

MÉTODOS DE PREVISÃO DA GERAÇÃO DE ÁCIDO A PARTIR DE RESÍDUOS MINEIROS

António Fiúza*¹, Cristina Vila¹, Rocio Martinez²,

¹Cigar – Centro de Investigação em Geo-Ambiente e Recursos (CIGAR), Faculdade de Engenharia Universidade do Porto - Porto, Portugal

²Universidade de Sonora, Mexico

*Email: afiuza@fe.up.pt

RESUMO

A geração de drenados ácidos e a correspondente libertação de soluções aquosas contendo elevadas concentrações em metais e metalóides dissolvidos é um problema ambiental à escala global. Apesar de a drenagem ácida ser vulgarmente exclusivamente associada à exploração e ao tratamento de minérios onde ocorrem mineralizações na forma de sulfuretos, ou à exploração de carvões com sulfuretos associados, o fenómeno pode ocorrer sempre que exista qualquer escavação que exponha sulfuretos à acção do oxigénio e da água. Os grandes projectos de engenharia, tais como a construção de auto-estradas, portos, caminhos de ferro, aeroportos ou escavação de fundações envolvem muitas vezes situações de exposição ambiental que originam a geração de drenados ácidos.

Os testes laboratoriais utilizados para determinar o potencial de geração de ácido podem ser de natureza estática ou dinâmica. Um teste estático determina simultaneamente, a partir de uma amostra, a capacidade total de geração de ácido bem como o potencial total de neutralização desse ácido. A capacidade total de geração de ácido é determinada ou como a diferença entre estes valores ou como o seu quociente. A partir desses resultados pretende-se inferir se existirá ou não geração de ácido quando da exposição dos resíduos aos agentes meteóricos. Estes testes não determinam a cinética da geração de ácido mas apenas o potencial de produção. Os testes cinéticos pretendem simular, a uma velocidade acelerada, o que acontece nos locais mineiros. Exigem um tempo de realização superior e têm um custo também superior. Os dados obtidos a partir destes testes podem ser utilizados para classificar os resíduos de acordo com o seu potencial de geração de ácido. Esta informação, quando recolhida e avaliada durante o próprio estudo de viabilidade de um novo empreendimento mineiro ou de construção civil, permite projectar medidas de mitigação desde o início do projecto. A principal distinção operatória, a nível laboratorial, entre os dois tipos de testes reside no facto que os ensaios estáticos correspondem a uma única determinação temporal enquanto que os ensaios cinéticos recorrem a vários ciclos repetitivos de exposição da amostra a várias cargas de soluções aquosas. Os testes cinéticos permitem simultaneamente inferir a composição iónica dos lixiviados. De um modo genérico pode-se afirmar que sob o ponto de vista metodológico os ensaios estáticos, devido à sua rapidez e baixo custo, podem ser efectuados com um grande número de amostras constituintes de várias unidades litológicas representativas, enquanto que os ensaios dinâmicos serão efectuados sobre uma ou duas amostras, geralmente compósitas e com uma composição sugerida pelos resultados obtidos com os testes estáticos.

Os autores submeterem amostras dos resíduos do tratamento de minérios de duas explorações mineiras portuguesas em actividade a vários destes testes estáticos e dinâmicos, comparando-os entre si.

Introdução teórica

Apesar de a geração de drenados ácidos ser normalmente associada ao armazenamento de resíduos mineiros ela ocorre sempre que existe qualquer escavação que exponha sulfuretos à acção do oxigénio e da água, como pode acontecer nas grandes obras de construção civil. A previsão do potencial de geração de ácido e da correspondente cinética é extremamente difícil dada a sua dependência de inúmeros factores: os responsáveis pela geração local de ácido e os factores responsáveis pelo seu consumo local. Como método de análise podemos individualizar três tipos de acções: factores primários, secundários e terciários. Os factores primários são os responsáveis pela produção de ácido, tais como as reacções de oxidação. Os factores secundários são aqueles que agem no sentido de controlar as reacções de oxidação, tais como as reacções de neutralização com minerais que consomem ácido. Os factores terciários referem-se à disposição física da unidade de resíduos (paredes de cortas, escombrelas ou armazenamento de resíduos) que influenciam as reacções de oxidação, de migração do ácido e do seu consumo. Outros factores a jusante podem alterar o carácter dos escorrimentos essencialmente por reacções químicas ou por diluição. Estes factores não serão aqui analisados.

Os factores primários de geração de ácido incluem a presença de minérios na forma de sulfuretos, água, oxigénio, ião férrico, bactérias que catalisam as reacções de oxidação e o calor gerado. Alguns sulfuretos são facilmente oxidáveis (p.e pirite frambóidal, marcassite e pirrotite) e portanto podem ter um elevado impacte no timing e na amplitude quando utilizados numa análise de predição de geração de ácido, relativamente aos outros sulfuretos. É também importante a forma da ocorrência física do mineral. Os minerais bem cristalizados (euédricos) têm áreas superficiais de exposição inferiores aos dos minerais disseminados.

Quer a água, quer o oxigénio, são necessários ao processo de geração de ácido. A água serve simultaneamente como reagente e como meio para as bactérias no processo de oxidação. É também o meio de transporte dos produtos da reacção. É igualmente necessário um fornecimento rápido de oxigénio atmosférico para conduzir as reacções de oxidação. O oxigénio é particularmente importante para manter as oxidações rápidas catalisadas pelas bactérias a pH inferior a 3,5. A oxidação dos sulfuretos é significativamente reduzida quando a concentração de oxigénio nos poros se torna inferior a 1 ou 2%. Diferentes bactérias estão melhor adaptadas a diferentes níveis de pH e a outros factores edáficos. O tipo de bactéria e a sua população varia à medida que as suas condições de crescimento são optimizadas.

A reacção de oxidação é exotérmica e tem um elevado potencial para gerar uma grande quantidade de calor, e portanto de gradientes térmicos dentro da unidade. O calor da reacção é dissipado por condução térmica ou por convecção. A investigação mostrou que o fluxo térmico convectivo pode ocorrer devido às elevadas porosidades do material. Formam-se células convectivas na rocha que originam influxos de ar e que tendem assim a prosseguir as reacções de oxidação. Os fluxos convectivos de gás, devidos à oxidação dos sulfuretos, dependem da temperatura máxima no resíduo. Por sua vez, esta temperatura máxima depende da temperatura da atmosfera ambiente, da intensidade da fonte de calor e da natureza da fronteira superior. Se os sulfuretos estiverem concentrados num local, como no caso da encapsulação, a fonte de calor pode ser muito intensa.

Os factores secundários agem no sentido de neutralizar o ácido gerado pela oxidação dos sulfuretos ou de alterar as características dos efluentes retendo parcialmente alguns dos iões metálicos lixiviados pelo ácido residual. A neutralização do ácido pela alcalinidade libertada

quando os ácidos reagem com minerais carbonatados é um factor importante na moderação da produção de ácido. Os minerais neutralizadores mais comuns são a calcite e a dolomite. Os produtos da reacção de oxidação (catiões hidrónio, iões metálicos, etc) podem também reagir com outros constituintes não neutralizantes. As reacções possíveis incluem a permuta iónica em partículas argilosas, precipitação pelo gesso e dissolução de outros minerais. Esta última contribui para um incremento na carga contaminante das soluções libertadas. Alguns exemplos mais vulgares dos metais que ocorrem nos derrames são o Al, o Cu, o Pb e o Zn.

Alguns dos factores terciários que afectam os derrames são as características físicas do material, a forma como os materiais geradores de ácido e neutralizantes estão colocados e o regime hidrológico nas proximidades. Algumas características físicas do material são relevantes, tais como a granulometria, a permeabilidade e as características de meteorização física. A granulometria é uma preocupação fundamental uma vez que afecta a área superficial exposta à meteorização e à oxidação. A área superficial é inversamente proporcional ao calibre da partícula. Os materiais com grãos muito grossos, tais como os encontrados nos escombros, expõem uma área superficial inferior, mas permitem que o ar e a água penetrem mais profundamente na unidade, expondo maior volume de material à oxidação e eventualmente produzindo mais ácido. A circulação do ar nos materiais grosseiros é ajudada pelo vento, por alterações na pressão barométrica e possivelmente por fluxos convectivos de gás provocados pelo calor gerado pelas reacções de oxidação. Em oposição o material de fina granulometria pode retardar a circulação de ar e o material muito fino restringe a circulação de água, expondo no entanto uma área superficial maior. As relações entre a granulometria, a área superficial e a oxidação desempenham um papel fundamental na previsão da geração de ácido. À medida que o material sofre a acção dos agentes erosivos, a granulometria reduz-se expondo uma área superficial maior e alterando as características físicas da unidade. Apesar de serem difíceis de ponderar, cada um destes factores afecta o potencial de geração de ácido e devem ser tidos em conta nas previsões a longo termo.

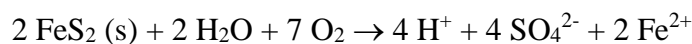
A hidrologia da área que circunda os trabalhos mineiros e a armazenagem de resíduos é igualmente importante na análise do potencial de geração de ácido. Uma cobertura aquosa dos resíduos, tal como se faz na deposição sub-aquática, inibe a formação de ácido dada a baixa solubilidade do oxigénio na água.

Ciclos alternados de humificação e de secagem em qualquer trabalho mineiro, ou nas unidades de armazenamento de resíduos, podem afectar o carácter dos derrames ácidos produzidos. Uma humificação frequente tende a gerar um volume de ácido constante com outros contaminantes uma vez que a água vai lixiviando esses compostos lavando simultaneamente o material depositado. A acumulação (buil-up) de contaminantes no sistema é proporcional à duração do período entre ciclos de humificação. À medida que o período de duração dos ciclos secos aumenta, os produtos da oxidação tendem a acumular-se no sistema. Uma humificação intensa tenderá a lavar e a retirar os contaminantes acumulados para fora do sistema. Esta relação é típica do incremento da carga contaminante que é observada a seguir a precipitações intensas.

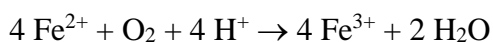
Oxidação dos Sulfuretos Metálicos

A oxidação dos sulfuretos metálicos consiste numa sequência de reacções. Cada sulfureto tem uma cinética própria. P.e. a marcassite e a pirite frambóidal oxidam-se rapidamente enquanto que a pirite cristalina se oxida lentamente.

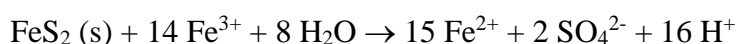
Num primeiro passo os sulfuretos são oxidados originando cationes hidrónio e sulfato que são os produtos da dissociação de ácido sulfúrico em solução.



O Fe^{2+} formado pode continuar a reagir. A oxidação do ião ferrosos a férrico ocorre a valores do pH mais baixos:



A níveis de pH entre 3,5 e 4,5 a oxidação do ferro é catalizada por uma variedade de *Metallogenium*, uma bactéria filamentosa. A pH abaixo dos 3,5 a mesma reacção é catalizada por bactérias acidófilas, sendo o *thiobacillus ferrooxidans* a mais frequente. O catião Fe(III) em contacto coma a pirite origina a sua dissolução



Esta reacção gera mais ácido. A dissolução da pirite pelo ião férrico, em conjugação com a oxidação do ião ferroso, constitui o **ciclo de dissolução da pirite**. O ião férrico precipita na forma de hidróxido de ferro



facilmente identificável através da deposição de precipitados amorfos, amarelos, laranja ou vermelhos no fundo das correntes (“yellow boy”)

Testes de Previsão

Os testes analíticos utilizados para determinar o potencial de geração de ácido podem ser de natureza estática ou dinâmica. Um teste estático determina, simultaneamente, a partir de uma amostra, a capacidade total de geração de ácido bem como o potencial total de neutralização desse ácido. A capacidade total de geração de ácido é determinada ou como a diferença entre estes valores ou como o seu quociente. Estes testes não determinam a cinética da geração de ácido mas apenas o potencial de produção. Os testes estáticos são conduzidos de forma expedita e apresentam custos pouco relevantes. Os testes cinéticos pretendem simular o que acontece nos locais mineiros, normalmente a uma velocidade acelerada. Exigem um tempo de realização superior e custam mais caro. Os dados obtidos a partir destes testes podem ser utilizados para classificar os resíduos de acordo com o seu potencial de geração de ácido. Esta informação pode ser recolhida e avaliada durante o próprio estudo de viabilidade de um novo empreendimento mineiro. Neste fase esta informação permite desde logo projectar medidas de mitigação.

Testes estáticos de determinação do potencial de geração de ácido

O nosso estudo incidiu sobre amostras recolhidas em duas minas: Neves-Corvo e Panasqueira. Em qualquer dos casos tratava-se de resíduos do tratamento de minérios obtidos na linha de produção. As razões para a escolha destes resíduos são as seguintes:

- Eram resíduos frescos que não foram alterados por reacção com o oxigénio atmosférico, tal como aconteceria se as amostras fossem retiradas de barragens de armazenamento de resíduos;
- Os resíduos do tratamento têm concentrações em sulfuretos muito mais elevadas que os escombros e portanto o seu potencial de geração de ácido é muito mais elevado.

Os resíduos foram previamente caracterizados física e quimicamente, executando-se as seguintes determinações:

- Análise química por fluorescência de raios X de energia dispersiva;
- Análise granulométrica;

Os métodos de previsão da geração de ácido seleccionados foram os seguintes:

- Balanço Ácido-Base;
- Balanço Ácido-Base Modificado;
- Método da Produção Líquida de Ácido.

Como se referiu na introdução teórica estes testes baseiam-se num balanço (diferença ou quociente) entre os potenciais de geração de ácido e os potenciais de neutralização desse ácido. A capacidade de geração de ácido é essencialmente determinada pela concentração em sulfuretos, enquanto que a capacidade neutralizadora depende da quantidade de minerais consumidores (carbonatos, alumino-silicatos, argilas,...). Estes ensaios não determinam a cinética mas apenas o potencial de geração.

No primeiro método o potencial de geração de ácido (AP) é determinado a partir do teor total em enxofre existente na amostra, de acordo com a equação

$$AP = 31,25.\% S$$

O valor de AP exprime-se em toneladas de acidez por tonelada de rocha.

O potencial de neutralização é inicialmente determinado por um ensaio simples de neutralização com NaOH 1N, a pH 7,0, após reacção de 500 mg da amostra com 20 mL de HCl 1N.

O potencial líquido de neutralização (NNP), determina-se subtraindo do potencial de acidez (AP), o potencial de neutralização (NP), que é uma medida de diferença entre os dois potenciais. O resultado pode ser positivo ou negativo. Os valores inferiores a **20** (kg CaCO₃/ton de rocha), são presumivelmente geradores de ácido. Os valores superiores a **20** indicam que os resíduos não são potencialmente geradores de ácido.

No método do Balanço Ácido-Base Modificado, a determinação do potencial de geração é idêntica ao anterior. A determinação do potencial de neutralização (NP) é diferente: faz-se uma digestão ácida com HCl 1 N durante 24 h, à temperatura ambiente. O consumo de ácido na digestão é determinado através de uma titulação com NaOH 1N até se obter um pH terminal de 8,3.

No Método da Produção Líquida de Ácido utiliza-se peróxido de hidrogénio para acelerar a oxidação dos sulfuretos. Toma-se uma amostra de 5 g que se adiciona a uma matraz com 100 mL de uma solução de H₂O₂ preparada a 15% para oxidar os sulfuretos metálicos. Adopta-se um tempo de reacção de 2h, sendo o pH terminal de 7. Este método é diferente dos anteriores pois tem simultaneamente em consideração os potenciais de geração e de neutralização gerando um único valor – o potencial líquido de geração.

Os resultados obtidos foram concordantes em todos os testes realizados evidenciando-se um potencial evidente para gerar drenados mineiros ácidos.

Realização de ensaios cinéticos

Os testes cinéticos distinguem-se dos testes estáticos na medida em que tentam simular as reacções de oxidação natural que ocorrem no campo. Estes testes utilizam um maior volume de amostra e demoram bastante mais tempo que os testes estáticos. Por outro lado fornecem informações relativas à cinética da oxidação dos sulfuretos e portanto da produção de ácido,

bem assim como são indicadores da qualidade da água de drenagem. Existem diferentes testes cinéticos e nenhum deles é preferencial.



Armazenamento de resíduos na Mina da Panasqueira sendo visíveis os DMA.

Os testes cinéticos podem também ser utilizados para avaliar o impacto de diferentes variáveis no potencial de geração de ácido. Por exemplo, as amostras podem ser inoculadas com bactérias (uma exigência em alguns testes); a temperatura do ambiente da amostra pode ser controlado durante o teste. A maior parte dos testes exigem que a granulometria da amostra seja inferior a um determinado calibre (p.e., menos 200 mesh), apesar de poder também estimar a formação de ácido a partir de partículas mais grossas, adaptando convenientemente o procedimento. Os mecanismos de controlo da drenagem de ácido, tais como o aumento da alcalinidade pela adição de cal, também podem ser estudados durante a realização dos testes.

Os testes podem ser completados com informação adicional, tais como a análise da superfície específica, da mineralogia e de metais. Esta informação pode afectar a interpretação dos dados dos testes e é importante quando se fazem comparações espaciais e temporais entre comportamentos de diferentes amostras. Tal como nos testes estáticos é importante considerar a granulometria da amostra testada, particularmente quando se comparam os resultados dos testes com os obtidos no campo.

Nos ensaios dinâmicos pretende-se acelerar as reacções de geração que ocorrem no campo, estudando-se simultaneamente a sua cinética. Seleccionaram-se dois métodos:

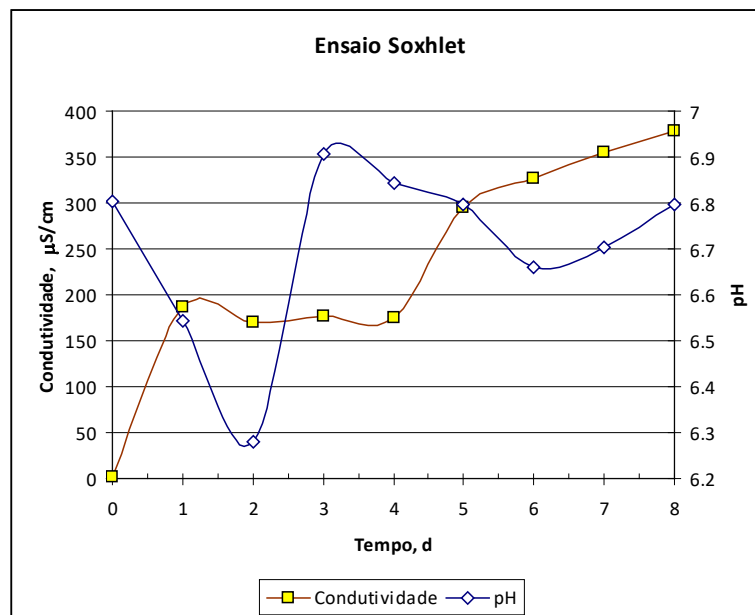
- A extracção soxhlet;
- Ensaios em coluna com ciclos alternados de humidificação/secagem.

O primeiro teste simula a erosão geoquímica utilizando um aparelho de extracção soxhlet para recircular as soluções através da amostra. A amostra é colocada num casquilho dentro da unidade e a solução é circulada a partir de um reservatório. Utilizam-se duas versões – uma é o teste padrão descrito por Singleton e Lavkulich (1978); a outra é o teste modificado por Sobek et al (1978). No ensaio padrão a amostra é lixiviada utilizando ou uma solução de ácido acético a 70 °C ou água destilada durante um período de cerca de 6 semanas (a duração pode ser variável). O teste modificado apenas utiliza água destilada a 90 °C.



Ensaio Soxhlet

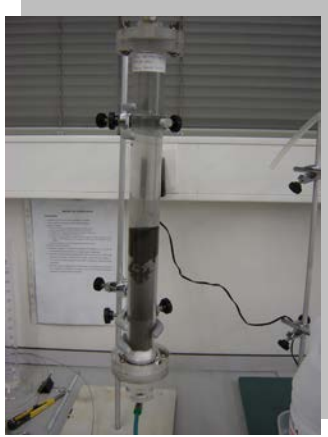
Na variante que adoptámos diariamente era retirada uma amostra de água na qual se determinavam os seguintes parâmetros; pH, condutividade, sólidos totais dissolvidos e salinidade.



Ensaio Soxhlet - Medições na fase aquosa

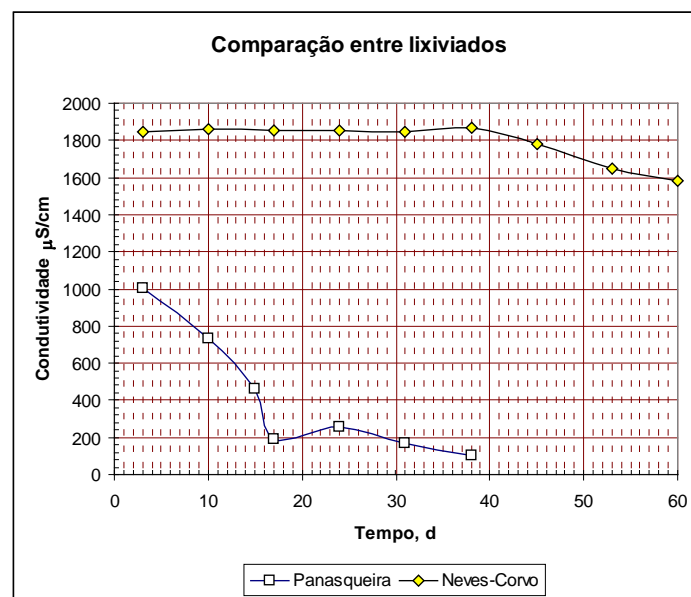
No gráfico é notório que a condutividade aumentou temporalmente devido à progressiva lixiviação de minerais da amostra.

Os testes de coluna são conduzidos colocando o material em colunas (cilindros) ou em dispositivos idênticos. Criam-se ciclos de molhagem e secagem adicionando água e permitindo a sua evaporação. Cada um dos ciclos pode ocorrer durante um período de alguns dias até uma semana, ou mais, apesar de tipicamente a duração ser de 3 dias. Devem-se tomar precauções para evitar curtos circuitos ao longo das paredes da coluna. A água adicionada à coluna é recolhida e analisada para determinar a cinética da oxidação, a produção de sulfatos, a libertação de metais e outros parâmetros.



Ensaio em coluna

Na figura seguinte apresentamos uma comparação entre os resíduos das duas minas. Para o mesmo procedimento foram determinadas as condutividades da água recolhida ao fim de cada ciclo de molhagem. É evidente que os resíduos de Neves Corvo são muito mais facilmente lixiviáveis (condutividades muito superiores). Podemos também concluir que nos resíduos da Panasqueira existe uma lixivação inicial rápida dos resíduos, correspondendo à dissolução de minerais facilmente lixiviáveis, após o que fica uma matriz relativamente difícil de solubilizar.



Ensaio em Coluna – Comparação das condutividades

Quando os testes terminaram analisou-se a fase sólida e pela diferença relativamente à composição inicial verificou-se quais os elementos que tinham sido lixiviados. Os resultados evidenciaram que os resíduos de Neves-Corvo eram mais facilmente solubilizados.

Determinação da actividade biológica

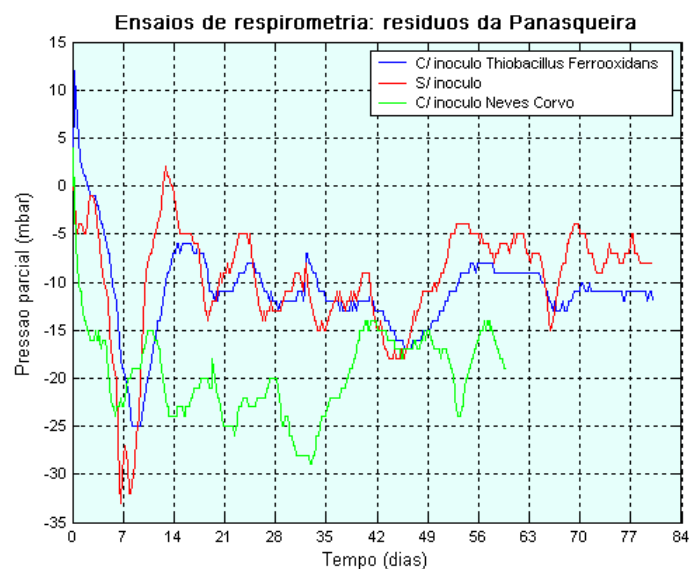
Apesar de os nossos laboratórios disporem de equipamento mais sofisticado, testou-se a influência da componente biológica na geração de ácido utilizando respirómetros de solo Oxi-Top. Utilizámos três reactores nos quais colocámos resíduos da mina da Panasqueira; num

deles tal-qual, como recolhido, noutra reactor inoculando bactérias do tipo *thiobacillus ferrooxidans*, e no terceiro, resíduos inoculados com inóculo obtido anteriormente a partir dos resíduos de Neves-Corvo. O equipamento mede para uma duração máxima de 90 dias a carência de oxigénio atmosférico.



Ensaio em Respirómetros Oxi-Top

Os resultados obtidos são apresentados no gráfico seguinte:



Nota-se que a carência de oxigénio é inferior nos resíduos sem inóculo. Nos resíduos com inóculo de bactérias *Thiobacillus ferrooxidans* o defeito de oxigénio é ligeiramente superior. No caso da inoculação com inóculo retirado dos resíduos de Neves-Corvo o defeito de oxigénio é notável o que realça a existência de uma elevada actividade biológica nesses resíduos que utilizam a oxidação dos sulfuretos como fonte de energia.

Os testes no campo utilizam grandes volumes de material para construir células de teste nas condições ambientais reais, ou seja sujeitos aos agentes atmosféricos. O tamanho da amostra pode variar de centenas de quilos a centenas de toneladas, dependendo do espaço disponível. A amostra não é normalmente fragmentada para se ter uma melhor aproximação às condições reais. A amostra é colocada por cima de um fundo impermeabilizado que permita a recolha das soluções existindo canais colectores para recolha dos lixiviados. Mede-se o volume de solução e determina-se o pH, os sulfatos, metais dissolvidos e outros parâmetros.

A consideração das **condições climatéricas** é importante na avaliação dos testes realizados no campo. Estes efeitos devem ser distinguidos da cinética de oxidação dos sulfuretos, da geração de ácido, da neutralização e da dissolução de metais determinados pela análise dos soluções de lixiviação. Isto é necessário porque os efeitos climáticos, especialmente a precipitação, determinam a relação de fases L/S existente mas não influenciam a cinética da reacção ou a composição química subsequente dos lixiviados.

Os teste de campo têm a vantagem de serem conduzidos nas mesmas condições ambientais em que estarão os resíduos cujo comportamento pretendem simular. Também permitem verificar a influência das bactérias e de medidas de controlo. Um grande inconveniente é a sua longa duração. Ao contrário dos outros testes cinéticos as condições ambientais não são aceleradas. Consequentemente os testes de campo fornecerão uma informação sobre o potencial de geração de ácido para o tempo durante o qual decorreu a experiência. Em alguns casos este tempo pode ser superior a 10 anos.

Ensaio de campo com cobertura secas

Nos ensaios de campo que realizámos pretendemos também comparar os resultados obtidos para uma deposição de resíduos tal-qual (contentor 1) com deposições em que se utilizava uma cobertura de argila para restringir a difusão de oxigénio (contentor 2) e uma cobertura múltipla constituída por argila (restrição da difusão do oxigénio) e por um material orgânico com elevada actividade biológica por bactérias heterotróficas aeróbias (camada consumidora de oxigénio – contentor 3). Os ensaios decorreram simultaneamente em paralelo utilizando-se para cada situação 200 kg de amostra de resíduos da Panasqueira.

As amostras de 200 kg foram colocadas em contentores com as seguintes características: comprimento 1,10 m, largura 0,90 m e profundidade 0,60 m. As paredes laterais e a base foram forradas com um material plástico. Na base foi ainda colocado um filtro para filtrar partículas sólidas em suspensão.

A metodologia foi a seguinte:

- Colocou-se inicialmente o filtro na base e nas paredes internas;
- Depois revestiu-se o fundo e as paredes laterais com plástico;
- Na pilha sem cobertura – contentor 1 - colocaram-se 200 kg de resíduos. A altura alcançada foi de cerca de 15 cm;
- No contentor 2 colocou-se também cerca de 200 kg de resíduos e uma cobertura de composto orgânica constituída por cerca de 10 kg de material, perfazendo uma espessura de 3 cm;
- No contentor 3 os resíduos tiveram uma cobertura múltipla com a seguinte composição da base para o topo: resíduos (cerca de 200 kg – 15 cm), composto (10 kg – 3 cm) e argila (0,75 cm de espessura);

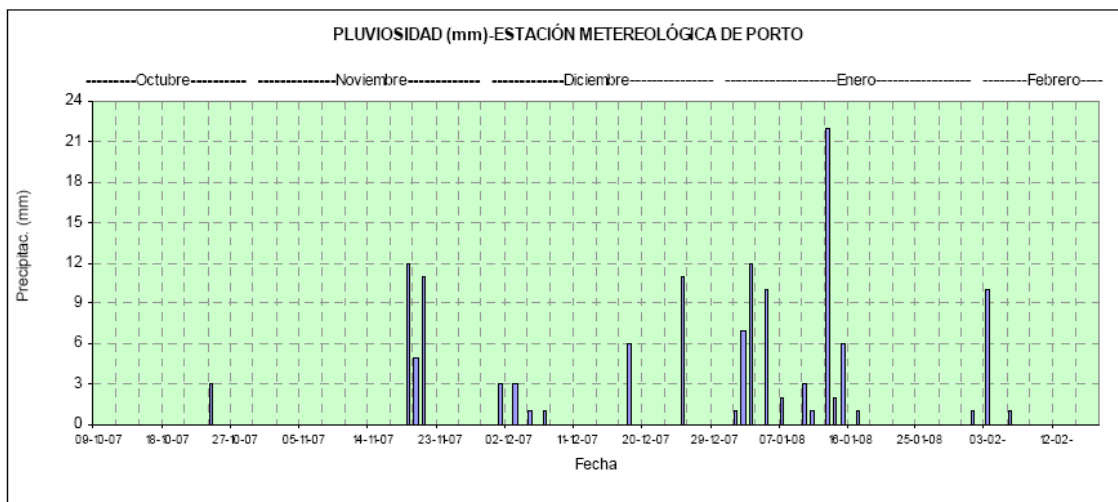
- Cada contentor assentou sobre outro contentor idêntico.



Aspectos do dispositivo experimental

Como metodologia fez-se uma análise química global dos resíduos antes e depois da experimentação e determinou-se a evolução temporal de parâmetros de qualidade da água nos lixiviados produzidos.

A experiência decorreu durante 6 meses no Outono de 2007 e Inverno de 2008. Verificaram-se condições atmosféricas anormais para estas épocas do ano com muito pouca pluviosidade, concentrada em períodos muito curtos, restringindo a quantidade e representatividade da informação obtida uma vez que os lixiviados apenas eram produzidos a seguir a períodos de chuva.

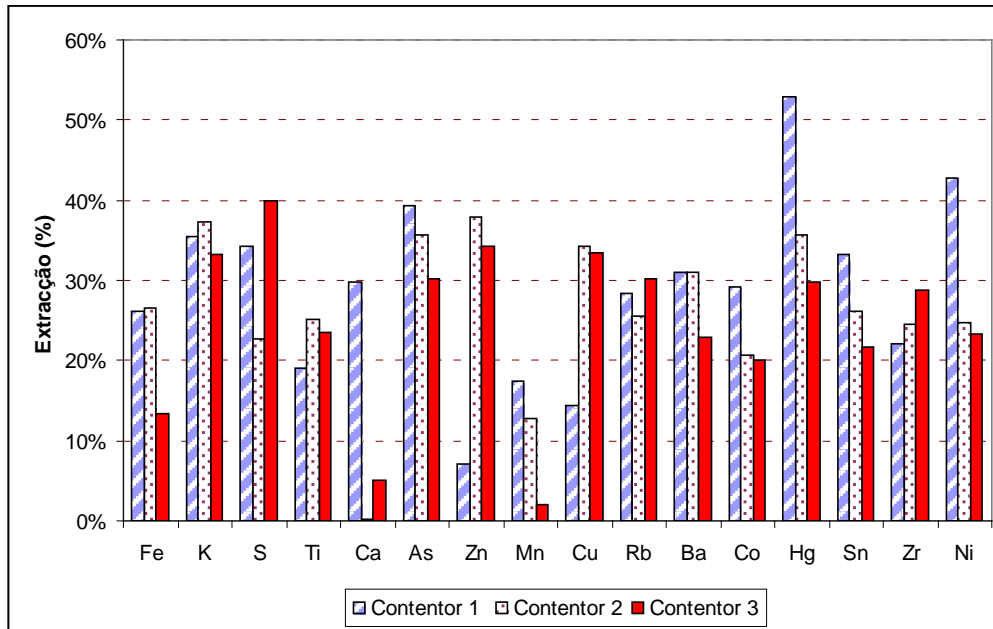


Registo da pluviosidade durante a experiência

Como resultados globais pode-se inferir que:

- O pH dos lixiviados produzidos no armazenamento sem cobertura era inferior ao obtido no contentor 2, por sua vez inferior ao do contentor 3. Existe portanto uma diminuição na produção de ácido restringindo o acesso de oxigénio e, ainda maior, restringindo e consumindo-o;
- Relativamente à condutividade dos lixiviados, o armazenamento com cobertura simples de argila apresenta um elevado atraso temporal /cerca de 2 meses) na geração de lixiviados condutivos;

- Relativamente à salinidade dos lixiviados os valores obtidos são idênticos nas três situações.
- Finalmente, relativamente à lixiviação de elementos existentes nos resíduos, o contentor com dupla cobertura evidenciou uma lixiviação muito inferior de todos os elementos à excepção do S e zircónio



Comparação da Extracção de Metais

Modelos de Difusão do oxigénio

Finalmente construíram-se ainda modelos de simulação da penetração de oxigénio através dos resíduos e das respectivas coberturas, com ou sem consumo interno do oxigénio, bem como um modelo agregado de penetração através de um sistema multi-camada. Os resultados obtidos serão divulgados posteriormente.

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia o financiamento do projecto POCI/ECM/60438/2004 no âmbito do qual esta investigação foi realizada.

REFERÊNCIAS

British Columbia AMD Task Force, December 1989. Acid Rock Drainage Draft Technical Guide, Volumes I and II. Report 66002/2. Prepared for the British Columbia AMD Task Force by SRK, Inc.

Blowes D.W., Ptacek C.J., Weisener C.G., The Geochemistry of Acid Mine Drainage, in Environmental Geochemistry. Edited by Barbara Wherwood Lollar, Treatise on Geochemistry, Vol 9, Elsevier, (2005)

Brodie, M.J., L.M. Broughton, and Dr. A. MacG. Robertson, A Conceptual Rock Classification System for Waste Management and a Laboratory Method for ARD Prediction From Rock Piles. In Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage.

Conference Proceedings, Volumes 1 - 4, September 16, 17, and 18, 1991, Montreal, Canada., 1991

Coastech Research Inc., Investigation of Prediction techniques for Acid Mine Drainage. MEND Project 1.16.1a. Canada Center for Mineral and Energy Technology, Energy, Mines, and Resources Canada. 61 pages, 1989

Lapakko, K. 1988. Prediction of Acid Mine Drainage From Duluth Complex Mining Wastes In Northeastern Minnesota. In: Mine Drainage and Surface Mine Reclamation. Volume I: Mine Water and Mine Waste. U.S. Department of Interior, Bureau of Mines Information Circular 9183. p.180-191.

Nicholson, Ronald V., 1992. A Review of Models to Predict Acid Generation Rates in Sulphide Waste Rock at Mine Sites. Presented to the International Workshop on Waste Rock Modelling, sponsored by the Mine Environment Neutral Drainage Program, September 29 - October 1, 1992 in Toronto, Canada.

Schafer, Dr. William M., Design of Geochemical Sampling Programs. In Mine Operation and Closure Short Course. Sponsored by EPA and others April 27 - 29, 1993. Helena, MT. (1993)

Singleton, G.A. and L.M. Lavkulich, 1978. Adaption of the Soxhlet Extractor for Pedologic Studies. Soil Science Society of America Journal, Vol. 42, p. 984-986.

Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R. Smith, R.M. 1978. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Minesoils. EPA 600/2-78-054.

Sugarek, R., 1993, Personal communication between Rick Sugarek, Remedial Project Manager for Iron Mountain Mine, EPA Region 9, and Chris Lewicki, Science Applications International, April 5, 1993.

U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, Acid Mine Drainage Prediction, Dezembro 1994.

U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, 1991 (June 21). Mining Sites on the National Priorities List. Final Draft. NPL Site Summary Reports Volumes I-V. NTIS - PB 92-124767, PB 92-124775, PB 92-124783, PB 92-1