ferrífero possuem métodos de lavra e beneficiamento que se assemelham, variando apenas em particularidades no processo de concentração do minério de ferro.

Dentre os grandes empreendimentos em operação, destacam-se os das empresas Vale, Samarco, CSN, com uma série de projetos, cujo beneficiamento é por via úmida e requer portanto a construção de barragens de rejeito.

Atualmente existem instaladas, no Quadrilátero Ferrífero, um total de 38 barragens para contenção de rejeitos de minério de ferro. Das 38 barragens, apenas 06 são de uso misto, ou seja, retêm os rejeitos e fornecem água para o processo industrial. O volume total de água armazenada nestes sistemas é de 426.238.000 m<sup>3</sup>, com uma projeção de um volume final de 637.942.215 m<sup>3</sup>, considerando a soma de todas as barragens listadas.

Localizada em áreas cada vez mais povoadas, principalmente em função da migração para suprir a demanda de mão de obra das próprias empresas mineradoras e seus prestadores de serviços,

a água subterrânea torna-se uma fonte importante de suprimento de água. Madan *et. al* (2004), ressaltam a importância da água subterrânea para o fornecimento global de água mas, por outro lado, afirmam que os recursos hídricos subterrâneos estão se reduzindo e sendo poluídos em várias partes do planeta. Portanto, torna-se importante prever a reação dos aquíferos quanto à quantidade e qualidade das águas, frente às atividades humanas, e mitigar os conflitos de interesse, assim como evitar os danos irreversíveis para o ecossistema e a humanidade. Os autores reforçam a importância do conhecimento das propriedades hidrodinâmicas dos aquíferos para um bom gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos.

Mylopoulos *et al* (2007) estudaram um suposto déficit hídrico em um sistema de lagos e aquíferos no norte da Grécia. Em uma primeira análise, levando em consideração as entradas e saídas de água do sistema, por si só não explicaram a diminuição do volume dos lagos, pois o resultado do balanço hídrico foi insignificante se comparado com a perda de água sofrida. Somente após o cruzamento das informações hidrológicas, geológicas e hidrogeológicas, juntamente com o modelamento matemático do aquífero, pôde-se perceber a verdadeira dinâmica hídrica local e entender a variação nos recursos hídricos superficiais. Dessa forma, devem ser utilizadas as ferramentas apropriadas para o entendimento de todo arcabouço hidrogeológico.

Diante da quantidade expressiva dessas estruturas de contenção de rejeitos de minério de ferro, e sabendo que todas possuem um tempo de vida limitado, é importante conhecer e estimar a qualidade da água que ficará armazenada no rejeito, visto que essas estruturas deverão ser, mesmo após a exaustão das atividades mineiras, constantemente monitoradas, e porque não, ter como uma segunda finalidade o uso dos recursos hídricos ali armazenados.

## **2. OBJETIVOS**

Este projeto apresenta como objetivo geral o estudo quantitativo e qualitativo da água armazenada nos rejeitos de minério de ferro da barragem do Pontal, de modo a caracterizá-la como um potencial manancial hídrico subterrâneo para eventual uso futuro no abastecimento humano e industrial.

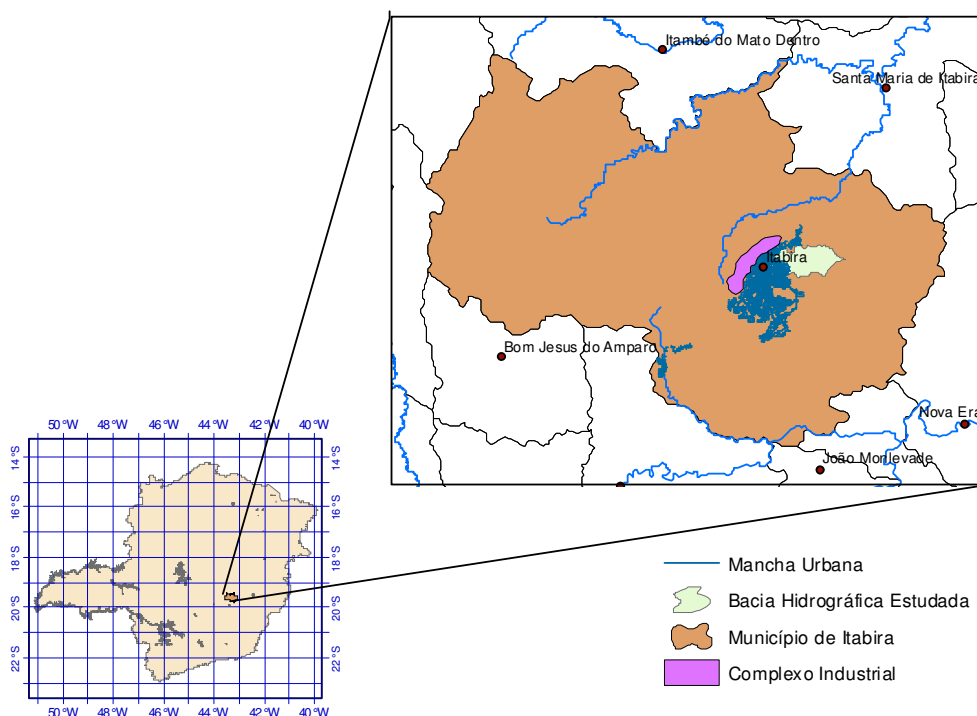
E os objetivos específicos do presente trabalho são:

- avaliar a qualidade da água contida no rejeito;
- realizar o balanço hídrico e identificar os aportes e saídas de água do sistema;
- estimar a reserva renovável de água subterrânea na geometria final do rejeito, para o ano de 2015;

- propor um sistema de monitoramento que assegure o controle das variáveis que modifique a qualidade da água armazenada, e que sugira sistemas de proteção à bacia estudada; e,
- subsidiar informações ao programa de descomissionamento da referida barragem.

### 3. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS

O Complexo Minerador de Itabira localiza-se no município de Itabira, estado de Minas Gerais, a uma distância de 110 km de Belo Horizonte, capital do estado.



**Figura 1:** Localização do município de Itabira

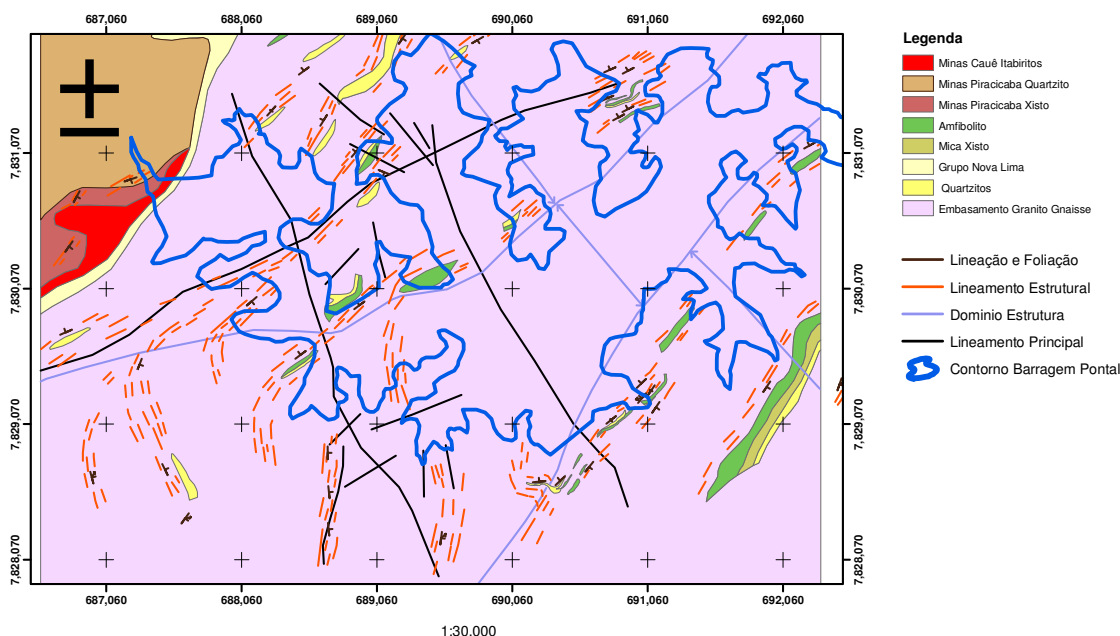
O Complexo Minerador, pertencente à Companhia Vale, situa-se às margens da área urbana da cidade de Itabira, na sua porção nordeste, conforme mostra a Figura 1. O Complexo é dividido em dois setores principais, denominados Complexo Conceição e Complexo Cauê. O primeiro é formado pela mina homônima e pelas instalações industriais formados pela Usina de Beneficiamento Conceição e oficinas de veículos leves e pesados, além de escritórios e restaurantes. A Usina de Conceição recebe o minério da Mina Conceição e também parte do minério das Minas do Meio através de correias transportadoras.

O Complexo Cauê é composto pelas Minas do Meio (Mina Chacrinha, Mina Onça, Mina Periquito e Mina Dois Córregos), pela cava exaurida da Mina Cauê, pela usina de beneficiamento Cauê, oficina centralizada, além de escritórios e restaurantes. A usina de beneficiamento Cauê

recebe o minério das Minas do Meio, sendo o rejeito atualmente lançado em dois pontos distintos. O rejeito é ciclonado, sendo que o “underflow”<sup>3</sup> é lançado na cava exaurida da Mina Cauê e o “overflow” é lançado na barragem do Pontal, que é o alvo deste estudo. Também faz parte desse complexo a barragem do Santana, que fornece água para a usina de beneficiamento Cauê.

#### 4. ASPECTOS GEOLÓGICOS LOCAIS

O local onde se está instalado a barragem é constituído por litotipos arqueanos, que compõem um Embasamento Granito-Gnáissico mais antigo. Esse embasamento está associado com níveis de supracrustais da “Seqüência Serra da Pedra Branca”, considerados como integrantes do pacote “greenstone belt”, conhecido como Grupo Guanhões (Figura 2).



**Figura 2:** mapa geológico da área de estudo

O Embasamento Granito-Gnáissico é formado, predominantemente, por gnaisses bandados com faixas alternadamente escuras, quartzo-feldspáticas mais ricas em minerais máficos, e claras, essencialmente quartzo-feldspáticas, de espessuras milimétricas a centimétricas e granulação variando de fina à média. Os minerais micáceos, biotita e muscovita, apresentam-se bem orientados. Ocasionalmente, os gnaisses podem apresentar estruturas migmatíticas. São ainda encontrados com relativa freqüência corpos pegmatíticos concordantes e discordantes à foliação e níveis decimétricos de anfíbolito.

<sup>3</sup> Após a ciclonação do rejeito total, a parte menos densa e, portanto com um menor conteúdo de água é denominado *overflow* e a parte mais densa e com maior conteúdo de massa sólida e denominado *underflow*.

A “Seqüência Serra da Pedra Branca” é constituída por um pacote máfico-quartzítico composto por anfibolitos, cloritas-xistos e quartzitos micáceos. Os contatos com os gnaisses são bruscos e muitas vezes marcados por zonas de cisalhamento dúctil concentrado. As espessuras dos pacotes que ocorrem na área da barragem são da ordem métrica à decamétrica, estando, sua foliação, coincidente com a das encaixantes gnáissicas.

Os litotipos desta seqüência encontram-se, também, profundamente decompostos a solos residuais, como os gnaisses.

O maciço rochoso pré-cambriano é ainda capeado ao longo de praticamente toda a área mapeada, por um colúvio argilo-arenoso marrom a avermelhado com espessura métrica.

Com relação aos aspectos estruturais, a foliação representa a feição marcante da matriz rochosa, ocorrendo no solo residual jovem e nas rochas completamente alteradas. Subordinadamente, ocorrem juntas fechadas de baixa persistência.

Praticamente, todo o sítio da barragem é atravessado por uma zona de cisalhamento dúctil transcorrente com a foliação, manifestando mergulhos íngremes a subverticais. A direção é invariavelmente NE-SW com mergulhos ora para NW ora para SE. Devido ao regime dúctil, onde as deformações ocorreram no regime plástico e não rúptil, esta estrutura não se comporta como uma falha e não constitui uma feição geotécnica peculiar de baixa resistência e alta permeabilidade.

Ocorrem ainda juntas subverticais cortando o maciço pré-cambriano. As direções são bastante variadas, sendo detectadas principalmente NW-SE, N-S e NE-SW, em ordem decrescente de importância.

## **5. CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM DO PONTAL**

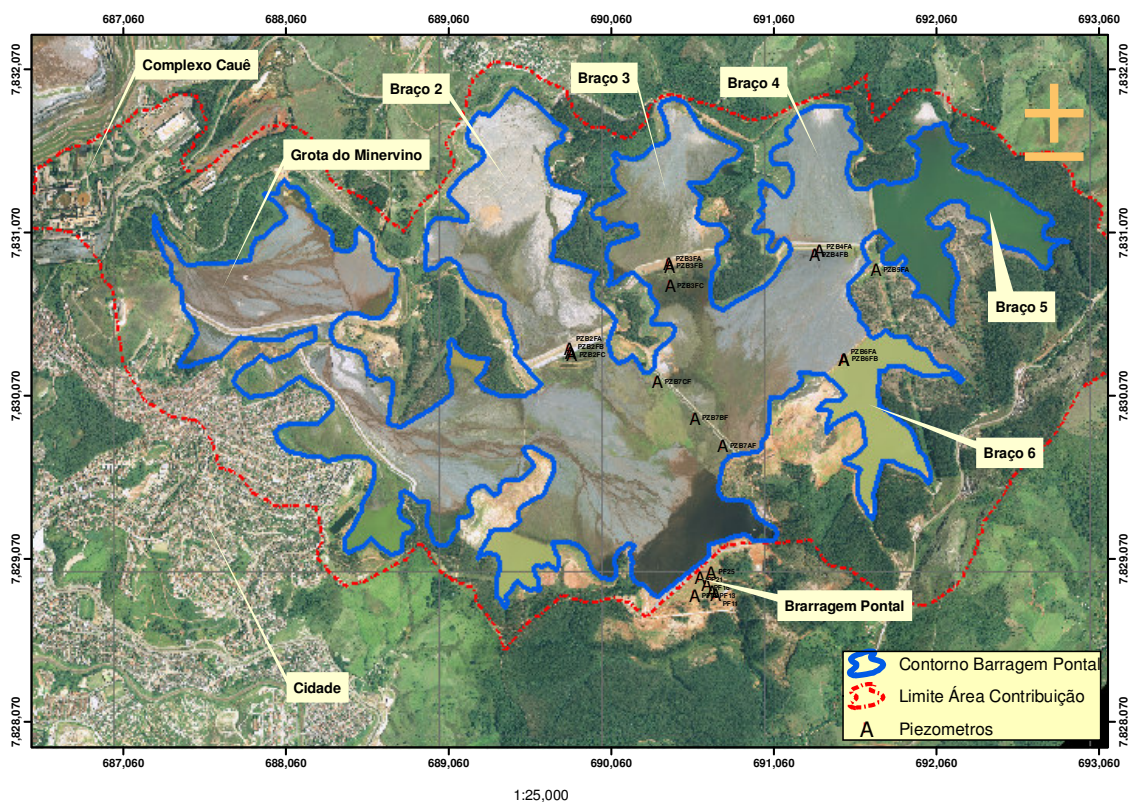
A Barragem do Pontal foi implantada no ano de 1972 com uma dupla finalidade: reter os rejeitos do processo de beneficiamento do minério de ferro na usina Cauê e fornecer água para esse mesmo processo industrial através da recirculação da água.

Está localizada no córrego dos Doze, afluente do rio do Peixe, que deságua no rio Piracicaba. A bacia de drenagem ocupa uma área de 16,3 km<sup>2</sup>, sendo ocupada com 32% com a superfície do reservatório e o restante por matas homogêneas de eucalipto, pela cava da Mina Cauê, pelas instalações industriais, escritórios e parte da zona urbana de Itabira.

A barragem possui uma geometria peculiar em leque, composta por um corpo principal e seis braços, que desempenham um papel importante na operação de disposição de rejeitos.

Os rejeitos, gerados na Usina de Beneficiamento Cauê, são dispostos nas cabeceiras e braços do reservatório, onde ocorrem a sedimentação e o desaguamento.

Desde o início da sua operação, os vales dos braços são preenchidos com os rejeitos até completar sua capacidade de armazenamento. Com o objetivo de aumentar o tempo de vida útil desses braços, foram implantados diques sobre os rejeitos, elevando assim os níveis de sedimentos a montante dos diques acima do coroamento da barragem (Figura 3).

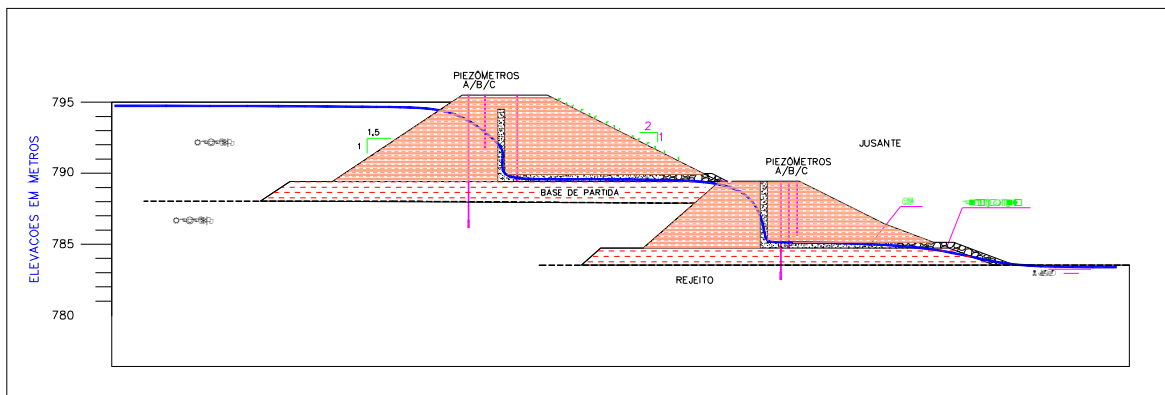


**Figura 3:** Barragem do Pontal

Os diques são importantes estruturas do condicionamento e armazenamento da água subterrânea, pois possuem a capacidade de reter juntamente com o rejeito sólido a água que satura o mesmo.

As principais estruturas que controlam o nível de água subterrânea na região dos diques são:

- a) o próprio corpo do dique: por ser construído por argila compactada, a sua baixa permeabilidade eleva o nível de água a montante;
- b) os drenos internos: com a função de eliminar a poro-pressão no interior do maciço do dique, os drenos deplecionam abruptamente o nível de água, conduzindo-a para o enrocamento frontal. Em perfeitas condições de uso, os drenos mantêm o nível d'água no maciço conforme mostra a Figura 4.



**Figura 4:** Perfil esquemático dos diques construídos sobre o rejeito

## 6. APORTES DE EFLUENTES DA UNIDADE INDUSTRIAL

Os circuitos de efluentes líquidos da área industrial da mina e usina Cauê que drenam para a bacia onde está instalada a barragem do Pontal são os seguintes:

- água de polpa incorporada aos rejeitos liberados pelos espessadores e ciclones, que são conduzidos para a Galeria Amarela, na grota do Minervino;
- água de polpa incorporada aos rejeitos do processo de flotação, lançados na Galeria Preta ou na Galeria Amarela, na grota do Minervino;
- água de polpa incorporada aos rejeitos liberados pelo Projeto Ouro, lançados na Galeria Preta e efluentes do laboratório do Projeto Ouro, lançados na Galeria Amarela;
- águas de drenagem dos pátios inferiores das usinas e das pilhas de estocagem de produtos, lançadas na Galeria Preta (grota do Minervino); e,
- águas de drenagem pluvial da área de escritórios que drenam para a galeria amarela.

### 6.1 Operação da Barragem

A barragem do Pontal opera em um sistema semi-fechado, com o lançamento do rejeito e das descargas da usina nos braços do reservatório e a recuperação da água no corpo principal da barragem, retornando através de bombeamento até a usina Cauê.

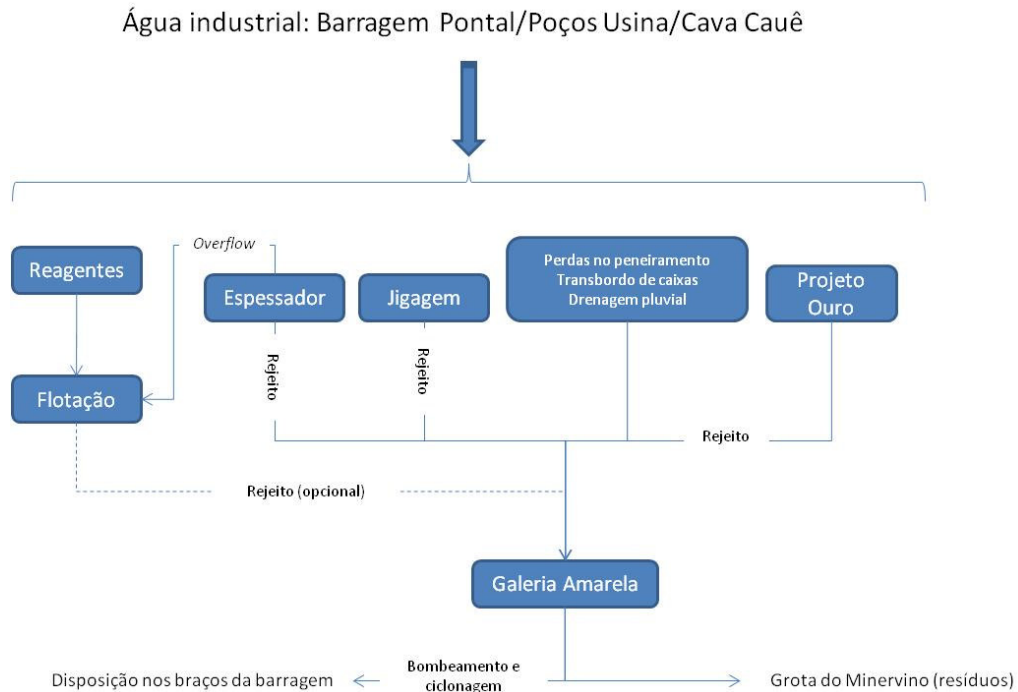
A partir dos pontos de lançamento o rejeito percorre pelas áreas sedimentadas até atingir o corpo de água principal, onde ocorre a sedimentação da parte sólida, clarificação e recuperação da água.

Os pontos de lançamento do rejeito na barragem incluem a galeria amarela, a galeria preta e os braços da barragem, descritos a seguir.



### 6.1.1 Galeria Amarela

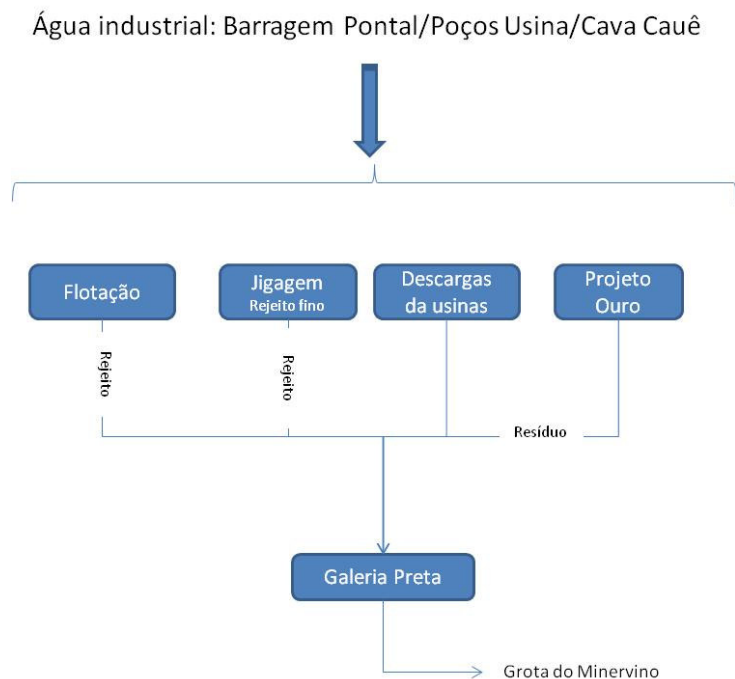
A galeria Amarela recebe esse nome devido à coloração dos rejeitos que nela deságuam. Proveniente na sua maior parte do “underflow” dos espessadores, nessa galeria é desaguado também os rejeitos da jigagem, perdas no peneiramento, transbordo de caixas e drenagem pluvial, além dos rejeitos do projeto ouro (Figura 5). Eventualmente pode receber também rejeitos da flotação.



**Figura 5:** Fluxograma do caminhamento de água industrial que deságua na Galeria Amarela

### 6.1.2 Galeria Preta

Assim como a Galeria Amarela, a Galeria Preta recebe esse nome também em função da cor dos rejeitos, que são provenientes em sua maioria do processo de flotação. Além dos rejeitos da flotação a Galeria Preta também recebe o rejeito fino da jigagem, resíduos do projeto ouro e as descargas da usina (Figura 6). A descarga de usina acontece quando há queda brusca de energia e todos os circuitos precisam ser esvaziados imediatamente evitando assim o entupimento das tubulações pelas partições sólidas da polpa.



**Figura 6:** Fluxograma do caminhamento de água industrial que desagua na Galeria Preta

### 6.1.3 Braços da Barragem

Em função do nível de assoreamento dos braços da barragem há a alternância do lançamento do rejeito nos braços da barragem. O braço 1, também denominado grotta do Minervino, recebe todo o rejeito da Galeria Preta e parte do rejeito da Galeria Amarela. Parte do rejeito da Galeria Amarela é bombeado e desaguado nos braços 2, 3 e 4.

Os braços 5 e 6 funcionam como reserva hídrica do sistema. A água bombeada na barragem do Santana é lançada no reservatório do braço 5. A partir do braço 5 a água é enviada através de uma galeria para o braço 6 e de lá lançada no corpo principal da barragem, passando pelo reservatório do dique 7. No braço 5 há também um sistema de sifão que lança a água para o dique 7 e de lá para o corpo principal da barragem. Esse último sistema funciona esporadicamente.

### 6.2 Balanço Hídrico da Barragem

O regime de recirculação de água na barragem do Pontal é feito simultaneamente com lançamento dos rejeitos e a captação de água recuperada.

A captação é feita pontualmente na estação de bombeamento localizada na margem esquerda do reservatório próximo ao corpo da barragem, através de um sistema de bombas montada sobre uma balsa. A vazão média bombeada é de 1945 m<sup>3</sup>/h, com a adução direta a usina Cauê.

O processo de lançamento do rejeito acontece em função do volume disponível para sedimentação e retenção da parte sólida.

A Figura 7 mostra o balanço hídrico da barragem do Pontal em função da captação e do aportes de água no rejeito.

O lançamento de água proveniente da barragem do Santana ocorre de forma descontinuada. Esse aporte acontece principalmente nos períodos de estiagem, quando o balanço hídrico da barragem é quebrado em função das perdas de água ocorridas durante o processo de beneficiamento mineral. Nesse período o lago remanescente é deplecionado e o aporte de água da barragem Santana se faz necessário para completar a disponibilidade hídrica do sistema.

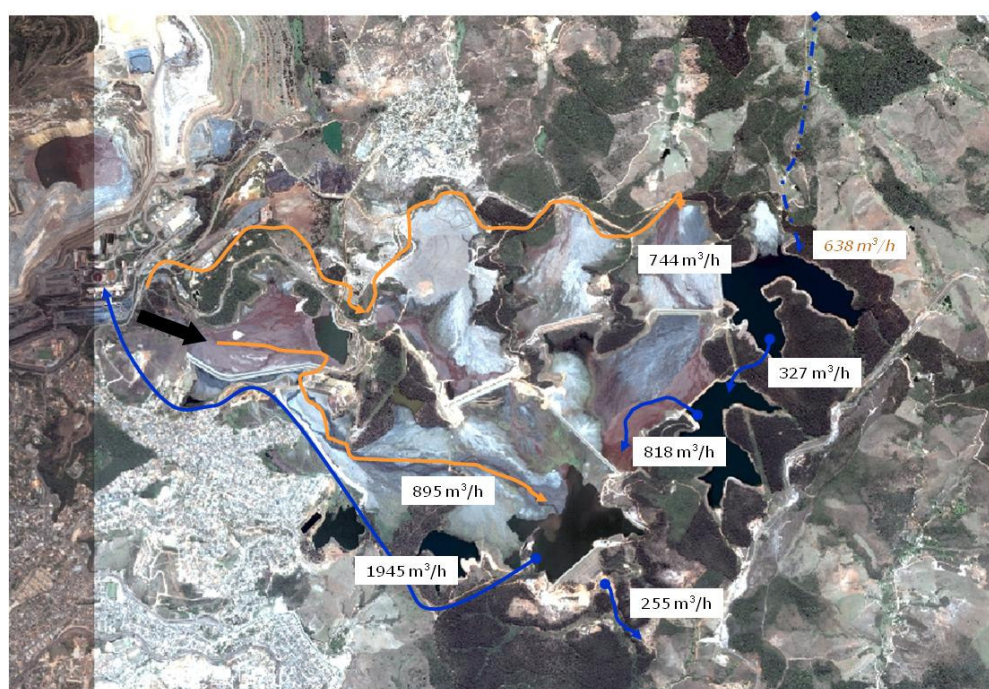


Figura 7: Fluxograma do balanço hídrico, de captação e lançamento de água na barragem do Pontal

## 7. O MODELO COMPUTACIONAL DO FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Atualmente, o uso de modelos numéricos computacionais para entender a dinâmica do fluxo de água subterrânea é altamente empregado, pois se trata de uma ferramenta que permite analisar conjuntamente todas as variáveis que compõem sistema hídrico subterrâneo, tais como dados geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos e permite, através do processamento matemático-computacional, obter resultados que possam levar ao entendimento de todo o sistema hídrico local.

A aplicação da técnica de modelagem matemática-computacional para diferentes fins tornou-se uma ferramenta rotineira no auxílio da solução de diferentes problemas, inclusive de águas

subterrâneas, sendo usada com frequência em projetos de gestão de recursos hídricos (BONGANHA et al., 2007).

Modelos matemáticos são ferramentas que representam uma aproximação de uma condição real (ANDERSON; WOESSNER, 1992). Portanto é importante levar em consideração todas as suas limitações, e por conseqüência a interpretação dos resultados, principalmente a sua capacidade de estimar intervenções futuras nos sistemas hídricos subterrâneos.

### 7.1 A Equação do Fluxo da Água Subterrânea

A equação diferencial parcial tridimensional, aplicada a um modelo matemático, que governa o fluxo de água subterrânea, considerando-se um meio heterogêneo, anisotrópico e em estado transiente, é derivada através da combinação matemática da equação de balanço de água e da lei de Darcy (ANDERSON E WOESSNER, 1992 e CLEARY, 1989 apud BONGANHA et al., 2007).

Considerando-se um volume elementar representativo de um aquífero, com os eixos do sistema de coordenadas coincidentes com as principais direções do tensor de condutividade hidráulica, isto é,  $x$ ,  $y$  e  $z$  co-lineares a  $K_x$ ,  $K_y$ , e  $K_z$  respectivamente, e considerando a água com uma densidade constante, a equação fundamental de fluxo de água subterrânea é representada pela Equação 1 mostrada a seguir (CLEARY, 1991 apud BONGANHA et al., 2007).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W_{(x,y,z,t)} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$h$  = carga hidráulica [L];

$K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  = valores de condutividade hidráulica ao longo dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente, [L/T];

$S_s$  = coeficiente de armazenamento específico, [1/L];

$t$  = tempo, [T]; e,

$W(x,y,z,t)$  = fontes ou sumidouros de água, [L<sup>3</sup>/TL<sup>3</sup>].

A Equação 1, quando combinada com as condições de contorno e as condições iniciais, descreve o fluxo transiente tri-dimensional da água subterrânea em um meio heterogêneo e anisotrópico, contanto que os principais eixos da condutividade hidráulica estejam alinhados com os eixos das coordenadas (HARBAUGH et al., 2000).

O processo do fluxo de água subterrânea é resolvido pela equação 1, usando o método de diferenças finitas, no qual o sistema de fluxo subterrâneo é dividido em células, em que para cada célula há um ponto chamado de nó, onde a carga hidráulica é calculada.

## **7.2 O Modelo Hidrogeológico Computacional da Barragem do Pontal**

O modelo hidrogeológico computacional da Barragem do Pontal abrangeu a bacia de contribuição a montante da barragem. As condições de contorno e demais elementos que compõe o modelo foram os seguintes:

- 1- limites do modelo: divisor de água da bacia e corpo da barragem;
- 2- unidades hidrogeológicas: embasamento cristalino, colúvio, rejeito e diques; e,
- 3- parâmetros de calibração: comparação do nível d'água subterrânea calculado *versus* observado.

O modelo foi calibrado nos seguintes cenários:

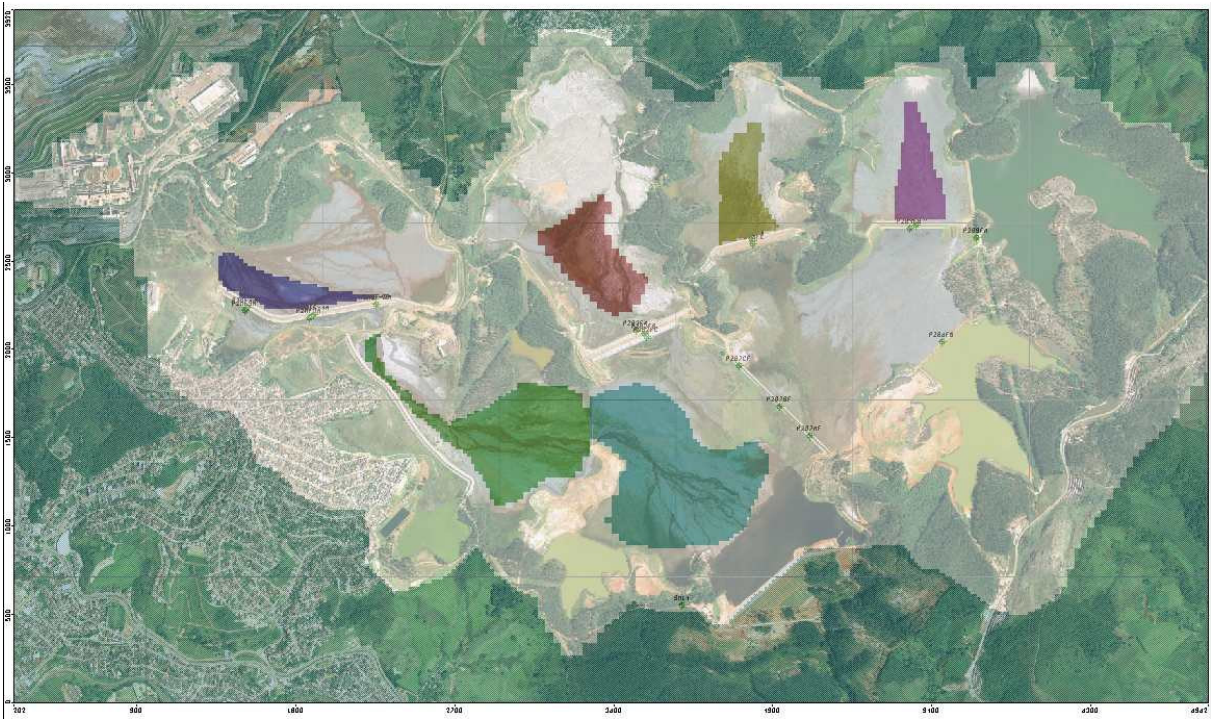
- 1- calibração em regime permanente referente ao período seco de 2005, para dados do nível de água do mês de setembro/2005: essa calibração teve como objetivo determinar o nível d'água no período seco, determinando a parcela da água que lançada nos braços da barragem que efetivamente infiltram no rejeito; e,
- 2- calibração em regime transitório: essa calibração teve como objetivo calibrar o modelo nas seqüências de meses secos e chuvosos, no período compreendido entre 20/set/2005 a 11/out/2007.

Após a calibração em regime transitório, os sistemas hídricos subterrâneos foram simulados até atingir a configuração final da barragem, com o lago remanescente da barragem atingindo a cota 785 metros. Os períodos de tempo foram também divididos entre os meses secos e chuvosos, com um total de 16 períodos compreendido entre 01/out/2007 a 30/set/2015.

## **7.3 Resultados Parciais**

### **7.3.1 Calibração em Regime Permanente**

Com a calibração em regime permanente foi possível avaliar a parcela de água lançada na Grota do Minervino e nos braços que realmente infiltram no rejeito. Para mensurar estes valores foram utilizadas áreas de recargas pontuais equivalentes ao caminhamento do rejeito, conforme mostra a Figura 8. Por se tratar de um período sem precipitação, considerou-se que a água que infiltra nos rejeitos é a única responsável por manter o nível de água subterrâneo nas áreas ocupadas.



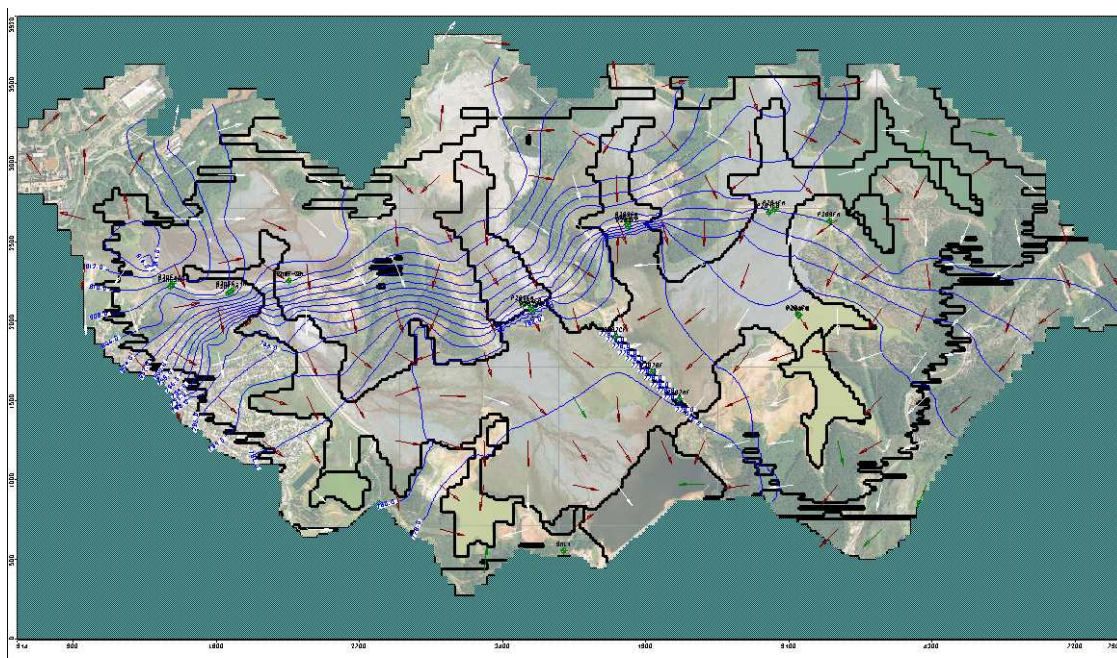
**Figura 8:** Área de recarga para mensurar a infiltração da água do rejeito

O mapa com as linhas isopiezométricas, em regime permanente, é mostrado na Figura 9, e o resultado final dos valores de infiltração é mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Valores de infiltração da água do rejeito na porção assoreada

Ponto	Vazão (m <sup>3</sup> /dia)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)
Grota do Minervino	1648,0	68,6
Intermediário	401,0	16,7
Final	304,0	12,7
Braço 2	1685,0	70,2
Braço 4	1289,0	53,4
	<b>Total</b>	221,6

Com um aporte médio de 1945 m<sup>3</sup>/h de rejeito no pontal, e com os valores de infiltração resultantes do modelo, tem-se que 11,3% da água da polpa infiltra no rejeito. Essa taxa relativamente pequena pode ser devida ao fato dos rejeitos serem altamente saturados, com o nível de água ficando a poucos centímetros da superfície da praia (figura 9).



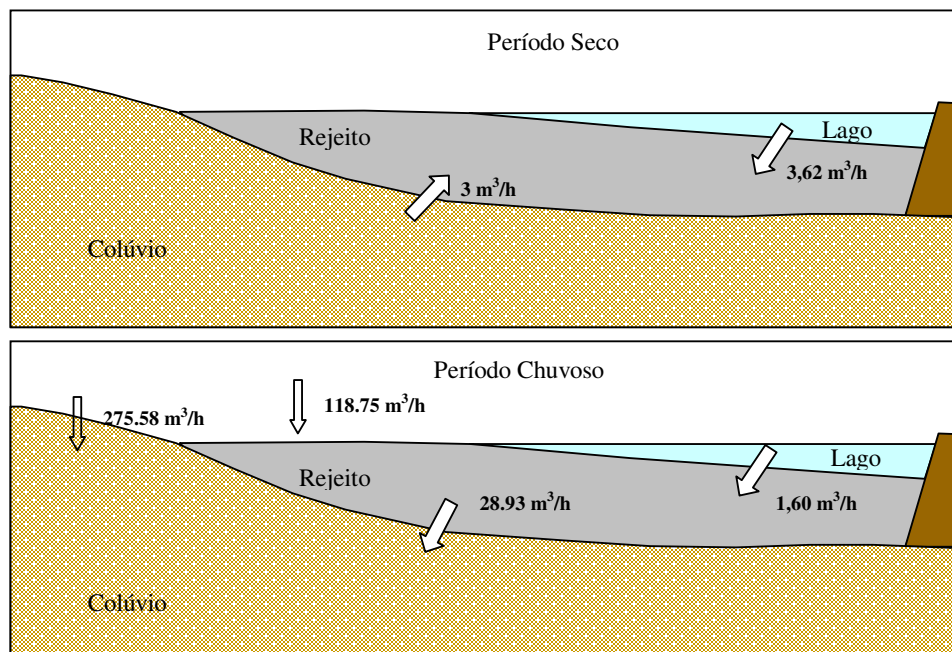
**Figura 9:** Mapa com as linhas isopiezométricas resultantes da calibração em regime permanente.

### 7.3.2 Calibração em Regime Transitório

A calibração em regime transitório teve como principal objetivo ajustar os valores de recarga e permeabilidade através da técnica de retro-análise dos dados de nível d'água no rejeito e no colúvio. A partir do resultado final dessa calibração simulou-se o enchimento do reservatório até o ano de 2015, data em que se encerra o lançamento do rejeito na barragem do Pontal.

Após a simulação da elevação do nível de água em função do último alteamento da barragem, simulou-se um período de um ano hidrológico, dividido nos períodos secos e chuvosos, com o objetivo de quantificar o balanço hídrico dos sistemas, principalmente o aporte de água entre o colúvio e o rejeito, e entre o rejeito e o lago remanescente.

A Figura 10, a seguir, mostra os resultados dos principais aportes de água, e a Tabela 2 mostra o resultado com todos os aportes de água, nos períodos seco e chuvoso.



**Figura 10:** Perfis esquemáticos mostrando o balanço de água calculado pelo modelo

**Tabela 2:** Valores do balanço de água calculado pelo modelo

	Período seco			Período chuvoso		
	IN	OUT	IN-OUT	IN	OUT	IN-OUT
	Colúvio			Colúvio		
	Vazão [m³/h]	Vazão [m³/h]		Vazão [m³/h]	Vazão [m³/h]	
Storage	94.18	100.55	-6.38	14.40	325.37	-310.98
Constant head	26.78	1.90	24.87	25.81	2.06	23.75
Drains	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
River Leakage	4.55	22.66	-18.11	4.14	23.64	-19.50
Recharge	0.00	0.00	0.00	275.58	0.00	275.58
Lago Pontal	1.48	0.03	1.45	1.46	0.16	1.31
Lago Braço 6	1.61	0.01	1.61	1.68	0.12	1.56
Lago ETE	0.00	0.45	-0.45	0.00	0.54	-0.54
Rejeito	148.74	151.74	-3.00	164.92	136.00	28.93
	Rejeito			Rejeito		
Storage	28.20	2.39	25.80	0.00	49.88	-49.88
Constant head	37.78	37.71	0.07	35.17	40.34	-5.18
Drains	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
River Leakage	0.29	30.77	-30.48	0.17	35.57	-35.41
Recharge	0.00	0.00	0.00	118.75	0.00	118.75
Geral	151.74	148.74	3.00	136.00	164.92	-28.93
Lago Pontal	5.23	1.61	3.62	5.69	4.09	1.60
Lago Braço 6	1.20	3.21	-2.01	2.07	3.19	-1.12
Lago ETE	0.68	0.62	0.06	0.78	0.82	-0.04



Os resultados demonstram que a água subterrânea disponível para o uso, sem que seja necessário captar as reservas subterrâneas é de 275 m<sup>3</sup>/h, que infiltram na parte do colúvio, e de 118 m<sup>3</sup>/h da parcela que infiltra no rejeito.

Esses dados deverão ainda ser posteriormente refinados, com simulações através de poços tubulares instalados no local, assim como com a quantificação da parcela da reserva hídrica subterrânea que poderá ser efetivamente explorada.

## 8. TRABALHOS COMPLEMENTARES

Os estudos apresentados ainda serão complementados para atingir os seguintes objetivos propostos:

1. estimativa da reserva renovável de água do sistema: com o refinamento das simulações espera-se quantificar a reserva renovável de água no sistema e indicar a melhor localização para a instalação de poços tubulares; e,
2. avaliação da qualidade da água contida no rejeito: de junho/2007 a fevereiro/2008 foram realizadas 16 campanhas de amostragem de água. O monitoramento iniciou-se com frequência semanal nos dois primeiros meses, sendo ajustado para uma frequência quinzenal, nos dois meses seguinte, e, por fim, com frequência mensal. Os pontos amostrados e os parâmetros analisados encontram-se nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 3:** Relação dos pontos de amostragem

Ponto	Local
Galeria Preta	Saída da descarga de rejeito e rejeito da flotação
Galeria Amarela	Saída do rejeito do espessador
ETE	Lago próximo e ETE do SAAE
Piezômetro Dique Minervino	Piezômetro na Fundação do Dique do Minervino
Poço 2	Poço perfurado no rejeito a jusante do dique 2
Barragem Santana	Lago da Barragem Santana
Barragem Principal	Lago principal da Barragem do Pontal

**Tabela 4:** Relação dos parâmetros analisados na água da barragem do Pontal

Alcalinidade	Boro	Estanho	Fósforo total	Nitrogênio amoniacal total
DBO5	Cádmio	Índice de fenóis	Magnésio	Sulfato
Oxigênio dissolvido	Cálcio	Ferro total	Nitrito	Sulfeto
pH	Cálcio solúvel	Fluoretos	Nitrogênio orgânico	Fosfato total
Temperatura	Carbonato	Molibdênio	Nitrogênio total	
Alumínio solúvel	Cianeto	Manganês	Sólidos dissolvidos totais	Cobre dissolvido
Alumínio total	Chumbo	Manganês solúvel	sólidos suspensos totais	Cromo trivalente
Amônia não ionizável	Cloretos	Mercúrio	Zinco	Cromo hexavalente
Amônia total	Cloro residual	Níquel	DQO	Ferro solúvel
Arsênio	Cobalto	Nitrato	Condutividade	Berílio
Bário	Cobre	Magnésio dissolvido	Sódio	Bicarbonato

De posse de dados de quantidade e qualidade da água no rejeito, serão então propostos os possíveis cenários, tanto para o uso da água contida nos rejeitos, quanto para os planos de monitoramento e gerenciamento de todo o sistema, de forma a perpetuar o uso do manancial hídrico subterrâneo local para o fornecimento de água.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**BONGANHA**, Carlos André et al. **CONCEITOS E FUNDAMENTOS DA MODELAGEM**.

Revista Analytica, São Paulo, n. 30, p.116-120, set. 2007.

ANDERSON, Mary P.; WOESSNER, William W.. Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport. San Diego, California: Academic Press, Inc., 1992. 381 p.

MADAN, K. J. et al, Determination of hydraulic parameters of an unconfined alluvial aquifer by the floodwave-response technique, **Hydrogeological Journal**, n. 12, p. 628-642, 2004.

MYLOPOULOS, N. et al., Groundwater modeling and management in a complex lake-aquifer system, **Water Resource Management**, n. 21, p. 469-494, 2007.

PEREIRA, Eleonardo Lucas. **Estudo Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento Estatístico**, 2005. 1v. 185f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Ouro Preto.

HARBAUGH, Arlen W. et al. MODFLOW-2000, THE U.S. GEOLOGICAL SURVEY MODULAR: USER GUIDE TO MODULARIZATION. U.s. Geological Survey: Open-File Report 00-92, Reston, Virginia, n. , p.1-130, 2000. Disponível em:

<<http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow2000/ofr00-92.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2008.