

Uso de entulho de construção civil como sistema de cobertura para abatimento de drenagem ácida de mina em uma mina abandonada de pirita

Use of solid residues from civil construction as a covering system for acid mine drainage abatement in an abandoned pyrite mine

Natália Cristiane de Moraes

Mestre em Engenharia Mineral,
PPGEM/UFOP
nataliacristianem@yahoo.com.br

José Margarida da Silva

Prof. do Departamento de
Engenharia de Minas/EM/UFOP
jms@demin.ufop.br

Hernani Mota Lima

Prof. do Departamento de
Engenharia de Minas/EM/UFOP
hernani.lima@ufop.br

Resumo

Em Ouro Preto/MG, pirita foi extraída em uma antiga mina, denominada Jazida de Pirita, durante os anos de 1930 a 1967. Considerada como uma das melhores jazidas de pirita no Brasil, essa mina foi explorada com o objetivo de atender à demanda por ácido sulfúrico, para fabricação de explosivos, da Fábrica Presidente Vargas em Piquete/SP. O local da mina está abandonado e tem, como principais passivos ambientais, a instabilidade das encostas e a geração de drenagem ácida. Atualmente, o local tem sido utilizado para lançamento clandestino de entulho na área o que contribui para o aumento do impacto ambiental. A Prefeitura de Ouro Preto, por sua vez, tem intenção de usar parte da área da mina para disposição de resíduo de construção civil. Esse artigo apresenta os resultados dos ensaios cinéticos realizados, em colunas de lixiviação, para avaliação do potencial de geração de drenagem ácida, em amostras coletadas da mina de pirita, e analisa a possibilidade de controle ou de minimização da drenagem ácida, utilizando-se do entulho como cobertura. Os resultados encontrados mostram que a utilização do entulho como sistema de cobertura foi eficiente na redução de acidez, na concentração de metais e sulfato presentes nas colunas analisadas.

Palavras-chave: Drenagem ácida de minas, entulho, colunas de lixiviação, Mina de Pirita.

Abstract

In Ouro Preto/MG, pyrite was exploited at an old mine from 1930 through 1967. Considered as one of the best resources of pyrite in Brazil, this mine was exploited in order to supply sulfuric acid for explosives manufacturing, at the President Vargas Plant in Piquete/SP. The mine site is abandoned and has slope instability and acid leakage generation as the main environmental liabilities. Lately, the site has been used for illegal deposition of all sorts of urban waste. The Ouro Preto Administration, on its turn, has the intention of using part of the mine site for the disposal of solid residues of civil construction. This paper presents the results of kinetic tests carried out, in leaching columns, to assess the acid mine drainage potential in samples collected from the mine site and to evaluate the possibility of controlling and minimizing acid generation by using solid residues as a covering system. Laboratory results show that

cover with solid residues of civil construction was effective in the reducing the acidity, concentration of metals and sulfate.

Keywords: Acid Mine Drainage, debris, leaching columns, Pyrite's Mine.

1. Introdução

Entre os municípios de Ouro Preto e de Mariana, região central do Estado de Minas Gerais, Brasil, localiza-se uma das antigas minas de pirita descrita por Djalma Guimarães. A mina, conhecida como Mina de Pirita, possuiu várias denominações, sendo a mais comum a de Jazida de Pirita. A mesma é também erroneamente denominada de Mina de Ojô, embora esta se localize a nordeste da área estudada.

A Mina de Pirita foi intensamente lavrada no período compreendido entre a Era Vargas e o início da década de 60, do século passado, pela Empresa Mineira de Pirita Ltda, tendo sido desativada pouco tempo depois. Na época, ela foi considerada como uma das melhores jazidas de pirita do Brasil, com uma reserva estimada de 10.000.000 toneladas (Lacourt, 1938). Foi explorada com o objetivo de se produzir ácido sulfúrico, utilizado principalmente para fins bélicos (confecção de pólvora) na Fábrica Presidente Vargas. Sabe-se que, durante a exploração, grandes quantidades de pirita foram mobilizadas e oxidadas, produzindo drenagem ácida de minas.

O processo de formação de drenagem ácida ocorre pela ação intensiva e prolongada do oxigênio atmosférico e da água sobre minerais sulfetados, que podem estar presentes em várias partes da mina, como cavas, pilhas de estéril, barragem de rejeitos e outras obras, como barragens de enrocamento e tú-

neis. Devido às múltiplas combinações de acidez e de constituintes metálicos presentes, cada drenagem ácida é única e o tratamento mais adequado pode variar amplamente de lugar para lugar.

A drenagem produzida pelo processo de oxidação pode ser neutra, ácida, com ou sem metais pesados, mas sempre contém sulfato. Além de ARD (acid rock drainage), a drenagem neutra de minas (DNM) ou a drenagem salina (DS) podem também ser resultados do processo de oxidação de sulfetos. A drenagem neutra de mina é caracterizada pela concentração elevada de metais em solução em um pH neutro. A drenagem salina contém elevadas concentrações de sulfato em um pH neutro sem concentração significante de metais. Nessas drenagens, os principais constituintes dissolvidos são os sulfatos, o magnésio e o cálcio (Vasconcelos et al., 2009).

Apesar de a pirita ser o principal mineral responsável pela acidez, existem metais bivalentes (Fe, Zn, Cd, Pb, Cu e Ni), presentes em outros minerais, responsáveis também pela produção de ácidos em reações químicas análogas à oxidação da pirita (Farfan et al., 2004). Em alguns casos, a geração de DAM pode ser devida à oxidação do enxofre elementar (Vasconcelos et al., 2009).

Hoje, a cava da mina, com aproximadamente 10 ha, faz parte de um contexto de disposição ilegal de resíduos de construção e demolição (RCD), po-

pularmente conhecidos como entulhos. O Município de Ouro Preto já possui instituídos alguns instrumentos de gestão urbana, entre eles o Plano Diretor (Lei Complementar no 29 de 28/12/06), que tem, como uma de suas políticas setoriais, a Gestão de Resíduos Sólidos.

Mariano (2008) realizou um estudo sobre as áreas de disposição ilegal de entulho na região de Ouro Preto e a Mina de Pirita foi um dos pontos diagnosticados como bota-fora. Ela foi classificada como Zona de Intervenção Especial (ZIE) e definida como uma área que demanda recuperação ambiental, em função da presença de processos erosivos ou de outras formas de degradação ambiental resultantes da ação do homem sobre o ambiente. A mina foi considerada o melhor local para a deposição de entulho, por ser uma ZIE, possuir baixa declividade, ter uma capacidade volumétrica considerável e ser de fácil acesso.

Tendo como base esse contexto, esse trabalho objetivou estudar a influência do entulho de construção sobre a drenagem ácida de minas através de ensaios, com colunas de lixiviação, considerados como método cinético muito utilizado na previsão do potencial de drenagem ácida. Tal método pretende imitar os processos encontrados nos locais da mina, normalmente a uma taxa acelerada (U.S. EPA, 1994). Através dele, pode-se avaliar diferentes variáveis no processo de produção de acidez.

2. Materiais e métodos

Nesse trabalho, foi utilizado entulho de construção civil em colunas de lixivia-

ção como sistema de cobertura para o abatimento da DAM. A seguir, descrevem-se

as etapas de amostragem, a realização dos ensaios e os resultados obtidos.

Amostragem

A localização e o número de pontos de amostragem na Mina de Pirita foram definidos através de visitas a campo e, também, de acordo com as condições favoráveis à coleta. Os locais foram definidos em virtude de pontos com surgência de água com pH < 3,0. A Tabela 1 apresenta a localização dos pontos, com as coordenadas e o pH correspondente.

As amostras da mina foram cole-

tadas manualmente com pá, picareta e enxada, tomando-se cuidado de se retirar uma camada superior a 30 cm de solo devido ao carreamento de sedimentos provenientes da parte superior da mina e ao elevado estado de alteração do solo. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos. No Laboratório de Geotecnia da UFOP, elas foram destorroadas,

passadas numa peneira convencional de construção civil, para a homogeneização do material. Após o peneiramento, as amostras foram secas ao ar livre e, logo após, pesadas. Retirou-se uma fração representativa de 7 kg de cada uma para mistura e foi feito o quarteamento pelo método cônico, resultando no material aqui codificado como AM (amostras da mina).

O entulho utilizado provém de reforma em prédio da própria UFOP, constituído de pedaços de concreto, de tijolos de cerâmica, de argila, de concreto, de gesso e de telhas de amianto,

classificados como A e C pela NBR ABNT 15114. No Laboratório de Processamento de Minérios da UFOP, tal entulho foi cominuído em britadores de mandíbulas e de rolos e classificado com

uma peneira de construção civil, a fim de se retirarem as partículas maiores e de igualar a sua granulometria ao material da mina. Todo o entulho foi homogeneizado e quarteadado pelo método cônico.

Tabela 1
Localização dos pontos amostrados e os correspondentes valores de pH.

* Coordenadas obtidas com GPS.
DATUM: SAD 1969 – Zona: 23S/
Projeção: UTM.

Pontos	Coordenadas *		pH
	X	Y	
1	657389	7743657	2,91
2	657419	7743668	2,74
3	657383	7743691	6,71
4	657411	7743699	4,94
5	657453	7743727	6,94

Procedimentos

Para determinação da composição mineralógica do entulho e do material da mina, foi utilizada a técnica de difração de raio X. As amostras submetidas a difratometria e a digestão foram pulverizadas de modo a se obter uma granulometria inferior a 200 mesh. O equipamento utilizado na difração foi difratômetro equipado com tubo de ferro com monocromador de grafite ($\lambda = 1,9360 \text{ \AA}$), em operação no laboratório do DEQUI/ICEB/UFOP.

Para avaliar o processo de formação e o abatimento da drenagem ácida,

foram montadas 5 colunas de lixiviação, denominadas I a V, com diferentes objetivos e dimensões. Para ensaios de lixiviação e para a análise de lixiviados, foram utilizados, como referência, procedimentos de Method 1627: Kinetic Test Method for the Prediction of Mine Drainage Quality (EPA, 2009) e Greenberg et al. (1992).

Os ensaios de lixiviação consistiram em percolar diariamente água deionizada pelo material da mina (AM) e pelos sistemas de coberturas acrescentados, monitorando-se diariamente

os diversos parâmetros químicos e físico-químicos do lixiviado. Para isso, a quantidade de água deionizada a ser lixiviada pelas colunas foi calculada com base na precipitação média anual ocorrida na cidade de Ouro Preto (1.724mm) e nas dimensões das colunas. A Tabela 2 mostra o resumo geral da composição das colunas de lixiviação, a quantidade de material introduzido, a duração dos ensaios e a quantidade de água introduzida diariamente. A quantidade de material introduzida nas colunas de lixiviação foi escolhida aleatoriamente,

Tabela 2
Principais características das colunas I, II, III, IV e V.

Colunas	Tipo de material utilizado	Quantidade de material (kg)	Duração dos ensaios (dias)	Volume de água introduzido diariamente (mL)
I	Amostra de material da mina (AM)	14,3	30	955
II	Entulho (E)	8,3	30	241
III	E + AM	7,5 + 7,5	23	955
IV	E + AM	2 + 8	40	955
V	E + CaO + AM	1 + 0,1 + 3,0	40	241

não obedecendo, nenhuma metodologia de ensaio.

As colunas I e II possuíam finalidade de servir como referência para resultados obtidos nas outras colunas e identificar características físico-químicas e comportamento dos materiais utilizados. Os objetivos das colunas III e IV foram avaliar a qualidade do abatimento da drenagem ácida oferecida pela cobertura de entulho e verificar se a proporção de entulho em relação ao material da mina seria satisfatória no processo. A coluna V

objetivou simular influência da camada de aditivo alcalino (cal) entre o material da mina e o entulho, na proporção 1: 3. A cal foi escolhida devido a seu baixo custo relativo no tratamento de drenagens com elevada acidez e alta concentração de sulfatos e por reagir rapidamente no sistema. Os ensaios das colunas IV e V foram prolongados por 10 dias.

Diariamente foram coletadas e armazenadas as soluções drenadas (lixiviados) das colunas para a determinação do pH, Eh (potencial redox), acidez, alcali-

linidade, metais, condutividade elétrica (CE), sulfato e temperatura.

As medidas dos valores do pH e Eh foram feitas em um pHmetro digital, cuja calibragem foi efetuada com soluções-tampão do fabricante - pH 4,01 e 6,86 (pH) e 228 mV (Eh).

As determinações dos metais foram feitas utilizando-se de ICP-OES (Espectrofotômetro de Emissão Óptica com Fonte Plasma Indutivamente Acoplado) e foram realizadas no Laboratório de Geoquímica Ambiental/UFOP. Para isso,

as amostras foram coletadas, filtradas, armazenadas em frascos de polietileno e devidamente acidificadas com 3 gotas de HNO₃, a 10 mol/L, para se evitarem possíveis reações de precipitação.

3. Resultados e discussões

Difração de raio X

A difratometria evidenciou a presença de quartzo (SiO₂), caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) e hematita (Fe₂O₃) em todas as amostras investigadas, exceto na amostra introduzida nas colunas de lixiviação. Dos cinco pontos amostrais, foi também diagnosticada goethita

(FeOOH), em dois dos pontos, muscovita (KAl₂(AlSi₃O₁₀)OH₂), exceto no ponto 1, albita (NaAlSi₃O₈), somente no ponto 3 e no entulho, rutilo (TiO₂): pontos 4 e 5, e dolomita (CaMg(CO₃)₂), na amostra introduzida nas colunas.

Tal mineralogia é compatível com

concentrações de sulfato foram obtidas através de uma curva-padrão.

Para a determinação da acidez e da alcalinidade, utilizou-se o método titulométrico descrito por Greenberg (1992).

Monitoramento das colunas de lixiviação

As Figuras de 1 a 4 apresentam os resultados das concentrações de metais lixiviados durante o período de monitoramento. A Tabela 3 apresentada sumariza os valores observados para os parâmetros monitorados.

Em todas as colunas monitoradas, houve uma expressiva queda da concentração dos metais Fe, Al, Mn e Zn, nas soluções lixiviadas, no decorrer dos ensaios. Ressalta-se a semelhança das curvas obtidas, a alta concentração dos

as rochas locais e com os resultados da caracterização físico-química.

Destaca-se que a pirita não foi descrita por esse método, mas foi vista a olho nu em campo e comprovada a existência por trabalho de Martins (2005).

metais analisados na coluna III, que possuía uma quantidade inferior de material da mina que a coluna I. Supõe-se que esses altos valores estejam relacionados ao estado de alteração e à granulometria das amostras introduzidas na coluna.

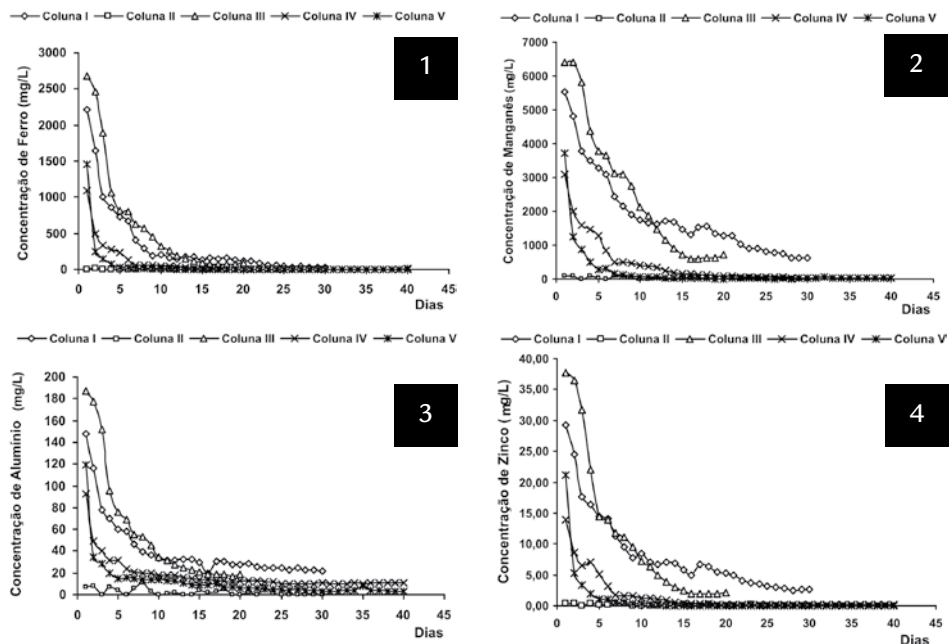


Figura 1
Concentração de ferro das soluções lixiviadas das colunas I, II, III, IV e V.

Figura 2
Concentração de manganês das soluções lixiviadas das colunas I, II, III, IV e V.

Figura 3
Concentração de alumínio das soluções lixiviadas das colunas I, II, III, IV e V.

Figura 4
Concentração de zinco das soluções lixiviadas das colunas I, II, III, IV e V.

Tabela 3
Resumo geral dos valores observados para os parâmetros monitorados durante os ensaios com as colunas de lixiviação.

Parâmetros	Colunas				
	I	II	III*	IV	V
pH	1,86 – 2,43	Oscilou entre 8,42 e 11,5	1,87 – 2,64	2,24 – 3,33	2,05 – 3,63
Eh (mV)	611,1 – 453,5	Forte oscilação entre -9,5 e 155,4	585,8 – 615,3**	592,1 – 425,6	607,2 – 412,5
CE (mS/cm)	11,019 – 4,288	3,824 – 2,168	12,651 – 4,005	7,918 – 2,398	9,625 – 2,001
Acidez (mg/L CaCO ₃)	304,75 – 81,65	-	1748,0 – 95,39	634,28 – 18,90	804,30 – 7,27
Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	-	Valores oscilando entre 309,4 (início) e 26,35 (20º dia)	-	-	-
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	9563,7 – 2551,0	Forte oscilação entre 1152,5 e 1848,9	14238,5 – 2329,9	6168,4 – 1599,6	2312,3 – 1434,9

*O monitoramento das soluções da coluna III foi impedido no 23º dia, devido ao entupimento do dreno.
** Os valores de Eh da coluna III exibiram o comportamento de queda até o 14º dia. Após esse período, os valores começaram a se elevar devido ao entupimento do dreno da coluna.

Os valores do pH, Eh, CE, acidez e concentração de SO_4^{2-} das colunas I, III, IV e V são referentes aos valores observados no intervalo compreendido entre o início e o fim dos experimentos. Os valores da coluna II, exceto a CE, oscilaram constantemente durante o monitoramento.

Os valores do pH das colunas I, III, IV e V foram considerados ácidos ($\text{pH} < 7$). Ressalta-se que a elevação observada, na coluna I, deve-se à presença de dolomita identificada pelas análises de difratometria. Nas outras colunas (III, IV e V), além da presença da dolomita, o entulho e a cal contribuíram para a elevação do pH observado. O caráter básico ($\text{pH} > 7$) apresentado pelas soluções lixiviadas da coluna II, deve-se, em parte, à presença do calcário, que faz parte da composição do cimento utilizado na construção civil.

Observa-se que os valores do Eh foram elevados, exceto para a coluna II, que oscilou entre -9,5 e 155,4 mV, indicando um ambiente redutor. Os valores

elevados das outras colunas refletem um ambiente oxidante, favorecendo a oxidação de sulfetos. Valores de Eh > 500 mV promovem a oxidação do Fe^{3+} (Mend Program, 1991), fato que pode ser comprovado pela grande quantidade de ferro que foi lixiviada nas soluções analisadas.

Nas colunas monitoradas, os valores de CE foram elevados, exibindo uma forte redução nos primeiros dias de monitoramento, inclusive para a coluna II. Esse parâmetro, junto com a acidez, refletiu a elevada quantidade de íons liberados para as soluções. A acidez das soluções lixiviadas deu-se através da elevada quantidade de sulfato presente nas amostras e, também, através da grande quantidade de metais lixiviados, principalmente Al, Fe e Mn, para as soluções. Esse fato pode ser confirmado pela forte coloração amarela e pela viscosidade das soluções analisadas, que, em $\text{pH} < 3,5$, precipitam o íon Fe^{3+} , que possui uma coloração amarelo-alaranjada. Ressalta-se a eficiência da camada de entulho sobre

o material da mina, que reduziu em mais de 90% a acidez das soluções das colunas III e IV. A referida camada, junto com a cal, reduziu, em 99%, o valor da acidez inicial das soluções da coluna V.

A alcalinidade do entulho da coluna II deve-se, principalmente, à presença do calcário contido na composição do cimento, do gesso e dos silicatos detectados pela difração de raio X (quartzo, muscovita, caulinita e albita). Os valores encontrados oscilaram entre 309,4 (início) e 106,25 mg/L CaCO_3 (fim).

A concentração de sulfato, determinada pelo método turbidimétrico, foi superior a 1000 mg/L em todas as colunas. O sulfato é um produto direto da oxidação dos sulfetos. Nas colunas I, III, IV e V, houve uma forte queda de concentração nos primeiros dias, destacando-se a eficiência do entulho sobre as reduções e o elevado estado de alteração das amostras, em virtude das elevadas concentrações apresentadas durante os ensaios.

4. Conclusões

A utilização do entulho como sistema de cobertura foi eficiente na redução de acidez, na concentração de metais e sulfato presentes nas colunas analisadas. Destaca-se a importância de se utilizarem aditivos alcalinos junto com o entulho, para uma melhor redução desses parâme-

tros. A adição de entulho não foi eficiente na elevação do pH e na redução do Eh, que são consideradas as variáveis principais dos processos geoquímicos para controle da solubilização dos metais.

O sistema de cobertura empregado nas colunas aponta para uma alternativa

interessante para a remediação da drenagem ácida de minas, um problema que hoje assombra as minerações devido aos inúmeros impactos ambientais. Entretanto mais estudos devem ser realizados, atentando-se para a elevada concentração de sulfatos presente no entulho.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Gorceix e ao PPGEM (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral),

pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do trabalho; ao pessoal dos Laboratórios de Geotecnia, Geoquímica

Ambiental, Química e Tratamento de Minérios da UFOP pela realização das etapas dos ensaios.

6. Referências bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 15114: Resíduos sólidos da construção civil - áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro - RJ, 2004. 7p.
- FARFAN, J.R.J., BARBOSA FILHO, O., SOUZA, V.P. *Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. n.30. 58p. (Série Tecnologia Mineral).
- GREENBERG, A.E., CLESCERI, L.S., EATON, A.D. *Standard Methods for the examination or water and wastewater*. (18ed.). Washington: American Public Health Association, 1992.
- LACOURT, F. Barita e piritita no município de Ouro Preto - Minas Gerais. *Revista Mineração e Metalurgia*, 1938, v.II, n.11, p.298-301.
- MARIANO, T.R.B. *Diagnóstico - plano integrado de gerenciamento dos resíduos sólidos da construção civil no município de Ouro Preto*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2008. 82p. (Monografia de Graduação).
- MARTINS, C.M. *Rastreamento geoquímico de possíveis contaminações remanescentes de minerações de piritita no município de Ouro Preto, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Geo-

- logia, Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, 2005. 221p. (Dissertação de Mestrado).
- MEND PROGRAM. *Environment Canada, Acid Rock Drainage Prediction Manual*. Mend, Project 1.16.1b, CANMET, 1991.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - U. S. EPA "Acid Mine Drainage Prediction". Technical Document, EPA 530-R-94-036.1994, p. 1-32.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - U. S. EPA. "Method 1627: Kinetic Method for the Prediction of Mine Drainage Quality". Technical Document, EPA 821-R-09-002. 2009, p. 1-40.
- VASCONCELOS, F. M., SANTOS, L.R.G., SOUSA, H.A. Global acid rock drainage (GARD) Guide: uma proposta de consolidação das metodologias de investigação e gestão da drenagem ácida de mina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO, 5. *Anais...* Belo Horizonte, 2008. p.1-6.

Artigo recebido em 13 de abril de 2010. Aprovado em 23 de novembro de 2010.

Rec



**Divulgue sua empresa
e seus produtos para os
formadores de opinião do
setor mineiro-metalúrgico.**

ANUNCIE NA REM - REVISTA ESCOLA DE MINAS.

Pedidos de inserção, negociações e consultas:

RBC EDITORAÇÃO ELETRÔNICA

Luciano Borba

(31) **3551 4730**

diretor.comercial@rem.com.br