



Companhia
Vale do Rio Doce

**PROJETO COBRE SALOBO
INVESTIGAÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA**

Testes Complementares

RELATÓRIO FINAL
novembro/1997 - Revisão 1

Superintendência de Tecnologia

NF	D	03
----	---	----



RESUMO

Conforme solicitação da Salobo Metais, foram repetidos os ensaios estáticos de determinação de drenagem ácida (Teste Inicial British Columbia Research), para dezenove das amostras analisadas em etapas anteriores. Além disso, foi realizado o NAG Test para seis dessas amostras.

Verificou-se também a influência nos resultados do ensaio do B.C. Research quando se substituía o ácido sulfúrico por ácido clorídrico, na mesma concentração.

Os resultados obtidos pelo ensaio do B.C. Research confirmaram, qualitativamente, os obtidos anteriormente, embora sejam muito diferentes em relação aos apresentados pelo NAG Test, que não indicou amostras geradoras de drenagem ácida.



SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	3
3. METODOLOGIA	4
3.1. Preparação das amostras para moagem	4
3.2. Teste Inicial do B. C. Research	5
3.3. Net Acid Generation (NAG Test)	6
4. PROCEDIMENTOS	7
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
5.1. Teste Inicial B. C. Research	7
5.2. Teste B. C. Research com ácido clorídrico	8
5.3. NAG Test	8
6. COMENTÁRIOS E RECOMENDAÇÕES	9
7. RECOMENDAÇÕES AMBIENTAIS	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11



LISTA DE TABELAS

	Pág.
TABELA 3.1 - Critérios para avaliação dos resultados de testes estáticos	6
TABELA 3.2 - Critérios de classificação para o NAG Test.....	7
TABELA 5.1 - Resultados do teste do B.C. Research - Ácido clorídrico.....	8
TABELA 5.2 - Resultados do NAG Test.....	9

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I - Procedimentos	
ANEXO II - Composição mineralógica das amostras analisadas	
ANEXO III - Planilhas pH x H ₂ SO ₄ - Teste inicial B. C. Research	
ANEXO IV - Resultados do teste inicial B. C. Research	
ANEXO V - Planilhas pH x HCl - Teste inicial B. C. Research (modificado)	



1. INTRODUÇÃO

A drenagem ácida (AMD - *Acid Mine Drainage*) é o fenômeno no qual os sulfetos presentes em rochas, minérios e rejeitos de beneficiamento são transformados em sulfatos pela ação direta de agentes naturais (ar, água, bactérias oxidantes), gerando um efluente ácido. Esse efluente pode causar a corrosão de equipamentos da planta de beneficiamento, e também danos ao meio ambiente, na forma de alterações em cursos d'água, danos à vegetação e contaminação por metais pesados eventualmente carregados.

Devido a isso, projetos de beneficiamento de minérios e tratamento dos rejeitos decorrentes devem englobar estudos para determinação do potencial de geração da drenagem ácida, de maneira que possam ser obtidas indicações para o estabelecimento de medidas preventivas e/ou corretivas, fornecendo assim subsídios para estudos de impactos ambientais.

A determinação do potencial de geração de drenagem ácida vem sendo objeto de estudos diversos, e atualmente existe uma gama de métodos aplicáveis, que se dividem em **testes estáticos** e **testes cinéticos**.

Os testes estáticos para determinação do potencial de geração de ácido são normalmente realizados em escala de bancada, e consistem basicamente em avaliar o consumo de ácido em relação à quantidade de sulfeto originalmente presente no material. Dentre eles, destacam-se:

- o teste inicial do British Columbia Research (B.C. Initial Test);
- o teste de contagem ácido - base (Acid Base Accounting);
- o teste de geração líquida de ácido (Net Acid Generation - NAG Test).

Esses ensaios têm por finalidade fornecer uma primeira idéia sobre o potencial de geração de ácido do material em estudo, e seus resultados não são definitivos, requerendo a realização dos testes cinéticos para sua confirmação.

Os ensaios cinéticos são realizados, em geral, em escalas e tempos maiores do que os estáticos, e simulam as condições reais de formação do efluente. Esses estudos permitem determinar taxas (formação de drenagem ácida, neutralização etc) e avaliar possíveis alterações de caráter químico, geológico ou biológico do material, em função



do tempo. Testes de coluna, lisímetros e células de umidade são exemplos de testes cinéticos.

Nesse trabalho, amostras de minérios naturais, alimentação e rejeitos da planta piloto do Projeto Cobre Salobo foram analisadas através de ensaios estáticos (B.C. Initial Test e NAG Test), com o objetivo de obter uma primeira identificação dos potenciais geradores de ácido e também confirmar os resultados do relatório anterior (setembro/97).



2. IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Com base nos resultados do relatório anterior, foram selecionadas as seguintes amostras:

- **FUROS DE SONDAGEM:**

Sulfetados:

1. Furo 154 (529 a 534 m)
2. Furo 155 (90 a 95 m)

Estéril:

3. Furo 151 (97 a 102 m)
4. Furo 151 (218 a 223 m)

Transição:

5. Furo 131 (45 a 50 m)

Saprolito:

6. Furo 130 (22 a 23 m)

Litologias:

7. X2
8. X4

- **PLANTA PILOTO - REJEITOS:**

9. Teste 59B - RF sif. TQ2
10. Teste 64C - RF sif. TQ2

- **PLANTA PILOTO - ALIMENTAÇÃO:**

Amostras < 1 mm:

11. Teste 36A (B3 composta)
12. Teste 41 (B5 com BC1)
13. Teste 47A
14. Teste 49C (Pilha 1)



- 15. Teste 54A (Pilha 4)
- 16. Teste 57A (Pilha 5)
- 17. Teste 59B (Pilha 6)
- 18. Teste 63 (Pilha 8)

Amostras < 1/4”:

- 19. Pilha 3

3. METODOLOGIA

Todas as amostras foram analisadas conforme o Teste Inicial do B. C. Research. Além disso, o teste foi repetido para as amostras 4, 5, 9 e 14, utilizando-se ácido clorídrico 1,0 N em lugar do ácido sulfúrico. Para as amostras 1, 6, 8, 11, 17 e 19, foi realizado também o NAG Test.

O teor de enxofre foi determinado através de análise química via LECO.

3.1. Teste Inicial do B. C. Research

Este teste compreende duas medidas distintas:

- (1) determinação da capacidade de neutralização de uma amostra
- (2) cálculo do potencial de produção de ácido de uma amostra

A capacidade de neutralização (PN) é determinada titulando-se uma polpa de rocha pulverizada com ácido sulfúrico padronizado até um pH estável de 3,5 utilizando-se um titulador/controlador de pH automático.

O potencial de produção de ácido (PA) é determinado pela análise do enxofre total e assume-se a conversão total do enxofre em sulfato (ácido sulfúrico).

A escolha do ponto final de pH 3,5 é baseada na premissa de que representa o limite acima do qual bactérias oxidantes de ferro e enxofre (tais como o *Thiobacillus ferrooxidans*) não são ativas.



O consumo de ácido (potencial de neutralização) em kg de H₂SO₄ por tonelada de material é dado por:

$$PN = \frac{\text{ml H}_2\text{SO}_4 (1,0 \text{ N}) \times 0,049 \times 1000}{\text{peso da amostra (g)}} \quad (3.1)$$

O potencial de produção de ácido (PA) da amostra, em kg de H₂SO₄ por tonelada de material é dado por:

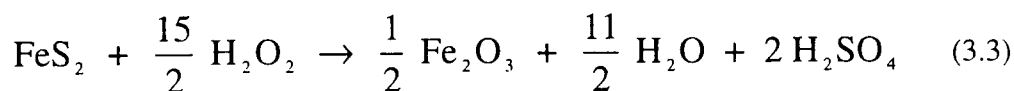
$$PA = \% S \times 30,6 \quad (3.2)$$

O consumo de ácido e o potencial de produção de ácido são comparados entre si. Se o potencial de produção de ácido (PA) excede o consumo de ácido (PN), a amostra é classificada como sendo **fonte potencial de drenagem ácida**. Nesse caso, recomenda-se um teste de confirmação ou um teste cinético. Se o valor de consumo de ácido (PN) é maior do que o potencial de produção de ácido (PA), a amostra é classificada como sendo um **não-produtor de ácido**, e nenhum trabalho adicional é necessário.

3.2. Net Acid Generation (NAG Test)

O NAG Test apresenta algumas vantagens frente ao ensaio do B.C. Research: é mais rápido, mais simples e de menor custo, podendo ser aplicado para muitas amostras ao mesmo tempo (cada teste dura, em média, três horas).

Neste teste, a amostra é reagida com peróxido de hidrogênio 15%, de forma a oxidar todos os sulfetos presentes no material e gerar o ácido sulfúrico, conforme a reação abaixo:



O pH ao final da reação (pH_{NAG}) é medido ao final da reação, e determina a classificação da amostra. Se o pH_{NAG} é maior que 4, o material analisado é classificado automaticamente como não gerador de ácido. Por outro lado, se o pH_{NAG} for inferior a 4, prossegue-se o teste, de forma a identificar o potencial de geração de ácido (NAG) da amostra.



O potencial de geração de ácido é dado por

$$NAG = \frac{49 \times V \times M}{W} \quad (3.4)$$

sendo:

NAG = Potencial líquido de geração de ácido (kg H₂SO₄/t)

V = Volume de base (NaOH) titulado (ml)

M = Molaridade do NaOH utilizado na titulação (moles/litro)

W = peso da amostra (g)

3.3. Comparação dos potenciais de geração e de neutralização de ácido

No Teste Inicial do B. C. Research, a classificação do material é normalmente feita a partir do potencial líquido de geração de ácido (NP), que consiste na diferença entre os potenciais de neutralização (PN) e de geração de ácido (PA):

$$NP = PN - PA \quad (3.5)$$

Nesse caso, uma amostra seria classificada como potencial geradora de ácido quando NP assume um valor negativo, ou seja, quando PN é menor do que PA.

Entretanto, alguns pesquisadores assumem que a simples comparação entre os valores de PN e PA não é o critério mais adequado para se afirmar que uma amostra é ou não potencial geradora de ácido. Com isso, foram propostos novos critérios de avaliação dos resultados, sendo os mais recomendados listados na tabela abaixo:

TABELA 3.1 - Critérios para avaliação dos resultados de testes estáticos

Geração de Ácido	Ferguson & Robertson	Ferguson	B.C. MD Task Force	Smith & Barton-Bridges
Não gera	PN/PA > 2	-	PN - PA > 20	PN/PA > 3
Pode gerar	1 < PN/PA < 2	-	- 20 < PN - PA < 20	PN/PA < 3
Gera	PN/PA < 1	PN - PA < 5	PN - PA < -20	-

Verifica-se que os critérios baseados na razão entre PN e PA fornecem maior segurança



na afirmação de que um material é ou não é um potencial gerador de ácido. Devido a isso, optou-se por analisar os resultados do Teste Inicial B.C. Research através do critério de Smith & Barton-Bridges, mais rigoroso do que o de Ferguson & Robertson.

Já para o teste de geração líquida de ácido (NAG Test), o pH ao final da oxidação (pH_{NAG}) e o potencial líquido de geração de ácido (NAG) são os parâmetros de classificação do material, conforme mostra a tabela abaixo:

Tabela 3.2 - Critérios de classificação para o NAG Test

Capacidade de geração de ácido	
$\text{pH}_{\text{NAG}} > 4$	Não forma ácido
$1 < \text{NAG} < 10$	Baixa capacidade
$\text{NAG} > 10, \text{pH}_{\text{NAG}} < 4$	Alta capacidade
Risco de geração de ácido	
$3 < \text{pH}_{\text{NAG}} < 4$	Baixo risco
$\text{pH}_{\text{NAG}} < 3$	Alto risco

4. PROCEDIMENTOS

Os procedimentos seguidos em cada teste encontram-se detalhados no Anexo I. Para os testes com HCl, foi seguido o mesmo procedimento do B. C. Initial Test, apenas substituindo o ácido sulfúrico.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Anexo II apresenta a composição mineralógica dos materiais analisados, conforme o relatório anterior, emitido em agosto/97. O percentual de enxofre encontra-se na tabela do Anexo IV.

5.1. Teste Inicial B.C. Research

As planilhas pH x H_2SO_4 do Teste Inicial do B.C. Research encontram-se no Anexo III, e os resultados desse teste, analisados conforme o critério de Smith & Barton-Bridges,



no Anexo IV.

Os resultados obtidos nesse teste mostram que, à exceção das amostras 5 a 10, as demais apresentaram-se como potenciais geradoras de ácido, segundo o critério de Smith & Barton-Bridges.

Entretanto, se considerarmos, conforme o teste original, a simples comparação dos valores de PA e PN, não haveria geração de drenagem ácida (exceto para as amostras 2, 11, 13, 17 e 19), uma vez que os valores de PN obtidos foram, em geral, mais altos do que os de PA.

5.2. Teste do B.C. Research com ácido clorídrico

A planilha desse teste encontra-se no Anexo V, enquanto os resultados são mostrados na tabela abaixo.

Tabela 5.1 - Resultados do Teste do B.C. Research - Ácido clorídrico

AMOSTRA	CRITÉRIO DE SMITH & BARTON-BRIDGES					
	pH natural	% S	PA (kg H ₂ SO ₄ /t)	HCl total consumido	PN (kg HCl/t)	Potencial gerador ácido
1. Furo 131(45 - 50 m)	5.10	0.02	0.61	0.70	2.52	NÃO
2. Furo 151 (218 - 223 m)	7.30	0.21	6.43	2.07	7.45	POSSÍVEL
3. Alimentação T 49 C	8.20	0.39	11.93	2.66	9.58	POSSÍVEL
4. Rejeito T 59B	7.45	0.05	1.53	1.66	5.98	NÃO

A comparação entre os resultados obtidos com ácido sulfúrico e com ácido clorídrico mostraram-se similares, embora os valores de PN, no ensaio com HCl, tenham sido bem inferiores aos calculados, para as mesmas amostras, no ensaio com ácido clorídrico.

5.3. NAG Test

Os resultados do NAG Test são mostrados na tabela abaixo, e mostram claramente que, conforme esse critério, as amostras analisadas não são potencialmente geradoras de ácido.



Tabela 5.2 - Resultados do NAG Test

AMOSTRA	pH _{NAG}	CLASSIFICAÇÃO
Furo 154	7,68	Não geradora de AMD
Furo 130	7,30	Não geradora de AMD
Litologia X4	8,14	Não geradora de AMD
Alimentação T 36A	7,50	Não geradora de AMD
Alimentação T 59B	6,69	Não geradora de AMD
Pilha 3	7,75	Não geradora de AMD

6. COMENTÁRIOS E RECOMENDAÇÕES

Sobre os resultados apresentados, são feitos os seguintes comentários e recomendações:

- Os testes estáticos tem por finalidade apresentar uma primeira idéia do comportamento dos materiais quanto à formação de drenagem ácida, não sendo portanto definitivos e absolutos; por isso, é de grande importância a realização de testes cinéticos, de forma a simular condições mais próximas da realidade e obter, assim, resultados mais representativos.
- A comparação entre os resultados obtidos nessa etapa e os do relatório anterior mostra que, para as mesmas amostras, a classificação em potencial gerador de ácido coincidiu, embora os valores absolutos tenham sido diferentes; com isso, não se vê a necessidade de repetição dos ensaios estáticos.
- Os valores de potencial de geração de ácido (PA) obtidos pelo Teste Inicial do B.C. Research levam em consideração o percentual de enxofre total presente na amostra; entretanto, sabe-se que a drenagem ácida é decorrente da oxidação do enxofre que se encontra na forma de sulfeto; isso indica que o valor de PA, nesse caso, possa ter sido superestimado.
- No método NAG, os sulfetos presentes na amostra são oxidados a ácido sulfúrico pelo peróxido de hidrogênio. Os resultados obtidos neste ensaio com seis amostras de minério de cobre do Projeto Salobo mostraram que as mesmas não apresentam risco de drenagem ácida. Para essas amostras, o pH_{NAG} final obtido foi superior a 4, o que



indica que o potencial de neutralização da amostra, resultante da presença de minerais de caráter alcalino (ex. calcita, dolomita, etc), é superior ao potencial de geração de ácido.

- Diante disso, é relevante a realização do NAG Test para as demais amostras estudadas anteriormente.
- Dada a importância do projeto e à localização do mesmo na Região Amazônica, recomenda-se que os testes cinéticos sejam realizados para as amostras que representem extremos (máximo, mínimo e intermediário), conforme a classificação do Teste Inicial B.C. Research; por exemplo, *Litologia X2, Furo 154, Furo 131 e Furo 155* deste teste. Desta forma, podem ser obtidos mais subsídios para os questionamentos de caráter ambiental.

7. RECOMENDAÇÕES AMBIENTAIS

Os minérios utilizados nesse ensaio foram classificados, para fins de disposição final, como Resíduos Classe 2 (Não perigosos), e descartados em tambores adequadamente identificados, após filtragem e pesagem. Antes da filtragem, as polpas foram neutralizadas para pH entre 6,5 e 8,0 conforme a legislação ambiental aplicável e procedimentos internos da SUTEC.

Os resíduos ácidos gerados foram descartados em bombonas específicas, para posterior ajuste de pH e descarte, conforme procedimentos internos da SUTEC.

No caso de execução dos testes cinéticos, devem ser observadas as condições dos ensaios, tais como a coleta, análise e disposição do lixiviado, medidas de proteção ambiental (por exemplo, contenção/minimização da evaporação de ácido, contenção de vazamentos etc). É interessante a elaboração de um plano que contemple as ocorrências possíveis e as ações pertinentes para prevenção e/ou correção das mesmas.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CANADA CENTRE FOR MINERAL AND ENERGY TECHNOLOGY. **New methods for determination of key mineral species in acid generation prediction by acid-base accounting.** British Columbia, 1991.
2. _____. **Acid rock drainage prediction manual.** British Columbia, 1991.
3. _____. **Investigation of prediction techniques for acid mine drainage.** British Columbia, 1989.
4. SOBEK, Andrew A. et al. **Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils.** Ohio, 1978. p.47 - 55.
5. ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY INTERNATIONAL PTY, LTD. **Static net acid generation test procedure (NAG Test).** Balmain, 1996.
6. COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. **Projeto Salobo; Investigação da drenagem ácida.** Relatório Final. Belo Horizonte, 1997.



Companhia Vale do Rio Doce
Superintendência de Tecnologia

ANEXO I - PROCEDIMENTOS