

CAPÍTULO

9

OPERAÇÕES DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS

Adão Benvindo da Luz
Engenheiro de Minas pela UFPE, Doutor em
Engenharia Mineral pela USP
Prof. Visitante do Departamento de Geologia-UFRJ
Pesquisador Titular do CETEM/MCTI

João Alves Sampaio
Engenheiro de Minas pela UFPE, Doutor em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela
COPPE-UFRJ, Tecnologista Sênior do CETEM/MCTI

1. INTRODUÇÃO

A atividade econômica necessita de agregados da construção civil para a implantação de infraestrutura de transporte, saneamento, moradias, instalações físicas de indústrias e de comércio, com a construção dos mais diferentes tipos de edificações. É necessário ressaltar uma característica marcante do mercado de agregados que é o custo de transporte, frequentemente, igual ou maior aos custos de produção. Uma alternativa para esse desafio consiste em viabilizar a exploração de rochas para agregados, tornando-a o mais próximo possível dos locais de consumo. (ARQUITÉ *et al.*, 2000).

Uma unidade industrial para beneficiamento de rocha tem por função modificar o tamanho das partículas, sua forma e distribuição granulométrica, visando ao seu uso como agregado na construção civil. Desse modo, o processo é constituído por:

- cominuição – britagem e rebitagem;
- lavagem para remoção do pó;
- peneiramento e classificação;
- transporte para estoque e manuseio de materiais e outros.

Assim é possível produzir agregados sem variações de sua qualidade e com as especificações requeridas pelo mercado (SMITH AND COLLIS, 2001; LUZ & LINS, 2010). Ainda, segundo estes autores, a escolha de um novo depósito de rocha para produção de agregados, deve considerar os seguintes requisitos:

- embora os recursos naturais estejam sujeitos ao fator locacional, tentar minimizar a distância entre a futura unidade de beneficiamento e o mercado consumidor;
- os agregados ao serem produzidos devem atender às especificações exigidas pelo mercado;
- na produção de agregado para concreto, as características mineralógicas e petrográficas diferem daquelas requeridas para o agregado de pavimentação, em particular para tráfego pesado;
- quando o mercado solicita agregado para concreto e pavimentação, a seleção do depósito torna-se mais difícil e uma estratégia de mercado seria fazer um planejamento para uma lavra seletiva do depósito, por exemplo, explotando rocha para concreto e rocha para pavimentação, exigindo com detalhe um estudo geológico, petrográfico e mineralógico do depósito;
- na viabilidade técnica e econômica de um novo depósito é estabelecida a sua vida mínima, para um determinado tipo de mercado;

- se nesse ínterim, ocorrer uma mudança do mercado, o projeto deve ser reavaliado, tornando possível a migração do mesmo para outro mercado que esteja sendo demandado.

Não constitui surpresa que as operações de pedreira, em alguns casos, ocasionam conflitos entre a população e o minerador. Isto ocorre, com frequência, quando a pedreira é localizada próximo às comunidades, nos quais a geração de particulados e ruídos são queixas frequentes. Por isto, as práticas de produção de agregados, que não diferem de outras industriais, devem se alinhar com os princípios da sustentabilidade – econômico, social e ambiental.

As usinas modernas de produção de agregados devem incorporar equipamentos que proporcionem o cumprimento de normas de segurança e higiene no trabalho, para as quais se considera o monitoramento de particulados e o seu abatimento pelo uso de surfactantes, aspersões programadas de água e controle de ruído (LANGER, 2002). Este procedimento operacional das pedreiras torna-se indispensável, principalmente, quando estas se encontram localizadas próximas de habitações.

Com o ordenamento territorial recente das regiões metropolitanas do País e as restrições ambientais, a distância das pedreiras ao centro consumidor apresenta um crescimento constante. Sugere-se uma distância entre 30 e 80 km para viabilizar o projeto.

As usinas de britagem para produção de agregados podem ser fixas, móveis ou temporárias. O estudo de viabilidade de unidades fixas considera uma vida útil da pedreira de pelo menos 30 anos ou mais, no caso de rochas compactas. As usinas móveis são consideradas mais complexas e adequadas a projetos específicos, como: pistas de aeroporto, ferrovias, barragens dentre outros (SMITH & COLLIS, 2001).

As características e especificações dos agregados oriundas das unidades produtoras são direcionadas ao mercado existente, desse modo, não é comum produzir um agregado para demandas pontuais.

O peso é a unidade utilizada no comércio dos agregados, pois há limites de cargas nas rodovias para as quais se exige o controle de peso dos caminhões, de forma a não danificar as rodovias pelo excesso de carga dos transportadores. Não obstante, o agregado é comercializado por metro cúbico, em todo o Brasil.

Os agregados são produzidos e comercializados em diferentes faixas granulométricas nominais e, de uma maneira geral, os produtores não têm estrutura de estoque e manuseio dos produtos para fazer uma blendagem e disponibilizar ao mercado um produto com distribuição granulométrica requerida pelo consumidor.

2. COMINUIÇÃO

Os circuitos de produção de agregados, em especial britas, sempre com base em rocha compacta, são constituídos essencialmente de equipamentos de britagem, peneiramento, classificação, transportador de correia e outros.

Um bom projeto de uma usina para produção de agregados deve considerar a cominuição e as operações de peneiramento e classificação, como um processo integrado. A rocha britada é separada em frações granulométricas para gerar produtos acabados, cuja distribuição granulométrica é da maior importância. A produção de agregados em várias granulometrias deve estar focada na demanda do mercado, de forma a maximizar o retorno econômico, muito embora, certos índices de flexibilidade no processo de britagem e classificação tornam-se essenciais. Estes fatores são da maior importância quando da seleção dos tipos de britador e no número de estágios de redução de tamanho (SMITH & COLLIS, 2001).

A operação de fragmentação, no campo do beneficiamento de rochas ou minérios, consiste de um conjunto de técnicas com o propósito de reduzir, por ação mecânica externa e algumas vezes interna, um sólido de determinado tamanho, em fragmentos menores. O primeiro estágio da fragmentação ocorre nas atividades de lavra, isto é, no desmonte da rocha, com o auxílio de explosivo, em que são obtidos blocos de tamanhos variados, entretanto, adequados à alimentação dos equipamentos de britagem (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

O segundo estágio da fragmentação numa pedreira ocorre na unidade de britagem. Nesta são utilizados equipamentos robustos com capacidades elevadas, capazes de suportar os esforços elevados exigidos na fragmentação das rochas compactas.

Sabe-se que, a cominuição é um processo de consumo intensivo de energia. Por isto, observa-se um grande interesse por estudos de fragmentação, porquanto, qualquer avanço tecnológico para minimizar o consumo de energia na operação significa uma economia de energia no processo de cominuição.

O consumo de energia para se atingir a ruptura de uma rocha, aumenta com a velocidade de aplicação das forças de compressão e tensão. A rocha se rompe, quando o limite de ruptura é ultrapassado, ou seja, quando todas as ligações atômicas de um certo plano se rompem. Como as rochas são materiais heterogêneos anisotrópicos e contém fraturas e falhas em escala micro e macroscópica, esse fenômeno não ocorre facilmente. A cominuição é regida pela teoria das leis da fragmentação (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

Leis da Fragmentação

A lei de Rittinger estabelece que a **área da nova superfície produzida por fragmentação é diretamente proporcional ao trabalho consumido.**

A segunda lei da cominuição formulada por Kick, estabelece que **o trabalho requerido é proporcional à redução em volume das partículas relacionadas ao processo.**

Como as leis de Rittinger e Kick não satisfaziam a todas as práticas da indústria da fragmentação, Bond postulou uma lei empírica denominada de Terceira Lei da Fragmentação: **A energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho.**

3. BENEFICIAMENTO

O beneficiamento, aplicado à obtenção de um agregado de qualidade, apropria-se das diferenças de propriedades físicas ou químicas das partículas minerais que constituem o agregado, tais como densidade, susceptibilidade magnética, cor, solubilidade etc. No entanto, como os agregados têm preços relativamente baixos, os processos de beneficiamento empregam normalmente métodos físicos de separação e a sua viabilidade econômica requer escalas elevadas de produção (SMITH & COLLIS, 2001).

Em algumas situações, a rocha da pedreira está coberta por uma camada de material intemperizado e na fase de decapeamento da pedreira, esse material poderá ser aproveitado para obtenção de agregado miúdo (areia), por meio de atrição e lavagem em tromel, roda desaguadora (*wheel dewater*) e classificação em classificador espiral ou hidrociclone. Quando essa ação não é possível o material resultante do capeamento deve ser estocado para futura recuperação do solo da área degradada pela lavra do maciço rochoso.

A estocagem dos agregados produzidos na pedreira poderá ser feita em silos elevados, de forma a permitir o carregamento dos caminhões ou dos vagões de trem, por gravidade ou por transportador de correia, (Figura 1A). No entanto, este processo é dispendioso para capacidade de estocagem horária ou diária. Uma alternativa mais econômica consiste na estocagem do agregado em pilhas no próprio pátio (Figura 1B) e proceder ao carregamento dos caminhões, com o auxílio de carregadeiras frontais.

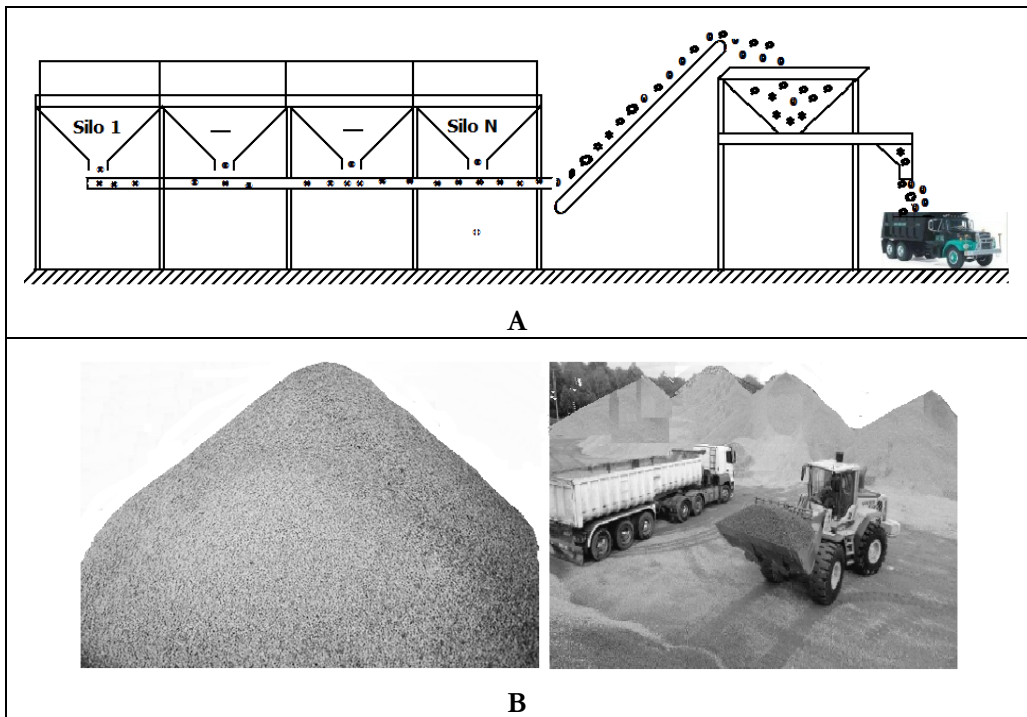


Figura 1 – Em (A), silos de estocagem de agregados e carregamento de caminhões. Em (B), pilha de agregado e manuseio com carregadeira frontal.

4. ASPECTOS AMBIENTAIS

As unidades industriais de produção de agregados devem ser projetadas de forma a prover aos seus operadores, um ambiente seguro e saudável com o mínimo possível de ruído e geração de particulados, dentro dos limites da empresa e também para as comunidades do seu entorno.

Os órgãos reguladores de meio ambiente da Comunidade Europeia estabelecem o limite de 85 decibéis/8 h como ruído máximo permitido nas áreas operacionais de pedra. Também são exigidos painéis de alerta para o uso de Equipamentos de Proteção Individual - EPIs, em especial o uso de protetor auricular.

Sabe-se que numa pedreira, as três principais fontes de particulados são:

- as operações de perfuração na frente de lavra, para carregamento de explosivos;
- o desmonte com explosivos;
- o movimento de caminhões das frentes de lavra para a unidade de beneficiamento;
- o manuseio dos agregados para os silos ou pilhas de estoque.

As fontes geradoras de particulados nas frentes de lavra de pedreiras e nas usinas de beneficiamento são mais controladas na fonte e devem ser abatidos mediante aspersões programadas de água e/ou pelo enclausuramento dos equipamentos geradores de particulados e/ou o uso adequado de filtros de manga. O propósito é reduzir o pó respirável ($< 5 \mu\text{m}$), a uma baixa concentração, por exemplo, de $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ (TUCK, 1987 *apud* SMITH & COLLIS, 2001). Sabe-se que partículas inferiores a $10 \mu\text{m}$ podem atingir o interior do sistema respiratório e, dependendo de uma série de fatores, causar as pneumoconioses, doenças pulmonares associadas ao acúmulo de poeiras nos pulmões e à reação tecidual (OIT, 2001 *apud* CASTILHOS *et al.*, 2008). O teor de sílica livre (quartzo) nas partículas minerais é considerado um parâmetro fundamental para a avaliação do risco à saúde humana. No caso do conteúdo da sílica livre ser maior do que 1%, a amostragem e o limite de tolerância (LT) devem ser referidos às partículas respiráveis. O limite de tolerância (LT) de exposição para minerais que contem sílica livre acima de 5% é determinado pela análise de uma amostra de poeiras respiráveis. Sob as atuais regulações brasileiras (NR 15 Anexo 12) e nos Estados Unidos, o LT varia com a percentagem de sílica livre no particulado (MSHA, 2011). Para a maioria das poeiras minerais respiráveis, o LT varia na faixa de 0,1 a $3,3 \text{ mg}/\text{m}^3$. Quando a percentagem de sílica livre é maior, decresce o LT. Na regulação norte americana, o padrão máximo de exposição permitido ajustado é determinado ao se dividir o número 10 pelo percentual de quartzo nas poeiras respiráveis, de modo a não exceder a exposição humana ocupacional a $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ de sílica livre. Por exemplo, o LT de $2,0 \text{ mg}/\text{m}^3$ é padrão para poeiras respiráveis de carvão mineral que contem até 5% de quartzo. No caso de se tratar de poeiras com 10% de quartzo, o LT resultaria em $1,0 \text{ mg}/\text{m}^3$ como padrão máximo de poeiras respiráveis. Se o teor de quartzo é menor do que 1,0%, como por exemplo, nas poeiras minerais encontradas na maior parte das operações de mineração de metálicos e não metálicos, o LT é de $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ de partículas totais (MSHA, 2011).

5. FLUXOGRAMAS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS

5.1. Fluxograma de Beneficiamento de Agregados de Unidade Versátil

A rocha explotada na pedreira é transportada por caminhão fora de estrada e descarregado em uma grelha que faz a remoção dos finos naturais e alimenta o retido em um britador de mandíbula, no qual ocorre o primeiro estágio de britagem da unidade de beneficiamento (Figura 2). Os finos passantes na grelha são repenneirados em uma granulometria mais fina visando à obtenção de uma rocha limpa.

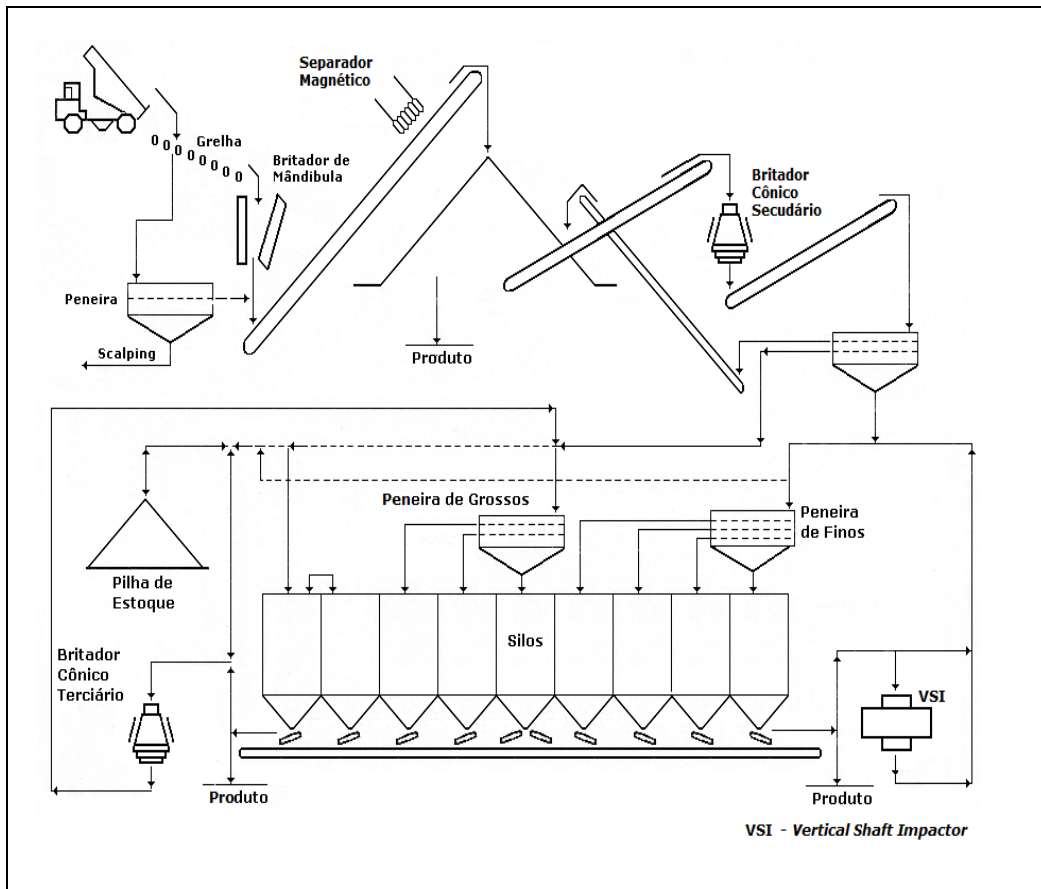


Figura 2 – Fluxograma genérico de uma usina de cominuição de rocha compacta para produção de agregado (Fonte: SMITH & COLLIS, 2001).

O produto do britador de mandíbula e o retido na peneira seguem por um transportador de correia para uma pilha pulmão da unidade de cominuição. Em um determinado ponto da correia encontra-se instalado um separador magnético, imã permanente, para remover alguma peça metálica proveniente das frentes de lavra. Desta pilha, a rocha pré-britada é retomada por um túnel transportador para alimentar o britador cônico secundário. Esse arranjo permite que a usina possa operar durante as interrupções das atividades da lavra na pedreira.

O produto da britagem secundária segue para uma peneira de duplo deque, classificando o produto da britagem em três frações. O retido no primeiro deque retorna ao britador cônico secundário, o retido no segundo deque constitui-se na fração grossa e o passante a fração fina. Neste estágio, por simples peneiramento, obtêm-se os produtos comerciais, todavia, em uma distribuição granulométrica

ampla. O agregado (brita) tipo 2 (Tabela 1) para concreto, base e sub-base de pavimento, é um exemplo relevante e poderá constituir uma proporção significativa da produção de uma pedreira.

O peneiramento do agregado britado em faixas granulométricas mais estreitas emprega peneiras de múltiplos deques normalmente montadas acima dos respectivos silos de estocagem e carregamento.

A fração grossa desse primeiro peneiramento poderá seguir para um britador cônico terciário ou seguir para um peneiramento com duplo deque com o objetivo de obter frações granulométricas mais estreitas e a seguir para estocagem em silos. A fração fina segue para um peneirador com três deques, resultando em quatro frações granulométricas que a seguir serão estocadas nos silos. Esta classificação e estocagem em faixas granulométricas mais estreitas têm por objetivo atender o mercado que é mais demandante para os agregados finos.

Na verdade, um sistema de silo pode ser projetado de modo a facilitar a operação, isto é, uma vez que o silo da fração mais grossa esteja cheio, o fluxo automaticamente alimentará o circuito de rebitagem. Os agregados finos poderão ser rebitados em britadores do tipo VSI (*vertical shaft impact*) e recirculados para as peneiras de finos.

5.2. Fluxograma de Beneficiamento de Agregado em Unidade Convencional

Um fluxograma de uma usina convencional típica de produção de agregados, com base em granito, gnaisse e outros, está configurado na Figura 3. Nesta são obtidos os produtos típicos (Tabela 1) de uma pedreira: brita 1, 2 e 3, pedrisco, pó de pedra e bica corrida.

As dimensões da rocha explotada na frente de lavra devem ser inferiores a 0,8 x 1,1 m. Os blocos de rocha acima desta granulometria são submetidos a um fogacho ou rompedor hidráulico para adequar sua granulometria ao britador primário. A rocha lavrada é retomada com carregadeira frontal e transportada em caminhões fora de estrada até o britador primário.

Tabela 1 – Classificação das britas produzida em uma pedreira comercial.

Produtos	Granulometria (mm)		Usos
	Mínima	Máxima	
Bruta 3	32	61	Lastro ferroviário.
Bruta 2	22	32	Agregado em concreto, base e sub-base de pavimentos.
Bruta 1	11	22	Concreto esbelto e bombeado.
Pedrisco	4,8	11	Massa asfáltica.
Pó de Pedra	-	4,8	Massa asfáltica.
Bica Corrida	-	25	Aterros.

Fonte: Sampaio *et al.*, (2001)

Na usina de beneficiamento, a operação tem início com o auxílio de uma carregadeira frontal que retoma a rocha no pátio de estocagem e descarrega num alimentador vibratório com uma grelha de 50 mm de abertura. A fração grossa (acima de 50 mm) segue para um britador de mandíbulas. A fração fina (abaixo de 50 mm) passante na grelha segue para uma peneira com abertura de 25 mm (Figura 3). A fração menor que 25 mm soma-se ao produto da britagem para formar a pilha pulmão, que alimentará a usina responsável pela produção das britas 1, 2 e 3. A fração abaixo de 25 mm, denominada de bica corrida, segue para uma pilha cônica constituída de material fino e de parte do material do solo remanescente do capeamento. Esse material poderá ser usado na pavimentação de estradas ou poderá retornar ao processo (Figura 3).

Da pilha pulmão de estoque, a rocha pré-britada é retomada, por meio de um transportador de correia, e alimenta uma peneira vibratória com abertura de 100 mm. A fração retida (acima de 100 mm) alimenta a segunda etapa da britagem constituída por um britador cônico com abertura regulada para obtenção de um produto abaixo de 100 mm. O produto desta britagem se junta à fração abaixo de 100 mm passante na peneira PV2 e alimenta uma peneira vibratória (PV3) com de três deques e telas de 63, 32 e 22 mm de abertura (SAMPAIO *et al.*, 2001).

A fração retida em 63 mm segue para a terceira etapa de britagem por meio de um britador cônico com regulagem hidráulica fechando o circuito com a peneira de três deques (Figura 3). A fração entre 63 e 32 mm já é um produto final e denominado de brita 3. De acordo com a demanda do mercado, a brita 3 poderá ser redirecionada no circuito para a produção de brita 2 e 3. Neste contexto, a brita 3 passa por uma britagem quaternária em um britador cônico com regulagem hidráulica, reduzindo o material a uma granulometria abaixo de 32 mm. Esta fração é submetida a uma peneira com três deques com telas de abertura de 22, 11 e 4,8 mm, em circuito aberto.

O britador quaternário poderá também ser alimentado pelo excedente da demanda da brita 2, visto que a brita 1 e o pedrisco são mais nobres do ponto de vista comercial.

A fração retida na tela de 22 mm, proveniente da peneira de três deques, é estocada por meio de um transportador de correia no silo de brita 2. O passante na tela de 22 mm é separado nas frações granulométricas de 11 e 4,8 mm.

A brita 1, produto retido em 11 mm e passante em 22 mm, é estocado no silo de brita 1.

O pedrisco, material entre 11 e 4,8 mm, é estocado no silo de pedrisco.

Por último, o pó de pedra, produto passante na tela de 4,8 mm, é estocado em silos de concreto com descarga inferior para carregamento dos caminhões destinados aos clientes.

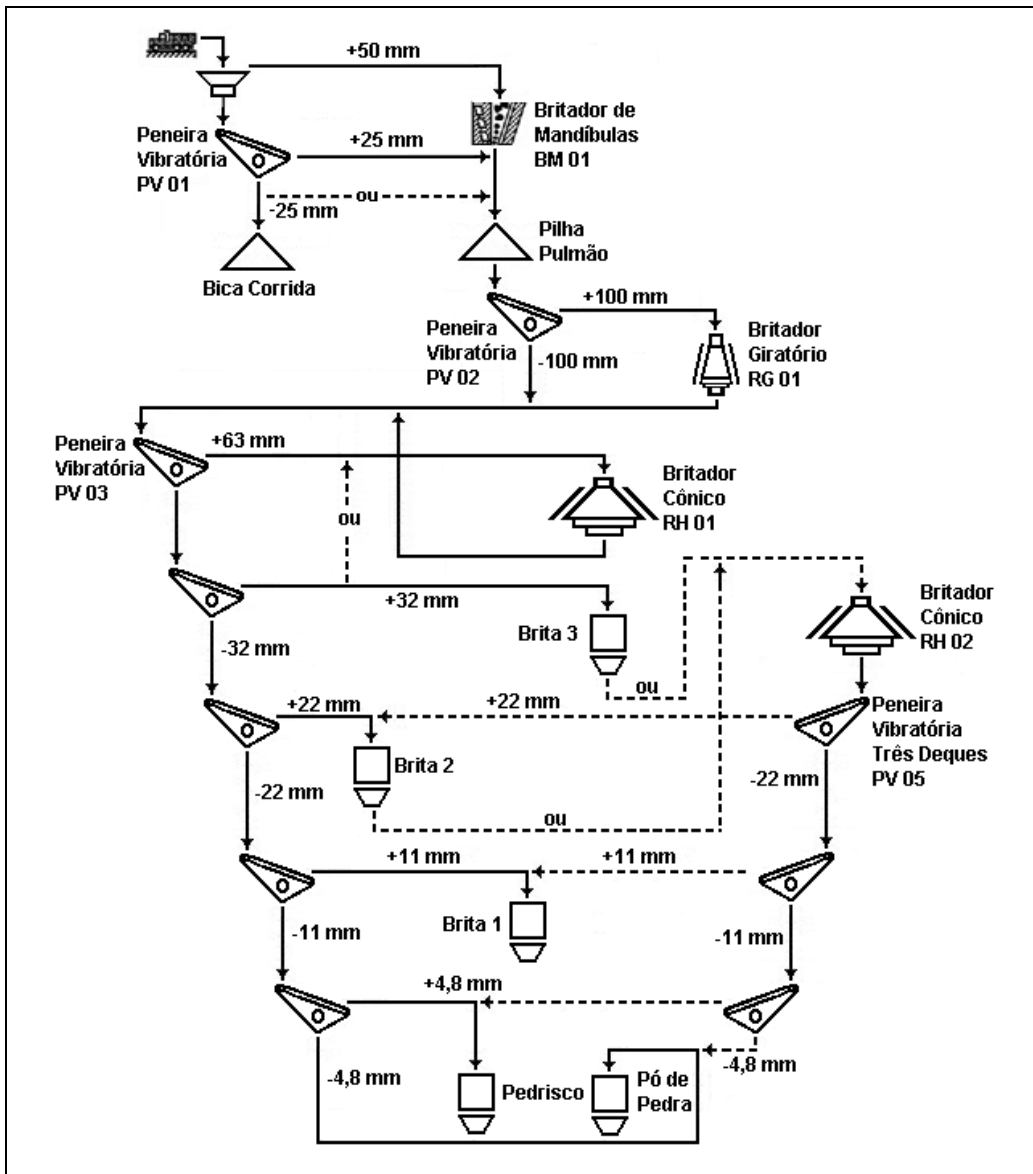


Figura 3 – Fluxograma de uma usina convencional de britagem de rocha compacta para produção de agregado (Fonte: SAMPAIO *et al.*, 2001).

5.3. Projeto de Usinas de Britagem

A concepção de um projeto conceitual e básico de uma usina de britagem, visando à produção de agregados para a construção civil, requer a definição de vários parâmetros, dentre os quais se destacam:

- a definição de reservas do depósito;
- localização da unidade de britagem;
- a rocha do depósito deve ser submetida a ensaios de caracterização tecnológica, por laboratório especializado, para avaliar as suas principais propriedades físicas, mecânicas, petrográficas/mineralógicas, químicas, visando às suas diferentes aplicações - concreto hidráulico, lastro de ferrovia, pavimentos betuminosos, enrocamento, argamassa, meio filtrante, drenagem, controle de erosão etc (SMITH & COLLIS, 2001; LOEMCO, 2003).
- para obter resultados confiáveis e reproduzíveis, recomenda-se a utilização das normas ABNT; existem outras instituições internacionais (ASTM, DIN, BS) que servem como referência para a realização de ensaios tecnológico com os agregados, no entanto, no presente trabalho, recomendamos focar as Normas ABNT.
- licença ambiental;
- definição da escala de produção da unidade de britagem.

Admitindo-se que já tenham sido atendidos esses pré-requisitos, o passo seguinte (METSU MINERALS, 2005) é realizar os seguintes estudos, executando cada fase, a seguir:

Estabelecimento dos critérios de projeto;

Estudo de mercado;

Definição do fluxograma de processo;

Simulações – Escolha dos tipos de equipamento e o seu respectivo dimensionamento;

Cálculo dos investimentos;

Estimativa de custo operacional;

Análise crítica do projeto;

Início do detalhamento.

Na elaboração dos critérios de projeto, o mais importante é a análise da disponibilidade de informações consistentes, pois quanto menores estas, maiores serão os investimento iniciais. Outros fatores também são determinantes na formulação dos critérios, tais como - nível de automatização, facilidade de operação e manutenção e por fim a análise de sustentabilidade, visando atender os aspectos econômico, social e ambiental.

Com o ordenamento territorial recente das regiões metropolitanas do País e as restrições ambientais, a distância das pedreiras para o centro consumidor apresenta uma tendência de crescimento e talvez se possa atribuir uma faixa de distância máxima ideal, considerando os custos e benefícios, entre 30 e 80 km.

Esta política de operação das pedreiras é da maior importância, principalmente quando estas se encontram localizadas próximo de habitações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARQUITÉ, G; GUIZOL, C.; LASSARTESE (2000). Presentation of a Quarrying Operation. In: *Aggregates – geology, prospecting, environment, testing specifications, extraction, processing plants, equipments and quality control*; Louis Primel and Claude Tourenq (Editors), p. 154 – 163, 2000.
- CASTILHOS, Z, C, NEUMANN, R. e BEZERRA, O. Exposição ocupacional e ambiental a poeiras de rochas e minerais industriais. In: *Rochas & minerais industriais usos e especificações*, Luz, A. B. e Lins, F. A. F. (Editores) p. 961 – 989, CETEM/2008.
- FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. (2010). Cominuição. In: *Tratamento de Minérios*, Adão B. Luz, João A. Sampaio e Silvia C. França (Editores), Capítulo 4, p. 143-210, CETEM, 2010.
- LOEMCO - Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de Construcción (2003). *Aridos: Manual de Prospección, Explotación y Aplicaciones*; Capítulo 15 – *Propiedades Básicas de Los Aridos*, p. 343-357; Capítulo 17-*Aridos para Drenaje, Filtración y Control de La Erosión*, p. 393-404; Carlos López Jimeno (Editor), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas da Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
- LANGER, W. H. (2002). Potential environmental Impacts of Quarrying stone in Karst – A Literature Review, U.S. Geological Survey, p. 11-12,
- LUZ, A. B.; LINS, F. A. Introdução ao Tratamento de Minérios. In: *Tratamento de Minérios/CETEM*, Adão B. Luz, João A. Sampaio e Silvia C. França (Editores), Capítulo 1, p. 3-20, CETEM, 2010.
- METSO MINERALS (2005). Projeto de Instalações de Britagem. In: *Manual de Britagem*, p. 8-1 – 8-29, 2005.
- MSHA (2011) - Mine Safety and Health Administration. Mineral dust hazard and sampling. www.msha.gov/illness_prevention/healthtopics/HHICM06.htm- Acesso em 04/02/2011.
- OIT (2011)- Organização Internacional do Trabalho.

SAMPAIO, J. A.; CARVALHO, E. A.; PIQUET, B (2001). Brita Pedreira Vigné. In: Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil, João A. Sampaio, Adão B. Luz e Fernando Lins (Editores), p. 383-390, CETEM/2001.

SMITH, M. R.; COLLIS, L. (2001). Extraction, Chapter 4, Environmental issues, p. 95-97; Description and Classification of Aggregates, Chapter 5, p. 107-144, Chapter 6, p. 145-168; Sampling and Testing, Chapter 7, p. 167-197; Aggregates for Concrete; Chapter 8, p. 199-223; Aggregates in bituminous bound construction material, Chapter 11, p. 255-284. In: Aggregates - Sand, gravel, and crushed rock aggregates for construction purposes, Edited by M. R. Smith and L. Collis, Third Edition, Published by the Geological Society London, 2001.