



1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
 24 e 25 de novembro de 2021
 Belo Horizonte • MG • Brasil

1ST LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
 NOVEMBER 24-25, 2021 • BELO HORIZONTE • MG • BRAZIL

1^{ER} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA
 24-25 DE NOVIEMBRE DE 2021 • BELO HORIZONTE • MG • BRAZIL

PROMOÇÃO

ABAS - MG INAP SANAP

PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS NO TRATAMENTO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINA COM DEJETOS SUÍNOS

MSc Carlos Henrique Schneider
 UFRGS
 Belo Horizonte, 25 de Novembro de 2021

0





Western Canada



Coreia do Sul

Efluentes de mineração, especialmente os ácidos, **representam um desafio em escala mundial**, havendo um grande esforço no sentido de viabilizar a atividade mineraria, a partir da compatibilização de suas operações com a preservação da qualidade dos recursos naturais situados na área de influencia dos empreendimentos.



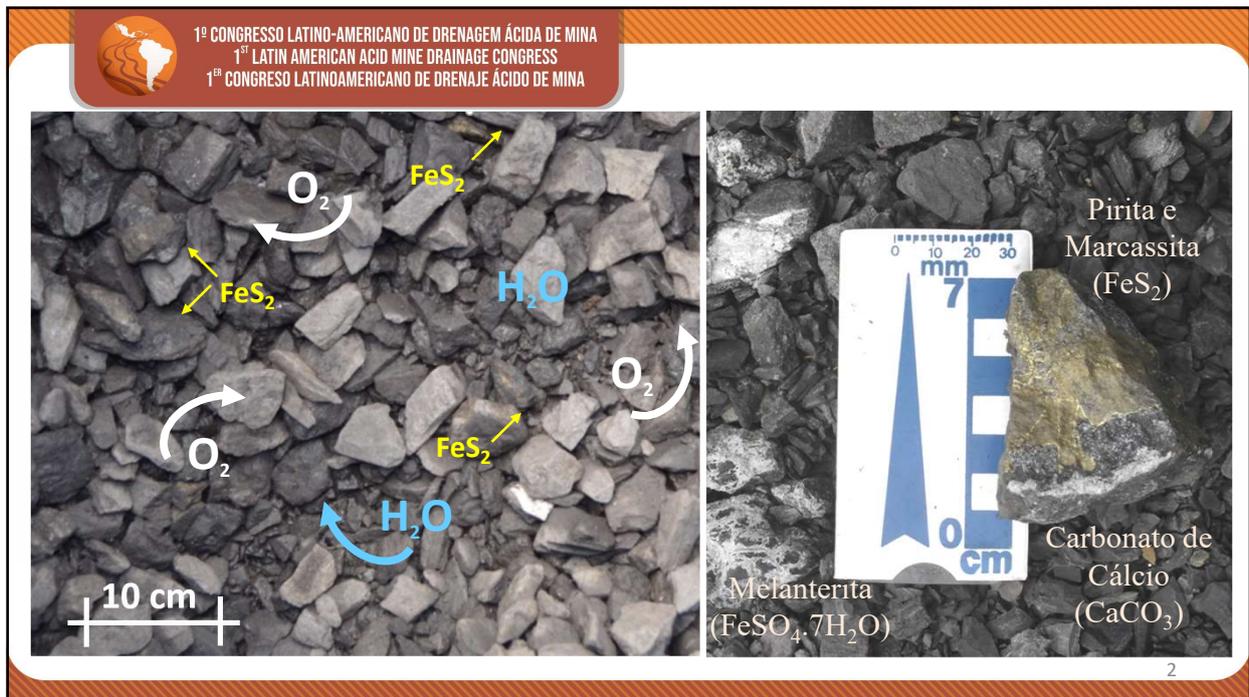
Portugal



Nova Zelândia

1

1



2



3



1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
 1º LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
 1º CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Medidas efetivas para controle, contenção e/ou tratamento da DAM são indispensáveis, e precisam ser estudadas já nas fases iniciais do projeto.

Fonte: Kontopoulos (1998)

Tabela 01 – Métodos de controle da drenagem ácida de minas

MÉTODOS EMPREGADOS NO CONTROLE DA D.A.M.	PREVENTIVOS	<ul style="list-style-type: none"> - Remoção dos sulfetos - Exclusão do oxigênio por cobertura úmida - Exclusão do oxigênio por cobertura seca - Aditivos alcalinos - Bactericidas
	DE CONTENÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> - Gestão dos fluxos hídricos (e.g. desvios de montante) - Estruturas de contenção (e.g. barragens, tamponamentos) - Paredes reativas porosas (e.g. filtros)
	REMEDIAÇÃO	<p>Sistemas Ativos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Neutralização e precipitação - Adsorção e troca iônica - Osmose reversa / nanofiltração - Eletro-diálise <p>Sistemas Passivos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Filtro Aeróbico de Calcáreo - Dreno Anóxico de Calcáreo - Barreira Permeável Reativa - Banhado Construído "wetland" - Reator de Fluxo Vertical

4

4



1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
 1º LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
 1º CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

REMEDIAÇÃO

Exemplo de Sistema Ativo
 Tipo *End of Pipe*
 Abordagem convencional



ETE
 West Virginia (USA)

5

5

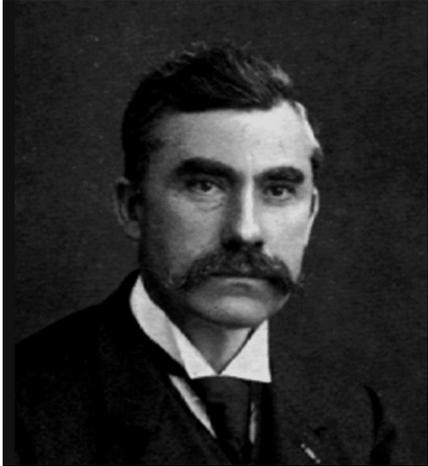


6

1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1st LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{er} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

3.2 – BACTERIAS REDUTORAS DE SULFATO

A primeira bactéria redutora de sulfato (BRS) isolada no mundo, foi identificada pelo biólogo holandês Martinus Beijerinck (foto) em 1895, que o descreveu como um microrganismo capaz de reduzir sulfato em sulfeto, ao qual deu o nome *spirillum desulphuricans*.



7

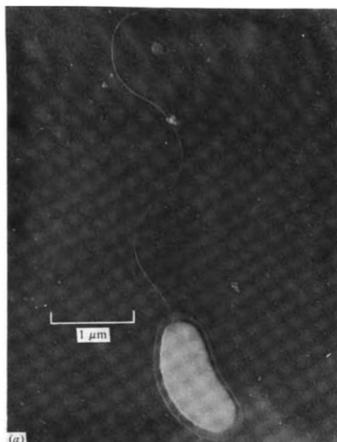
7



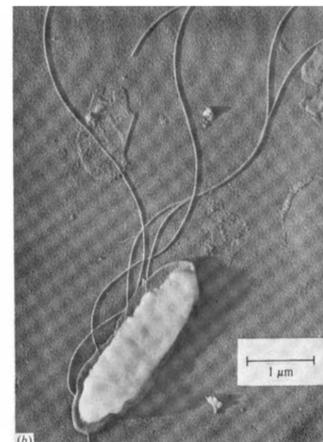
1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1st LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{er} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Trata-se de microrganismos muito simples, do gênero *Desulfovibrio*, caracterizados por respiração anaeróbica, capazes de realizar a redução desassimilativa do íon sulfato como acceptor terminal de elétrons, atuando como agente oxidante na metabolização da Matéria Orgânica.

O metabolismo destas BRS não assimila nenhum composto orgânico, e a maior parte do enxofre reduzido é excretada na forma hidrolisada do íon sulfeto.



(a) *Desulfovibrio desulfuricans*



(b) *Desulfotomaculum nigrificans*

(Fonte: Postage J.R. 1984)

8

8



1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1st LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{er} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

As condições propícias para o desenvolvimento das BRS dependem das reações de oxidação da matéria orgânica presente no meio.

Quando este meio for **aeróbio**, o oxigênio dissolvido é utilizado como acceptor terminal de elétrons. Somente a partir do consumo de todo este oxigênio o meio passa a condição **anaeróbia**, permitindo que outras moléculas como o **sulfato** e **nitrito** passem a atuar como aceptores de elétrons.

Sempre que houver vários receptores de elétrons predominando no meio, as oxidações bioquímicas ocorrem numa sequência que prioriza aquele que produz a maior quantidade de energia, que pela ordem são: 1) **oxigênio** dissolvido como receptor de elétrons; 2) o **nitrito** passa a ser utilizado, 3) o **sulfato**. Assim, na respiração anaeróbia, há transferência de hidrogênio da matéria orgânica para o sulfato, utilizando oxigênio combinado como acceptor de elétrons, formando produtos ainda oxidáveis como o HCO_3^{-1} e o CH_4 .

9

9



1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1º LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1º CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

3.3 – DEJETOS SUÍNOS

As BRS estão presentes no trato intestinal dos mamíferos, sendo os suínos uma importante fonte destas, além de alcalinidade, nutrientes e matéria orgânica.

Estudos divulgados pela EMBRAPA (1993), relata uma produção média diária de 2,5 kg de dejetos sólidos por unidade, com uma DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) na ordem de 30.000 a 52.000 mg/L, o que representa 260 vezes a DBO presente num esgoto doméstico.

O Estado de Santa Catarina é o maior produtor regional de suínos, com plantel na ordem 5,5 milhões de cabeças, avalia-se que o montante anual de dejetos gerados alcança cerca de 10^7 de m^3 ao ano.

10

10



1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1º LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1º CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA



11

11



4 - Experimento

Para esta apresentação, retomamos um trabalho desenvolvido por Madeira *et al.* (2005), no qual avaliamos diferentes dosagens de dejetos suínos em duas amostras representativas de DAM, as quais foram coletadas em duas diferentes minas subterrâneas de carvão, uma desativada (Amostra SR) e outra operacional (Amostra UM II).

O dejeito suíno foi obtido junto a uma granja local, com boa estrutura para coleta e manejo dos dejetos, sendo a amostra representativa de cinco dias de dejetos suínos.

As características físico-químicas destes dejetos, e da DAM tratada, estão relacionados nas Tabelas 2 e 3.

12

12



Tabela 02 - Valores médios Dejetos suínos

Concentração	Valor medido
Sólidos Totais (mg/L)	97146.67
Sólidos Voláteis (mg/L)	73930
Sólidos Fixos (mg/L)	23216.67
DQO (mg/L)	31050.71
N-NH ₄ (mg/L)	6922.17
N-NO ₂ (mg/L)	365.51
N-NO ₃ (mg/L)	15.51

Fonte: Santos, M. A. et al. (2007)

Tabela 03 - Caracterização das amostras de DAM

Parâmetro	SR	UM II
pH (27°C)	2,9	6,5
Acidez (mg/L CaCO ₃)	28,8	5,8
Fe (mg/L)	43,0	13,7
Al (mg/L)	24,5	0,4
Mn (mg/L)	1,7	1,5
Zn (mg/L)	0,4	0,0
Cu (mg/L)	0,1	0,1
Sulfato (mg/L)	818,9	1.100,0
Nitrato (mg/L)	36,2	0,1
OD (mgO ₂ /L)	4,0	1,2

Fonte: Madeira *et al.* (2005)

13

13

1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1º LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1º CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Pto	Condições experimentais
Pto1	$DQO=0,5 \times 0,67 \times SO_4^{-2}$
Pto2	$DQO=0,67 \times SO_4^{-2}$
Pto3	$DQO=2 \times 0,67 \times SO_4^{-2}$
Pto4	$DQO=2 \times 0,67 \times SO_4^{-2}$; pH=5,5; T=30°C.

Bateria 1 (SR)

Bateria 2 (UM II)

14

14

1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1º LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1º CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Concentrações estequiométricas estabelecidas para dosagem dos dejetos suínos, aplicadas em cada recipiente, foram determinadas em função da Demanda Bioquímica de Oxigênio, combinada a proporção de sulfato presente na DAM.

Pto	Condições experimentais
Pto1	$DQO=0,5 \times 0,67 \times SO_4^{-2}$
Pto2	$DQO=0,67 \times SO_4^{-2}$
Pto3	$DQO=2 \times 0,67 \times SO_4^{-2}$
Pto4	$DQO=2 \times 0,67 \times SO_4^{-2}$; pH=5,5; T=30°C.

Neste experimento foram estabelecidas 3 diferentes concentrações para cada bateria (Pontos 1, 2 e 3), acrescidas de uma solução padrão para fins de comparação (Ponto 4).

Nos 80 dias de observações destas reações, foram coletadas amostras periódicas da solução aquosa, as quais foram submetidas a análises visando a determinação dos parâmetros pH, Potencial Redox, Sulfato, Ferro total e DQO.

Os resultados estão lançados nos gráficos correspondentes a cada bateria, conforme indicado na sequencia.

15

15



5 – Resultados Obtidos

No período deste experimento, foi possível observar a evolução das reações bioquímicas, revelando a proliferação das bactérias num prazo variável entre o 5° e 20° dias.

Esta diferença reflete as diferenças de oxigênio dissolvido e pH, sendo necessário um período para que cada teste pudesse consumir todo oxigênio dissolvido na solução.

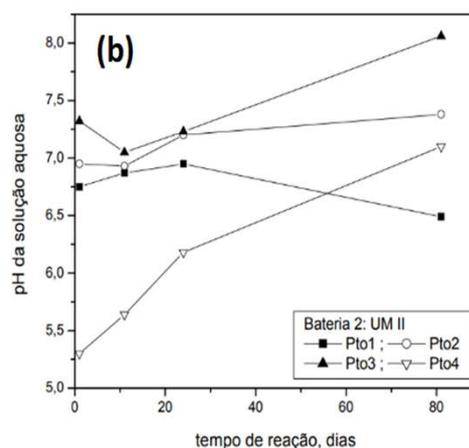
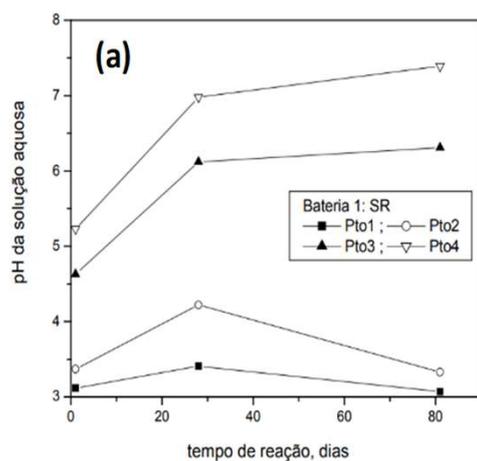
A partir da eliminação do oxigênio dissolvido, as bactérias anaeróbias passaram a “respirar” por transferência do hidrogênio da matéria orgânica para o sulfato, utilizando oxigênio combinado como acceptor de elétrons, formando produtos como o HCO_3^{-1} e o CH_4 ainda oxidáveis.

Neste momento a solução assumiu uma coloração negra, que em questão de horas cedeu lugar a um sobrenadante clarificado, restando ao fundo um fino depósito de material negro, provavelmente associados a íons sulfeto precipitado na forma de sulfetos metálicos.

Os gráficos que seguem mostram o comportamento físico-químico observado no período.

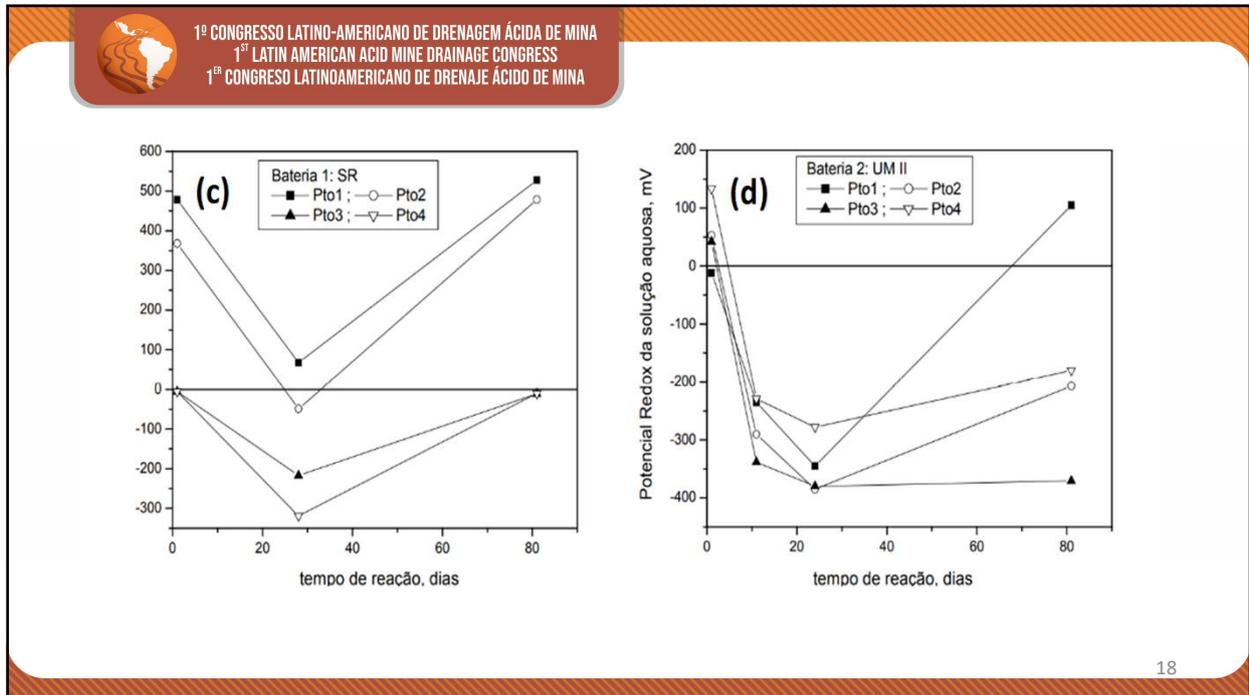
16

16

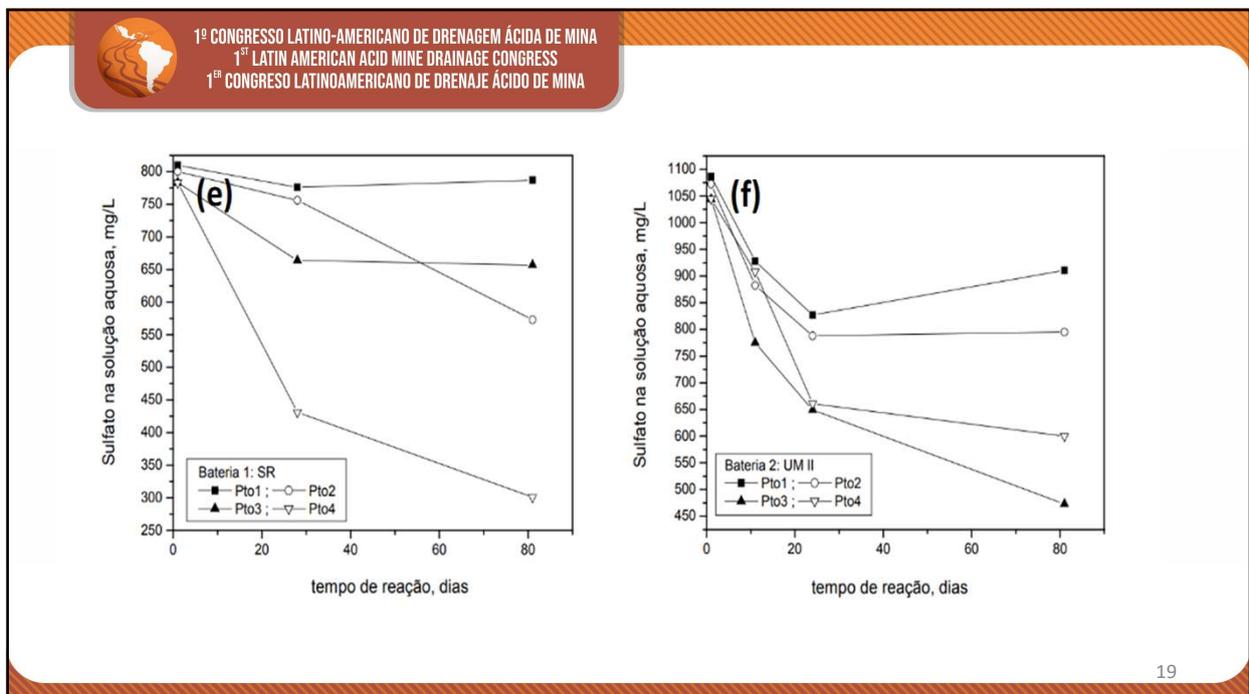


17

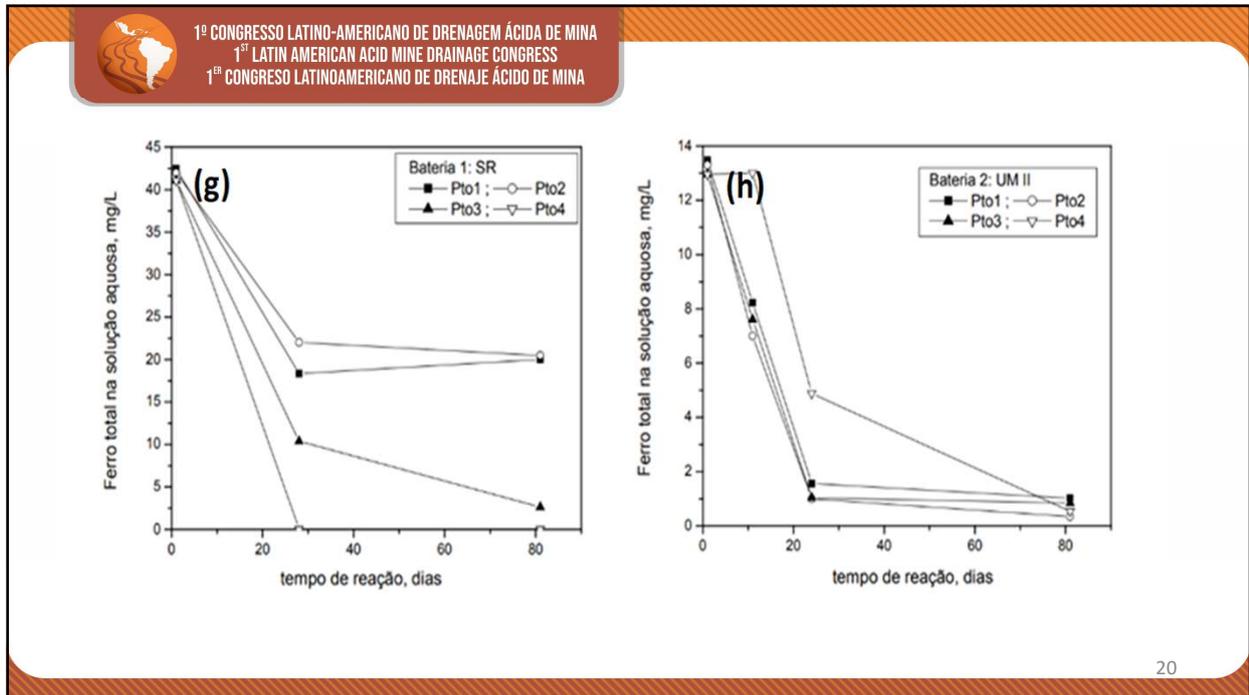
17



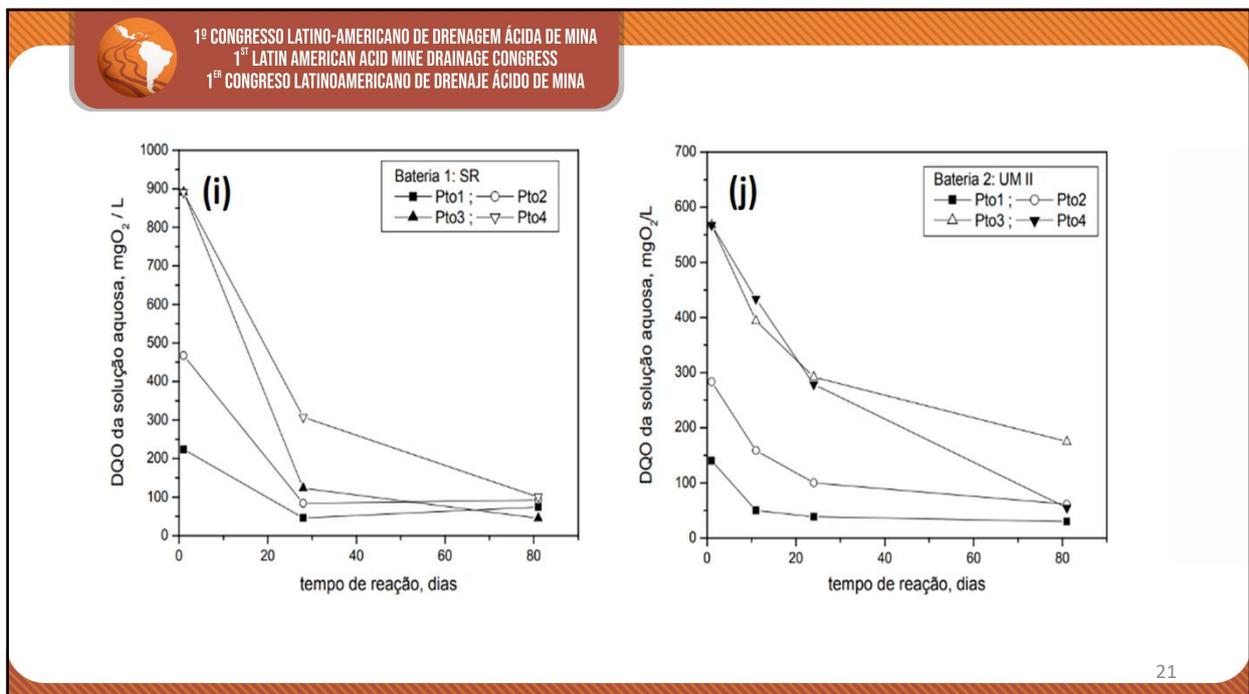
18



19



20



21



6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos aqui realizados nos levam às seguintes observações:

- Os dejetos suínos reúnem condições e características capazes de promover as reações de redução do sulfato em sulfeto, com a vantagem de acrescentar alcalinidade ao meio;
- O carbono presente na matéria orgânica, quando disponibilizado na quantidade estequiométrica, supre a necessária fonte de energia para a redução do sulfato;
- A necessária reposição destas fontes de carbono, poderá ser atendida por fontes como o etanol, lactato, cama de aviário, esterco, entre outros;
- A presença de oxigênio e nitrato dissolvidos nos dejetos de suinocultura, retardam o início das reações com BRS;

22

22



Quanto a aplicação:

- A aplicação de BRS em minas abandonadas deve considerar, além do teor de sulfato, os valores de pH, N e OD;
- Antes da introdução de dejetos em áreas mineradas, é recomendável que se providencie a completa inundação das galerias ou cavas a céu aberto, medida capaz de reduzir o OD na DAM, com a consequente elevação do pH;
- Esta inundação deve buscar a eliminação das oscilações do nível freático nas zonas onde minerais sulfetados estejam sujeitos a exposição alternada entre água e ar, o chamado “efeito praia”;

23

23



1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1st LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{er} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

Bioindicadores:

- Tratamentos combinando adição de diferentes resíduos ou efluentes podem gerar desconfianças quanto a segurança ambiental;
- Ensaios de ecotoxicidade de qualquer solução, são indicados para demonstração da segurança de um efluente. Neste sentido, contamos com os BIOINDICADORES, que são organismos sensíveis a qualquer alteração capaz de comprometer a sobrevivência dos mesmos;
- Nestes ensaios os organismos são submetidos ao efluente que se deseja testar, em diferentes diluições, sendo o grau de toxicidade medido pela menor diluição de sobrevivência dos bioindicadores;
- Tal metodologia é descrita em normas internacionais (e.g. ISO 6341 - *Daphnia magna*, ISO 11348 - *Vibrio fischeri*, ISO 8692 - *Artemia* sp.)

24

24



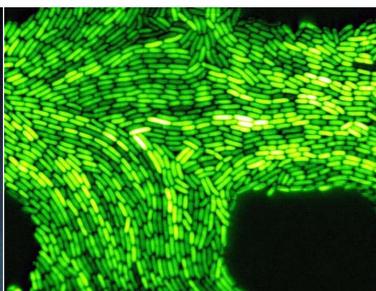
1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1st LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{er} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA

ISO 6341



Daphnia magna;
(microcrustáceo)

ISO 11348



Vibrio fischeri
(fotobactéria)

ISO 8692



Scenedesmus subspicatus
(*Artemia* sp.)

(Fonte: bing.com/images)

25

25



7 – REFERÊNCIAS

1. **Beijerinck, M. W.**, Zentralbl. Bacteriol. Abt. 2, 1 (1895), 49-59
2. **Cohen RRH** (2006) Uso de micróbios para redução de custos da remoção de metais e fluxos de resíduos da indústria de mineração
3. **ISO 6341:2012** International Organization for Standardization, 2012, Water quality — Determination of the inhibition of the mobility of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) — Acute toxicity test, *Daphnia magna*.
4. **ISO 11348:2007** International Organization for Standardization, 2007, Water quality — Determination of the inhibitory effect of water samples on the light emission of *Vibrio fischeri* (Luminescent bacteria test), *Vibrio fischeri*.
5. **ISO 8692:2004** International Organization for Standardization, 2004, Water quality — Freshwater algal growth inhibition test with unicellular green algae, *Scenedesmus subspicatus* (*Artemia* sp.)
6. **Kontopoulos, A.** (1998) "Acid Mine Drainage Control," In: S. H. Castro, F. Vergara and M. A. Sánchez, Eds., Effluent Treatment in the Mining Industry, University of Concepción, Edmundo Larenas, 1998, pp. 57-118.
7. **Madeira VS, Eckert AB, Schneider CH, Schneider IAH** (2005) Redução de Sulfetos na Drenagem Ácida de Minas Através de Tratamento Anaeróbio com Bactérias Redutoras de Sulfato. XXI ENTMMME - Encontro Nacional de Tratamento de Minério, Metalurgia e Engenharia. Natal – RN, novembro, 2005.
8. **Postage JR.** (1984) The sulphate reducing bacteria. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

26

26



8 – AGRADECIMENTOS

UFRGS / LEAmet - Lab. Estudos Ambientais pela Metalurgia
Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider

SIECESC / CTCL – Centro Tecnológico do Carvão Limpo
Eng. Minas Marcio Zanuz

CARBONÍFERA CRICIÚMA S.A.
Alfredo Flavio Gazzolla (*in memoriam*),
Eng. Quím. Vivian S. Madeira
Eng. Sanit. Amb. André B. Eckert

27

27

1º CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA
1st LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
1^{er} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA



**QUESTIONAMENTOS
CONTRIBUIÇÕES e CRITICAS**

MUITO OBRIGADO

chs_gp146@hotmail.com

28