

A água como ferramenta em Mineração

W.T. Hennies, A. Stellan Jr., L. Soares, F. Fujimura

Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil

RESUMO: A água usada como ferramenta em mineração iniciou-se com o processo de concentração do ouro aluvial. Os russos deram saltos tecnológicos mais recentes, onde no início do século 19 conseguiram controlar a força dinâmica do fluido conduzindo-a por tubulações. Assim um primeiro jato foi criado que poderia ser lançado contra as camadas de rochas sedimentares. Esta técnica de desmonte hidráulico foi intensivamente usada no oeste americano durante a corrida do ouro. Na moderna indústria a água é usada como ferramenta de limpeza e corte de todos os materiais de engenharia. Esta nova ferramenta produz um jato de água extremamente fino de alta energia e pressão, que puro ou misturado com abrasivos ou aditivos, pode limpar, polir ou mesmo cortar materiais extremamente duros. Materiais como metais, vidros, cerâmicas e até rochas podem ser cortados nos mais complexos desenhos. Os canhões de água, onde pulsos descontínuos são usados, podem substituir o explosivo na mineração de carvão. A água é um meio transportador de minério nos modernos minerodutos. A principal pergunta a ser feita é o que a água irá nos propiciar no futuro próximo? Quais serão os próximos saltos tecnológicos? Deixa-se ao leitor deste artigo o desafio de responder a estas duas perturbadoras indagações.

1 INTRODUÇÃO

A água é um líquido incolor, sem cheiro ou sabor, essencial a vida, que congela a 0° C e ferve a 100° C. Quimicamente é o óxido de dihidrogênio (H₂O). A água é também a parte líquida do globo terrestre, designada de hidrosfera, e forma oceanos, mares e rios do planeta, e cobre cerca de três quartos de sua superfície.

A água é essencial para a sobrevivência das espécies animais e vegetais sendo um dos itens mais importantes dos recursos hídricos da hidrosfera, e constitui na preocupação básica da engenharia ambiental. O uso da água pelo homem evoluiu constantemente, desde a função primordial de sobrevivência, higiene e via de deslocamento para aplicações tecnológicas mais avançadas.

2 ANTIGOS USOS DA ÁGUA

Quanto ao uso da água na antiguidade pode-se distinguir como principais os seguintes: vias naturais de navegação e transporte, irrigação na agricultura, suprimento de água às comunidades.

Assim, os rios e mares foram usados no início para o transporte de pessoas e mercadorias em barcos. A primeira canoa dos tempos pré-históricos

foi um tronco de madeira arduamente escavado, similar aquele de nossos indígenas, como ilustra a Figura 1.



Figura 1. Canoa do homem primitivo.

Neste sentido a navegação fluvial e marítima foi a primeira conquista tecnológica, onde no antigo Egito esculturas revelam que as rochas usadas para a construção das pirâmides foram transportadas por barcos. Os pintores em paredes e as gravuras em cerâmica mostram barcos a remos e barcos de vela usadas neste período. Por volta de 3.000 AC, navegadores egípcios atingiam ilhas distantes do mediterrâneo como Creta, a uma distância de 950 km. Estes barcos transportavam madeiras nobres como o cedro, para construção de barcos. O desenvolvimento náutico egípcio ocorreu concomitante com a invenção do tecido para as velas e cordas para amarração.

A irrigação na agricultura tem sido praticada desde 5.000 AC, ao longo das planícies de

inundação de rios como o Nilo, com a construção de canais e assim ampliar a área coberta pela inundação, e por diques para reter a água nos terrenos após o nível do rio ter baixado. O desenvolvimento de reservatórios com barragens e de dispositivos (rodas de água) para elevar a água permitiram o aproveitamento por irrigação das terras acima do nível de inundação normal. Remanescentes destas antigas estruturas podem ser encontradas no Egito, Babilônia, China, Fenícia, Peru, México, Índia e Estados Unidos. Os modernos sistemas de irrigação são, em princípio, derivados daqueles antigos e rudimentares sistemas.

O terceiro uso da água das antigas comunidades refere-se a sistemas de abastecimento de água limpa e disposição de águas utilizadas. O túnel de um destes sistemas é descrito na antiga Grécia, na ilha de Samos. O projeto pioneiro de Eupalinis de Megara, que foi considerado primeiro engenheiro, consistiu na abertura de um túnel de 1.000 m de comprimento e seção transversal de dois m², ligando um lago até uma comunidade. A Figura 2 mostra este projeto de engenharia, que data de 600 AC.

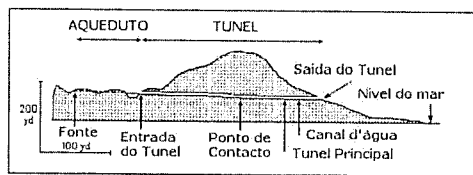


Figura 2 Sistema de água da ilha de Samos, 600 AC.

3 ÁGUA EM MINERAÇÃO NA ANTIGUIDADE

A água como ferramenta de mineração é igualmente antiga. Os gregos usavam a água para desagregar aluviões auríferas fazendo escoar por canais inclinados e desviando a polpa formada e fazendo-a passar sobre pelegos de carneiros para reter seletivamente as partículas de ouro.

Na mitologia Grega o Velo de ouro foi um tesouro roubado por Jasão e Medea de um dragão em Colchis. Após o retorno dos Argonautas o premio foi usado como colcha de núpcias de Jasão e Medea santificando sua união real.

Nestas antigas técnicas de mineração a água sem dúvida foi o elemento fundamental utilizado para a desintegrar as rochas sedimentares, transportar sob a forma de polpa, concentrar e extrair seletivamente as partículas de ouro.

Os romanos quando extraíam o ouro no Sul da Espanha melhoraram estes procedimentos com a construção de grandes reservatórios com razoável quantidade de água, e descarregando os mesmos de súbito contra as aluviões auríferas.

A história de Diodorus Siculus no primeiro século AC sobre mineração de ouro descreve o

processo de uso de fogo, que é usado para fragmentar a rocha. Após o aquecimento da rocha, água fria era usada para fragmentar a rocha, que consistia no método de escavação de rocha por choque térmico usado até a idade média e denominado de fogo resfriado.

4 IDADE MÉDIA ATÉ O SÉCULO XVIII E O PRIMEIRO SALTO TECNOLÓGICO

No fim da Idade Média, galerias inundadas de uma mina germânica foram usadas para o transporte de minério com barcaças facilmente deslocáveis, como aparece ilustrado na Figura 3.

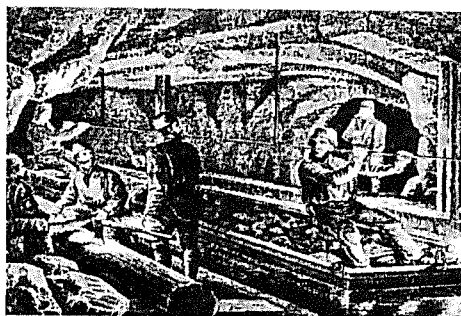


Figura 3 Transporte aquático em galeria de mina alemã.

A máquina a vapor, talvez, foi o primeiro salto tecnológico realizado no momento da invenção da primeira máquina móvel, para substituir a força animal ou humana para o transporte de pessoas, matérias e cargas. Antes disso, existiam sofisticados dispositivos para aproveitar quedas de água ou correntes de rios, mas todas eram restritas a aproveitamentos locais e imóveis.

Examinando as ilustrações do livro de Agrícola do século XVI, este fato pode ser evidenciado. A máquina a vapor foi o primeiro dispositivo móvel para transformar a energia da água em trabalho mecânico. Esta invenção é atribuída a James Watt, que modificou um aparelho de Newcombe em 1760. Esta máquina contribuiu para estabelecer os fundamentos tecnológicos da revolução industrial que se iniciou poucos anos após.

Uma grande curiosidade sobre a água é que somente cerca de 20 anos mais tarde, Henry Cavendish mostrou em 1781, que a água poderia ser obtida com a combustão do hidrogênio. Além disso, somente em 1860, exatamente um século depois da invenção da máquina a vapor, Stanislaw Cannizzaro descobriu a composição química da água, quando demonstra que a mesma dissocia-se eletroliticamente em dois volumes de gás hidrogênio e um volume de gás oxigênio. Na mesma época da invenção da máquina a vapor o siderurgista escocês John

Wilkinson, a perfuração com precisão e esta máquina a vapor

5 SÉCULO POSTERIO

No início do século XIX, precisamente o segundo salto tecnológico a água foi obtida através da mineração.

A condução de água para o lançamento de minério estabeleceu um novo sistema na mineração. O uso de água fluida e seu uso em sistemas hidráulicos, de fato, foi um avanço importante. A largamente utilizada nos Estados Unidos.

A Figura 4 mostra um sistema hidráulico para a mineração de ouro nos Estados Unidos. O sistema hidráulico tornou a operação de mineração mais difícil para o operador, com o uso de minério.



Figura 4 Primeiro sistema hidráulico de ouro nos Estados Unidos.

Nos casos de grande gradiente hidráulico entre o nível do rio e o nível do jato de água deduzindo curvas, bocas

6 ÁGUA E O PRIMEIRO SALTO TECNOLÓGICO

Com a revolução industrial e a invenção das máquinas a vapor

usado para
to da rocha,
rocha, que
rocha por
média e

XVIII E O

las de uma
insporte de
veis, como



na.
iro salto
enção da
a força
pessoas,
isticados
água ou
tritas a

Agrícola
iado. A
o móvel
rabalho
s Watt,
n 1760.
er os
dustrial

é que
Henry
ria ser
disso,
ois da
izzaro
uando
mente
me de
ão da
John

Wilkinson, em 1787 inventou uma máquina de perfuração com um cilindro oco de aço de grande precisão e isto foi fundamental para a melhoria da máquina a vapor de Watt, recentemente inventada.

5 SÉCULO XIX E OS SALTOS TECNÓLOGICOS POSTERIORES

No início do século XIX, nos montes Urais, mais precisamente em 1827 (Savanick, 1996), iniciou-se o segundo salto tecnológico onde o domínio sobre a água foi obtido pela mecanização das atividades de mineração.

A condução da água por tubulações e seu lançamento contra as rochas sedimentares por bocais estabeleceu o avanço tecnológico mais importante na mineração. Deste modo, a técnica de domínio do fluido e seu mais racional uso foram conquistados, e de fato, foi começo da chamada mineração hidráulica. Pouco após, esta tecnologia foi largamente empregada na corrida do ouro no oeste dos Estados Unidos da América.

A Figura 4 ilustra bem, o principal elemento do sistema hidráulico, onde a própria fotografia destaca as dificuldades no manuseio do monitor pelo operador, como dispositivo de desintegração do minério.



Figura 4 Primeiro jato de água usado na Rússia para mineração de ouro nos Montes Urais. (Savanick, 1996)

Nos conceitos de hidráulica destes dias, o gradiente hidráulico, ou então, a diferença de altura entre o nível do reservatório de água e a saída do jato de água no bocal era a energia disponível, deduzindo desta o atrito nas paredes da tubulação, curvas, bocais e outros elementos do sistema.

6 ÁGUA NA MINERAÇÃO NO SÉCULO XX E SALTOS TECNÓLOGICOS SUBSEQUENTES

Com a revolução industrial, o desenvolvimento de máquinas e equipamentos de movimentação tem

propiciado ou otimizado os processos de produção, e atualmente existem sofisticados equipamentos disponíveis no mercado.

Os saltos tecnológicos subsequentes, ocorreram no século XX, onde uma série de elementos contribuiu para este desenvolvimento.

O primeiro foi por volta de 1960, na indústria de joalheria, onde duras pedras preciosas perfuradas foram usadas como mancais de rubis de relógios para aumentar a precisão dos mecanismos de rotação das engrenagens. Em 1968, Norman C. Franz iniciou a estudar o uso destas jóias como bocais para gerar jatos de água de alta pressão para cortar materiais moles e friáveis. Em 1971, a primeira patente deste sistema de corte com jato d'água foi registrada nos Estados Unidos da América (Zeng et al., 1992)

Por outro lado, na então União Soviética, equipamento hidráulico (canhão de água) foi desenvolvido para lançar jatos de água comprimida intermitentes ou descontínuo em lugar de explosivo para a mineração das camadas de carvão em técnica não convencional de desmonte. Neste procedimento, furos de mina eram abertos com energia da água, e o desmonte que se seguia sem o uso de explosivos aumentaram a segurança das operações de produção, diminuindo as necessidades de ventilação para diluir gases nocivos do desmonte convencional.

No início da década de 80, um importante salto tecnológico teve lugar na mineração e construção subterrânea. As máquinas de túneis de seção plena (TBM) foram otimizadas com processos de corte mistos. Assim foram associados jatos d'água de alta pressão estrategicamente locados entre discos de abrasão mecânica na frente de corte. A Figura 5 mostra um destes modernos equipamentos.



Figura 5 Moderna máquina de túnel TBM.

Este procedimento permitiu obter fragmentos maiores na face em corte o que diminuiu em muito a energia necessária para avanço do túnel.

Como resultado, o desempenho foi substancialmente melhorado e o duplo do avanço foi conseguido com igual potência instalada.

Pelo sucesso encontrado na máquina de túnel os métodos de mineração examinaram outros equipamentos de corte como fresa de frente ampla substituindo os borifadores de água por jatos de alta pressão para auxiliar o corte da ferramenta, esperando atingir resultados similares aos das TBMs. Entretanto, apesar de muitas pesquisas os resultados não se mostraram promissores.

Para este tipo de uso dos jatos de água deu-se o nome de jatos assistidos. Na Figura 6, uma idéia desta aplicação pode ser vista em um boletim do U.S. Bureau of Mines dos EUA (Taylor et al. 1989).

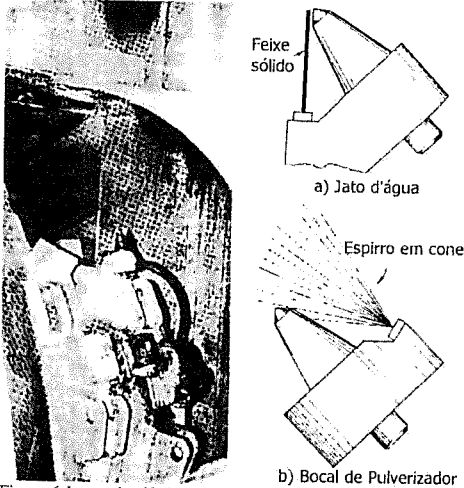


Figura 6 Jatos e borifadores em cortadoras de carvão.

Em meados da década de 80, o salto tecnológico consistiu na adição de abrasivos aos jatos d'água de gerados pelos orifícios das jóias e o grande incremento de pressão por bombas intensificadoras em substituição as de pistão. Estas melhorias permitiram cortar materiais muito duros como metais (aço, cobre, alumínio, aço ferramenta), cerâmicos e uma variedade de outros produtos. Na última década do século 20 sistemas administrados por computador tornaram-se disponíveis, e mesas XY operadas por um controlador CAD/CAM o qual permite desenhar e cortar chapas de qualquer material de engenharia (Lauand et al. 2000). As mais sofisticadas bombas com intensificador trabalham atualmente com pressão do jato d'água de 400 MPa no bocal.

Uma interessante aplicação deste novo conceito em perfuratrizes de rochas duras, para abrir furos ou

ranhuras pode ser examinada no estudo do U.S. Bureau of Mines dos EUA (Savanick & Krawza, 1989). A Figura 7 mostra esta perfuratriz para o corte em rochas duras.

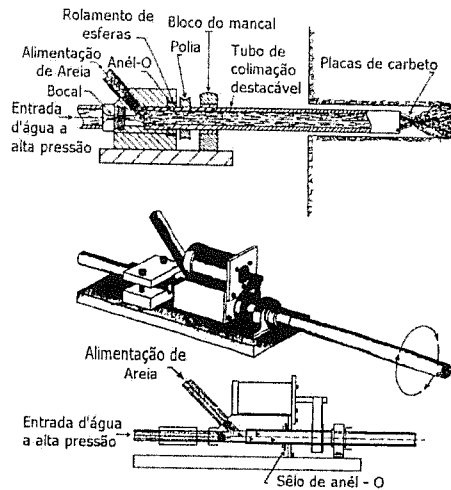


Figura 7 Jato abrasivo em perfuratriz manual para rochas duras (Savanick & Krawka, 1989).

Atualmente existem muitos outros exemplos deste importante uso d'água. Dois exemplos brasileiros de transporte por água nas operações da mineração para destacar o avanço tecnológico realizado no final do último século são apresentados, a seguir:

No estado do Amapá, no norte do Brasil, um mineroduto de 5 km com 127 mm (5 polegadas) de diâmetro transporta por gravidade uma polpa de caulim da fração abaixo de 325#. Esta tubulação está em seu ponto de alimentação numa cota de cerca de 100 m acima do nível do mar. Deste ponto no Morro do Felipe (Estado do Amapá), a tubulação alimenta o minério para a usina de Monguba, no Estado do Pará (Moeri et al., 1987). Neste trajeto a tubulação precisa atravessar o rio Jarí subaquaticamente. O sistema opera desde 1976.

Outra interessante aplicação de transporte por água em dutos é dada pela empresa Samarco. Em 1986 foi construído um mineroduto para transportar uma polpa de concentrado de minério de ferro na Estação de Germano situada no Quadrilátero Ferrífero do Estado de Minas Gerais, até o Porto de Umbu no Estado do Espírito Santo. Este mineroduto da Samarco é o mais longo do mundo o primeiro no Brasil e transporte minério numa distância de 396 km. Atualmente este mineroduto bombeia 15,5 milhões de toneladas por ano de concentrados de minério de ferro sem maiores distúrbios. O sistema é composto por várias estações de bombeamento que

operam baixos ri
Para aluivões muitas e escavação investim atrativos da meta mecânic. contínua proximic al.,2001)

7 CON RESE

Em res histórica todo, e cronológ tecnológ

Tabela 1 (

Data
5000 a.C.
3000 a.C.
1600 a.C.
691 a.C.
600 a.C.
100 a.C.
212 a.C.
1300
1370
1556
1619
1698
1769
1774
1781
1787
1804
1814
1826
1827
1860
1960
1962

operam a baixos custos e grande confiabilidade e baixos riscos ambientais.

Para exploração de depósitos minerais nas aluviões e rochas sedimentares não consolidadas, muitas experiências confirmam que a alternativa da escavação hidráulica apresenta valores de investimento em capital ou propriedade mais atrativos, os quais são na maioria das vezes ao redor da metade daqueles necessários numa escavação mecânica da reserva. Uma mineração hidráulica contínua para areia de construção foi descrita, nas proximidades da cidade de São Paulo (Hennies et al., 2001).

7 CONCLUSÕES: O QUE A ÁGUA NOS RESERVA NO FUTURO?

Em resumo, este artigo apresenta a evolução histórica do uso da água na engenharia como um todo, e particularmente no setor da mineração. A cronologia desta história com os principais saltos tecnológicos é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 Quadro Histórico de usos da água.

Data	Avanço tecnológico ou fato correlato
5000 a.C.	Os egípcios iniciam a irrigação.
3000 a.C.	Galeras acionadas por remos e velas estão em uso no Mediterrâneo.
1600 a.C.	A clepsidra, relógio d'água é inventado no Egito
691 a.C.	Os assírios constroem um primeiro aqueduto, transportando água por 34 milhas até Nineve.
600 a.C.	Projeto de água na ilha de Samos, Grécia
100 a.C.	Mineração de ouro no Egito com uso do fogo resfriado
212 a.C.	Arquimedes é morto durante a conquista pelos romanos de Siracusa.
1300	O primeiro relógio mecânico aparece na Europa.
1370	O primeiro perfume Água húngara é feito para a rainha Elizabeth da Hungria.
1556	O tratado minero metalúrgico de Agricola De Re Metallica é publicado.
1619	O artista espanhol Diego Velazquez pinta O vendedor de água de Sevilha.
1698	Thomas Savery inventa a bomba de água
1769	James Watt patenteia um condensador para melhorar o desempenho do motor a vapor.
1774	John Wilkinson inventa uma máquina para perfurar cilindros de canhões.
1781	Henry Cavendish mostra que a água pode ser obtida pela combustão de hidrogênio.
1787	O inventor John Fitch lança um vapor.
1804	O engenheiro inglês Richard Trevithick constrói a primeira locomotiva a vapor.
1814	George Stephenson constrói sua primeira locomotiva a vapor.
1826	O engenheiro americano John Stevens costói a primeira locomotiva a vapor nos EUA.
1827	Mineração russa inicia uso de jatos d'água.
1860	Stanislau Cannizzaro demonstra a composição da água por sua eletrólise.
1960	Jóias de rubi iniciam a ser usadas em relógios.
1962	O cineasta polonês Roman Polanski dirige seu primeiro filme sobre A faca na água.

1967	Canhões de água são desenvolvidos na União Soviética para mineração de carvão.
1968	Norman C. Franz inicia a estudar jatos de água produzidos bocais de jóias de rubi de relógios.
1970	Duo de compositores Simon e Garfunkel gravam Ponte sobre águas agitadas.
1971	Primeira patente de corte com jato de água é concedido a Norman C. Franz, nos EUA
1976	O mineroduto de caulim do rio Jari é colocado em operação no Brasil
1981	Máquinas de Túnel TBM com corte de jato d'água são desenvolvidas.
1983	Jatos de água abrasivos são patenteados e imediatamente utilizados
1986	O mineroduto da Samarco para transporte de concentrado é inaugurado no Brasil.
1989	Perfuratrizes manuais para rochas duras são estudadas nos EUA no U.S. Bureau of Mines.
Após 1990	Sistemas mais complexos de corte por jato de água são desenvolvidos em todo o mundo.

Como um último comentário, as quedas de água constituem uma grande fonte de energia e podem ser usadas como baratas e ecologicamente corretas. A área metropolitana da grande São Paulo é o maior centro industrial de toda América do Sul devido a disponibilidade de energia hidroelétrica barata. Em meados do século passado um reservatório artificial foi construído e o lago gerado pela represa Billings permitiu a que um desnível de 600 metros de queda a construção da usina hidroelétrica Henry Borden, cujas turbinas operam praticamente ao nível do mar.

Na Figura 8 mostra-se a Barragem de Itaipu, localizada entre o Paraguai e o Brasil no Rio Paraná. Itaipu ainda é o maior complexo hidroelétrico do mundo com 18 gigantescas turbinas cuja capacidade de geração é de 12.600 megawatts. Sua construção foi iniciada em 1975, seu custo foi de 20 bilhões de dólares e cerca de 30.000 trabalhadores foram empregados.

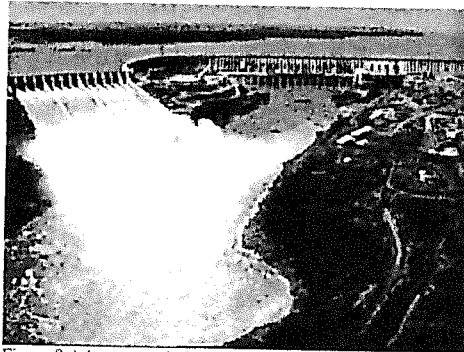


Figura 8 A barragem de Itaipu, no rio Paraná entre o Brasil e o Paraguai, gera 12.600 MW, sendo até o momento o maior complexo em operação na Terra.

Em 1991 sua construção foi completada. No Brasil, cerca de 90% da eletricidade é produzida por usinas hidroelétricas, tornando-se um país singular neste aspecto.

Concluindo, são duas as questões vitais e desafiadoras a serem feitas: O que a água propiciara aos seres humanos no futuro? Quais serão os saltos tecnológicos ainda reservados? Deixamos ao leitor deste artigo as perguntas para refletir sobre estes inquietantes assuntos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRICOLA, G. 1556 (Trad. L. H. HOOVER) DE RE METTALICA
HENNIES, W. T.; SOARES, L.; FUJIMURA, F.; LAUAND, C. T.; MARTÍN CORTÉS, G. R. 2001 Water Jet Applications in Mining and Other Fields In: International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, 10th New Delhi, India, Oxford & IBH Publishing Co. Pvt.Ltd. New Delhi, 2001, p.209-214.
LAUAND, C. T.; MARTÍN C., G.R.; HENNIES, W. T.; CICCUCI, R. 2000 The Brazilian Program of High Pressure Water Jet to Cut Ornamental Rocks. In: International

- Conference on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, 6., Calgary, 2000. Proceedings. Calgary, 2000. p. 711-16.
MEYER, C. 1997 Bir Umm Fawakhir: Insights into Ancient Egyptian Mining JOM The Minerals, Metals & Materials Society 49 (3) p. 64-68.
MOERI, E.; W. T. HENNIES e J. F. COURA 1987 Geological model and computer control for planning and operating of the Jari kaolin mine, Morro do Felipe, Brazil. In: WORLD MINING CONGRESS, 13, Stockholm, Sweden. Improvement of mine productivity and overall economy by modern technology. Balkena, Rotterdam, v. 1, p 129-136 (there are Spanish and German versions).
SAVANICK, G. A. 1997 Hydraulic Mining Section 6.0 Fluid Jet Technology 5th Edition (ed. T. J. Labus & G. A. Savanick) Water Jet Technology Association, Saint Louis, USA 12 pp.
SAVANICK, G. A.; KRAWZA W. G. Abrasive Water-Jet Drill for Hard Rocks Report of Investigation 9261 United States, Bureau of Mines, 1989, 10 p.
TAYLOR, C. D.; THIMONS, E. D.; KOVSCEK, P. D. Evaluation of Water-Jet-Assisted Cutting Capability on Longwall Shearers Report of Investigation 9270 United States, Bureau of Mines, 1989, 12 p.
ZENG, J.; KIM, T. J.; WALACE, R. J. 1992 Quantitative evaluation of machinability in abrasive water jet machining. PED - Vol. 58 169-179

Uso de

C. T. Le
Departam
L. C. Fe
Eljusa

RESU
alumínio
feitas sol
químicas
descritas
Universi
cortes fe
mesma g
apto a i
acabame
extrema
rápida de

1 INTR

A utiliz
para o p
tema de
abrasivo
processo
possui c
sua efic
que as e
corte sã
grau de
Corte
experim
material
silício)
processo
influênc
vários p
espessu
no proc
granito.
grandes
profund
quando
Atribuít
defeitos
plástica
que, pa