

# ENSAIOS DE ALTERABILIDADE PARA A PREVISÃO DA DRENAGEM ÁCIDA NA BARRAGEM DE IRAPÉ, BRASIL

Weathering tests for acid rock drainage prediction at the Irapé Dam, Brazil

Marcelo Guimarães Duarte\*

Adilson do Lago Leite\*\*

Romero César Gomes\*\*\*

**RESUMO** – A barragem de Irapé, localizada no sudeste brasileiro e inaugurada em 2006, representou um marco na engenharia nacional, devido às condições adversas de sua construção, como topografia íngreme e a presença de sulfetos nos maciços de fundação, o que sustentava a hipótese de geração de drenagem ácida de rochas (DAR). Na época, o problema da DAR era pouco conhecido na construção de usinas hidrelétricas e diversos estudos foram conduzidos para controle e minimização dos riscos ambientais e de engenharia do empreendimento. Estes estudos sustentaram medidas inovadoras de engenharia, incluindo o zoneamento do enrocamento, a adoção de geossintéticos impermeabilizantes e a proteção com aditivos das estruturas de concreto. Este trabalho apresenta resumidamente os resultados de uma ampla campanha laboratorial que objetivou complementar os referidos estudos, na tentativa de melhor avaliar o mecanismo de geração ácida sob o contexto da UHE Irapé. Ela consistiu de amostragem, caracterização petrográfica e química das amostras, ensaios estáticos (pH em pasta e NAG) e cinéticos (lixiviação em colunas e em extrator Soxhlet, ensaios de ciclagem). Os resultados demonstraram que não houve geração ácida nos ensaios cinéticos e no ensaio de pH em pasta, levando-se em consideração os tempos e as condições de ensaio. Por outro lado, a presença de sulfetos nas análises petrográficas e os resultados dos ensaios NAG revelaram potencial de geração ácida em algumas das amostras, demonstrando a necessidade de pesquisas adicionais.

**ABSTRACT** – The Irapé Dam, southeastern Brazil, was inaugurated in 2006, representing a milestone in Brazilian engineering due to the site adverse conditions, including steep topography and the presence of sulfides in the foundation rock, which could generate acid rock drainage (ARD). At that time the ARD problem was not well known in the construction of large earth-rock dams, which led to complementary research to control and reduce the associated environmental and engineering risks. The results of this research supported innovative engineering measures, including rock zoning, the use of impermeable geosynthetics and additives to protect the concrete structures. This paper presents complementary research on the quality and quantity of possible ARD generated with rock samples from that site. The experimental campaign involved rock sampling, petrographic and chemical characterization, both static (paste pH and NAG) and kinetic (column and Soxhlet leaching, natural and sulfate cycling). The results of the kinetic test and paste pH demonstrated no acid generation, as opposed to the NAG tests, which resulted in acid formation. The presence of sulfides in the petrographic analyses also indicated acid potential for the rock specimens. Considering these conflicting results further research is needed.

**PALAVRAS CHAVE** – Drenagem ácida de rochas, ensaios estáticos e cinéticos, barragem de terra e enrocamento, sulfetos.

---

\* Engenheiro Civil, MSc., Cemig Geração e Transmissão S.A. E-mail: mgduarte@cemig.com.br.

\*\* Prof. Associado, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. E-mail: alleite@em.ufop.br.

\*\*\* Prof. Associado, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. E-mail: romero@em.ufop.br.

## 1 – INTRODUÇÃO

A construção da Usina Hidrelétrica de Irapé representou um marco para a engenharia brasileira e para o desenvolvimento da região do Vale do Jequitinhonha, estado de Minas Gerais, amplamente conhecida por seus baixos indicadores socioeconômicos.

As características físicas e geológicas adversas do sítio de implantação, associadas à complexa logística construtiva, tornaram a obra desafiadora e promoveram a realização de diversos estudos e campanhas de investigações complementares aos trabalhos rotineiros da engenharia de barragem. Dentre os desafios enfrentados, destaca-se a presença de sulfetos nos xistos grafitosos da fundação da barragem (Figura 1), revelada através dos estudos de caracterização inicial dos maciços rochosos locais. A existência destes sulfetos acenava para a possibilidade da existência de drenagem ácida de rochas (DAR) (Lima, 2009).

Com esta constatação diversos ensaios foram realizados durante as campanhas de investigação e construção da referida obra com o objetivo de se definir melhor a existência e a qualidade do percolado ácido que poderia se formar quando do fluxo de água pelos materiais sulfetados. Tais estudos estão muito bem relatados em Lima (2009), incluindo campanhas exaustivas de caracterização químico-mineralógica, ensaios em células de umidade laboratoriais e percolação em grandes lisímetros de campo (até 2000 litros). Contudo, os resultados destas campanhas mostraram grande variabilidade na presença de sulfetos nos xistos e também grande variabilidade na quantidade e composição do percolado gerado nos ensaios cinéticos, de modo que ensaios complementares tornaram-se necessários.

Independentemente dos resultados dos ensaios cinéticos empreendidos à época, a presença de sulfetos nos xistos locais e o consequente potencial de geração de DAR induziram soluções de engenharia inovadoras como alternativa às práticas e técnicas de uso corrente no âmbito da construção de usinas hidrelétricas no Brasil, como relatam Aires (2006), Pereira (2008) e Lima (2009). Algumas destas soluções envolveram o zoneamento estratégico do enrocamento das faces de jusante e montante da barragem, a aplicação de geossintéticos para a proteção contra a precipitação pluviométrica e a proteção das estruturas de concreto contra possíveis efeitos da DAR.



Fig. 1 – Detalhes dos cristais de pirrotita associados a veios de quartzo (Lima, 2009).

Há décadas ensaios laboratoriais são aplicados para a previsão da existência e da qualidade da DAR na mineração e outras obras civis (Hornberger e Brady, 1998). Apesar desta longa história, Sengupta (1993), Evangelou (1995), Hornberger e Brady (1998), Murta *et al.* (2008), MEND (2009),

Guimarães (2012) e outros apontam para as dificuldades enfrentadas nos diversos métodos, incluindo fatores físicos, químicos e biológicos. Podem ser destacados a representatividade e a granulometria das amostras considerando a variabilidade composicional e estrutural dos maciços rochosos; o grande tempo de ensaio considerando-se os tempos de obra; a influência marcante de processos biológicos na velocidade e na intensidade das reações de oxidação; a dificuldade de simulação das condições reais físico-químicas do sítio, incluindo a disponibilidade de oxigênio etc. Apesar destas dificuldades, os ensaios laboratoriais envolvendo testes estáticos e cinéticos, possuem grande utilidade prática, devido principalmente ao maior controle sobre os fatores intervenientes já relatados e também aos menores tempos relativos de ensaio (MEND, 2009). A acidez propriamente dita e a composição do percolado gerado em campo são mais bem representadas nos ensaios cinéticos. Sendo assim, bastante esforço tem sido empregado no desenvolvimento e padronização dos procedimentos destes ensaios, como relatado em Hornberger *et al.* (2004).

Dentro deste contexto, o presente trabalho relata estudos laboratoriais complementares para a avaliação da geração de DAR em amostras locais à barragem de Irapé, descritos de forma mais detalhada em Duarte (2011). Com eles pretendeu-se consolidar os conhecimentos relativos à quantidade e qualidade da DAR no contexto desta barragem, bem como contribuir para o desenvolvimento de métodos laboratoriais para previsão e controle da DAR associada à presença de minerais sulfetados na construção de usinas hidrelétricas.

Nestes estudos foram utilizadas amostras rochosas de testemunhos de sondagens rotativas provenientes das campanhas iniciais de exploração geológica da barragem de Irapé. Foram realizadas análises petrográficas e geoquímicas para caracterização das amostras rochosas e quantificação dos sulfetos, ensaios estáticos (pH em pasta e NAG), ensaios de lixiviação em colunas e em extrator Soxhlet, finalizando-se com ensaios de alterabilidade por ciclagem.

## 2 – A BARRAGEM DE IRAPÉ: ASPECTOS GERAIS

A barragem de Irapé localiza-se no Rio Jequitinhonha, região nordeste do estado de Minas Gerais, Brasil, entre os municípios de Berilo (margem direita) e Grão Mogol (margem esquerda). O eixo do barramento é definido pelas coordenadas 16°44'14" de latitude sul e 42°34'29" de longitude oeste.

O empreendimento é constituído pelas estruturas de desvio do rio, barragem de enrocamento com núcleo argiloso, circuito de controle de vazão e circuito hidráulico de geração, conforme a Figura 2. A área inundada do reservatório é de 137,16 km<sup>2</sup> e os níveis d'água Máximo Normal, Máximo Maximorum e Mínimo Minimorum situam-se nas Els.(m) 510,00, 512,20 e 470,80, respectivamente. A barragem é outro aspecto superlativo da usina: com 208 metros de altura é a mais alta do Brasil e a segunda da América do Sul.

Em relação à sua tipologia, a presença de sulfetos na matriz rochosa do sítio de implantação foi a principal razão para que a alternativa em concreto fosse descartada. Desta forma, foi adotada uma solução com núcleo de solo argiloso e com espaldares em enrocamento, com crista na elevação 514,70 m. O talude de montante apresenta inclinação de 1:1,5 até a elevação 484,00m, se alterando para 1:1,3 na sequência. O talude de jusante apresenta inclinação de 1:1,3 em toda sua extensão.

A partir da El. 370,00 foram implantadas estruturas em forma de “guarda-chuvas”, constituídos por geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), com espessura de 1,5 mm, cuja principal função era impedir a infiltração da água das chuvas no interior do maciço e o eventual contato com os enrocamentos sulfetados, evitando, desta forma, a formação de DAR.

Em relação aos materiais de construção empregados na construção do barramento, foram prioritários os materiais oriundos das escavações obrigatórias. A Figura 3 ilustra o zoneamento de materiais na seção de maior altura do barramento.



Fig. 2 – Vista de jusante da barragem de Irapé (www.cemig.com.br).

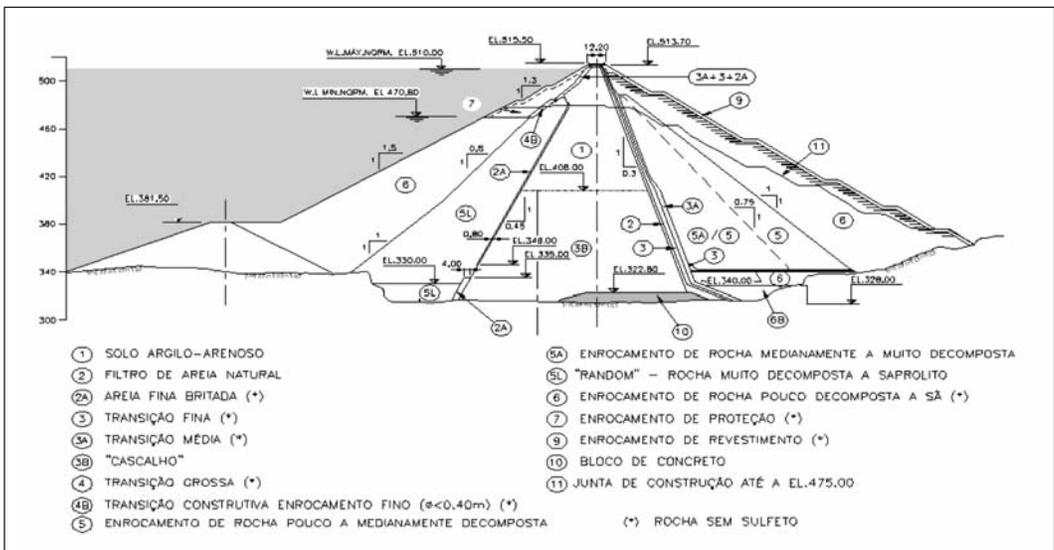


Fig. 3 – Zoneamento de materiais na barragem de Irapé (Consórcio Construtor Irapé – CCI).

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 – Amostragem

Devido à impossibilidade de acessar diretamente o material sulfetado posicionado no interior do barramento de Irapé optou-se pela utilização de rochas dos testemunhos de sondagem provenientes da fase de pré-implantação da referida obra.

As amostras foram escolhidas na tentativa de representar o material utilizado em cada uma das estruturas da barragem. Foram selecionados aproximadamente 640 kg de amostras, constituídas por rochas relativamente enriquecidas com sulfetos e provenientes das escavações obrigatórias, distribuídas da seguinte forma: 208 kg de rocha medianamente a muito decomposta (5A), 221,8 kg de rocha pouco a medianamente decomposta (5) e 207,7 kg de rocha sã (6), conforme o Quadro 1.

**Quadro 1** – Localização e quantitativos de amostras coletadas para os ensaios de laboratório.

Nº furo	Localização	Rocha tipo 5A (kg)	Rocha tipo 5 (kg)	Rocha tipo 6 (kg)
SR-07	Túneis de desvio - MD	43,10	37,60	-
SR-105	Barragem	68,00	44,20	32,20
SR-108	Casa de Força	41,60	36,60	42,20
SR-111	Vertedouro	55,30	34,00	65,90
SR-115	Tomada d'Água	-	69,40	67,40
Total (kg)		208,00	221,80	207,70

#### 3.2 – Caracterização das amostras

As atividades conduzidas na primeira etapa dos estudos, representadas por análises petrográficas e químicas, tiveram como principal objetivo caracterizar as amostras de enrocamento do tipo 5A e 6. Elas foram selecionadas por representarem extremos de intemperismo, como mencionado no item anterior.

As análises petrográficas, utilizadas para identificação dos minerais translúcidos, principalmente silicatos e carbonatos, foram realizadas a partir do exame por microscopia óptica em lâminas delgadas, expostas em áreas de aproximadamente  $4,0 \times 2,5$  cm, com espessuras da ordem de 0,03 mm. As referidas análises foram conduzidas nos laboratórios do Departamento de Geologia (DEGEO) da UFOP.

Os teores químicos foram obtidos em ICP-AES, através do equipamento Spectro, modelo Ciro CCD, pertencente ao Laboratório de Geoquímica Ambiental DEGEO-UFOP. A digestão da amostra foi feita por calcinação a 1000°C por 1 hora, sendo o resíduo deste procedimento solubilizado em meio ácido.

#### 3.3 – Estudos laboratoriais

A tendência de determinada rocha em produzir acidez é função do balanço entre os minerais consumidores de ácido (alcalinos) e os produtores de acidez (sulfetos). Empiricamente, cada vez que a capacidade consumidora de ácido de uma rocha (ou potencial de neutralização) ultrapassa a capacidade de geração de ácido, toda a acidez gerada da rocha é consumida. Desta forma, a DAR gerada pela oxidação dos minerais sulfetados poderá ser neutralizada pelo contato com os minerais consumidores de ácido, como carbonatos e silicatos. Comumente estes potenciais são analisados pela determinação do balanço ácido-base, designados de ensaios estáticos ou ABA (do inglês: *Acid-Base Accounting*).

Dito isso, ensaios estáticos foram realizados nas amostras 5, 5A e 6. Os ensaios estáticos escolhidos para a determinação do potencial de geração ácida e de neutralização de acidez das amostras foram o teste de geração ácida líquida (NAG) e o pH em pasta (MEND, 2009). O motivo dessa escolha decorre de que ambos são expeditos e possuem ampla divulgação na literatura.

O teste NAG foi desenvolvido na Austrália e tem a finalidade de contabilizar o potencial líquido de geração ácida de determinada amostra (MEND, 2009). Para isto a amostra é oxidada a quente com peróxido de hidrogênio, levando à oxidação dos sulfetos a sulfatos. O ácido sulfúrico gerado é então neutralizado pelas bases presentes na amostra e o excedente ácido, quando houver, é titulado com solução padrão de hidróxido de sódio até o pH 4,5. Os materiais são classificados conforme os seguintes critérios (MEND, 2009):

- Não geradores de ácido: pH NAG > 4,5
- Geradores de ácido: pH NAG < 4,5

Para realização do referido ensaio aproximadamente 2,5 g de rocha pulverizada (fração menor que a peneira 200 mesh) foram suspensos em 250,0 mL de solução de peróxido de hidrogênio 15%, em duplicata. As suspensões foram então fervidas até a completa decomposição do peróxido de hidrogênio, caracterizada pelo cessar do aborbulhamento.

Após resfriamento em temperatura ambiente, as suspensões foram então tituladas até a obtenção de pH 4,5 com solução de NaOH 0,01 mol/L padronizada. Também foi avaliada uma amostra que havia sido utilizada nas colunas de lixiviação empregadas nos ensaios cinéticos, que serão detalhados mais a frente, denominada aqui de amostra 5AL.

Os ensaios de determinação do pH em pasta consistiram na suspensão de 20 g ou 40 g de amostra pulverizada (< 200 mesh) em 20 mL de água deionizada, constituindo relações sólido: líquido de 1:1 e 2:1, conforme MEND (2009).

Posteriormente, as suspensões foram agitadas por 5 minutos, com 30 minutos de descanso subsequentes. Para cada amostra foram feitas 2 leituras de pH.

Os ensaios cinéticos foram representados pela lixiviação em colunas e em extratores Soxhlet, conforme os procedimentos indicados em Hornberger e Brady (1998) e Guimarães (2012). O objetivo destes ensaios, além de confirmar os resultados dos ensaios estáticos, era tentar simular melhor as condições reais de intemperismo, considerando os aspectos físicos (dimensões e geometria do aparato experimental, quantidade e granulometria da amostra, volume, etc.), químicos (composição mineral das amostras, composição química da solução efluente e influente, etc.) e biológicos (presença e abundância de bactérias oxidantes, presença e variabilidade de nutrientes, etc.). Assim, teoricamente a qualidade da DAR gerada estaria mais próxima da realidade de campo.

Como o próprio nome diz, as colunas são cilindros onde as amostras são percoladas por fluidos de maneira controlada, avaliando-se o lixiviado com o tempo. Trata-se de um conjunto formado por três partes: reservatório inferior, coluna de amostra e tampa superior, fixados por hastes e borboletas de latão (Figura 4).

Os materiais empregados em sua construção foram o PVC (reservatório inferior e tampa superior) e acrílico (coluna), considerados inertes em relação às soluções ácidas percolantes. Ao conjunto foram adicionadas três torneiras em PVC, as quais foram utilizadas para coleta da água percolada (tampa inferior) e para a entrada de ar (oxigênio) no sistema.

A amostra utilizada no ensaio foi obtida conforme descrito no item 3.1, sendo o material britado em um britador mecânico de mandíbula, limpo previamente com água destilada.

A etapa seguinte consistiu no peneiramento do material em malha # 3,3 cm, de modo que o diâmetro equivalente máximo do material considerado seja o mesmo. De acordo com as recomendações de Hornberger e Brady (1998), o diâmetro equivalente máximo das partículas deveria ser igual a 1/4 do diâmetro interno da coluna de lixiviação. Desta forma, os parâmetros adotados para o ensaio foram:

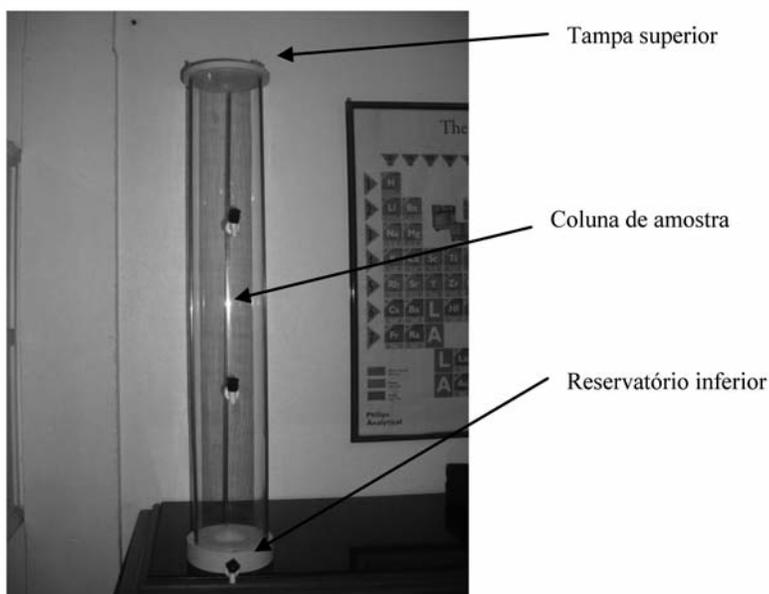


Fig. 4 – Detalhe da coluna de lixiviação.

- Diâmetro interno ( $\phi$ ) da coluna = 14 cm  $\Rightarrow$   $\phi$  máximo partícula = 3,5 cm
- Largura caixa cisalhamento = 20 cm  $\Rightarrow$   $\phi$  máximo partícula = 3,3 cm

Durante a percolação, a alimentação de água destilada-deionizada na coluna foi realizada por meio da utilização de um pequeno reservatório plástico (barrilhete), com controle manual dos volumes inseridos, utilizando-se de uma torneira plástica simples. O volume diário de água adicionado foi calculado com base no volume total de 14 852,83 mL, correspondente a um ano hidrológico na UHE Irapé. Desta forma, o volume empregado foi de 1142,5 mL, considerando 13 dias de ensaio.

As características dos ensaios de lixiviação são apresentadas, resumidamente, no Quadro 2.

Quadro 2 – Características dos ensaios de lixiviação.

Material ensaiado	Massa total (g)	Diâmetro interno (cm)	Altura (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Volume percolado (cm <sup>3</sup> )	Compactação final
5A (CL1)	20 334	14,4	91,2	162,86	1,37	5787	0,66%
5A (CL1a)	20 548	14,4	89,4	162,86	1,41	17 361	0,34%
6 (CL2)	22 026	14,4	89,8	162,86	1,51	51 192,2	0,45%

O bom funcionamento da coluna durante a realização dos ensaios evidenciou as boas condições do processo construtivo e operacional utilizado. Dentre as diversas características das colunas empregas e dos procedimentos adotados nos ensaios, merecem destaque:

- As amostras ensaiadas foram muito bem caracterizadas física, química e mineralogicamente, de forma a se obter melhor controle antes, durante e depois do ensaio e também auxiliar na interpretação dos resultados;

- O diâmetro equivalente máximo da maior partícula ensaiada foi aproximadamente 4 vezes menor que o diâmetro interno da coluna;
- Houve controle dos volumes ensaiados dentro da coluna, tanto de sólidos, como líquidos e gases;
- Foi feito o monitoramento dos parâmetros pH, Eh, condutividade elétrica, e temperatura, com frequência diária.

Encerrando a fase de testes cinéticos, lançou-se mão do extrator Soxhlet, que constitui em um equipamento utilizado na simulação de intemperismo acelerado, no qual ciclos de lixiviação são impostos às amostras. O fluido percolado é constantemente recirculado por meio de evaporações e condensações sucessivas, possibilitando o controle de temperatura, do fluxo e de altura da coluna de solução, conforme Figura 5.



**Fig. 5** – Extrator Soxhlet em funcionamento.

Esta etapa consistiu na avaliação da amostra 5A, onde se observou quantidades significativas de produtos de oxidação, que representam, em outras palavras, acidez que poderia ser liberada em contato com a água e oxigênio.

Foi preparada uma amostra peneirada em malha de 1 cm, correspondente ao diâmetro máximo de  $\frac{1}{4}$  do diâmetro do tubo do extrator no qual seria depositada. Uma massa seca de 365,0 g de amostra foi utilizada, para 1000 mL de água destilada + deionizada como solução lixiviante.

Dentro do extrator, as amostras foram recobertas por manta acrílica, de modo a protegê-las no contato com a água e o vidro. Cada ciclo de lixiviação durou 6 horas, sendo realizados ao todo 8 ciclos, em 8 dias diferentes.

A campanha laboratorial foi encerrada com ensaios de ciclagem natural e ataque com etileno-glicol. Eles foram escolhidos pois são normalizados (ver Quadro 3) e rotineiros em análises da qualidade de agregados em pavimentos, pretendendo-se avaliar a possibilidade da geração ácida e sua influência no desgaste intempérico destas amostras. Os ensaios foram realizados no período de abril a junho/2010 no Laboratório de Pavimentos da UFOP.

**Quadro 3** – Normas Técnicas empregadas nos ensaios de ciclagem.

Norma ABNT	Descrição	Objetivo
NBR 12.695	Agregados – Verificação do comportamento mediante a ciclagem natural	Verificar a perda de massa em percentagem de determinada quantidade de amostra de agregados quando submetidos a diferentes processos de ciclagem
NBR 12.697	Agregados – Avaliação do comportamento mediante ciclagem acelerada com etilenoglicol	

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

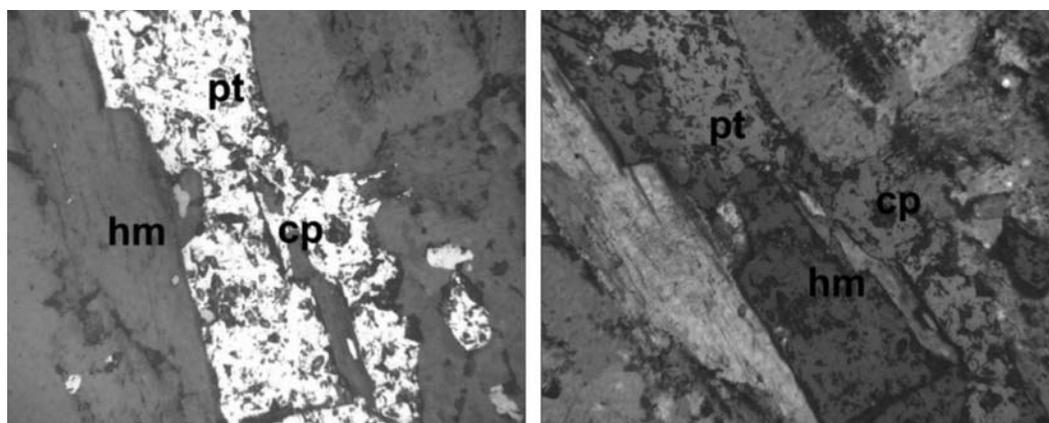
### 4.1 – Ensaios de caracterização

Nas atividades conduzidas na primeira etapa dos estudos promoveu-se a caracterização das amostras de enrocamento do tipo 5A (mais alterada) e 6 (rocha sã), selecionadas por representarem extremos de intemperismo, buscando conhecer detalhadamente seus componentes mineralógicos e químicos, principalmente sulfetos, bem como avaliar seu potencial de geração de drenagem ácida.

Nesse sentido, foi possível identificar através da análise petrográfica em lâmina delgada que as amostras avaliadas são inequigranulares (os cristais diferem substancialmente no tamanho), com grãos variando de grossos (maiores que 5 mm) a finos (menores que 1 mm). Quanto à perfeição de forma, os cristais variam de euétricos (bem formados, com faces nítidas e facilmente reconhecíveis) a anétricos (sem faces nítidas), sendo que, entre os grãos de quartzo os cristais possuem contatos poligonais e amebóides.

A textura é granolepidoblástica, correspondendo a cristais de quartzo aproximadamente equidimensionais em contato com cristais tabulares de sericita, biotita e clorita, com orientação preferencial, gerando uma foliação pronunciada. Observa-se ainda a textura poiquiloblástica, através de cristais porfiroblásticos, gerados a partir do processo de metamorfismo da biotita, preenchidos por inclusões diminutas de outros minerais.

Destaca-se a presença dos sulfetos pirrotita (pt) e calcopirita (cp), compondo 20% da lâmina, além de hemetita (hm), como destacado na Figura 6.



**Fig. 6** – Foto de lâmina delgada (amostra 6 – 20×) - a) em luz refletida e natural; b) em luz refletida e polarizada – Fonte: CCI.

Foram também identificados os seguintes minerais:

- Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ): Corresponde a aproximadamente 30% da lâmina. É um mineral pré-tectônico e está distribuído em forma aproximadamente paralela à foliação.
- Sericita [ $\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$ ]: Corresponde a aproximadamente 24% da lâmina. É o principal mineral constituinte da foliação e é sin-tectônico.
- Cianita ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ): Corresponde a aproximadamente 10% da lâmina. É um mineral sin-tectônico.
- Biotita [ $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{OH},\text{F})_2(\text{Al},\text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}$ ]: Corresponde a aproximadamente 5% da lâmina. É um mineral sin-tectônico, alguns cristais se encontram oblíquos em relação à foliação, devido a sua formação durante o metamorfismo.
- Clorita [ $(\text{Mg},\text{Al},\text{Fe})_{12}(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$ ]: Corresponde a aproximadamente 5% da lâmina. Está presente na foliação da rocha.
- Granada [ $\text{A}_{32}+\text{B}_{23}+(\text{SiO}_4)_3$ ]: Corresponde a aproximadamente 5% da lâmina. É um mineral pré-tectônico.
- Zircão ( $\text{ZrSiO}_4$ ): Corresponde a aproximadamente 1% da lâmina. Está incluso dentro de cristais de biotita.

Os resultados das análises químicas são apresentados no Quadro 4 e confirmam as observações petrográficas, nas quais a rocha é descrita como xisto. Destaca-se a pequena quantidade de enxofre elemental, incompatível com as observações petrográficas que deram conta de 20% de sulfetos para a amostra 6.

**Quadro 4** – Teores em óxidos das amostras 5A e 6, (% em peso). Os teores elementais estão entre parênteses.

Elemento	Amostra	
	6	5A
$\text{SiO}_2$ (Si)	75,3 (35,2)	86,5 (40,4)
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (Al)	11,1 (5,9)	7,62 (4,0)
CaO (Ca)	0,547 (0,4)	0,058 (0,04)
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Fe)	5,10 (3,6)	1,93 (1,35)
$\text{K}_2\text{O}$ (K)	2,39 (2,0)	1,71 (1,42)
MgO (Mg)	1,13 (0,7)	0,30 (0,50)
MnO (Mn)	0,186 (0,14)	0,304 (0,39)
$\text{Na}_2\text{O}$ (Na)	0,937 (0,7)	0,427 (0,32)
$\text{TiO}_2$ (Ti)	0,152 (0,1)	0,104 (0,06)
(S)	--- (1,52)	--- (0,03)

Adicionalmente foram observados menores teores para a amostra 5A, exceto para MnO e  $\text{SiO}_2$ , fato que demonstra o efeito do processo intempérico de lixiviação sobre o material, uma vez que a amostra 5A apresenta-se mais alterada que a amostra 6. Tal fato explica ainda os teores desprezíveis de enxofre elemental (S) da amostra 5A.

Quanto aos elementos traços, destacam-se os valores mais significativos dos elementos Ba, P, V e Zn, conforme relata o Quadro 5.

**Quadro 5** – Teores químicos (ppm) das amostras 5A e 6 (elementos mais expressivos + traços).

Elemento	Amostra 5A (ppm)	Amostra 6 (ppm)	Limite Quant. (LQ) ppm
Al	40 351	58 867	31
As	<LQ	<LQ	5,98
Ba	806	1322	0,0389
Be	0,862	1,46	0,155
Bi	<LQ	<LQ	7,13
Ca	415	3908	19,0
Cd	<LQ	<LQ	1,65
Co	40,6	49,4	1,15
Cr	73,2	141	0,630
Cu	49,1	51,0	1,90
Fe	13 529	35 680	51,5
K	14 173	19 817	9,08
Li	74,9	78,9	5,19
Mg	1835	6838	0,180
Mn	2358	1441	0,107
Mo	<LQ	<LQ	1,28
Na	3171	6950	6,90
Ni	5,12	44,9	1,71
P	97,8	568	5,78
Pb	<LQ	<LQ	7,47
Sb	<LQ	<LQ	6,0
Sc	4,98	8,25	0,0536
Sr	34,6	64,3	0,0316
Ti	623	913	0,840
V	91,1	103	6,39
Y	10,6	9,4	0,336
Zn	16,0	170	0,296
Zr	31,0	21,2	0,866
PPC	3,88%	4,42%	–

De maneira resumida as amostras rochosas analisadas podem ser descritas como xisto escuro sulfetado, que, pela presença da cianita, pode ser enquadrado em metamorfismo regional de pressão e temperatura variando de média a alta, originado do metamorfismo de rochas pelíticas ou micáceas.

## 4.2 – Ensaios estáticos e cinéticos

Os resultados do teste de geração ácida líquida (NAG) são descritos abaixo, donde se confirma o potencial de geração ácida das amostras estudadas:

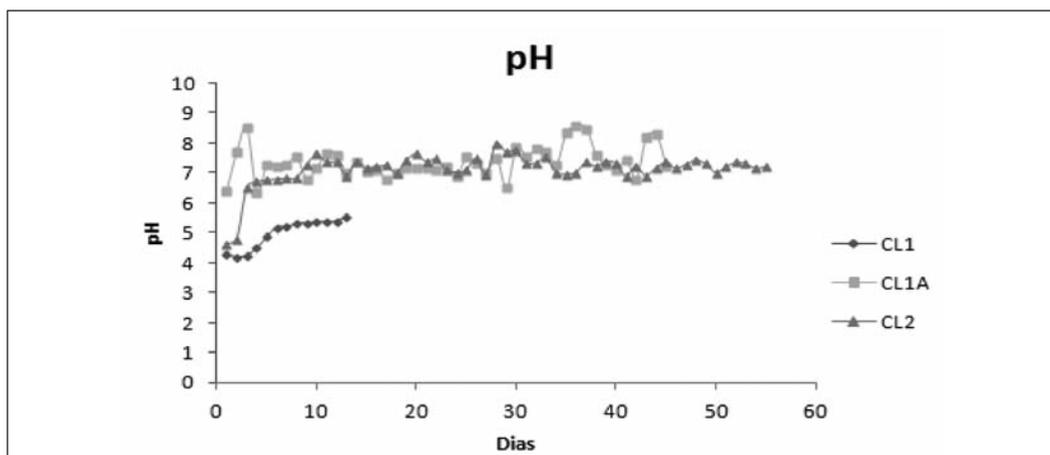
- Amostra 6: NAG pH = 2,54 (< pH 4,5) – conclusão: *gerador de ácido*
- Amostra 5A: NAG pH = 3,0 (< pH 4,5) – conclusão: *gerador de ácido*
- Amostra 5AL: NAG pH = 2,95 (< pH 4,5) – conclusão: *gerador de ácido*

Os resultados do pH em pasta são apresentados no Quadro 6, e não se verificou geração ácida nas amostras 5A e 6, em contraposição aos testes NAG. Acredita-se que não houve tempo hábil para a completa oxidação dos sulfetos presentes, de modo que não se recomenda este método para futuras análises de geração ácida.

**Quadro 6** – Resultados do ensaios de pH em pasta.

Amostra	pH em pasta Razão Sólido:Líquido 1:1	pH em pasta Razão Sólido:Líquido 2:1
Água	8,3	7,0
6	7,5	7,2
5A	8,3	7,9
5AL	9,3	8,8

Nas Figuras 7 a 10 estão apresentados os resultados do monitoramento do lixiviado dos ensaios em colunas.



**Fig. 7** – Evolução do pH para os ensaios CL1, CL1A e CL2.

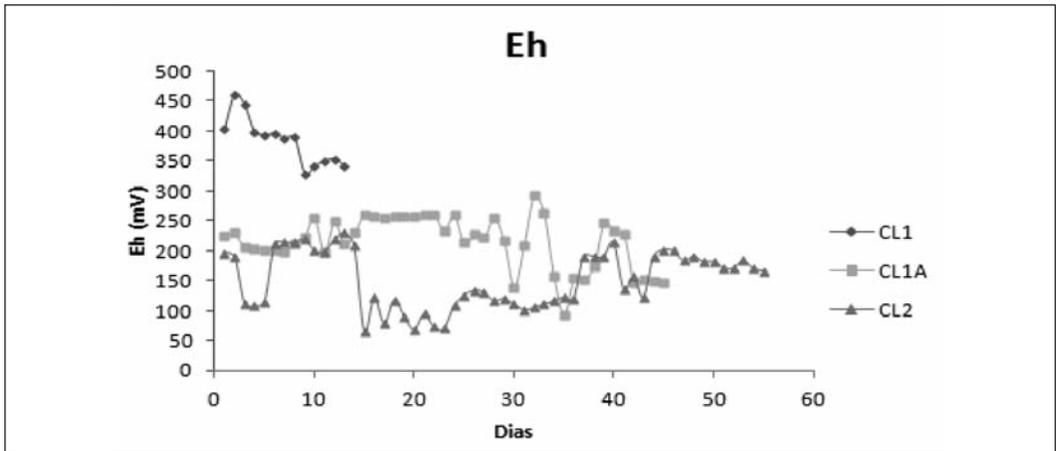


Fig. 8 – Evolução do Eh para os ensaios CL1, CL1A e CL2.

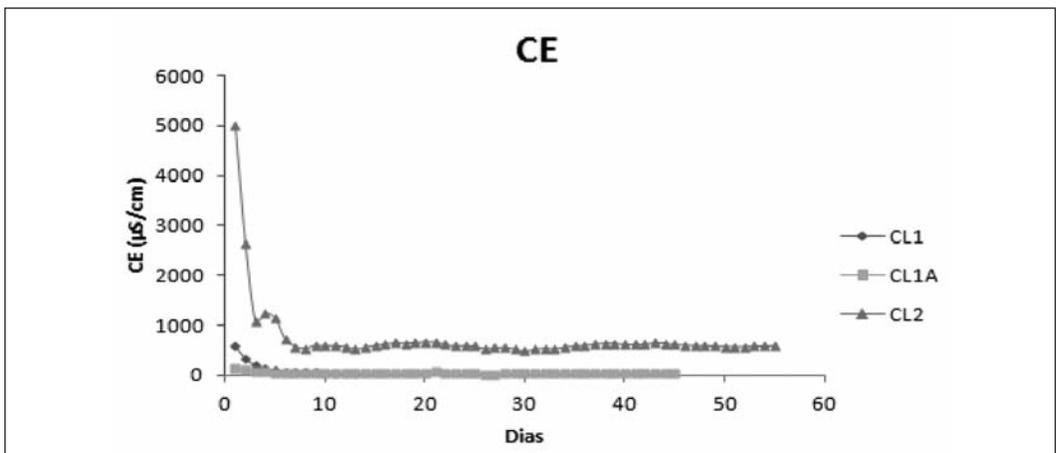


Fig. 9 – Evolução da condutividade elétrica (CE) para os ensaios CL1, CL1A e CL2.

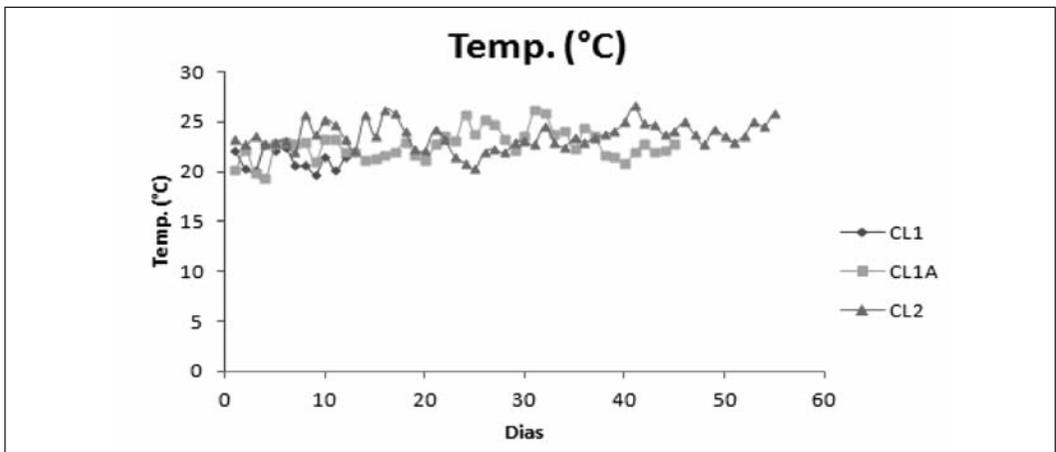


Fig. 10 – Evolução da temperatura para os ensaios CL1, CL1A e CL2.

Alguns comentários podem ser destacados acerca dos resultados dos ensaios de lixiviação em colunas:

- O aumento do pH durante o ensaio sugere ausência de geração ácida ou a lixiviação da acidez presente, considerando também a neutralidade da água destilada-deionizada das colunas;
- As oscilações verificadas para o Eh são inconclusivas, não sendo observada tendência de aumento das condições oxidantes ou redutoras. De forma geral, os valores se situam entre 100 e 300 mV, o que não denota condições oxidantes para a geração ácida;
- Verificou-se redução significativa da condutividade elétrica, indicando pouca lixiviação da fase sólida;
- Não foi possível verificar tendência de reações exotérmicas ou endotérmicas durante os ensaios, considerando a temperatura da água destilada-deionizada na entrada das colunas e também a oscilação da temperatura do lixiviado.

Os resultados obtidos do monitoramento do lixiviado do extrator Soxhlet são apresentados nas Figuras 11 a 13. A título de comparação, foram incluídos nestes diagramas cartesianos os resultados do monitoramento do ensaio CL1 das colunas de lixiviação.

De um modo geral se observou que o pH se elevou em aproximadamente 1 ponto em oito ciclos de lixiviação, à semelhança do resultado do ensaio CL1. Portanto, os resultados mostraram que durante os primeiros ciclos não houve variação significativa nos dois métodos cinéticos, mesmo considerando que a taxa de intemperismo no extrator Soxhlet possa ser maior em relação às colunas de lixiviação.

Mais uma vez se constatou a ausência da geração ácida na amostra 5A nos tempos considerados, tal qual no ensaio CL1. Observou-se, também, que as condições de Eh do ensaio CL1 foram um pouco mais oxidantes do que no extrator. Tal fato pode estar relacionado às maiores temperaturas alcançadas no extrator (ebulição), que causaram a expulsão do oxigênio do sistema, diminuindo as condições oxidantes.

A evolução da condutividade elétrica em ambos os tipos de ensaios mostrou maiores valores iniciais para o ensaio CL1 (coluna de lixiviação) em relação ao ensaio ES1 (extrator Soxhlet), indicando maior solubilização de íons no primeiro. Tal fato provavelmente se deve a maior quantidade de amostra presente na coluna de lixiviação. De qualquer forma, a tendência da CE em ambos os ensaios é diminuir até próximo de zero, indicando que não há aumento de solubilização com o tempo, fato que corrobora a observação sobre a neutralização ou ausência de geração ácida feita para o pH e Eh.

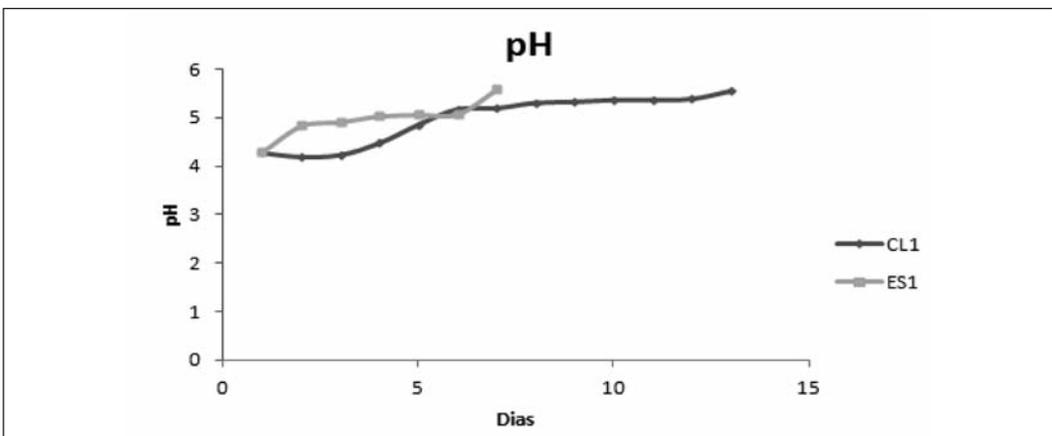


Fig. 11 – Evolução do pH nos ensaios ES1 e CL1.

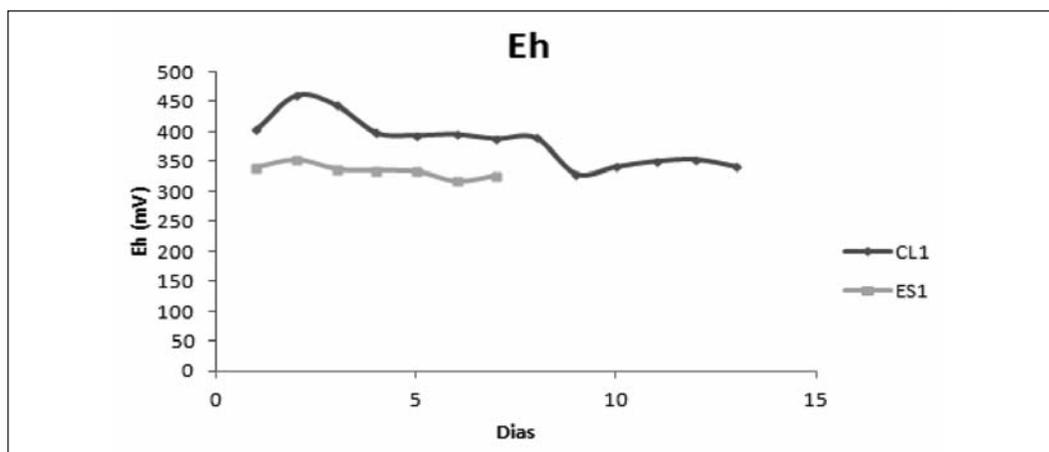


Fig. 12 – Evolução do Eh nos ensaios ES1 e CL1.

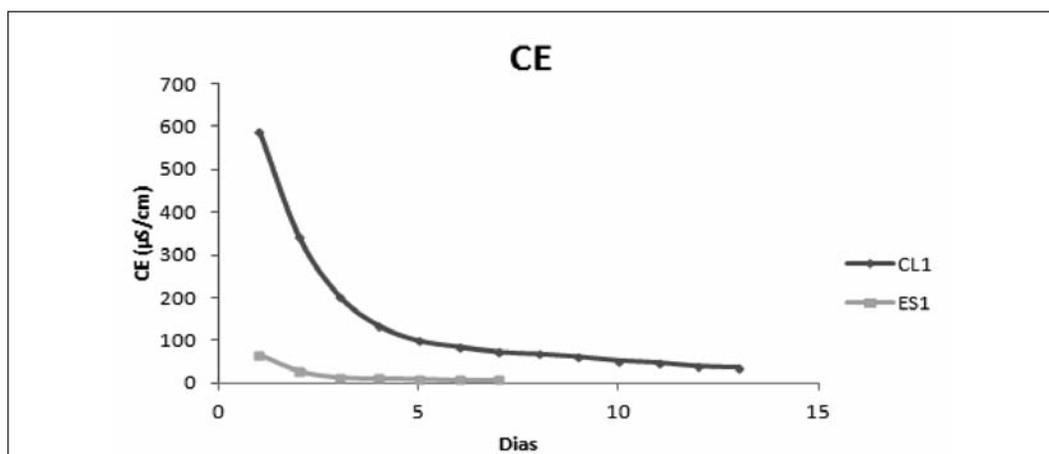


Fig. 13 – Evolução da CE nos ensaios ES1 e CL1.

Comparando-se os resultados gerados a partir do extrator Soxhlet com os obtidos através dos ensaios em colunas, verifica-se uma elevação moderada do pH, demonstrando que durante os primeiros ciclos não há variação significativa nos dois métodos, mesmo considerando que a taxa de intemperismo no extrator seja maior. Mais uma vez se constatou a ausência da geração ácida na amostra 5A, tal qual no ensaio em coluna de lixiviação, considerando o tempo de ensaio em questão.

Conclui-se, ainda, que as condições de Eh do ensaio em coluna foram um pouco mais oxidantes do que no extrator Soxhlet. Tal fato pode estar relacionado às maiores temperaturas alcançadas no extrator (ebulição), que causaram a expulsão do oxigênio do sistema, diminuindo a oxidação.

Finalmente, a condutividade elétrica mostrou-se mais acentuada nos ensaios de coluna, indicando maior solubilização de íons no primeiro. Tal fato provavelmente se deve a maior quantidade de amostra presente na coluna de lixiviação. De qualquer forma, a tendência da CE em ambos os ensaios é diminuir até próximo de zero, indicando que não há aumento de solubilização com o tempo, fato que corrobora a observação sobre a neutralização ou ausência de geração ácida feita para o pH e Eh.

A campanha laboratorial foi encerrada com ensaios de ciclagem (natural/com etilenoglicol) que, de maneira geral, apresentaram convergência nos resultados, evidenciando perdas de massa desprezíveis e efeitos incipientes nas amostras ensaiadas (Quadros 7 e 8). Durante o exame qualitativo macroscópico não foram observados quaisquer sinais de deterioração, fissuração ou lascamento dos grãos de rocha.

**Quadro 7** – Perdas de massa obtidas no ensaio de ciclagem com etilenoglicol.

Tipo	Ciclo	Duração (h)	$m_0$ (kg)	m (kg)	Perda de massa (%)
Ciclagem com etilenoglicol	1	24	1,5	1,5	0
	2	24	1,5	1,5	0
	3	24	1,5	1,5	0
	4	24	1,5	1,5	0
	5	24	1,5	1,5	0
	6	24	1,5	1,499	0,067
	7	24	1,5	1,499	0,067
	8	24	1,5	1,499	0,067
	9	24	1,5	1,499	0,067
	10	24	1,5	1,499	0,067
	11	24	1,5	1,499	0,067
	12	24	1,5	1,499	0,067
	13	24	1,5	1,499	0,067
	14	24	1,5	1,498	0,133
	15	24	1,5	1,498	0,133
	16	24	1,5	1,498	0,133
	17	24	1,5	1,498	0,133
	18	24	1,5	1,498	0,133

Lima (2009) relata os resultados de estudos de percolação em grandes lisímetros de campo utilizando amostras de xistos (5 e 5A) do enrocamento da barragem de Irapé, constatando que para algumas a geração ácida foi praticamente instantânea, fato que não foi percebido nos resultados da presente pesquisa. Adicionalmente, Lima (2009) reporta a grande heterogeneidade de comportamento das amostras locais em termos de geração ácida, mesmo após dois anos de percolação, o que talvez possa explicar o comportamento variável das amostras aqui estudadas.

De qualquer maneira tempos maiores de ensaios são sugeridos tanto para os ensaios de lixiviação, quanto para a ciclagem natural, levando-se em consideração também a intervenção bacteriológica por meio de bioadição e bioestimulação. Adicionalmente sugere-se a aplicação do peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), um poderoso agente oxidante, em substituição ao etilenoglicol nos ensaios de ciclagem.

**Quadro 8** – Perdas de massa obtidas no ensaio de ciclagem natural.

Tipo	Ciclo	Duração (h)	m <sub>0</sub> (kg)	m (kg)	Perda de massa (%)
Ciclagem natural	1	48	1,5	1,5	0
	2	48	1,5	1,5	0
	3	48	1,5	1,498	0,133
	4	72	1,498	1,498	0
	5	72	1,498	1,498	0
	6	72	1,498	1,498	0

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A campanha laboratorial mostrou a presença de sulfetos (pirrotita e calcopirita) na análise petrográfica e os resultados dos ensaios NAG revelaram potencial de geração ácida em algumas das amostras. Por outro lado, baixos teores de enxofre foram detectados nas análises químicas e também os ensaios cinéticos em colunas e no extrator Soxhlet não revelaram a presença de geração ácida. Adicionalmente, nenhuma alteração intempérica relevante foi verificada nos ensaios de ciclagem.

Infere-se, então, que o tempo aplicado nos ensaios de lixiviação e o número de ciclos dos ensaios de ciclagem não foram adequados, e dessa maneira são recomendados prazos maiores e um maior número de ciclos para análises futuras com estes materiais.

Reconhece-se que a cinética química e as reações envolvidas no processo de geração ácida nos ensaios cinéticos são complexas, envolvendo fatores de caráter mineralógico, físico, químico e biológico, e esta complexidade dificulta a interpretação dos fatos verificados nos ensaios. Por outro lado, não se podem desprezar os resultados destes ensaios, pois seus aspectos constitutivos e operacionais são mais parecidos aos fatos da obra em campo em relação aos resultados obtidos de análises químico-mineralógicas e também de ensaios estáticos.

Contudo, as atividades a seguir são apresentadas como sugestão de pesquisas laboratoriais futuras utilizando-se materiais da barragem de Irapé:

- Realização de ensaios cinéticos em períodos mais longos (anuais), de modo a se melhor avaliar a cinética química envolvida;
- Catalisação de uma possível geração ácida por meio da adição de populações bacterianas cultivadas em laboratório (bioadição ou bioestimulação);
- Emprego de células de umidade em períodos superiores (5 meses) aos preconizados pela norma ASTM D5744-96.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Cemig Geração e Transmissão S.A. pela disponibilização de dados e informações do projeto da UHE Irapé; aos alunos Marcela Mapa e Miguel Paganin pela realização dos ensaios e aos revisores do artigo, que muito contribuíram para o presente texto.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aires, A.D.B. (2006). *Estudo tensão-deformação da barragem de Irapé*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 167p.
- ASTM D5744-96 (1996). *Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Materials Using a Modified Humidity Cell*.
- Duarte, M.G. (2011). *Ensaaios laboratoriais para avaliação da drenagem ácida na barragem da UHE Irapé*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 135p.
- Evangelou, V.P. (1995). *Pyrite Oxidation and Its Control: Solution Chemistry, Surface Chemistry, Acid Mine Drainage (AMD), Molecular Oxidation Mechanisms, Microbial Role, Kinetics, Control, Ameliorates and Limitations, Microencapsulation*. CRC Press, New York, USA, 293p.
- Guimarães, A.T.A. (2012). *Estudos cinéticos para a previsão e prevenção de drenagem ácida: estudo do caso das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), Caldas, MG*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Conservação dos Recursos Naturais. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Hornberger, R.J.; Brady, K.B.C. (1998). *Kinetic (leaching) tests for the prediction of mine drainage quality*. In: Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Prevention in Pennsylvania, Harrisburg: Pennsylvania Department of Environmental Protection, pp. 7-1 to 7-54.
- Hornberger, R.J.; Brady, K.B.C.; Cuddeback, J.E.; White, W.B.; Scheetz, B.E.; Telliard, W.A.; Parsons, S.C.; Loop, C.M.; Bergstresser, T.W.; McCracken Jr., C.R.; Wood, D. (2004). *Refinement of ADTI-WP2 standard weathering procedures, and evaluation of particle size and surface area effects upon leaching rates: Part 1: Laboratory evaluation of method performance*. National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation and the 25th West Virginia Surface Mine Drainage Task Force. ASMR, Lexington, USA. pp. 916-947.
- Lima, A.L.C. (2009). *Influência da presença de sulfetos na implantação da UHE Irapé – Vale do Jequitinhonha – Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 206p.
- MEND (2009). *Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials*. MEND Report 1.20.1.
- Murta, F.C.; Leite, A.L.; Lima, H.M. (2008). *Estudos cinéticos de sistemas de coberturas alcalinas em pilha de estéril para a prevenção ácida de mina*. Revista Brasileira de Geociências, v. 38, pp. 227-236.
- Pereira, W.J.L. (2008). *Impermeabilização das superfícies de contato para implantação de estruturas de concreto em maciço de rocha sulfetada: o caso da UHE de Irapé*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 158p.
- Sengupta, M. (1993). *Environment Impacts of Mining – Monitoring, restoration and control*, Lewis Publishers, USA. 494p.