

PMI-3328
Introdução ao Meio Ambiente e
Sustentabilidade na Mineração

Tema 3
Impactos da mineração sobre a
hidrosfera –
Parte C Drenagem ácida

Luis E. Sánchez

2023



Conteúdo

1. Mecanismos formadores de drenagem ácida
2. Prevenção e controle

L. E. Sánchez

O que é drenagem ácida ?



Bridgewater Canal, Worsley, Manchester, UK
Canal construído em 1803 para transporte de carvão, afetado por drenagem ácida de minas de carvão

Fonte: Review 63, Dec 2003

L. E. Sánchez

Pilha de estéril geradora de ácido



L. E. Sánchez

Pilha de estéril geradora de ácido



L. E. Sánchez

O que é drenagem ácida ?

- ❑ Oxidação de minerais sulfetados é um processo natural resultante da sua exposição em condições atmosféricas. Em minerações, este processo é acelerado quando grandes volumes de materiais ricos em sulfetos (normalmente estéreis ou rejeitos) são expostos
- ❑ **Drenagem ácida** resulta da oxidação de materiais sulfetados e podem gerar impactos ambientais adversos imediatos e a longo prazo

L. E. Sánchez

Estágios da formação de drenagem ácida

Reações em Stage I (1)
 $\text{Fe}^{2+} + 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}^+$ [1]
 $\text{Fe}^{3+} + 1/2\text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 1/2\text{H}_2\text{O}$ [2]
 $\text{Fe}^{2+} + 1/2\text{O}_2 + 1/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+$ [3]

Reações em Stage II (3)
 $\text{Fe}^{2+} + 1/2\text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 1/2\text{H}_2\text{O}$ [1]
 $\text{Fe}^{3+} + 1/2\text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 1/2\text{H}_2\text{O}$ [2]
 $\text{Fe}^{2+} + 1/2\text{O}_2 + 1/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+$ [3]

Reações em Stage III (3)
 $\text{Fe}^{2+} + 1/2\text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 1/2\text{H}_2\text{O}$ [1]
 $\text{Fe}^{3+} + 1/2\text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 1/2\text{H}_2\text{O}$ [2]
 $\text{Fe}^{2+} + 1/2\text{O}_2 + 1/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+$ [3]

Estágio I: pH baixa lentamente porque acidez neutralizada por carbonatos
 Estágio II: a partir de pH 4,5 há aceleração por ação de bactérias
 Estágio III: dissolução de silicatos reduz a velocidade da reação

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração
 fonte: The GARD Guide www.gardguide.com
 L. E. Sánchez

Mecanismos geradores da drenagem ácida (2)

2. Oxidação de Fe²⁺, produzindo Fe³⁺

$$\text{Fe}^{2+} + 1/4 \text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 1/2 \text{H}_2\text{O}$$

3. O Fe³⁺ se combina com o OH⁻ e se precipita na forma de hidróxido, aumentando ainda mais a acidez do meio.

$$\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$$

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração
 L. E. Sánchez

Mecanismos geradores da drenagem ácida (3)

4. Íons Fe³⁺ residuais reagem com a pirita, produzindo mais ácido:

$$14\text{Fe}^{3+} + \text{FeS}_2 + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15 \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$$

Representação combinada das reações:

$$\text{FeS}_2 + 15/4 \text{O}_2 + 7/2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$$

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração
 L. E. Sánchez

Reações principais

$$\text{FeS}_2 + 7/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ [1]$$

Ar e água são os principais oxidantes, mas na presença de Fe³⁺ dissolvido, a reação:

$$\text{FeS}_2 + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} = 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+ [2]$$

e desenvolvida, e como ela é de duas a três ordens de magnitude mais rápida que a reação [1], ela acelera a acidificação

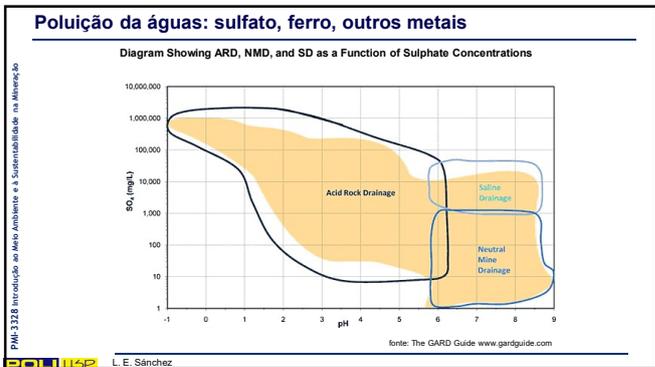
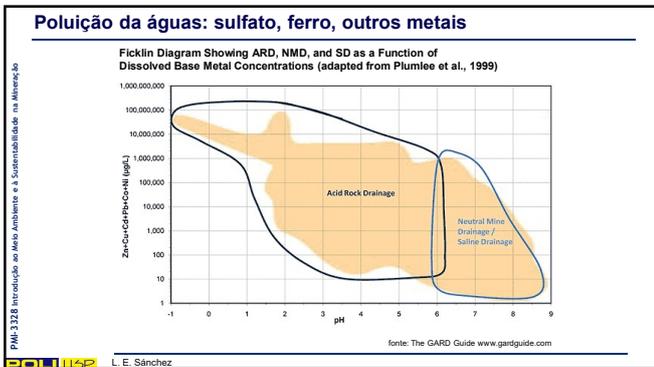
Outras reações ocorrem, conforme ferro ferroso é oxidado a ferro férrico:

$$\text{Fe}^{2+} + 1/4\text{O}_2 + \text{H}^+ = \text{Fe}^{3+} + 1/2\text{H}_2\text{O} [3]$$

que, por sua vez, alimenta Fe³⁺ à reação [2], produzindo mais acidez (H⁺) e sulfato

(INAP, 2014)

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração
 L. E. Sánchez



Drenagem ácida



Drenagem ácida em meio a pilhas de rejeitos de beneficiamento de carvão em Criciúma (SC)

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez

Drenagem ácida



Área de disposição de rejeitos de mineração de carvão em Rio Maina, SC

Notar a ausência de vegetação ciliar e a coloração da água do rio, devido à presença de ferro

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez

Fatores que influenciam a drenagem ácida

Fatores primários:

- Disponibilidade de água para oxidação e transporte;
- Disponibilidade de oxigênio;
- Características físicas do material;
- Temperatura.
- pH
- Atividades microbiológicas
- Equilíbrio de Fe^{2+}/Fe^{3+}

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez

Fatores que influenciam a drenagem ácida

Fatores secundários:

Presença de minerais que neutralizam a acidez. Ex: carbonato.

Fatores terciários:

- Clima: chuva (mecanismo de transporte) e temperatura.
- Natureza física da pilha de estéril: a média da geração de drenagem ácida é em função da área de sulfetos expostas na superfície. Além de estar relacionada a granulometria, dureza, resistência ao intemperismo e permeabilidade.
- Características químicas da água (alcalinidade)

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez

Cuidando da drenagem ácida

→ **Prevenção**
→ **Controle**

Primeiro passo: estudo do potencial gerador de ácido

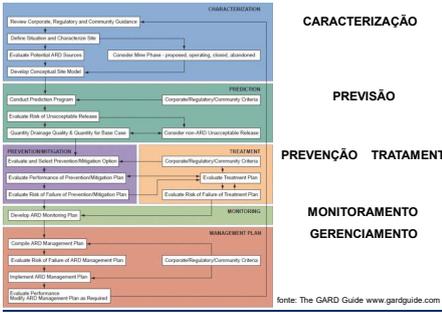
- estudo geológico
- caracterização mineralógica
- amostragem
- ensaios de laboratório
 - testes estáticos, e.g. *acid-base accounting*
 - testes dinâmicos (em colunas) – procuram reproduzir as condições de oxidação a que serão submetidos os estéréis e rejeitos

Segundo passo: projeto de disposição de estéréis e de disposição de rejeitos (ou de material excedente em obras civis)

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez

Cuidando da drenagem ácida



CARACTERIZAÇÃO

PREVISÃO

PREVENÇÃO TRATAMENTO

MONITORAMENTO GERENCIAMENTO

fonte: The GARD Guide www.gardguide.com

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez

Sistemas de tratamento passivo: *Wetlands*

- Figuras wetlands

Objetivos de aprendizagem

- Conhecer as condições de ocorrência de drenagem ácida em minas
- Conhecer as principais abordagens para prevenção e controle de drenagem ácida