

TRATAMENTO DE DRENAGEM ÁCIDA COM INJEÇÃO ALCALINA EM GALERIAS DE MINAS ABANDONADAS DE CARVÃO EM SANTA CATARINA

Roberto ROMANO NETO¹; Cleber José BALDONI GOMES²; Antônio Sílvio Jornada KREBS³; Denise Olímpio Ugioni GARCIA⁴; Luciane GARAVAGLIA⁵

Núcleo de Meio Ambiente do Centro Tecnológico de Carvão Limpo (CTCL) da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC), roberto.romano@satc.edu.br¹; cleber.gomes@satc.edu.br²; antonio.krebs@satc.edu.br³; denise.ugioni@satc.edu.br⁴; luciane.garavaglia@satc.edu.br⁵.

RESUMO

A infiltração da água em minas subterrâneas de carvão abandonadas constitui-se em um dos principais impactos ambientais relacionados com a atividade de mineração de carvão em Santa Catarina. Os pontos de ingresso da água para as minas subterrâneas são as fraturas, principalmente, as formadas pelo colapso da cobertura que ocorre em consequência do desmonte dos pilares. As águas que infiltram para o ambiente subterrâneo acidificam-se pelo contato com os produtos da oxidação da pirita existente no subsolo, acarretando, além da redução da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, a contaminação dos cursos d'água que recebem drenagem ácida de mina (DAM) a partir dos pontos de surgência. Os custos de bombeamento, tratamento químico da água, bem como as obras de desvio de águas de montante, vedação de fraturas, conformação topográfica e remediação da superfície são custos elevados. Nas minas abandonadas Lazzarin e Rio Bonito situadas em Lauro Müller/SC a água subterrânea apresenta circulação e contato direto com a camada de carvão Barro Branco em pilares remanescentes, gerando drenagem ácida com descarga no Rio Bonito através de galerias de encosta. O projeto proposto pelo Centro Tecnológico de Carvão Limpo (CTCL) da Associação Beneficente da indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC) prevê o enchimento parcial de galerias subterrâneas com materiais alcalinos reduzindo o volume de água percolada e melhorando sua qualidade pela adição de alcalinidade. A DAM coletada a partir dos pontos de surgência será tratada em sistema passivo composto por drenos anóxicos de calcário com polimento em banhados aeróbicos. O sistema proposto prevê uma redução de, aproximadamente, 30% da vazão, bem como remoção acima de 80% da carga de acidez e dos metais contidos.

Palavras-chave: Minas de carvão subterrâneas abandonadas, Injeção alcalina, tratamento passivo de drenagem ácida de mina (DAM)

ABSTRACT

The infiltration of rain water into abandoned underground coal mines is one of the main environmental impacts related to the coal mining activity in Santa Catarina. The recharged of the water to the underground mines are the fractures of tectonic origin and, mainly, the fractures formed by the collapse of pillars. As soon as have contact to the underground environment water becomes acidified by the presence of the products of the oxidation of pyrite causing the reduction of the surface and underground water availability, the contamination of the springs and rivers that receive acid drainage (AMD) from the mine. The costs of pumping, chemical treatment of water, as well as the diverting of upstream waters, sealing fractures, topographical conformation and surface remediation have high costs. In the abandoned Lazzarin and Rio Bonito mines located in Lauro Müller / SC, groundwater flows directly in contact with the Barro Branco coal seam on remaining pillars, generating acid drainage with discharge in the Bonito River through hillside galleries. The project proposed by the Clean Coal Technological Center (CTCL) of the Benefit Association of the Carboniferous Industry of Santa Catarina (SATC) foresees the partial filling of underground galleries with alkaline materials reducing the volume of outflow water and improving its quality by the addition of alkalinity. The AMD collected from the upwelling points will be treated through a passive system composed of anoxic limestone drains with polishing in an aerobic wet lands. The proposed system provides for a reduction of approximately 30% of the flow rate, as well as removal of over 80% of the contained metal load. Total affected areas with direct results in reducing the acid and pollutant load associated with AMD in the Rio bonito watershed.

Key-words: Abandoned underground coal mines, alkaline injection, passive treatment of acid mine drainage (AMD)

1. INTRODUÇÃO

A atividade de mineração de carvão em Santa Catarina vem sendo desenvolvida em parte da jazida através da lavra em subsolo e foi realizada com a recuperação parcial ou total de pilares até 1990.

Como consequência desse método de lavra houve o fraturamento da cobertura da camada de carvão, resultando extensas áreas onde a água de precipitação infiltra diretamente para o interior das minas.

O contato da água com o carvão e as rochas encaixantes causa a geração de drenagem ácida de mina (DAM) através das reações de oxidação e hidrólise dos minerais sulfetados. Nas minas onde a água das minas alcança a superfície, a DAM atinge os rios configurando impacto ambiental em toda a subacia (BRASIL, 2016).

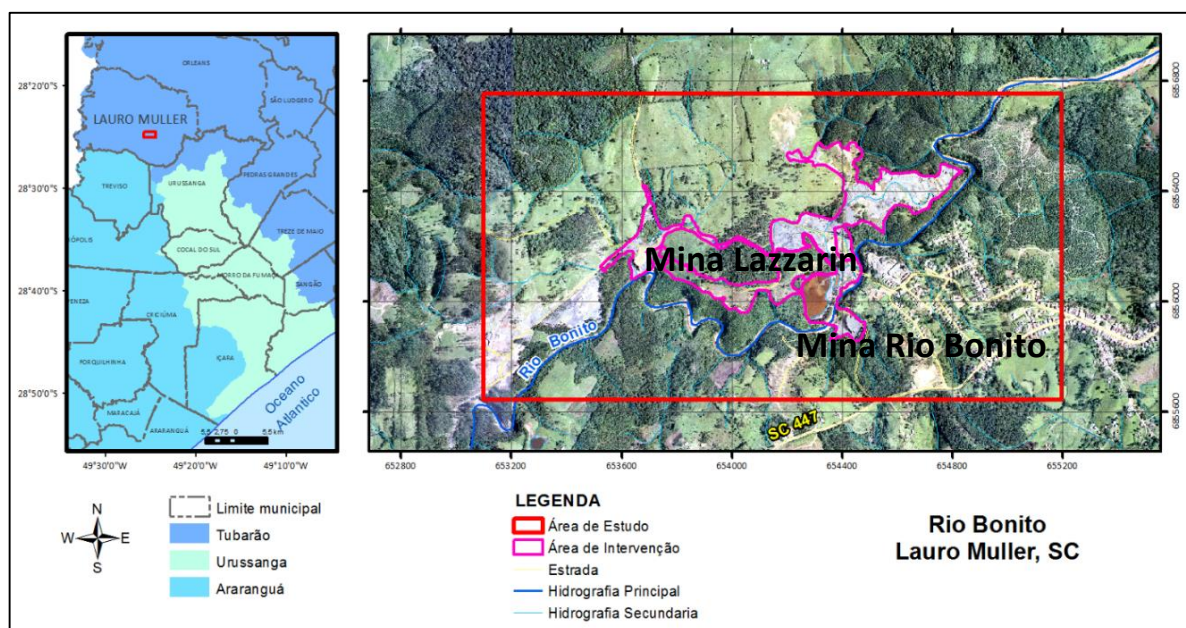
Neste trabalho apresenta-se um projeto de tratamento de drenagem ácida da Mina Rio Bonito desenvolvido pelo Centro Tecnológico de Carvão Limpo (CTCL) da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC), o qual introduz o conceito pioneiro de injeção alcalina em subsolo acompanhado de um circuito de tratamento passivo composto por drenos anóxicos de calcário e *wetland*.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO, HIDROGEOLÓGICO E DA MINERAÇÃO

No local denominado Rio Bonito, Município de Lauro Müller/SC, a mineração da camada de carvão em subsolo foi realizada em duas minas denominadas Lazzarin e Rio Bonito (Figura 1). Nessas minas foi adotado o método de lavra com recuo de pilares, o qual propicia notável aproveitamento das reservas da jazida. Nesse método, o desmonte da camada de carvão é feito através de câmaras e pilares e ao final do desenvolvimento dos painéis ou eixos, os pilares são minerados parcial ou totalmente. O projeto de tratamento de DAM foi elaborado para a mina Rio Bonito que tem extensão de 122,34 hectares de acordo com dados do Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) citado no diagnóstico ambiental (CTCL, 2015).

O perfil geológico local é formado por uma sequência de camadas de arenitos finos, médios e grossos cinza claros a brancos intercaladas por camadas de siltito, folhelhos escuros e carvão que pertencem a fácies superior do Membro Siderópolis da Formação Rio Bonito (KREBS, 2004). Sobrepoem-se a essa sequência, camadas de siltitos e siltitos arenosos do intervalo inferior da Formação Palermo.

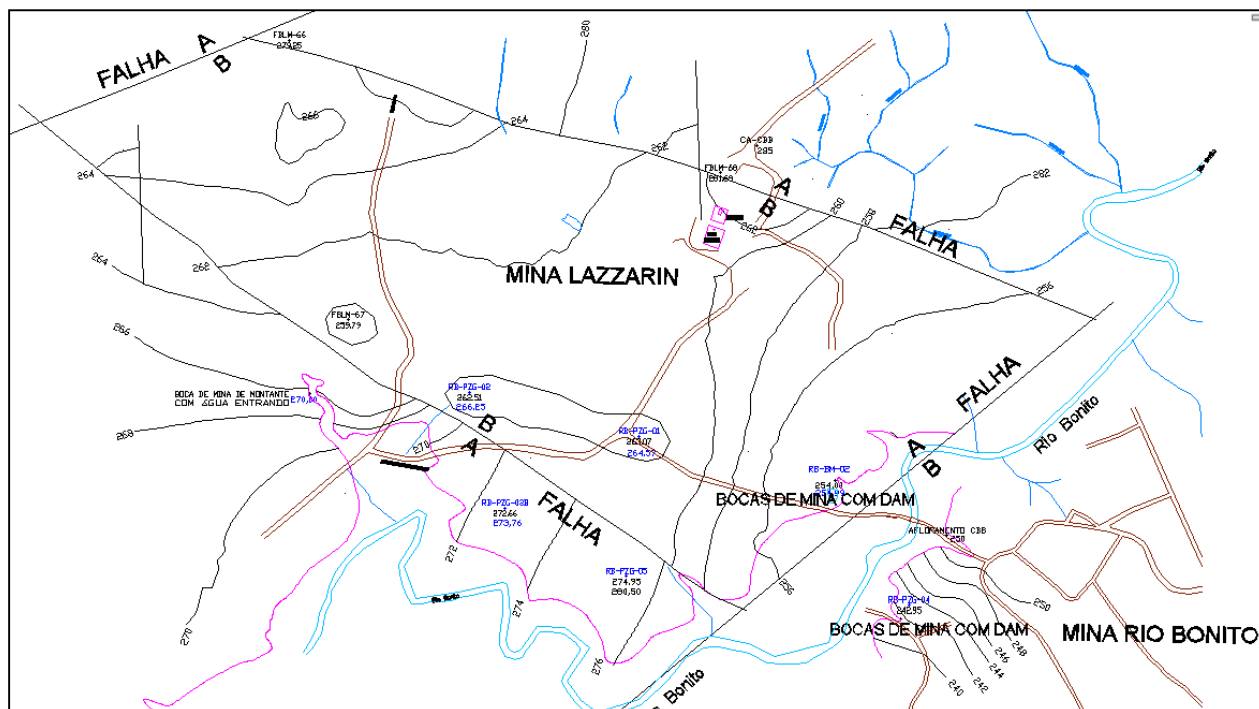
Figura 1 - Localização das minas Lazzarin e Rio Bonito em Lauro Müller/SC.



Estruturalmente, essas minas estão compartimentadas em blocos afundados limitadas por sistema de falhas locais com orientações preferenciais N40°E e N50°W. Os movimentos não lineares associados com as falhas condicionaram.

diretamente, o mergulho das camadas, verificando-se que no bloco NW as camadas mergulham de NW para SE e no bloco SE mergulham de NE para SW (Figura 2).

Figura 2 - Mapa estrutural das Minas Lazzarin e Rio Bonito



Fonte: CTCL (2015)

A hidrogeologia local é caracterizada pelo ciclo de recarga, circulação e descarga da água subterrânea que ocorre dentro dos limites da área minerada em subsolo e por tratar-se de uma mina desenvolvida com recuo de pilares, os aquíferos freático e profundo encontram-se conectados.

As áreas de recarga são representadas pelas zonas com subsidência das minas ocorrendo infiltração direta da água da chuva para as galerias em subsolo (Figura 3).

Na mina Rio Bonito a circulação da água ocorre de NE para SW e na Mina Lazzarin de NW para SE seguindo a topografia do piso da camada de carvão, ou seja, é, estruturalmente, controlada pelo mergulho das camadas.

A descarga da água subterrânea ocorre através de galerias de encosta que no caso da Mina Rio Bonito estão, parcialmente, obstruídas pelo

colapso do teto imediato, fluindo diretamente para o rio Bonito (Figura 4).

A recarga e a circulação da água subterrânea ocorrem, principalmente, no perfil da Formação Rio Bonito, que se constitui na unidade aquífera que apresenta a maior representatividade, haja vista que sua área aflorante ocupa 154,10 hectares da área estudada.

No centro-leste, esse aquífero ocorre de forma livre e a água subterrânea circula numa sequência de topo para base formada por camadas de arenitos finos a grossos que se encontram abaixo da lapa da Camada de Carvão Barro Branco. A recarga ocorre por infiltração direta da água da chuva na região com exposição de afloramentos e por drenança das Formações Palermo e Serra Geral e a descarga, diretamente, no rio Bonito.

Figura 3 - Efeitos do método de lavra com recuo de pilares no solo e subsolo formando áreas com subsidência onde ocorre infiltração de água da chuva para o subsolo



Fonte: CTCL (2015)

Figura 4 - Detalhe das surgências de DAM das galerias de encosta da Mina Rio Bonito



Fonte: CTCL (2015)

Essa sequência é sobreposta por um manto de alteração arenoso friável cuja espessura varia de 2,85 m a 5,30 m.

O nível estático do aquífero livre estabiliza sempre abaixo do manto de alteração, encontrando-se em maior profundidade na sequência em que predomina o arenito poroso.

No centro-oeste da área estudada a água subterrânea associada com a Formação Rio Bonito atinge as galerias das minas Lazzarin e Rio Bonito através de fraturas formadas a partir dos desmontes de pilares. Os poços monitores situados nessa área não apresentaram água durante todo o período monitorado de 2013 a 2015.

3. DIAGNÓSTICO AMBIENTAL

No diagnóstico ambiental da área da Mina Rio Bonito, os estudos do meio físico compreenderam, além dos mapeamentos geológico, hidrogeológico, o monitoramento dos recursos hídricos através de medidas de vazão e coleta de amostras da água surgente nas bocas de minas e de medidas de nível e coleta de água no subsolo através de um poço monitor aprofundado até a galeria (Figura 4).

As vazões da água surgente nas bocas de minas variaram de 18,0 m³/h a 36,0 m³/h no período monitorado e os resultados das análises físico-químicas demonstram características hidroquímicas de drenagem ácida com elevadas concentrações de acidez, metais e sulfato (Tabela 1).

Tabela 1 - Dados de monitoramento das bocas de minas e do poço monitor da Mina Rio Bonito

Parâmetros	Poço monitor			Bocas de mina		
	Min	Max	Média	Min	Max	Média
Prof. do NA (m)	4,00	5,00	4,50			
Vazão (m³/h)				18,00	36,00	27,00
pH	4,30	5,50	4,90	3,40	5,50	4,45
Acidez total (mg/l)	109,00	160,00	134,50	69,00	196,00	132,50
Ferro Total (mg/l)	15,00	36,00	25,50	20,00	30,00	25,00
Ferro 2+ (mg/l)	21,00			20,00		
Manganês (mg/l)	0,94	1,47	1,21	1,15	1,44	1,30
Alumínio (mg/l)	0,30	3,50	1,90	3,70	15,40	9,55
Sulfatos (mg/l)	80,00	161,00	120,50	183,00	315,00	249,00

Fonte: CTCL (2015)

No sistema aquífero local a água subterrânea apresenta três níveis de circulação:

- O primeiro ocorre em nível subsuperficial ou freático até 15 metros de profundidade correspondendo ao manto de alteração do perfil geológico das Formações Rio Bonito e Palermo. Nas áreas das minas Lazzarin e Bonito onde foi realizada a lavra com recuo de pilares esse intervalo está conectado com as galerias através das fraturas induzidas pelo recuo de pilares;
- O segundo ocorre em nível profundo corresponde ao maciço rochoso fraturado da Formação Rio Bonito abaixo do manto de alteração até a profundidade de 30,5 metros. Nas áreas das minas Lazzarin e Bonito onde foi

realizada a lavra com recuo de pilares esse intervalo está conectado com as galerias;

- O terceiro corresponde à circulação da água subterrânea no interior das galerias das minas Lazzarin e Rio Bonito.

A caracterização hidrodinâmica do sistema aquífero local foi realizada através de ensaios de bombeamento fora da área minerada. A metodologia adotada nesses testes foi a proposta por Halford *et al.* (2002), cujo embasamento teórico para o cálculo da transmissividade e condutividade hidráulica foi obtida a partir de Theis (1935) e Cooper *et al.* (1946). Os resultados estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis hidrodinâmicas do sistema aquífero local

Teste de bombeamento	Q (L/min)	Rebaixamento	Recarga	Capacidade Específica (L/m/min)	Kh	Kv	Sistema Aquífero Local
		(m/min)	(m/min)		(cm/s)	(cm/s)	
1	1,10	0,005	0,003	0,11	6,51E-05	1,41E-07	Freático Rio Bonito
2	1,10	0,089	0,017	0,11	8,80E-06	3,53E-08	Freático Rio Bonito
3	1,03	0,029	0,005	0,07	1,50E-04	1,38E-07	Freático Rio Bonito
4	1,03	0,074	0,015	0,08	5,00E-06	3,35E-08	Freático Rio Bonito
5	1,11	0,041	0,006	0,13	6,90E-05	2,43E-08	Freático Palermo
6	7,50	0,039	0,025	1,90	1,10E-04	1,71E-08	Profundo Fraturado Rio Bonito

Q= vazão; Kh = condutividade hidráulica; Kv= coeficiente de permeabilidade vertical equivalente

Fonte: CTCL (2015)

Os resultados da estimativa do coeficiente de permeabilidade vertical equivalente (Kv) variaram de $1,38 \times 10^{-7}$ cm/s a $3,5 \times 10^{-8}$ cm/s e demonstram que a sequência de arenitos e siltitos que formam o sistema aquífero local onde houve mineração subterrânea apresentam baixa permeabilidade vertical.

Os resultados da condutividade hidráulica (Kh) variaram de $1,5 \times 10^{-4}$ cm/s a $8,8 \times 10^{-6}$ cm/s, constatando-se que, em média, a permeabilidade na direção subhorizontal é 1000 vezes maior que a permeabilidade na direção vertical.

O segundo nível de circulação da água subterrânea corresponde ao intervalo entre as camadas de carvão Barro Branco e Bonito Inferior, cuja espessura varia de 30 a 55 metros. Nesse intervalo ocorre uma sequência de camadas de arenitos finos, médios e grossos e, a despeito da textura porosa, o armazenamento e circulação da água subterrânea ocorre, principalmente, em zonas de falha/fratura muitas vezes associados com intrusões de diabásio.

O terceiro nível de circulação da água subterrânea corresponde ao horizonte minerado da

camada de carvão Barro Branco compreendendo os perímetros das minas Lazzarin e Bonito. No âmbito dessas unidades mineiras a água subterrânea circula pelas galerias deixadas pela extração da camada de carvão, hidráulicamente conectadas com o primeiro e o segundo nível, através das fraturas formadas a partir da recuperação dos pilares.

O modelo de fluxo da água subterrânea até a profundidade de 15 metros está representado pelo esboço do Mapa Potenciométrico (Figura 5).

Figura 5 - Mapa potenciométrico da água subterrânea no aquífero freático Rio Bonito até a profundidade de 15 metros. Os perímetros das minas Lazzarin e Rio Bonito estão representados pelos polígonos na cor vermelha e o fluxo do aquífero freático pela linha na cor azul

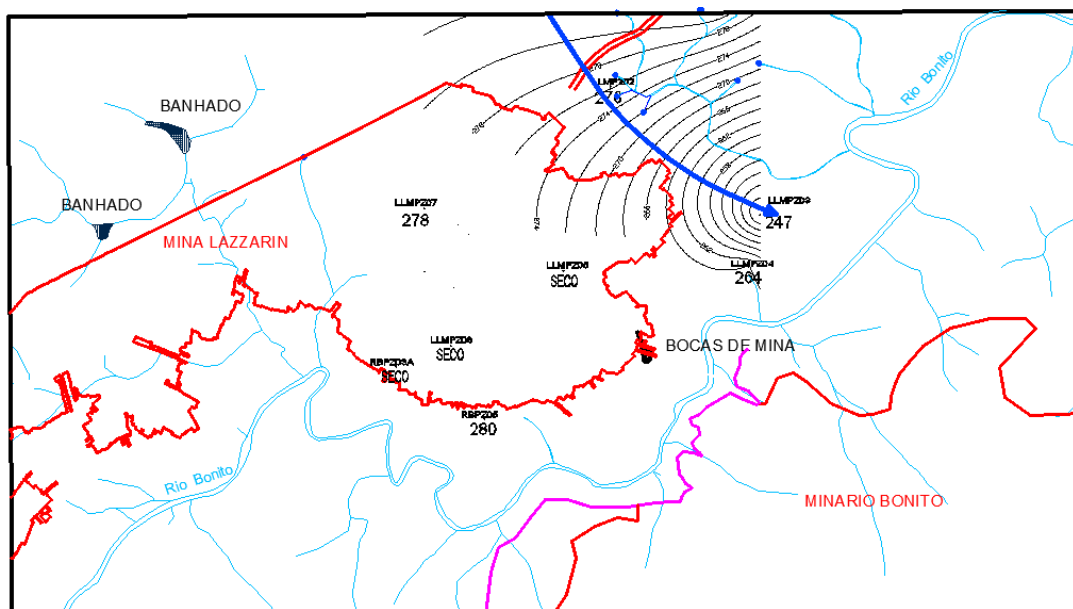


Tabela 3 - Hidroquímica do aquífero freático Rio Bonito fora da área minerada das Minas Lazzarin e Rio Bonito

Poço Monitor Freático	Campanha	Data	pH	Acidez (mg/L)	Turbidez (NTU)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês dissolvido (mg/L)	Alumínio dissolvido (mg/L)	Sulfato
1	1 ^a	25/10/2013	5,9	42,3	1,30	< 0,006	0,02	< 0,006	5,54
	2 ^a	16/04/2014	5,1	29	5,55	0,014	0,026	0,0558	< 4,0
	3 ^a	07/10/2014	4,9	41,4	<4	<0,006	0,017	<0,006	<4
2	1 ^a	25/10/2013	5,5	36,9	3,84	0,579	0,075	0,0366	17,9
	2 ^a	16/04/2014	4,9	29	15,2	0,032	0,019	0,385	< 4,0
	3 ^a	07/10/2014	4,8	34,3	<4	<0,006	0,033	0,265	<4
3	1 ^a	25/10/2013	4,7	41,4	2,21	< 0,006	0,155	0,025	12,8
	2 ^a	16/04/2014	4,8	42,5	38,5	0,025	0,090	0,0818	< 4,0
	3 ^a	07/10/2014	4,8	33,3	<4	<0,006	0,082	0,09	<4
3	1 ^a	25/10/2013	3,8	411	9,29	6,089	0,399	18,7	25,4
	2 ^a	16/04/2014	5,0	38,6	7,49	0,079	0,124	1,637	86,7
	3 ^a	07/10/2014	4,2	158	68,3	0,497	0,312	79,8	80,5
4	1 ^a	25/10/2013	5,7	61,2	11,9	0,178	0,284	0,573	16,6
	2 ^a	16/04/2014	5,2	42,5	172	0,094	0,067	0,129	30,7
	3 ^a	07/10/2014					**		
5	1 ^a	25/10/2013	5,2	24,3	10,7	0,358	0,871	0,204	81,7
	2 ^a	16/04/2014	4,8	32,8	29,8	0,019	0,172	0,0357	20,1
	3 ^a	07/10/2014					**		
6	1 ^a	25/10/2013	6,1	30,6	1,94	< 0,006	0,963	< 0,006	18,6
	2 ^a	16/04/2014	5,9	44,4	20,1	3,618	0,768	0,0214	31,3
	3 ^a	07/10/2014	5,2	83,8	95,5	2,18	0,511	0,212	14,8
7	1 ^a	18/08/2014	5,2	87,6	306,5	7,55	0,48	N.D.	93,2
	2 ^a	10/09/2014	5,4	10,5	232,5	6,14	0,50	3,13	42,3
	3 ^a	08/10/2014	5,5	214,2	0,10	3,6	0,29	N.D.	40,2
	4 ^a	04/11/2014	5,0	65	205	4,62	0,39	0,10	46
	5 ^a	18/12/2014	4,8	185,9	162	6,83	0,24	0,47	30,9
	6 ^a	12/01/2015	4,7	102	156,56	5,06	0,38	0,50	6,4
	7 ^a	12/02/2015	4,9	150,2	163,5	6,38	0,42	N.D.	27,4
	8 ^a	09/03/2015	4,8	198,8	9,70	5,00	0,37	4,75	25

Fonte: CTCL (2015).

O terceiro nível de circulação da água subterrânea corresponde ao horizonte minerado da camada de carvão Barro Branco compreendendo os perímetros das minas Lazzarin e Bonito, onde a circulação da água subterrânea ocorre nas galerias em contato direto com a camada de carvão Barro Branco e cobertura imediata em caimentos, sendo, portanto, nessa condição, semelhante a um aquífero de conduto.

O modelo de fluxo da água subterrânea no interior das galerias das minas Lazzarin e Rio Bonito foi elaborado a partir das cotas da lapa dos furos de sondagem realizados para a instalação da rede de poços monitores, assim como a partir de levantamentos topográficos dos afloramentos, sendo representado pelo esboço do mapa potenciométrico (Figura 6).

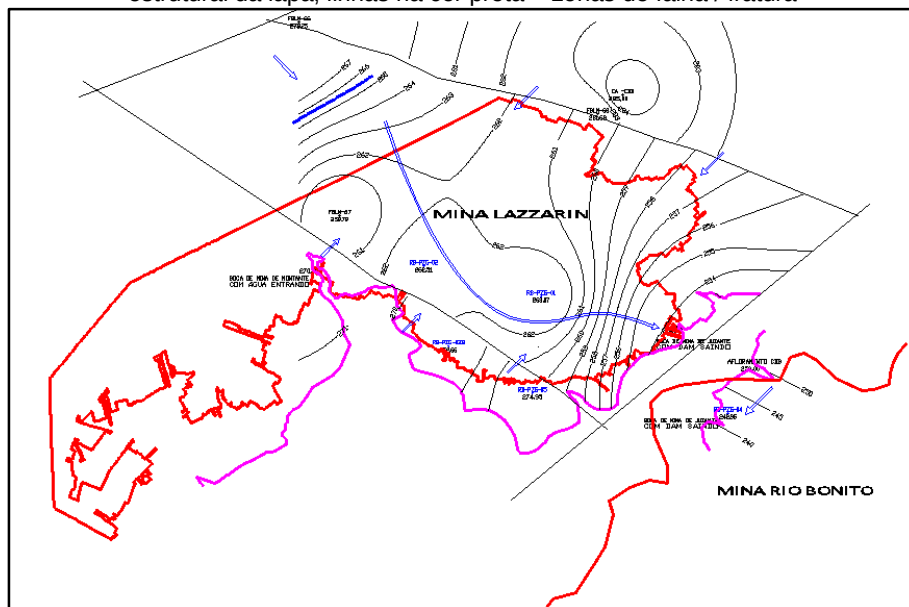
As principais áreas de recarga do aquífero profundo estão localizadas onde foi realizada a lavra com recuo de pilares e nas zonas de falha de direção noroeste.

As áreas de descarga da água subterrânea das minas em questão ocorrem em bocas de minas, sendo que a vazão está diretamente relacionada com a extensão da área de recarga, sendo, portanto, muito maior na mina Lazzarin.

A Tabela 4 mostra os dados analíticos da água subterrânea que circula nas galerias das minas Lazzarin e Rio Bonito com parâmetros escolhidos com o objetivo de avaliar impacto de drenagem ácida.

Os resultados das análises físico-químicas mostram que a água subterrânea que circula nas galerias apresenta elevadas concentrações de acidez, metais e sulfato, sendo mais elevadas na mina Lazzarin do que na mina Rio Bonito. Os expressivos volumes de descarga dessas minas constituem as principais fontes primárias de contaminação do Rio Bonito com DAM.

Figura 6 - Mapa potenciométrico da água subterrânea no aquífero profundo em galerias das Minas Lazzarin e Rio Bonito. Polígonos na cor vermelha = minas Lazzarin e Rio Bonito; vetores na cor azul = direção e sentido da água subterrânea; linha na cor magenta = afloramento da camada Barro Branco; linhas cotada na cor preta = contorno estrutural da lapa; linhas na cor preta = zonas de falha / fratura



Fonte: CTCL (2015).

Tabela 4 - Resultados das análises físico químicas do aquífero profundo da Minas Lazzarin e Rio Bonito.

Poço Monitor Profundo	Data	pH	Acidez (mg/L)	Turbidez (NTU)	Ferro dissolvido (mg/L)	Manganês dissolvido (mg/L)	Alumínio dissolvido (mg/L)	Sulfato (mg/L)
Mina Lazzarin	18/08/14	3,4	118,4	422,5	8,35	2,43	N.D.	389
	10/09/14	3,6	84	182	14,52	2,32	5,74	368,2
	08/10/14	5,5	185,8	137,5	35,53	1,93	N.D.	414,4
	04/11/14	4,2	40	457,5	7,57	1,64	1,36	343,8
	18/12/14	5,8	180,6	476	52,88	1,91	N.D.	465
	12/01/15	4,5	96,9	195,5	15,87	2	1,38	214,7
	12/02/15	5,4	110,2	88,8	28,71	1,2	N.D.	297,8
	09/03/15	5,8	145,5	18,8	26,98	1,5	2,58	347
Mina Rio Bonito	18/08/14				*			
	11/09/14				*			
	08/10/14				*			
	04/11/14				*			
	18/12/14	5	110,3	0,10	15,29	0,94	N.D.	80,2
	12/01/15	4,3	153	0,10	27,59	1,47	0,30	94,4
	12/02/15	5,5	109,2	493	36,46	1,14	N.D.	124,6
	09/03/15	5,4	160	315,5	27,67	1,08	3,5	161,1

Fonte: CTCL (2015).

4. PROJETO DE TRATAMENTO DA DAM

4.1 TRATAMENTO PASSIVO

Apesar de bem conhecido em diversas partes do mundo (HAMILTON *et al.*, 1995, GUSEK *et al.*, 1996), o uso de sistemas de tratamento passivo para águas ácidas de mina é relativamente recente no Brasil (GOMES *et al.*, 2015).

Os sistemas passivos se valem da adição de materiais alcalinos e/ou de processos naturais para

adicionar alcalinidade, aumentar o pH e, consequentemente, precipitar os metais presentes na solução. São sistemas que não requerem a utilização de energia elétrica e se caracterizam pela baixa necessidade de manutenção e operação.

A qualidade dos efluentes resultantes da percolação da água superficial no interior da mina Rio Bonito, foi monitorada por meio da amostragem da água efluente das bocas de mina, e daquelas coletadas no poço monitor que intercepta a galeria

subterrânea. Os resultados do monitoramento foram mostrados na Tabela 4.

Os dados de qualidade que melhor representam a situação da água que será encaminhada para o tratamento são aqueles obtidos no poço monitor. No interior da mina a água ainda não entrou em contato com o oxigênio da superfície e tampouco com as águas superficiais, de forma que suas características físico-químicas, possivelmente, não são alteradas.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados no projeto de tratamento passivo da Mina Rio Bonito

Parâmetros	Valores médios
Vazão (m ³ /h)	27,00
Acidez (mg/l)	134,50
pH	4,90
Fe total (mg/l)	25,50
Fe ⁺² (mg/l)	20,00
Mn (mg/l)	1,21
Al (mg/l)	1,90
Sulfatos (mg/l)	120,00

Fonte: CTCL (2016).

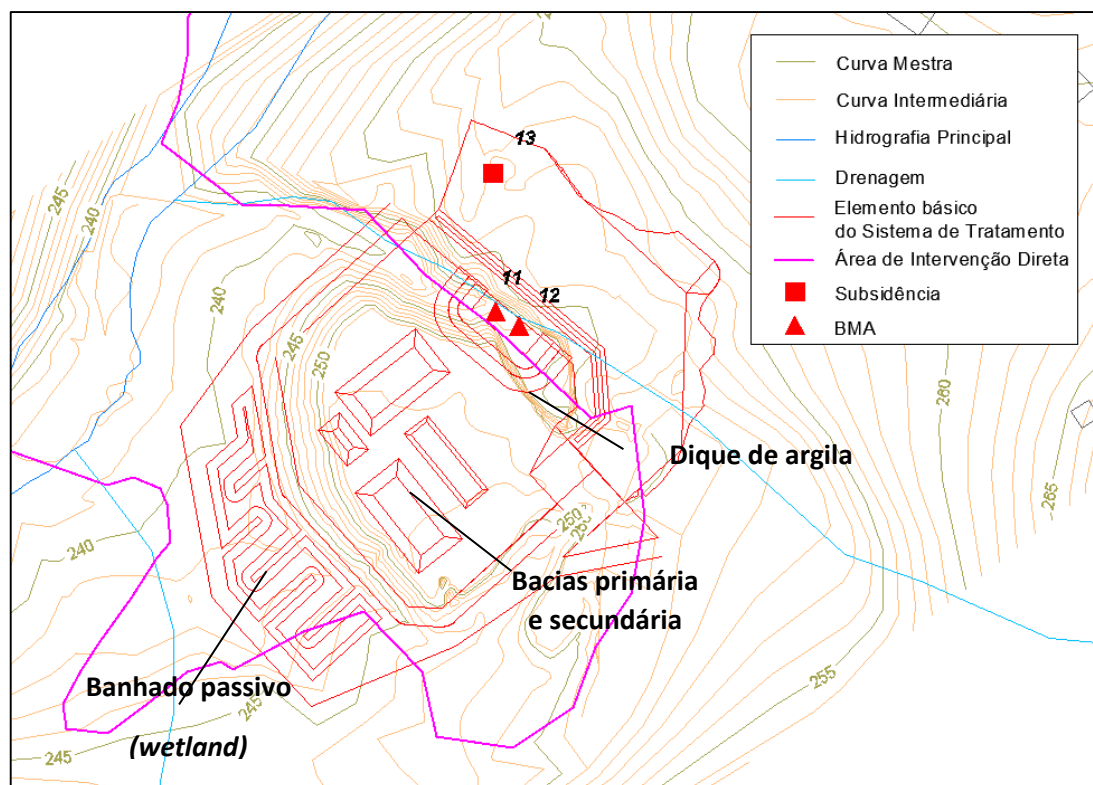
4.1.1 Características da DAM

Na caracterização da DAM foram adotados para dimensionamento do tratamento: a vazão média das bocas de minas e os valores médios de concentração de metais obtidos no poço monitor que intercepta a galeria subterrânea (Tabela 5).

4.1.2 Conceitos Propostos Para o Tratamento Passivo

As condições do local, e os valores de pH, acidez e carga de metais obtidos, são adequados ao uso de tratamentos passivos, cujo projeto está representado na Figura 7.

Figura 7 – Projeto de tratamento passivo para a drenagem ácida da Mina Rio Bonito



Fonte: CTCL (2016)

Os conceitos de tratamento passivo do projeto incluem as seguintes etapas:

- Abertura da área de subsidência com remoção do solo, do material de cobertura da camada de carvão, e do material de preenchimento da galeria e

construção do primeiro dreno anóxico de calcário (injeção alcalina). Após a limpeza será realizado o preenchimento das aberturas com calcário dolomítico granulado (25 a 40 mm) ou, alternativamente, escória de fundição que se constituem em materiais alcalinos que visam ao aumento do pH da água de subsolo. A abertura será recoberta com argila compactada de forma a promover o fechamento e a selagem da galeria. Na superfície será feita reconformação topográfica impedindo o fluxo de águas superficiais para este local. Com este procedimento é esperada a redução da vazão nas bocas de minas e a elevação do pH do efluente;

- Os rejeitos depositados nas proximidades das bocas de minas serão removidos até a cota 247 m, para a implantação do tratamento passivo. Os rejeitos retirados deste local serão utilizados para constituição de bancada na cota 245 m, necessária para a construção do banhado passivo;
- O fechamento das bocas será feito por meio de um dique de argila compactada, que irá provocar a elevação de 2,50 m no nível da água (cota 247 m), propiciando um selo hidráulico que impedirá a entrada de oxigênio e que certamente irá reduzir a vazão de saída da drenagem ácida;
- O segundo Dreno Anóxico de Calcário (DAC), será construído junto às bocas de mina, aproveitando o espaço formado pela construção do dique de argila. Como as bocas de mina estarão completamente submersas pela elevação da água, não haverá contato do oxigênio com a água, evitando assim a oxidação do ferro ferroso (Fe^{2+}). Dentro do dique será colocado calcário com granulação grossa que permitirá a continuidade do fluxo da água oriunda do subsolo, ao mesmo tempo que aportará alcalinidade por dissolução progressiva;

- A água das bocas de minas irá extravasar em vertedouro (tubo) e seguirá por gravidade para a bacia de decantação primária. Nessa bacia, em função da elevação do pH ocasionada pela adição de calcário, irão precipitar os metais contidos na solução;
- Da bacia de decantação a água já com pH elevado e com uma carga de acidez e metais (sobretudo ferro férrico, e alumínio) reduzidas será direcionada para um leito de rochas onde as algas presentes poderão auxiliar na remoção de manganês. Caso seja necessário, poderá ser adicionada uma segunda carga de alcalinidade na saída deste leito mediante adição de cal ou soda;
- Do leito de rocha, o fluxo tratado será direcionado para a bacia de decantação secundária onde ocorrerá a segunda etapa de precipitação dos metais;
- Da bacia de decantação secundária a água será direcionada para um banhado passivo aeróbico, onde ocorrerá o polimento final com remoção de sólidos e metais ainda remanescentes e parte dos sulfatos contidos em solução. Do banhado passivo a água fluirá até o leito do rio Bonito.

Neste banhado a ação das raízes das plantas e dos micro-organismos presentes permitem a remoção de metais porventura ainda presentes em solução, bem como a redução de parte do sulfato presente na água.

A construção de um substrato adequado, que sustentará a vegetação, é de suma importância, pois o mesmo auxiliará na remoção dos metais, através da adsorção destes em suas partículas, em consonância com uma vegetação ideal implantada no banhado.

Deverá ser introduzida a espécie conhecida como taboa (*Typhadomingensis*), que se apresenta eficaz no tratamento final de efluentes. A introdução da vegetação deverá ser realizada a partir da obtenção de mudas em banhados naturais localizados no entorno do projeto. Deve-se

selecionar mudas de indivíduos mais jovens para o plantio.

As taxas de remoção de acidez e metais previstas no projeto de tratamento da DAM da Mina Rio Bonito são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Taxas de remoção sistemas de tratamento passivos previstas para o projeto de tratamento passivo da DAM na Mina Bonito

Contaminante	Taxa de remoção
Mn	66%
Fe	97%
Acidez	89%

Fonte: CTCL (2016)

5. CONCLUSÕES

A mineração de carvão com método de lavra no qual os pilares são desmontados resultou na formação de extensas áreas recarga direta da água de precipitação para o interior das minas.

No âmbito dos limites minerados com esse método de lavra formou-se um sistema aquífero que se caracteriza pela conexão entre os aquíferos freático e profundo, sendo que nesse último o fluxo da água ocorre nas galerias como se fosse aquífero de conduto.

O fluxo da água subterrânea nas galerias é controlado pela topografia do piso e no caso das Minas Lazzarin e Rio Bonito foi condicionada pela compartimentação tectônica local, de modo que a água flui de NW para SE na mina Lazzarin e de NE para SW na mina Rio Bonito.

Nessas minas a água subterrânea está contaminada com drenagem ácida e atinge a superfície, implicando significativo impacto ambiental à medida que sua descarga atinge a sub-bacia do Rio Bonito.

O projeto desenvolvido pelo CTCL contempla o tratamento da DAM surgente nas galerias de encosta da Mina Rio Bonito através de injeção alcalina em subsolo e um circuito composto de drenos anóxicos de calcário e banhados passivos com a expectativa de remover 89% da acidez e 97% dos metais e sulfato.

6. REFERÊNCIAS

BRASIL. **10º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais**. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma, 2016. 218 p.

CTCL – CENTRO TECNOLÓGICO SATC. **Projeto de Recuperação de Área Degradada. Diagnóstico Ambiental. Rio Bonito. Município de Lauro Müller/SC**, 2015, 145pp.

_____. **Projeto de Recuperação de Área Degradada. Subárea III. Rio Bonito. Município de Lauro Müller/SC**, 2016, 234pp

COOPER, H.H. & JACOB, C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. American Geophysical Union Transactions, v.27, 526-534.1946.

GOMES, C.J.B et al.: “Tratamento de DAM oriunda de Bocas de Minas Abandonadas – PROJCARVÃO, IV Seminário de Regional de Recuperação Ambiental de Áreas Impactadas pela Mineração de Carvão – Criciúma –SC, Outubro 2015;

GUSEK et al. **The challenges of designing, permitting and building a 1,200 gpm passive bioreactor for metal mine drainage**, West Fork mine, Missouri, 1996.

HALFORD, J.K. & KUNIANSKY, E.L. Documentation of Spreadsheets for the Analysis of Aquifer-Test and Slug-Test Data. United States Geological Survey. Open-File Report 02-197. 2002.

HAMILTON et al.: Passive treatment systems for the remediation of acid mine drainage, Wheal Jane, Cornwall, UK. 1996;

KREBS, A. S. J. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia do rio Araranguá, SC**. Florianópolis: UFSC, 2004. 375p. 2 v. (Tese de Doutorado) - Departamento de Geociências. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

THEIS, C.V. **The Relationship Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage**. American Geophysical Union, 1935. p.519-524.