BRITAGEM EM MINAS SUBTERRÂNEAS

J. M. da Silva[1]; J. A. M. da Luz[2]
Escola de Minas – UFOP – Brasil
[1]Departamento de Engenharia de Minas – Campus Universitário, s/n – Morro do Cruzeiro - Ouro Preto (MG) - jms@demin.ufop.br
[2]Departamento de Engenharia de Minas – Campus Universitário, s/n – Morro do Cruzeiro - Ouro Preto (MG)– jaurelio@demin.ufop.br

Resumo

A proporção do número de minas subterrâneas, relativa ao número de minas a céu aberto, vem crescendo no mundo. Modificações ou adaptações de operações de uma modalidade vão sendo estudadas para possível implantação na outra modalidade de lavra. A exemplo de minas a céu aberto, que, a partir da década de 50 do século XX, adotaram a britagem semi-móvel e móvel em cava, reduzindo o custo operacional e de investimento do transporte manuseio do material lavrado, muitas minas subterrâneas (antigas e projetos novos) passaram a adotar a britagem no subsolo. Nesses casos, o transporte do material britado para a superfície acontece por içamento em esquipes por meio de poços verticais, por caminhões que se deslocam em rampa ou por correias transportadoras em escavações menos inclinadas. Durante a última fase de adversidade econômica mundial, vários operadores de lavra de grande porte avaliaram o emprego de sistemas de mineração contínuos e semi-contínuos. A lavra mecanizada tem substituído inúmeros métodos manuais de baixa produtividade e de alto risco. O concomitante problema de abastecimento de pneus no mercado também influenciou definições em operações, entre outros aspectos relacionados a alto custo de operação e manutenção. O presente artigo apresenta os tipos de britadores utilizados em minas subterrâneas, e descreve casos específicos, com as justificativas operacionais para cada empreendimento.

Palavras-chave: britagem, operações em subsolo, mina subterrânea, material fragmentado, custo operacional.

1. INTRODUÇÃO

Plantas de manuseio representam um conjunto de atividades integradas das mais importantes para contribuir para suprimento confiável de minérios. A Mineração mostra tem demonstrado tendência ao aproveitamento cada vez maior de materiais antes descartados, movimentação de volumes cada vez maiores com extração de minérios com menor teor, para manter metas de produção e custos competitivos.

A proporção do número de minas subterrâneas existentes vem crescendo. Minas são retomadas, outras minas operadas a céu aberto passam para extração em subsolo. Modificações ou adaptações de operações de uma modalidade vão sendo estudadas para possível implantação na outra modalidade de lavra.

Uma decisão foi tomada em algumas minas a céu aberto de levar britagem para interior da cava, mais próximo da frente de lavra, em substituição a parte da frota de caminhões e de horas de trabalho de outros equipamentos, com objetivo de se reduzir custo de cominuição, de grande impacto em usinas de tratamento de minérios; também para reduzir custo de transporte do material e outras atividades auxiliares de manuseio, tanto do ponto de vista operacional quanto de investimento. Essa definição ocorreu em meados da década de 50 do século XX.

No caso de minas subterrâneas, observa-se uma tendência de britagens próximo as atividades de lavra desde o final da década de 70 do século XX, a exemplo de minas de carvão e de potássio (especialmente os britadores compactos do tipo *sizers* e *feeder breakers*). Nesse sistema, o transporte para a superfície do material fragmentado produzido pela operação de britagem acontece por içamento em esquipes por meio de poços verticais, por caminhões que se deslocam em rampa ou por correias transportadoras em escavações menos inclinadas, ou mesmo em túneis, quando a topografia favorece.

2.COTEJO ENTRE BRITADORES

A escolha do britador depende do tipo e quantidade de material a ser britado, além de especificações de produto britado, especialmente a distribuição granulométrica, sem desprezar as características e configurações mecânicas destes equipamentos. A maioria dos circuitos de britagem primária usualmente inclui britador, moega, correia de descarga, alimentador e correia de descarga; grelhas também tem sido muito utilizadas com a função de escalpe (alívio do britador). Britagem secundária e terciária têm geralmente mesmos itens, incluindo peneiras, silos de estocagem, chutes e divisores de fluxo.

A maioria dos britadores empregados em operações subterrâneas e a céu aberto é britador de mandíbula. Com a cadência típica de mina subterrânea, é menos comum emprego de britadores giratórios, principalmente em rocha dura. Uma vantagem destes sobre os de mandíbulas é que, para mesma razão de redução e taxa de alimentação, requerem menor potência (Pryor, 1978). Por outro lado, britadores de mandíbulas são mais compactos, o que facilita seu transporte e montagem em ambientes confinados. Dentre britadores de mandíbulas, o mais adequado seria o de eixo duplo que, devido a seu trabalho de fragmentação por compressão simples, sem componente vertical reciprocativa, ocasiona menor desgaste por fricção das mandíbulas, com aumento na pressão de fragmentação.

A limitação de tamanho de alimentação de britador de mandíbula é a dimensão da boca do mesmo, cujo limite é de 80 % da abertura, B. A razão entre abertura e largura de boca (B/L) de

britadores de mandíbula varia de 1,2 a 1,7 (excepcionalmente até 2,0), com valor mediano de B/L = 1,4.
De modo geral, tem-se dado preferência a britador de mandíbula de um único eixo, que apresenta maior desgaste, pelo seu movimento mandibular de compressão associado a um vai-vem vertical. A vantagem é que esse movimento reciprocativo facilita o escoamento gravitacional do material na câmara de britagem, acarretando maior capacidade horária, comparado ao de eixo duplo de câmara equivalente. Esse ganho de capacidade se deve ao movimento da mandíbula, que não é somente compressivo, mas para baixo e para cima (o que causa, entretanto, maior desgaste). E são mais baratos (por serem mecanicamente mais simples e mais leves).

Outra vantagem é construtiva, pois para as mesmas dimensões efetivas da câmara, o porte do equipamento de um eixo é substancialmente menor. Quanto a esse aspecto, Callow e Kenyen (1996) mostram que para britador com boca de alimentação de 0,61 m por 0,914 m, com um eixo tem-se massa de 14.512 kg, contra 25.678 kg para britador de dois eixos com mesma dimensão de boca (relação de massa de 0,565). Para britadores de maior porte esta relação pode superar a 0,68.

Em aplicações onde a cominuição primária pode ser feita tanto com britador de mandíbulas, quanto com giratório, regra prática é adotar britador de mandíbulas caso vazão não exceda a capacidade máxima deste (dependendo das características do material a ser processado e da taxa de redução requerida este valor pode chegar a 1200 t/h) (Ottegren, *apud* McIntosh, 2003). McIntosh (2003) apresenta critérios alternativos para essa decisão. Para britador giratório do tipo mandíbula, fornecido para as minas Northparkes (cobre, Rio Tinto, Austrália) e Malmberget (minério de ferro, LKAB, Suécia), a taxa de produção pode chegar a 2500 t/h e 3000 t/h (Varela, 2011).

Em qualquer instância, o sistema de alimentação do britador deve ter compatibilidade com suas dimensões. Quando alimentação é feita por carregadora frontal ou equivalente (caso comum em britagem no subsolo), pode-se fazer essa seleção pela figura 1, trabalhada a partir de tabela de Schlitt e colaboradores (1992): a abscissa (escala logarítmica) é volume útil da caçamba do equipamento de carregamento e a ordenada é dimensão da largura da boca do britador de mandíbula (B) ou largura da boca de alimentação do britador giratório mais compatíveis. Análise de regressão linear obteve bons resultados (nas equações, V é volume - metro cúbico- da caçamba do equipamento de carga).

- Abertura (em metro) da boca do britador de mandíbulas compatível (coeficiente de correlação de 94,96 %): $B = 0{,}266xV + 0{,}624$;
- Largura da boca de alimentação (em metro) do britador giratório compatível (coeficiente de correlação de 98,28 %): $\Phi = 0{,}389xV + 0{,}182$.

Britadores de rolos atualmente têm sido pouco empregados em subsolo, embora do tipo *sizers* sejam utilizados em operações de carvão, em vista do desgaste acentuado, da baixa produtividade e da baixa razão de redução, decorrência do ângulo crítico de mordedura dos materiais (o que exigiria diâmetros de rolos demasiadamente grandes). A Mina Finsch (África do Sul), mina de alto índice de automação, na lavra por abatimento em blocos, utiliza sistema conjugado de britadores de rolos e de mandíbulas, *sizers*, correias transportadoras, *breakers*, grelha, passagens de minério e alimentadores no manuseio de minério.

No que tange a capacidade horária, deve-se levar em conta que britadores de mandíbula trabalham efetivamente na metade do ciclo de movimento da mandíbula na largura plena da câmara de britagem, ao passo que giratórios (e cônicos) trabalham efetivamente durante o inteiro ciclo, mas somente com metade da câmara, posto que outra metade estará na posição aberta (devido à excentricidade do giro do cone).

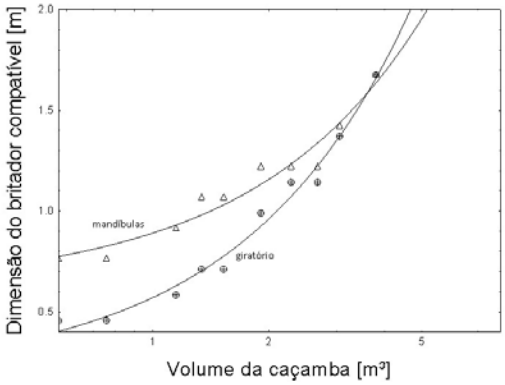

Figura 1 – Relação entre volume da carregadora (abscissa) e a largura da boca do britador (ordenada).

A equação que prevê a vazão volumétrica, Q_{vman} (em m^3/h) de alimentação de britador de mandíbula é dada por:

$$Q_{V\,man} = \frac{(a+f)}{2} \times \frac{(a-f)}{tg\alpha} \times L \times 60 \times N \times k_{man} = \frac{(a^2 - f^2)}{2 \times tg\alpha} \times L \times 60 \times N \times k_{man} \quad (2.1)$$

Onde: **a** – abertura da mandíbula na posição aberta [m]; **f** – abertura da mandíbula na posição fechada [m]; **α** – ângulo de mordedura das mandíbulas [°]; **L** – Largura efetiva da boca da câmara de britagem [m]; **N** – velocidade angular do volante do britador [RPM]; $\mathbf{K_{man}}$ – coeficiente empírico do material e do equipamento [-].

O coeficiente k_{man} leva em conta tanto empolamento do material, quanto efeito de frenagem por atrito da queda do material e, adicionalmente, efeito geométrico da configuração das ondulações nas mandíbulas (na posição fechada). Em geral k_{man} varia de 0,4 a 0,45 e o ângulo de mordedura cai em geral na faixa entre 19° e 23°, segundo Galperin *et al.* (1982). Correspondentemente, a equação que prevê a vazão volumétrica, Q_{vgir} (em m^3/h) de alimentação de britador giratório é dada por:

$$Q_{Vgir} = (D - S) \times \pi \times S \times \frac{(a-f)}{tg\alpha} \times 60 \times N \times k_{gir} \quad (2.2)$$

Onde: **D** – diâmetro nominal do britador (base do cone do côncavo) [m]; **S** – abertura do cone na posição fechada [m]; **α** – ângulo de mordedura do manto e côncavo e manta [°]; **N** – velocidade de oscilação do britador giratório [rpm]; $\mathbf{k_{gir}}$ – coeficiente empírico do material e do equipamento [-]. O coeficiente adimensional k_{gir} varia, em geral, de 2,0 a 3,0.

3.ESTUDOS DE CASO

Minas lavradas por diversos métodos, em diferentes profundidades, têm utilizado britagem em subsolo. No quadro 2.1, percebe-se quantidade razoável de vezes em que acontece este fato. Plantas de britagem têm sido requeridas para capacidade de até 3000 t/h. As principais

aplicações se encontram em operação em minas metálicas, notadamente de ouro, cobre, níquel e ferro, assim como calcário, segundo Varela (2011), com transporte inclinado à superfície.

No Brasil, a Mina Cuiabá (ouro, AngloGold) utiliza britagem do material desmontado, trazido por caminhões. Carregadeiras rebaixadas LHD conduzem a esquipes para transporte de minério fragmentado até a superfície, de onde minério é conduzido para usina de tratamento. A figura 2 mostra o britador de mandíbula dessa mina. Na Mina Baltar (Votorantim, calcário), minério fragmentado é conduzido por caminhões ao britador, depois a silo com capacidade para 2.200 t, saindo por correia de 1,067 m (42”) de largura até as etapas de tratamento posteriores e produção de cimento em superfície.

(a)

(b)

Figura 2 – Britador subterrâneo em minas: a) Olympic Dam (Bailey *et al.*,s.d.); b) Cuiabá.

Ugalla (2001) cita britador giratório na maior mina subterrânea da Austrália, Olympic Dam (cobre, urânio), onde se lavra cerca de 1,5 milhão t/ano. A figura 2 ilustra carregamento do britador e sistema de rompedor hidráulico utilizado para fragmentar matacões nessa mina. As Minas Mount Isa (prata, chumbo, zinco) utilizam trem, britadores e esquipes (em poço de 1.144 m de extensão) nas etapas de processamento e manuseio do material. Lawrence (1998) cita utilização de britador giratório em mina subterrânea de minério de ferro onde se emprega método de alargamento de subnível (codificada como “Mina C”). O britador tem 1,067 m (42”) de diâmetro do cone e capacidade de 9.614 t/dia. Transporte até a superfície é feito por esquipes de 17,2 t. Na Pasminco (chumbo, zinco, prata), o ROM é alimentado por gravidade em britador no subsolo, com içamento à superfície por esquipes (Edwards e Rauert, 2001).

Na África do Sul, Mina Palabora (vermiculita, cobre), passagens conduzem minério à britagem; sendo que o material cominuído é transportado por correia e ao longo do poço de 1.280 m de extensão. Na Mina Avgold (ouro), foi implantado sistema com britadores de mandíbula simples e alimentadores vibratórios com grelhas para escalpe em 200 mm, com taxa de 565 t/h e alimentação com tamanho máximo de partícula de 600 mm. Na Mina La Ronde, a usina de tratamento é no subsolo, a mais de 3 km da superfície. Nas pedreiras da África do Sul com plantas de britagem subterrânea é feita ligação para ultrapassar o desnível existente entre a frente em extração e a área de armazenagem.

Na Finlândia, nas minas Kittila, a britagem cominui em subsolo (250 mm), com içamento por poço vertical, a 2.250 m profundidade. O minério é transportado entre minas por caminhões (Engineering & Mining Journal, 2007). Na Mina Pyhäsalmi (zinco, ouro, cobre, prata)

carregadeiras LHD enchem caminhões que transportam minério para britagem, que ocorre a 1.405 m de profundidade. Material sai por correia para silo, sendo içado à superfície por esquipes com capacidade de 21,5 t (Engineering & Mining Journal, 2007).

Quadro 3.1 – Sistema de manuseio em minas subterrâneas com britagens (compilado de Engineering & Mining Journal, várias edições; Pfleider e Selleck, 1968; Minérios & Minerales, 2009; Varela, 2011, Hustrulid e Bullock, 2001).

Mina	Material	Método	Sistema de manuseio
Algoma (Canad	cobre	Abatimento e blocos; realc em subnívei	Carregadeira, caminhão, passagem vertical (3 m x 3 r chute, **britador** (4”), correia (14,5°, 200 m) até superfície.
Baltar (Brasil	Calcário	Realce em subníveis	Caminhões, **britador no subsolo**, silo 2.200 t, correia a superfície.
Cuiabá (Brasi	ouro	Corte e enchimento	caminhões, carregadeiras LHD, **britagem**, esquipes teleféricos para tratamento.
Efemçukuru (África do Su	ouro	Projeto de lav	**Britagem subterrânea** e transporte por correia à superfície.
Finsch (África Sul)	diamante	Abatimento e blocos	passagens, **britadores de rolos, giratório e mandíbulas**, ***sizers,*** correias transportadoras, *breake* grelha, alimentadores e esquipes.
Garpenberg (Suécia)	Zinco, chumbo cobre, prata	Corte e enchimento	Caminhão 42 t, **britagem subterrânea,** içamento er poço.
Grasberg (Indonésia)	Ouro, cobre, pra	Abatimento e blocos	Carregadeiras LHD, caminhões, passagens, **britagen** correia em áditos, moagem na superfície
Kiruna (Suéci	Minério de ferr	Abatimento e subníveis	carregadeiras LHD controle remoto, caminhões 22 t **britagem**, passagens (diâmetro 3 m, 69º), vagões 35- t.
Kittila (Finlând	ouro, cobre, zinc prata	Projeto de rea em subnívei	Entre minas, por caminhões; **britagem** (250 mm), içamento por poço (2.250 m)
Malmberget (Suécia)	Minério de ferr (magnetita e hematita)	Abatimento e subníveis	passagens conduzem ao nível de transporte (815m profundidade); caminhões 120t levam à **britagem**; minério é içado para superfície
Mount Isa (Austrália)	prata, zinco, chumbo	Corte e enchimento	Trem, **britadores**, esquipes (poço 1.144 m)
Northparkes (Austrália)	cobre	Abatimento e blocos	**Britador giratório**, 900 t/h
New Brunswic (Canadá)	basalto	Corte e enchimento	**Britador giratório**, 1500 t/h
Olympic Dan (Austrália)	Cobre (1,6 %) urânio (0,2 kg/t U_3O_8) ouro, pra	Realce em subníveis	Trem, **britador giratório** (3.000 t/h), esquipes de 21 m^3 (36,5 t)
Palabora (África do Su	cobre, vermiculi	Abatimento e blocos	passagens, **britagem**, correia, poço 1.280 m
Pasminco Brok Hill (Austrália	Zinco, chumbo prata	Corte enchimento realce em subníveis	Alimentação direta do ROM em **britador**, içamento p esquipes
Pyhäsalmi (Finlândia)	zinco, ouro, cob prata		LHDs, caminhões para **britagem**, correia, silo, esquip 21,5 t (1.405 m)

Na Suécia, Mina Kiruna (minério de ferro, LKAB) utiliza carregadeiras LHD de controle remoto que enchem caminhões de 22 t que levam minério à britagem. Material é conduzido por passagens de minério (diâmetro 3 m, inclinação 69 ^{o}), que enchem vagões (35 a 40 t) para material de 10 a 14". A Mina Grasberg (ouro, cobre e prata) tem manuseio com carregadeiras LHD e caminhões de 55 t que levam à britagem primária (britador giratório, alimentação direta, vazão de 6000t/h, conforme ThyssenKrupp, 2011), a 4.100 m de profundidade; material cai em passagens e é transportado por correias até a superfície onde continua tratamento. A produção é cerca de 220.000 t/dia.

No Chile, Mina Andina (cobre), usina de tratamento também foi instalada no subsolo, com 25% do produto da mina a céu aberto e 75 % da mina subterrânea, produzindo 17.000 t/mês de concentrado de cobre.

Outro exemplo de planta de britagem com britador giratório no subsolo é na Henderson Mine – 1,371 m x 1,880 m [54 in x 74 in] (EUA, molibdênio) (Boyd, 2003). No manuseio dessa mina há correia, britador, carregadeiras LHD, passagem de minério e caminhão com capacidade para 80 t (Engineering & Mining Journal, 2006). Ovanic (2001) reporta adoção de britagem no subsolo da única mina subterrânea de lavra de minério de ferro dos EUA: Pea Ridge. Bronkhorst e Brouwer (2001) citam caso da mina Williams, com quatro britadores de mandíbulas 0,914 m x 1,219 m (36" x 48"), no subsolo, com produto britado nominal a 203mm, obtendo produção de 600 t/h. Antes de material ser alimentado ao silo de alimentação da câmara de carregamento dos esquipes, minério britado é transportado por correia de 1,1 m de largura por cerca de 750 m. Deste silo é transferido por alimentador de sapata (com largura de 1,65 m) para a câmara, munida de chutes com comportas para carga dos esquipes, que têm 22 t de capacidade e são de descarga pelo fundo.

No norte das Filipinas, a Mina Philex possui cadência de lavra de 800 t/h de minério de ouro e cobre. Visando a proteção do transportador de corrente do plano inclinado, adotou-se instalação de britagem no subsolo, englobando chute de recepção na passagem de minério, alimentador de sapatas e britador primário de mandíbula (Metso, 2004).

Preece (2001) relata seleção realizada na Mina Finsch (diamante, De Beers, África do Sul) do sistema de fragmentação primária do minério entre *breakers*, britadores de rolos, de mandíbulas e *sizers*, na lavra subterrânea, após a lavra a céu aberto.

4.CONCLUSÕES

Britagem primária em minas subterrâneas está cada vez mais presente. O transporte do minério escavado ou desmontado é realizado parcial ou totalmente por caminhões que se deslocam em rampa, por içamento em esquipes por meio de poços verticais ou por correias transportadoras em escavações menos inclinadas. Instalações têm sido requeridas para 500 a 800t/h em minas metálicas.

A britagem tem sido levada para próximo à frente de lavra no subsolo, sendo cada vez mais realizada a maiores profundidades. A justificativa para essa mudança é o custo operacional da cominuição. De qualquer modo, a escolha do britador depende do tipo e quantidade de material

a ser britado e características desejadas para o produto, sem desprezar as características e configurações do equipamento a ser utilizado. Os britadores de mandíbula representam a maioria dos britadores primários em operações no subsolo atualmente, principalmente em rocha de maior dureza e abrasividade.

5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bailey, M.; Olsson, B.; C Glassock, C. *Underground Ore Handling Systems*. Disponível em http://www.miningone.com.au/page. <Acessado em 01/04/2011>.

Boyd, K. *Crushing Plant Design and Layout Considerations*. Vancouver: Amec Mining & Metals. 2003. 29 p.

Bronkhorst, D. & Brouwer, G. Sublevel Stoping at the Williams MIne (chapter 25). pp: 235-238. In: Hustrulid, W. A.; Bullock, R. L. (ed.) *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. 2001. 721 p.

Callow, M. I. & Kenyen, V. P. Crushing (Chapter 25.3.1). pp: 2184-2201. In:

Galperin, M. *et alii*. *Construction Equipment.* Moscow: Mir. 1982. 408 p.

Edwards, D. R.; Rauert, N. S. Pasminco Broken Hill Mine (chapter 36). In: Hustrulid, W. A.; Bullock, R. L. (ed.) *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. 2001. 721 p.

Lawrence, B. W. Considerations for Sublevel Open Stoping (Chapter 9). In: Gertsch, R. E.; Bullock, R. L. (ed.) *Techniques in Underground Mining – Selections from Underground Mining Methods Handbook*. Littleton: SME. 1998. 836 p.

Metso Minerals. Philex Mining Corporation, Philippines - Philex Under Ground Crushing Stations, 2004. 3 p.

Mcintosh Engineering. *McIntosh Engineering Hard Rock Miner's Handbook - Rules of Thumb*. Tempe: McIntosh Engineering. 2003. 58 p.

Ovanic, J. Mining Operations at Pea Ridge Iron Ore Company - A case study (chapter 24). In: Hustrulid, W. A.; Bullock, R. L. (ed.) *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. 2001. 721 p.

Plinninger, R. J. Hardrock abrasivity investigation using the rock abrasivity index. pp. 3445-3452 In: Williams, A. L. *et alii*. *Geologically Active*. London: Taylor & Francis. 2010.

Pfleider, E. P.; Selleck, D. J. Ore passes, tunnels and shafts. *Surface Mining*. AIME. New York, pp. 637-648. 1968.

Preece, C. A. Finsch Mine – open pit to open stoping to block caving. In: Hustrulid, W. A.; Bullock, R. L. (ed.) *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. 2001.721 p.

Schlitt, W. J. *et al.* Mineral Processing (chapter 25.3). In: Hartman, H. L. (ed.). SME Mining Engineering Handbook, Littletown: SME, v. 2. 1992. Pp. 2184-2205.

Ugalla, S. Sublevel Open Stoping-Design and Planning at the Olympic Dam Mine (chapter 26). Pp. 338 - 244. In: Hustrulid, W. A.; Bullock, R. L. (ed.) *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. 2001.721 p.

Varela, J. J. Lista de referências de aplicações de britadores ThyssenKrupp, Relatório Interno de avaliação de tecnologias de britagem, 11p. 2011.

Catálogos de britadores de mandíbulas ThyssenKrupp, 7p. 2011.

Catálogos de britadores de mandíbulas e giratórios ThyssenKrupp, 7p. 2011.