



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS**

VITOR RIBEIRO JUNCIONI

**ACOMPANHAMENTO DA MOAGEM DE MAGNÉSIA SINTERIZADA APÓS
REFORMA ESTRUTURAL NA LINHA DE PRODUÇÃO**

Belo Horizonte

2013

VITOR RIBEIRO JUNCIONI

**ACOMPANHAMENTO DA MOAGEM DE MAGNÉSIA SINTERIZADA APÓS
REFORMA ESTRUTURAL NA LINHA DE PRODUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Rachel Mary Osthues

Belo Horizonte

2013

VITOR RIBEIRO JUNCIONI

**ACOMPANHAMENTO DA MOAGEM DE MAGNÉSIA SINTERIZADA APÓS
REFORMA ESTRUTURAL NA LINHA DE PRODUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Dra. Rachel Mary Osthues (orientadora)

Ms.C. Karina Silva Campos

Dr. Sidney Nicodemos da Silva

Ms.C. Wanderlei Ferreira de Freitas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de expansão térmica para principais produtos refratários	11
Figura 2 - Britador de mandíbula de um eixo	16
Figura 3 - Britador de mandíbulas de dois eixos	17
Figura 4 - Exemplo de britador de impacto	18
Figura 5 - Exemplo britador Barmac	19
Figura 6 - Esquema de um britador de rolos	20
Figura 7 - Esquema de um britador de rolo dentado	20
Figura 8 - Comparação do formato dos grãos obtido nos britadores de rolos (a) e Barmac (b)	21
Figura 9 - Curva granulométrica para moagem em diferentes tipos de britadores	21
Figura 10 - Exemplo de britador giratório	22
Figura 11 - Esquema de um moinho de martelos	23
Figura 12 - Exemplo de um quarteador Jones	24
Figura 13 - Micrografias de um grão do sinter M-10	28
Figura 14 - Micrografias de um grão do sinter M-30	28
Figura 15 - Gráfico de acompanhamento de produção em toneladas	34
Figura 16 - Gráfico do número de horas produtivas da linha de moagem	35
Figura 17 - Distribuição granulométrica na fração grossa	35
Figura 18 - Distribuição granulométrica na fração média	36
Figura 19 - Distribuição granulométrica na fração fina	36
Figura 20 - Distribuição granulométrica na alimentação do moinho	37
Figura 21 - Distribuição granulométrica da carga circulante	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química e física da magnesita proveniente de diferentes localidades	10
Tabela 2 - Estágios de britagem	14
Tabela 3 - Tabela de velocidades recomendadas em função do material processado	15
Tabela 4 - Relação entre as dimensões das partículas	15
Tabela 5 - Análise química dos diferentes tipos de sinter utilizados	27
Tabela 6 - Análise física dos diferentes tipos de sinter	28
Tabela 7 - Parâmetros de moagem utilizados no britador Barmac	31
Tabela 8 - Parâmetros de moagem do britador Barmac para geração da fração crítica	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Cerâmicas com propriedades refratárias	9
2.2	Materiais refratários	10
2.3	Cominuição	13
2.3.1	<i>Britagem</i>	14
2.3.2	<i>Tipos de Britadores</i>	16
2.4	Quarteamento	23
2.5	Classificação e separação granulométrica	24
3	MATERIAL E METODOLOGIA	27
3.1	Material	27
3.2	Metodologia	29
3.2.1	<i>Realização do teste de produção</i>	30
3.2.2	<i>Ensaio granulométricos</i>	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	Produtividade	34
4.2	Produtividade e análise granulométrica do britador Barmac	35
4.3	Distribuição granulométrica da carga circulante	36
5	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	39

RESUMO

A britagem de material refratário realizada na empresa que o trabalho foi feito, utilizava um britador de rolos e não era suficiente para atender a demanda de produção. Foi feita uma modificação no fluxograma para aumentar a produtividade da linha. Para verificar a eficiência dessa modificação, foi realizado um estudo de produtividade e ensaios granulométricos no laboratório. Estudar as características e particularidades dos equipamentos utilizados na linha de produção é uma maneira de caracterizar como o material está sendo processado e britado, assim como analisar as curvas granulométricas para ter conhecimento das frações das matérias que estão sendo utilizadas na linha de produção. Foi feita uma análise baseada nas propriedades dos equipamentos utilizados para britar a matéria-prima, juntamente com ensaios laboratoriais, de granulometria, modificações de fluxo ou *layout* na linha, para verificar o aumento da produção na moagem de magnésia sinterizadas que foi o objetivo deste trabalho. A produtividade desejada da nova linha de produção foi alcançada com as novas modificações e manteve-se o material na faixa granulométrica especificada pela empresa. No trabalho realizado, propôs-se ainda uma possibilidade de britar o material em outro tipo de britador, como sugestão de melhoria futura na linha de produção.

Palavras-chave: Britagem. Refratário. Granulometria

ABSTRACT

The crushing refractory material held in the company that the work was done, used a roll crusher and it was not enough to attend the demand of production. It was made a modification in the flow chart to increase line productivity. To verify the efficiency of this modification, a study of productivity and granulometric tests in the laboratory were done. Study the characteristics and peculiarities of the equipment used in the production line is one way to characterize how the material is being processed and crushed, as well as analyze the size distribution curves to have knowledge of the fractions of the material that are being used on the production line. An analysis was made based on the properties of the equipment used to crush raw materials, along with laboratory tests, such as granulometry, flow or layout modifications in line to check the increase of production in the grinding of sintering magnesia that was the main goal. The productivity desired of the new production line has been achieved with the new modifications and held the material in the grain size range specified by the company. In the work, it was also proposed the possibility of crush material into another type of crusher for suggested future improvement in the production line.

Keywords: Crushing. Refractory. Granulometry

1 INTRODUÇÃO

A empresa onde foi realizado o trabalho atua na área de tijolos refratários, e em sua unidade principal possui o processo de beneficiamento de materiais que será utilizado nas etapas posteriores de mistura, prensagem e queima do refratário. O beneficiamento é para consumo interno e também para venda a clientes externos.

A linha de moagem da empresa apresenta dificuldade para atender a demanda de entrega de material beneficiado para um de seus clientes, devido ao fato da sua produção precisar atender a demanda da fábrica e a demanda de entrega para clientes externos. Para otimizar esse processo, a empresa decidiu modificar a estrutura e o fluxo da linha de produção com o objetivo de dobrar a capacidade de produção.

Para que o beneficiamento atinja a produção determinada no projeto, deverá ser feito o estudo dos equipamentos utilizados para tal função, estudar as características do material que está sendo beneficiado, bem como alternativas e soluções para que o fluxo de produção aumente.

O tipo de equipamento utilizado para beneficiamento do material é de suma importância para análise da capacidade de produção, pois existem diferentes tipos de britadores, com particularidades, como capacidade máxima de beneficiamento, custo, disponibilidades de peças para reposição, desgaste das peças, etc.

A análise pode ser feita com uma tabela de acompanhamento da curva granulométrica do material britado, pois assim é possível visualizar as consequências diretas de modificações feitas durante o início da produção. As características intrínsecas do equipamento afetam a característica do material britado, portanto, esses fatores influenciam na forma como será conduzido o processo de moagem para otimização na produção.

O trabalho apresentado é o acompanhamento da modificação de uma linha de moagem da empresa, através da análise de curvas granulométricas do material beneficiado, que é o sinter de óxido de magnésio. Também foi realizado o acompanhamento do início da linha de produção, após a conclusão da modificação feita pelo setor de engenharia e projetos da empresa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cerâmicas com propriedades refratárias

As cerâmicas apresentam estrutura cristalina mais complexa do que os metais, e são compostas por pelo menos dois elementos químicos, frequentemente mais que isso. A ligação atômica pode ser iônica ou covalente, sendo que podem apresentar a combinação dessas ligações (CALLISTER, 2006).

O óxido de magnésio (MgO) é uma cerâmica que apresenta a estrutura cristalina como o cloreto de sódio, do tipo AX, sendo que uma célula unitária é formada a partir de um arranjo CFC para ânions, com um cátion no centro do cubo e outro situado no centro de cada uma das 12 arestas. Sua estrutura é composta então por duas redes CFC que se interpenetram, uma composta por ânions e outra por cátions e o percentual de caráter iônico para o MgO é de 73% (CALLISTER, 2006).

Esta cerâmica é utilizada para produção de refratários e é considerada um mineral industrial com nome de periclásio, que é definido como um mineral com aplicabilidade na indústria por possuir valor econômico para a empresa, ou seja, a fábrica pode explorá-lo e ter retornos financeiros rentáveis (BRANDÃO, 2008; GARCIA, 2008; LIMA, 2008).

A magnesita pode ser natural ou sintética. A magnesita natural é encontradas em minas, e em países como a Áustria, Brasil, China, Grécia, Índia e nos países que formavam a antiga União Soviética, como pode ser observado na tabela 1. Esta tabela também mostra as características físicas e químicas, próprias da magnesita natural de elevada qualidade, que são necessárias à fabricação de certos refratários. Para converter a magnesita bruta em um material de boa densidade, termoestável e melhorado, ela deverá ser submetida a um processo de moagem fina, densificação em vários estágios, calcinação cáustica e tratamento em temperaturas elevadas, em fornos rotativos ou do tipo chaminé (*shaft*) (MATOS, 2006).

A magnesita (MgCO₃) sintética pode ser obtida através da extração do minério da água do mar ou de poços de salmoura enriquecida geologicamente. Nestas fontes, os compostos de magnésio reagem com o calcário dolomítico produzindo hidróxido de magnésio precipitado [(MgOH)₂], que passa a Mg(OH)₂ então por um processo de lavagem, espessamento, drenagem de água, calcinação cáustica, densificação e queima para produzir a magnesita com a densidade e química desejadas (MATOS, 2006).

Tabela 1 – Composição química e física da magnesita proveniente de diferentes localidades

Procedência	Grécia	Brasil	China	Áustria
Composição Química				
SiO ₂	0,50	1,30	3,50	1,00
Al ₂ O ₃	0,03	0,80	1,50	1,00
Fe ₂ O ₃	0,60	2,70	1,00	5,00
CaO	1,85	0,80	1,25	3,00
MgO	97,00	95,00	92,40	90,00
B ₂ O ₃	<0,01	0,007	<0,01	<0,01
MnO	-	0,20	-	-
CaO/SiO ₂	3,7	0,5	0,36	3,0
DMA;g/cm ³	3,42	3,20-3,35	3,20	3,35
Tipo de cristal do material cru	Cristalino	Macrocrystalino	Macrocrystalino	Macrocrystalino

Fonte: MATOS, 2006

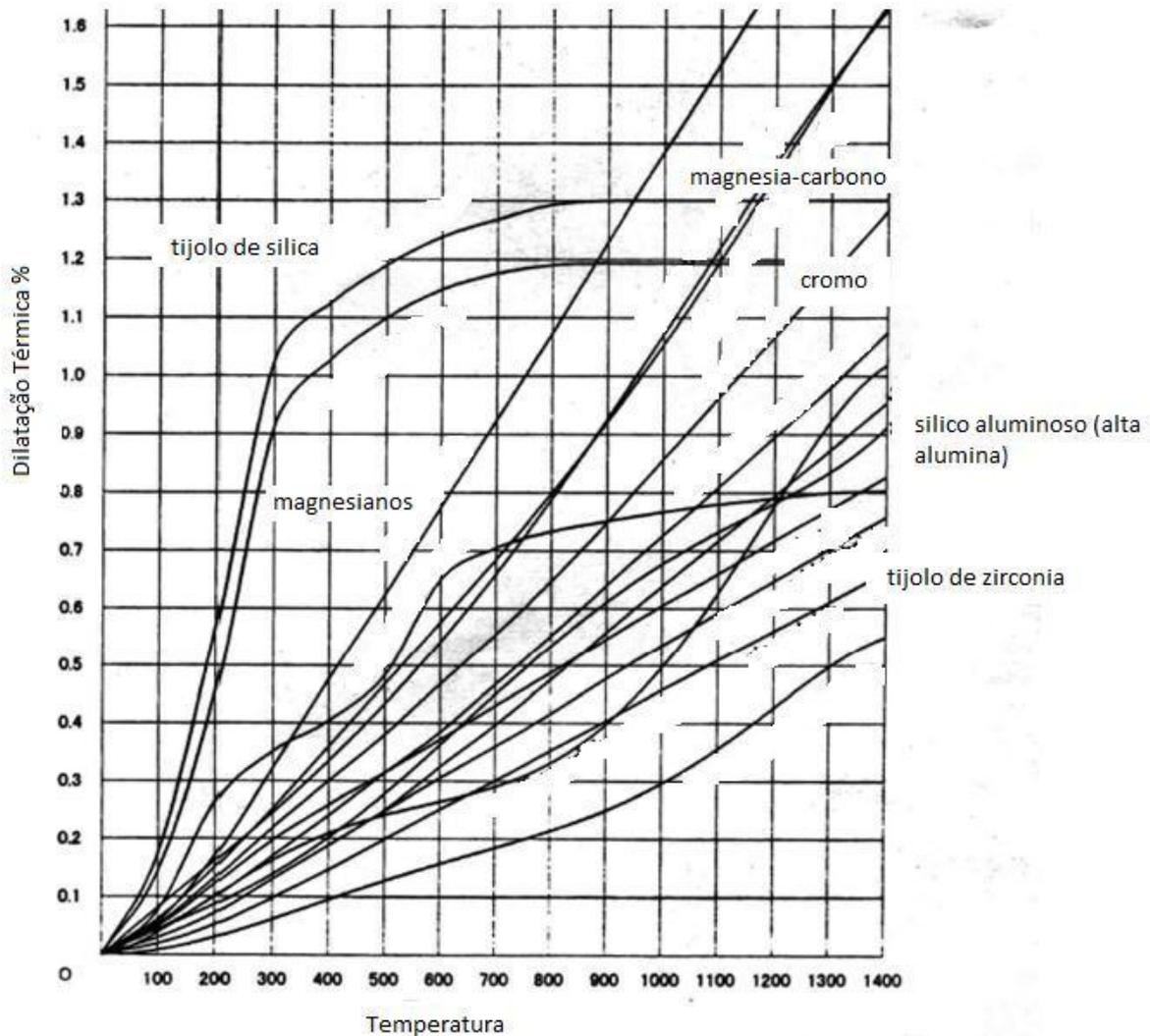
2.2 Materiais Refratários

Segundo Matos (2006),

Os materiais refratários são materiais cerâmicos e têm muita importância em indústrias que utilizam elevadas temperaturas, como a indústria metalúrgica. São conceituados como materiais resistentes a elevadas temperaturas, à corrosão química por um determinado tempo e ao desgaste mecânico. Distinguem-se entre si por propriedades químicas ou físicas, em que apresentam diferentes comportamentos.

Uma diferença no comportamento, na expansão térmica, pode ser observada na figura 1, que mostra um gráfico do percentual de expansão térmica de tijolos à base de sílica, à base de magnésia, à base de argila, à base de magnésia carbono e outros tipos de materiais refratários.

Figura 1 – Diagrama de expansão térmica para diversos produtos refratários



Fonte: MATOS, 2006

Os materiais refratários são constituídos por grãos minerais ligados e são utilizados em revestimentos de equipamentos que utilizam altas temperaturas. Apresentam características como resistência à alta temperatura de serviço, resistência à erosão e abrasão, resistência aos agentes químicos, resistência às variações bruscas de temperatura, entre outras que são específicas de cada refratário, como permeabilidade alta ou baixa. Para cada utilização, deve-se ter conhecimento das propriedades físicas e químicas do refratário, para assim ter um melhor rendimento (MATOS, 2006).

Os materiais refratários podem não se decompor quando expostos a solicitações químicas e mecânicas em graus variados de tensão a temperaturas elevadas.

Diferentes refratários são projetados e produzidos de modo a se adequarem a sua aplicação. Em geral, as propriedades do material podem ser analisadas a partir de ensaios para prever seu desempenho na aplicação real (BANERJEE, 2004).

Materiais refratários se comportam como materiais inorgânicos, polifásicos policristalinos e sólidos. Entre suas principais funções está armazenar, manter e ceder calor; suportar cargas sólidas, líquidas, estáticas e dinâmicas; conter fluidos e resistir a solicitações mecânicas e térmicas (MATOS, 2009).

Os refratários possuem um conjunto de propriedades físicas peculiares destacando-se a porosidade aparente, que mede os poros abertos, responsáveis pela infiltração e corrosão; a densidade aparente, que mede a densificação do material; e permeabilidade, que determina a facilidade de passagem de fluido pelo material. Dentre as características mecânicas expressivas estão a resistência à abrasão, resistência a flexão e a resistência a compressão. Quanto às propriedades térmicas, pode-se falar sobre resistência ao choque térmico, que está relacionado à capacidade do material suportar tensões geradas pela variação rápida de temperatura; a expansão linear reversível, importante para calcular juntas de dilatação em projetos; e a condutividade térmica, que expressa a capacidade de transmissão de calor através do refratário. Como propriedade química, a resistência a corrosão é importante por causa do ambiente e reações do meio no qual o material refratário será aplicado (PAGLIOSA, 2008).

O sucesso de um produto no mercado, depende de vários fatores como consumidores, mercado, qualidade, produtividade, economia, tolerâncias dimensionais e materiais. A produção de refratários é uma interação de tecnologia, mão de obra, matéria-prima e investimento (REED, 1986).

O processamento de refratários inicia-se na matéria-prima: um ou mais materiais cerâmicos, líquidos e aditivos. Esses materiais são beneficiados química e/ou fisicamente por meio de operações de moagem, mistura, separação magnética, flotação, entre outras. Após esse processamento, vem a etapa de conformação, que dependerá do tipo de produto que se quer obter. A próxima fase de produção é o tratamento térmico, com o objetivo de se obter um material com microestrutura e propriedades de acordo com sua aplicação. Por fim, o acabamento é feito posteriormente com o objetivo de ajustar alguma propriedade mecânica, química ou dimensional do produto final (REED, 1986).

2.3 Cominuição

O processo de fragmentação que tem por finalidade reduzir, por ação mecânica externa ou interna, um sólido de certo tamanho em partículas menores é chamado de cominuição. Quando o material é heterogêneo, a função é separar os minerais mais valiosos, e quando o material é homogêneo, a função é reduzir até o tamanho desejado para utilização (MATOS, 2006).

Este processo é utilizado para reduzir o tamanho das partículas dos materiais com a finalidade de controlar a porosidade, obter uma distribuição adequada de grãos, dispersar aditivos ou outros aglomerantes químicos e alterar a forma das partículas (REED, 1986).

Quando são gerados tamanhos de partículas com diâmetros até aproximadamente 1 milímetro, o processo é denominado britagem. Quando a fragmentação tem o objetivo de atingir tamanhos menores que 1 milímetro, dá-se o nome de moagem (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013).

O processo de fragmentação pode ser dividido desde a mina até a adequação ao processo industrial onde o material será utilizado. Na mina, na etapa de lavra, são utilizados explosivos para fragmentar a rocha ou realizar o desmonte do minério em blocos volumosos. A operação que fragmenta os materiais recebidos da etapa de lavra, podendo ser repetido várias vezes até alcançar o tamanho desejado para sua aplicação é denominada britagem. A fragmentação fina é obtida pela etapa de moagem, que alcança os menores valores de granulometrias (MATOS, 2006).

A energia mecânica necessária à fragmentação é aplicada por meio dos seguintes mecanismos: compressão, impacto e atrito. Quando partículas irregulares são sujeitas à quebra por compressão, os produtos se apresentam em duas faixas de tamanho, partículas grossas resultantes da quebra induzida pela tensão, e partículas finas resultantes da quebra por compressão no local onde a carga é aplicada. No mecanismo de impacto os esforços são aplicados rapidamente, a partícula sofre uma pressão elevada e como resultado absorve mais energia do que a necessária para uma simples fratura e fragmenta-se, não havendo deformação. O produto resultante apresenta-se como partículas de tamanho e forma semelhantes. A fragmentação por atrito acontece principalmente devido às interações partícula-partícula e podem ocorrer até num britador, se este é alimentado rapidamente, o que provoca um contato maior entre as partículas aumentando assim a atrição. A quebra por atrito gera material fino (MATOS, 2006).

2.3.1 Britagem

Britagem é a fase grosseira da cominuição de minerais. O processo mais empregado na britagem consiste na quebra de material principalmente pela ação da força de compressão, aplicada através do movimento periódico de aproximação e afastamento de uma superfície de britagem móvel contra outra fixa (MANUAL, 1994).

O Manual de Britagem FAÇO (1994) e Matos (2006) dizem que a britagem é um conjunto de operações que fragmentam o material, que está em forma de blocos vindos das minas, tornando-os compatíveis para utilização direta ou para etapas seguintes. Não há um padrão em relação às etapas de britagem, que podem ser divididas em primária, secundária, terciária e quaternária, mas geralmente utiliza-se a configuração fornecida pela tabela 2.

Tabela 2 – Estágios de britagem

Estágios de Britagem	Tamanho Máximo de Alimentação (mm)	Tamanho máximo de Produção (mm)
Britagem Primária	1000	100
Britagem Secundária	100	10
Britagem Terciária	10	1
Britagem Quaternária	5	0,8

Fonte: MATOS, 2006

Na britagem primária, utilizam-se britadores de grande porte, como o britador de mandíbulas, o britador giratório, o britador de rolo dentado e o britador de impacto. É realizada a seco e tem uma redução na razão de 8:1.

Na britagem secundária, os equipamentos normalmente utilizados são britador de mandíbulas secundário, britador giratório secundário, britador de martelos (impacto), britador de rolos. Na britagem terciária os equipamentos, em geral, utilizados são os britadores cônicos, com uma razão de redução de 4:1 a 6:1. A britagem quaternária é geralmente substituída pela moagem (MATOS, 2006).

Velocidades periféricas altas proporcionam granulometrias mais finas dos produtos, porém aumentam os níveis de desgaste, diminuindo a durabilidade dos martelos. A escolha da velocidade está diretamente relacionada com o material e a abertura da grelha a ser utilizada. É recomendado o uso de uma determinada abertura de grelha, que consiga atingir os índices desejados para o produto. Quanto menor a abertura, melhor a moagem obtida, porém, o

desgaste aumenta. Na tabela 3 podem ser observadas as velocidades recomendadas de acordo com as grelhas e o material. (MANUAL, 1994).

Tabela 3 - Tabela de velocidades recomendadas em função do material processado

Abertura da grelha (mm)	Velocidades mínimas recomendadas (m/s)	
	Materiais moles	Materiais duros
2	60	70
5	50	60
10	40	50

Fonte: MANUAL, 1994

Os formatos das partículas são classificados de acordo com a tabela 4, sendo C o comprimento (distância entre dois pontos paralelos que possam conter o agregado em sua maior dimensão) (MATOS, 2006).

Tabela 4 – Relação entre as dimensões das partículas

Formato	Relação
Alongado	$C > 1,5 - 1/C \leq 1,5$
Esférico (equiaxial)	$C \leq 1,5 - 1/C \leq 1,5$
Lamelar	$C > 1,5 - 1/C > 1,5$
Discóide	$C \leq 1,5 - 1/C > 1,5$

Fonte: MATOS, 2006.

De acordo com Matos (2006), minérios corrosivos impõem condições especiais na escolha dos materiais e equipamentos usados na instalação. Outro fator que afeta na escolha do material, é a presença da umidade. Minérios que apresentam elevada umidade impossibilitam a britagem em granulometria de 20-25cm, pois dificultam a operação de alguns britadores e o peneiramento.

O último estágio do processo de fragmentação é a moagem. Nesta etapa, as partículas são reduzidas, pela combinação de impacto, compressão, abrasão, e atrito a um tamanho adequado ao processo fabril (MATOS, 2006).

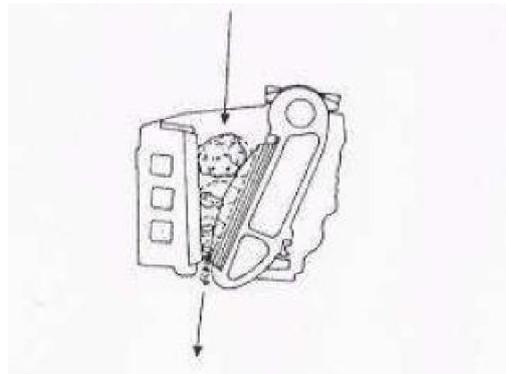
2.3.2 Tipos de Britadores

a) Britador de mandíbulas

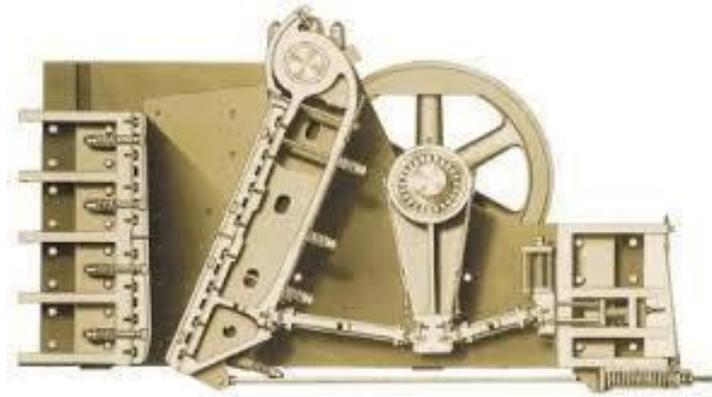
É constituído de uma mandíbula móvel, ligada a um excêntrico, que fornece o movimento de aproximação e afastamento entre a outra mandíbula que é fixa. É utilizado para blocos de elevada dimensão e elevada dureza. São de dois tipos, o de um eixo (figura 2) e de dois eixos (figura 3). O que possui um eixo tem menor custo de produção e possui movimento elíptico. Já o que possui dois eixos, apresenta movimento pendular e tem maior custo de produção, sendo 50% maior que o de um eixo, porém, é indicado para materiais mais abrasivos e de difícil fragmentação (MATOS, 2006).

O perfil das mandíbulas, escolhido de acordo com o material britado, garante um produto com granulometria uniforme que, além de melhor qualidade, possibilita maior rendimento na britagem secundária (MANUAL, 1994).

Figura 2 – Britador de mandíbula de um eixo



Fonte: MATOS, 2006.

Figura 3 – Britador de mandíbulas de dois eixos

Fonte: MATOS, 2006

b) Britador de impacto

É composto por um eixo na horizontal, e ao invés da fragmentação ser por compressão, ela é feita por impacto. Possui em sua estrutura barras de impacto em que o material é britado graças ao impacto da mesma em alta velocidade. De acordo com o Manual de Britagem FAÇO (1994), os britadores de impacto possuem certas características construtivas, como por exemplo, uma ampla câmara de impacto que permite que grandes blocos sejam britados. Outra característica é que as barras de impacto, protegidas por anéis de manganês e ajustáveis por meio de calços, possibilitam a regulagem da curva granulométrica. Pinos de segurança os protegem contra materiais que não são possíveis de serem britados neste equipamento devido ao tamanho do material.

Um exemplo desse equipamento está na figura 4. Através do movimento das barras, parte da energia cinética é transferida para o material protegendo-o sobre placas fixas de impacto em que ocorre a fragmentação. São caracterizados por apresentarem alta produção e alta relação de redução com menor consumo de energia, produzindo materiais cúbicos com alta porcentagem de finos. Por apresentarem grande porte e resistência mecânica, podem ser utilizados para materiais como granito, basalto e minérios de ferro, fornecendo elevada produtividade e excelente curva granulométrica, em contrapartida, o custo operacional é maior que nas instalações convencionais. Os britadores de impacto são máquinas projetadas para britagem primária e secundária de materiais com baixo índice de abrasão, como por exemplo, o calcário, dolomita e carvão (MANUAL, 1994).

Uma desvantagem é que apresenta elevado grau de desgaste dos seus componentes e conseqüentemente alto custo de manutenção. Portanto, não é aconselhável para materiais

abrasivos e com mais de 15% de sílica. É utilizado para alta razão de redução do tamanho dos blocos e alta produção de finos (MATOS, 2006).

Figura 4 – Exemplo de britador de impacto



Fonte: MATOS, 2006

O britador de Eixo Vertical Barmac é um britador de impacto autógeno rocha contra rocha que emprega o sistema de alimentação por cascata para introduzir um segundo fluxo de material, devidamente dosado, na turbulência da câmara de cominuição, causando uma superpopulação de partículas dentro da mesma. Tal característica melhora a transferência de energia interpartículas. Além disso, possui um sistema de controle granulométrico que é feito pelo operador através da otimização das variáveis como a variação da rotação, escolha dos anéis da cavidade da câmara de cominuição, a dosagem da alimentação da cascata e a seleção de diferentes diâmetros do rotor (MATOS, 2006).

O Manual de Britagem FAÇO (1994) confirma o que Matos (2006) diz a respeito do Barmac, que defini este britador como um equipamento que emprega um rotor revestido de rocha, atuando como uma bomba de pedras a alta velocidade que arremessa um fluxo contínuo de rochas contra uma câmara de britagem recoberta de rochas. Um ilustração com exemplo desse tipo de britador pode ser observada na figura 5. O material pode atingir uma velocidade de até 105 metros por segundo. A cominuição ocorre primariamente por impacto, atrito e abrasão de rocha contra rocha.

A curva granulométrica no Barmac não depende do estado de desgaste das peças dentro do rotor, mas depende da alimentação, da friabilidade da rocha, da velocidade do rotor, da

densidade da cortina de partículas na câmara de britagem e a proporção da cascata (MANUAL..., 1994).

De acordo com o Manual de Britagem FAÇO (1994), o Barmac se baseia no impacto livre para realizar a cominuição, enquanto nos britadores tipo compressão o material é prensado através de uma abertura estreita.

O aumento na velocidade do rotor aumenta a energia cinética das partículas e consequentemente a cominuição do produto final. Se a proporção da cascata for aumentada além de 20%, diminui a taxa de redução, porém, aumenta a capacidade do britador. Se a operação for executada com um rotor de diâmetro maior, a velocidade periférica aumenta efetivamente e o efeito é semelhante quando se aumenta a velocidade do rotor com o detalhe de que quanto mais longo for o braço moedor no rotor, mais fino se produz do que um rotor de diâmetro menor com a mesma velocidade periférica (MANUAL..., 1994).

Figura 5 – Exemplo britador Barmac



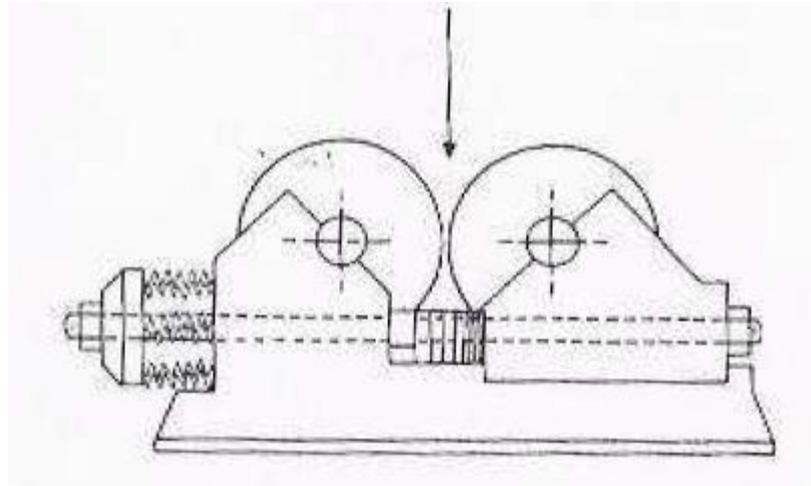
Fonte: MATOS, 2006

c) Britador de rolos

Possui dois rolos girando na mesma velocidade e em sentidos contrários com uma distancia definida entre si, como exemplificado na figura 6. O material é alimentado entre os rolos cujo movimento faz com que o mesmo seja forçado a passar pela distância definida

previamente por ajuste. Esta ação promove a fragmentação dos blocos. A granulometria do material é limitada, pela distância entre os rolos. (MATOS, 2006).

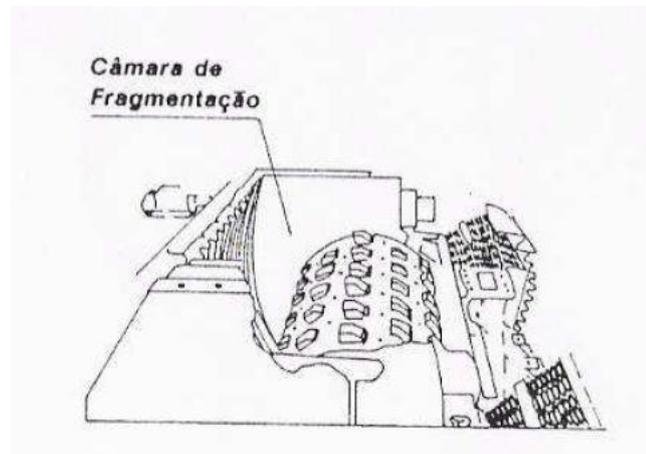
Figura 6 – Esquema de um britador de rolos



Fonte: MANUAL, 1994

Existe o britador de rolo dentado, que é um tipo de britador de rolos, mas que possui superfícies em alto relevo nos rolos, dentes, como no exemplo da figura 7. O movimento giratório do rolo provoca a compressão e cisalhamento do material entre os dentes e a placa fixada à câmara. Sua funcionalidade é limitada devido ao grande desgaste dos dentes e por ser sensível à abrasão. Aplicação mais adequada para rochas de fácil fragmentação e também para britagens móveis, dada as pequenas dimensões do equipamento. Possui alta tolerância à umidade da alimentação, sendo na britagem primária o equipamento que produz menos fino (MATOS, 2006).

Figura 7 – Esquema de um britador de rolo dentado



Fonte: MANUAL, 1994

É mais utilizado na britagem secundária, assim como os de martelo, e o cônico. São utilizados com o objetivo da redução da granulometria do material para a moagem (MATOS, 2006).

O formato das partículas produzidas por um britador por compressão tem forma lamelar, diferente dos produtos do Barmac que são bastante cúbico, como mostrado na figura 8. Na figura 9 pode ser observada a curva granulométrica comparando os britadores Barmac e de rolo, em que são muito parecidas.

Figura 8 – Comparação do formato dos grãos obtido nos britadores de rolos (a) e Barmac (b)



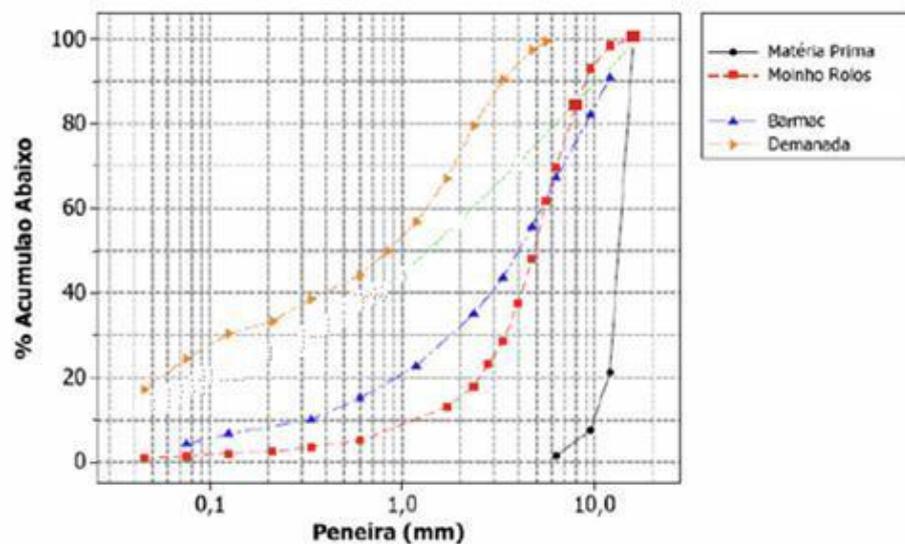
rolos (a)

Barmac (b)

Imagem em mesma escala

Fonte: MATOS, 2006.

Figura 9 – Curva granulométrica para moagem em diferentes tipos de britadores



Fonte: MANUAL, 1994

d) Britador giratório

É composto por suspensões e unidades motrizes, um pilão cônico e cuba cônica. É mais utilizado quando há uma grande quantidade de material a ser fragmentado, sendo mais operacional que o de mandíbulas, já que pode ser alimentado por qualquer lado. Seu funcionamento consta basicamente no movimento de aproximação e distanciamento do cone central em relação a carcaça invertida, o que faz com que toda a carcaça seja aproveitada durante a britagem (MATOS, 2006). O exemplo de um britador giratório pode ser observado na figura 10.

Figura 10 – Exemplo de britador giratório

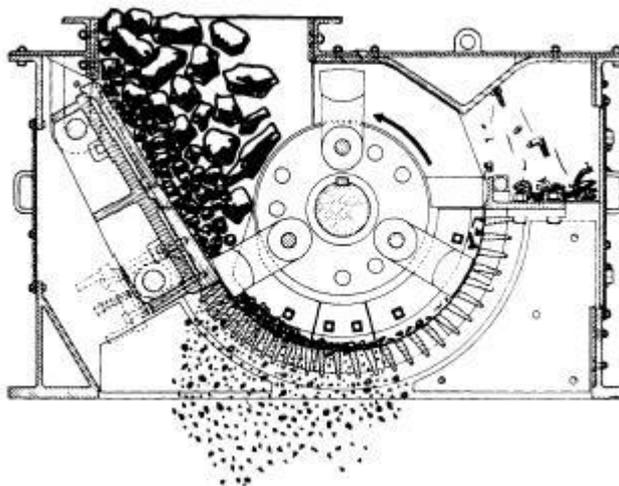


Fonte: MATOS, 2006

O britador giratório tem como vantagem, a possibilidade de ser alimentado diretamente, não exigindo um modo específico de alimentação, como correias ou grelhas vibratórias, no entanto é pouco adequado para materiais úmidos com alto teor de argila. (MATOS, 2006).

f) Britador de martelos

Também chamado de moinho de martelo são compostos de caixa de máquina, rotor, grelha e martelo, em que o martelo colide com os fragmentos contra grelhas, fazendo com que ocorra a fragmentação, como observado na figura 11. Esse equipamento possui três tipos de martelos, o de duas faces, o de multiface e os de oito faces. Enquanto que o martelo de duas faces, também em forma de pastilha, apresenta aplicabilidade para moagem fina, com impacto moderado e alta abrasão. O de multiface é indicado para moagem média e fina, com alta resistência contra desgaste e moderado contra impacto. O de oito faces é em forma de pastilha retangular e com aplicação para moagem média e graúda, alta resistência contra impacto e resistência média contra a abrasão (MANUAL..., 1994).

Figura 11 – Esquema de um moinho de martelos

Fonte: Matos, 2006

2.4 Quarteamento

As propriedades químicas e físicas de um material particulado são determinadas por meio de ensaios com pequenas amostras. As amostras devem ser representativas da partida de sólidos. Um exemplo de método de amostragem é o das divisões sucessivas (método de coneamento ou quarteamento), que podem ser manual ou mecanicamente. Manualmente, o material é empilhado na forma de um cone uniforme sobre uma superfície de papel ou outro material. Faz-se um achatamento do topo do cone, e o cone truncado é dividido em quatro partes iguais. Um par das quartas opostas é rejeitado e mistura-se bem o conteúdo do outro par preparando-se outro cone. O processo é repetido até o tamanho da amostra requerida ser obtido (MULLIN, 1992).

O quarteamento pode ser feito através de um equipamento denominado quarteador Jones. Esse equipamento, figura 12, é constituído por uma série de calhas inclinadas, ora para um lado ora para o outro. Quanto maior o número de calhas mais confiável são as amostras obtidas (SILVA, 2008).

Figura 12 – Exemplo de um quarteador Jones



Fonte: SILVA, 2008

As calhas são de aço, com uma inclinação maior que 45° , e não possuem ângulos vivos. O número de calhas é par e todas tem a mesma largura, maior que $2d + 5\text{mm}$ (d = diâmetro da maior partícula). A amostra é dividida em duas partes, retornando-se uma das partes para um novo quarteamento e, assim sucessivamente até se obter a alíquota na quantidade necessária aos ensaios de peneiramento (SILVA, 2008).

2.5 Classificação e separação granulométrica

Após a etapa de britagem, ocorre a etapa de peneiramento, que de acordo com (MATSUDA, 2007), peneiramento é a separação de partículas mediante a sua apresentação a um ou mais gabaritos de tamanhos constantes e pré-determinados, pelos quais elas passam ou ficam retidas. O gabarito pode ser de telas de malhas quadradas, de barras alongadas ou placas perfuradas.

O peneiramento é a separação de acordo com o tamanho geométrico das partículas, enquanto que na classificação a separação é realizada tomando-se como base a velocidade com que os grãos atravessam um meio fluido (MATOS, 2006).

As peneiras vibratórias são compostas por um chassi robusto, apoiado em molas (ou suspenso), acionado por contrapesos. Cada plano de peneiramento é designado como “deck” (MATSUDA, 2007).

Uma vez o material sobre a superfície de peneiramento ocorre dois processos que possibilitam a classificação: estratificação e probabilidade de separação (MANUAL, 1994).

Na estratificação, o processo ocorre na camada de material, por efeito do movimento vibratório, ao deslocar-se sobre a superfície de peneiramento, pelo qual as partículas menores,

escoando através dos vãos criados pelas partículas maiores, encaminham-se para a parte inferior da camada, indo de encontro com a superfície de peneiramento, enquanto as partículas maiores tendem a se deslocar na parte superior da camada (MANUAL..., 1994).

Os fatores que afetam a estratificação, são: a forma de percurso do material (função da estratificação do material, espessura da camada, características de funcionamento e da inclinação da peneira); as características de funcionamento (amplitude, direção de rotação, tipo de movimento e frequência) e a umidade superficial das partículas (alta umidade dificulta a estratificação) (MANUAL..., 1994).

A probabilidade de separação é o processo das partículas introduzirem-se em aberturas, serem rejeitadas se maiores que a abertura ou passarem através dela se menores, e é função da relação entre seu tamanho e a abertura da tela. Quanto maior for a diferença entre ambos, mais facilmente passam ou são rejeitadas pela tela e vice-versa (MANUAL..., 1994).

As partículas com tamanho maior que $1,5a$ (a = abertura da malha) têm reduzida importância para o resultado do peneiramento. A quantidade relativa destas influi principalmente no desgaste e na energia consumida. As partículas menores que $0,5a$ que são também de menor influência, uma vez que atravessam facilmente as malhas. As partículas com tamanho entre $0,5a - 1,5a$, chamada de “classe crítica”, determinam tanto a eficiência quanto a capacidade, pois as partículas entre $0,5a - a$ muitas vezes necessitam de várias tentativas para conseguir passar pela abertura da tela. As partículas maiores que a , porém menores que $1,5a$ entopem grande número de malhas antes de saírem da tela como material retido (MANUAL..., 1994).

Quando o material é introduzido na extremidade de alimentação da peneira, a vibração provoca a estratificação e este trecho tem estratificação máxima. A máxima remoção das partículas ocorre após esse trecho, e é o ponto de mais alto grau de probabilidade, porque apresenta alta porcentagem de partículas finas. O trecho subsequente é de baixo grau de probabilidade, e a probabilidade de a partícula passar através da abertura é menor porque haverá maior porcentagem de partículas pertencentes à “classe crítica”. Em uma peneira típica de separação simples, uma separação perfeita não é comercialmente praticável, pois do último trecho em diante a probabilidade de as partículas passarem através da abertura se torna extremamente baixa. Teoricamente, para uma separação perfeita, a peneira deveria ser infinitamente longa, pois a curva de classificação torna-se assintótica no eixo do comprimento da peneira (MANUAL..., 1994).

Para a boa qualidade de separação é necessário ter-se uma relação certa entre a amplitude e a frequência. Sendo desejável que a partícula, ao deslocar-se sobre a superfície de

peneiramento, não caia na mesma abertura, mas que também não salte ultrapassando várias aberturas deve-se observar que se a malha for maior, a amplitude é maior e frequência menor. Se a malha é menor, a amplitude é menor e a frequência maior (MANUAL..., 1994).

Nas peneiras inclinadas, o movimento vibratório é circular num plano vertical. A vibração levanta o material, produzindo a estratificação e as partículas deslocam-se sobre a superfície de peneiramento, devido ao impulso do movimento vibratório e pela inclinação.

Nas peneiras horizontais, o movimento deve ser capaz de transportar o material sem a ajuda da força de gravidade. Um movimento linear com um ângulo de aproximadamente 45° com a horizontal produz um componente de levantamento para a estratificação e um componente de transporte (MANUAL..., 1994).

3 MATERIAL E METODOLOGIA

3.1 Materiais

Na empresa na RMBH, utiliza-se a magnesita natural, ou seja, carbonato de magnésio ($MgCO_3$). Este material é processado, sendo homogeneizado em pilhas, britado, calcinado, briquetado e sinterizado em fornos acima de $1900^{\circ}C$. Neste trabalho foram utilizados sínteres das seguintes classes: M-10 e M-30. O sinter M-10 é um carbonato de magnésio de baixa densidade e o sinter M-30 é um carbonato de magnésio de alta densidade.

Tabela 5 – Análise química dos diferentes tipos de sinter utilizados

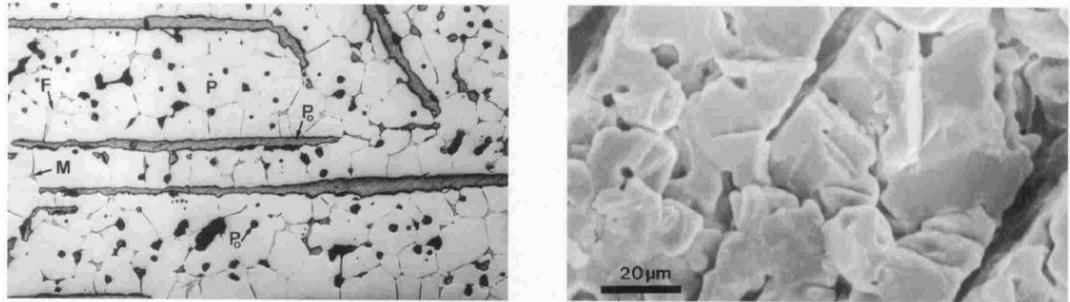
Composição	%	
	M-10	M-30
MgO	94,88	98,4
CaO	0,44	0,77
SiO ₂	1,29	0,25
Al ₂ O ₃	0,35	0,05
Fe ₂ O ₃	2,11	0,41
MnO	0,94	0,12
B ₂ O ₃	0,007	0,007

Fonte: MATOS, 2006.

Além destas diferenças químicas, apresentadas na tabela 5, os sínteres também apresentam diferenças físicas, pois como o sinter M-30 sofre o processo de sinterização e briquetagem, possui forma de briquetes, enquanto que o sinter M-10 tem aspecto de uma rocha e dimensão maior. Nas figuras 13 e 14 estão ilustradas a microestruturas dos sínteres M-10 e M-30. O sinter M-10 é obtido por mono-queima da magnésia natural, através das etapas de homogeneização da magnesita em pilhas, calcinação e sinterização em temperaturas acima de $1700^{\circ}C$, usando fornos verticais e britagem em tamanhos abaixo de 60mm. O sinter M-30 é obtido por um processo de dupla queima da magnésia natural, através das etapas de britagem da magnesita seguida de homogeneização em pilhas, concentração através de dupla flotação para a remoção de talco, cloritas e hematitas, calcinação, briquetagem da magnésia cáustica e sinterização dos briquetes em temperaturas acima de $2200^{\circ}C$, usando fornos *shaft*.

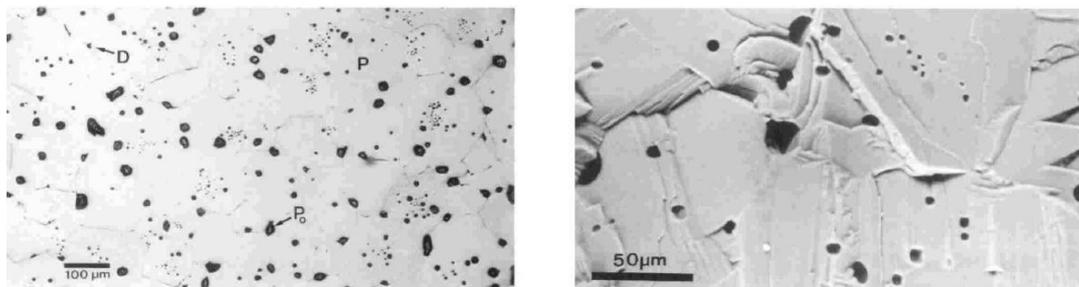
Uma análise física entre os dois tipos de sinter é mostrado na tabela 6 (MATOS, 2006).

Figura 13 – Micrografias de um grão do sinter M-10



Fonte: MATOS, 2006

Figura 14 – Micrografias de um grão do sinter M-30



Fonte: MATOS, 2006

Tabela 6 – Análise física dos diferentes tipos de sinter

Propriedade	M-10	M-30 B
Porosidade Aparente	12~14%	1~2%
Densidade Volumétrica	3,07g/cm ³	3,34 g/cm ³
Constituição Mineralógica		
Mineral Principal	P	P
Minerais Acessórios	M ₂ S,CMS,MF	C ₂ S
Tamanho de Cristal	70μm	120μm
Distribuição Granulométrica		
>50,8 mm	10%	
<50,8 mm	90%	
>12,7 mm		70%
<12,7 mm		30%

Fonte: MATOS, 2006

3.2 Metodologia

A produção na linha de moagem em 2011 foi de 8.000 toneladas, e corresponde ao período anterior à sua otimização. Em 2011, não havia um britador primário antes do elevador de canecas, que funciona como um transportador de material, o que ocasionava entupimentos do mesmo, pois o fluxo do material após ser abastecido na galga vai para o elevador de canecas e depois para as peneiras vibratórias para assim ser classificado nas granulometrias adequadas. Após a reforma, foi instalado um britador primário, no caso um moinho de martelos, antes do elevador de canecas, o que evita que o material cause entupimento no equipamento.

A fração de maior consumo na fábrica é a fração com tamanho menor que 600 μ m e se a linha estiver ensacando a fração fina, as outras frações classificadas na peneira podem ser redirecionadas para o moinho para serem britadas novamente ou então podem ser direcionadas para os moinhos de bola para geração de partículas menores que 75 μ m. No entanto, quando se está ensacando a fração grossa (4,75mm a 2,36mm) ou a fração média (2,36mm a 600 μ m), não tem como direcionar a fração de fino para nenhum lugar, o que gera as interferências de silo cheio e ocasiona as paradas na linha de moagem.

A reforma iniciou em Outubro de 2011 e terminou em Janeiro de 2012, e durante esse período a produção foi feita em outra linha de moagem da fábrica e para os períodos de alta demanda, a britagem do sinter foi terceirizada a um custo de R\$200/tonelada da fração crítica que é a menor que 600 μ m, e foi terceirizada a produção de 3.000 toneladas para atender a demanda devido a reforma na linha. O custo desse processo foi de R\$ 600.000,00.

O projeto do “upgrade” da linha de moagem contemplava um transportador de arraste, que é utilizado para transportar material de um ponto ao outro da fábrica. Esse transporte é devido ao layout da fábrica não permitir que o material classificado na peneira vibratória vá direto para os silos de ensacamento, sendo necessário esse equipamento para escoar a produção da linha de moagem. No desenvolvimento do projeto, o fornecedor garantiu que esse equipamento funcionaria para a função de transportar o material de um ponto ao outro. No entanto, após o início da linha de produção, o equipamento gerou elevado número de interferências mecânicas, pois como o sinter é um material seco, gerava entupimento nas correntes do transportador, uma vez que funcionam com lubrificação. O equipamento é utilizado para transporte de materiais como grãos (milho, arroz, etc.) que possuem lubrificantes naturais e possibilitam seu funcionamento correto.

Após esse problema de projeto foi proposto trocar o transportador de arraste por uma correia transportadora simples que não é influenciada pelo fato do material ser seco. Essa troca durou duas semanas e foi realizada pelo fornecedor do transportador de arraste, pois o mesmo garantiu o funcionamento do mesmo, o que não ocorreu.

A reforma da linha de moagem foi feita para aumentar a capacidade produtiva e assim atender a demanda atual da fábrica. A estrutura inicial contava com britador de rolo primário, um britador de rolo secundário e a produção só podia ser destinada para os silos de estocagem.

Com o novo projeto, foi implantado um moinho de martelos que substituiu os dois britadores de rolos, que tem uma capacidade maior de produção e ajuste de granulometria para o sinter utilizado nas linhas de moagem da fábrica. Além desse novo equipamento, foi instalada uma correia transportadora que permitiu desviar o material para ensacamento, ou seja, uma alternativa que antes não era possível. A estrutura inicial contava ainda com duas peneiras, que classificam o material através de um posicionamento inclinado, onde o material saltava nas aberturas das peneiras. Uma peneira classifica o material na fração *over* e *undersize*, e a outra classifica o material nas frações fina, média e grossa. Com a reforma da linha, essas duas peneiras foram substituídas por uma peneira que realiza todas essas funções e é um equipamento que classifica o material na vertical, ou seja, o material não “caminha” sobre a tela da peneira.

3.2.1 Realização do ensaio de produção

Para verificar se a produtividade havia aumentado conforme o projeto, o qual previa um aumento de 50% na geração do material britado, foram feitas medições de tempo de ensacamento e também foi pesado os bags produzidos durante esse tempo pré-estabelecido.

Para verificar a reforma da linha de produção de britagem e propor um futuro trabalho, como por exemplo, a aquisição de um novo equipamento para atender demandas maiores, foi feita uma comparação de produtividade. Esse teste foi realizado britando o mesmo material da linha, o sinter de óxido de magnésio, na linha de britagem de outra fábrica da empresa, mas que possui em sua estrutura, um britador giratório Barmac. Para isso, foi necessária uma limpeza do equipamento, para não ocorrer contaminação dos materiais, pois nessa fábrica descrita, não é britado o mesmo material da linha de produção estudada. Essa limpeza foi feita tanto antes do teste, quanto depois.

O ensaio consistiu em fazer o material seguir o fluxo de britagem, separação granulométrica pelas peneiras e ensilamento das três frações. O ensilamento é feito após o material ser classificado na peneira e então seguiu por uma bica até o silo de sua respectiva fração. A produção foi medida na saída do material dos silos, ou seja, como a produção foi ensacada em bags após sair pelas bocas dos silos, pesando-se os bags. Portanto, para comparar as produtividades, foi calculado o peso total da produção e também foi considerado o tempo que o britador moeu aquela quantidade de material, para obter assim a quantidade produzida por hora (tonelada/hora). O britador foi abastecido através de suas galgas de alimentação com partículas com tamanho médio de 40 mm. Os parâmetros utilizados são os descritos na tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de moagem utilizados no britador Barmac

Velocidade do rotor	2170 rpm
Velocidade do alimentador	950 rpm
Tempo de operação	2,21 h

Fonte: Produzido pelo Autor

A fração crítica é a fração fina, pois o seu consumo é elevado, portanto para se obter mais dessa fração, pode-se utilizar uma técnica em que as frações grossa e média são direcionadas para retornar ao britador mudando as chaves nas bicas em que o material percorre nas linhas de moagem. Assim, o material passa mais de uma vez no britador até alcançar a granulometria da fração fina. Assim, a carga circulante aumenta e o material só passa pela bica de material fino. Devido a esses gargalos de produção, foi feito o teste no Barmac para geração de uma só fração, para medir a capacidade produtiva da linha quando for necessário gerar apenas a fração fina do material. Foi mantida as regulagens muito próxima dos parâmetros utilizados no teste que ensila as três frações para obtenção da fração crítica, em que os parâmetros escolhidos foram os determinados na tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de moagem do britador Barmac para geração da fração crítica

Velocidade do rotor	2200 rpm
Velocidade do alimentador	800 rpm
Tempo de operação	1 h

Fonte: Produzido pelo Autor

Para efeito de análise, foi feito ensaio granulométrico do material que estava entrando no britador Barmac e também foi feita a granulometria da carga circulante no moinho.

3.2.2 *Ensaio granulométricos*

Os ensaios granulométricos foram realizados no laboratório central da fábrica com amostras pesando entre 400g e 600g, e que foram quarteadas para evitar erro no ensaio granulométrico.

Os equipamentos utilizados para este teste foram:

- peneirador mecânico com frequência de oscilação de 290 ± 20 ciclos/min. e golpe rítmico de 30 ± 3 mm de queda a cada duas oscilações (ROTAP);
- peneiras para ensaio: malhas de 4,75mm; 3,35mm; 2,36mm; 1,70mm; 600 μ m e 212 μ m;
- balança com capacidade adequada e resolução mínima de 0,1 g;
- estufa com capacidade para 1kg de material e 110 ± 10 °C;
- recipientes e acessórios para lavagem e secagem de amostras;
- espátula metálica;
- pincel;
- água corrente;
- pia ou bacia para lavagem das amostras.

Antes do peneiramento as amostras foram lavadas na peneira de malha de 212 μ m, lavadas em água corrente até que a água residual saísse transparente. Cuidados a serem tomados na lavagem das amostras: deve ser realizada sempre na malha mais fina do conjunto de peneiras especificado para a análise, deve ser realizada tomando-se o cuidado de não provocar danos à peneira ou ao material, nunca esfregar o material contra a malha da peneira ou utilizar jatos fortes do líquido de lavagem quando utilizados outros líquidos de lavagem estes não podem provocar alteração no material e / ou comprometer os resultados. O material lavado foi, então, seco em estufa a 100°C durante 15 minutos e resfriado ao ar até a temperatura ambiente.

Para o peneiramento foi realizada a montagem do conjunto de peneiras a serem utilizadas no ensaio, iniciando-se com a peneira mais fina da série, montada sobre o fundo. Sobre esta, foram montadas as demais peneiras em ordem crescente de abertura de suas malhas, ficando a mais grossa no topo do conjunto. As amostras foram pesadas e designadas

por “m1”. A amostra foi colocada no topo do conjunto e fechou-se o conjunto com uma tampa. O conjunto foi montado no peneirador, que funciona por vibração. Após feito isso, o

mesmo foi ligado e observou-se a batida do marte, que estava encostando-se à tampa e dando pancadas na mesma. Ajustou-se o temporizador para 10 min de peneiramento.

Após o peneiramento, foi removido o conjunto do peneirador e efetuadas as pesagens. Foram pesadas as frações retidas em cada peneira para verificar a porcentagem em peso de cada faixa granulométrica comparando-se com o peso inicial, que é entre 400g e 600g. A balança possui resolução mínima de 0,1 g, inclusive o fundo.

A transferência da fração retida para o recipiente da balança foi feita com cuidado, não só para garantir a remoção de todo o material, como também para evitar perdas e possíveis danos à malha da peneira.

O resultado da granulometria foi calculado:

$$P = (m/m_I) \times 100$$

Onde:

P = porcentagem de uma determinada fração retida em uma peneira.

m = massa da fração retida em uma peneira, em gramas.

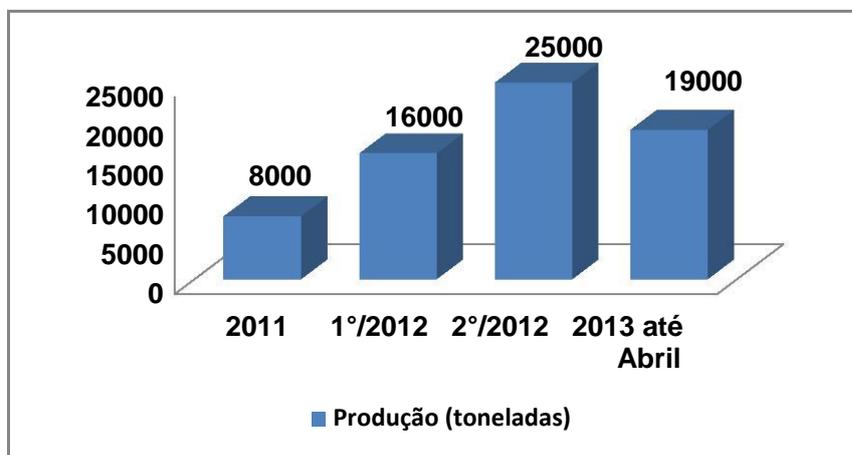
m_I = massa inicial da amostra de ensaio, seca, em gramas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Produtividade

Após a troca do transportador de arraste pela correia transportadora foi alcançada uma produção de 25.000 toneladas no segundo semestre de 2012 e a produção foi dobrada em relação ao primeiro semestre de 2012, como pode ser observado na figura 15. Essa conquista foi alcançada devido ao equipamento britador ser o adequado para a situação requerida, pois teve capacidade para britar o material e alimentar a linha de moagem sem gerar interferências por entupimento ou desgaste excessivo de peças internas.

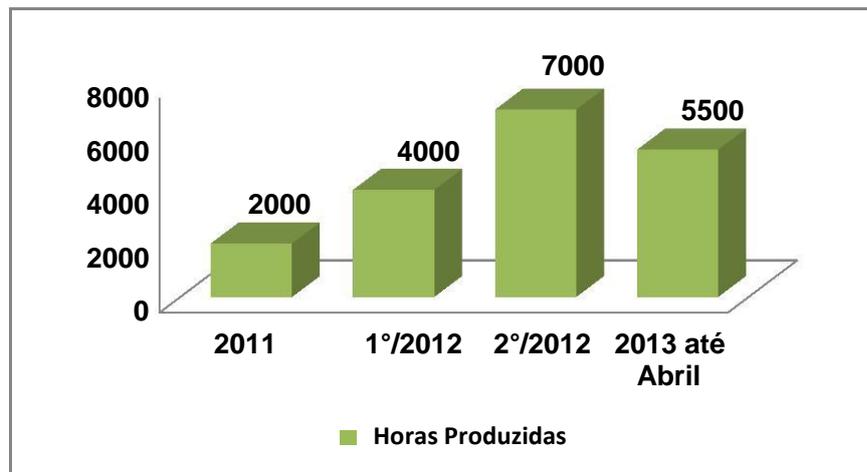
Figura 15 – Gráfico de acompanhamento de produção em toneladas



Fonte: Produzido pelo Autor

Outro ponto relevante foi o aumento do número de horas que linha produziu. Anteriormente à reforma, a linha só tinha um silo para ser ensacado, ou seja, gerava paradas na linha de produção devido a interferência de silo cheio. A reforma contemplou a instalação de quatro silos com a finalidade do ensacamento das quatro frações produzidos pela moagem, terminando com as horas paradas da linha devido ao silo estar cheio, ou seja, acaba com a ociosidade dos equipamentos. O número de horas que a linha produziu dobrou em relação ao ano de 2011, somente comparando o primeiro semestre de 2012. Mesmo com esse aumento do número de horas, a linha teve paradas devido a interferências mecânicas no transportador de arraste, descrito anteriormente. Após a substituição do transportador de arraste e colocação da correia transportadora, o número de horas que a linha produziu no 2º semestre de 2012 dobrou em relação ao 1º semestre de 2012, como pode ser observado na figura 16.

Figura 16 – Gráfico do número de horas produtivas da linha de moagem



Fonte: Produzido pelo Autor

4.2 Produtividade e análise granulométrica do britador Barmac

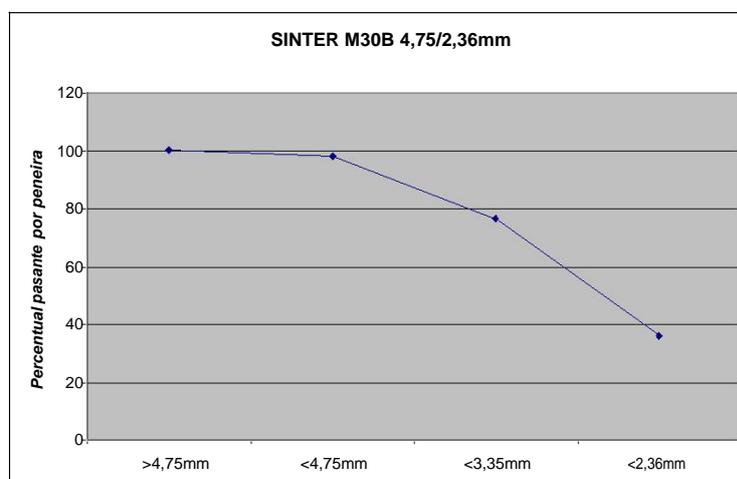
No teste comparativo de produtividade no Barmac, foram encontrados os seguintes resultados:

Ensilando as três frações:

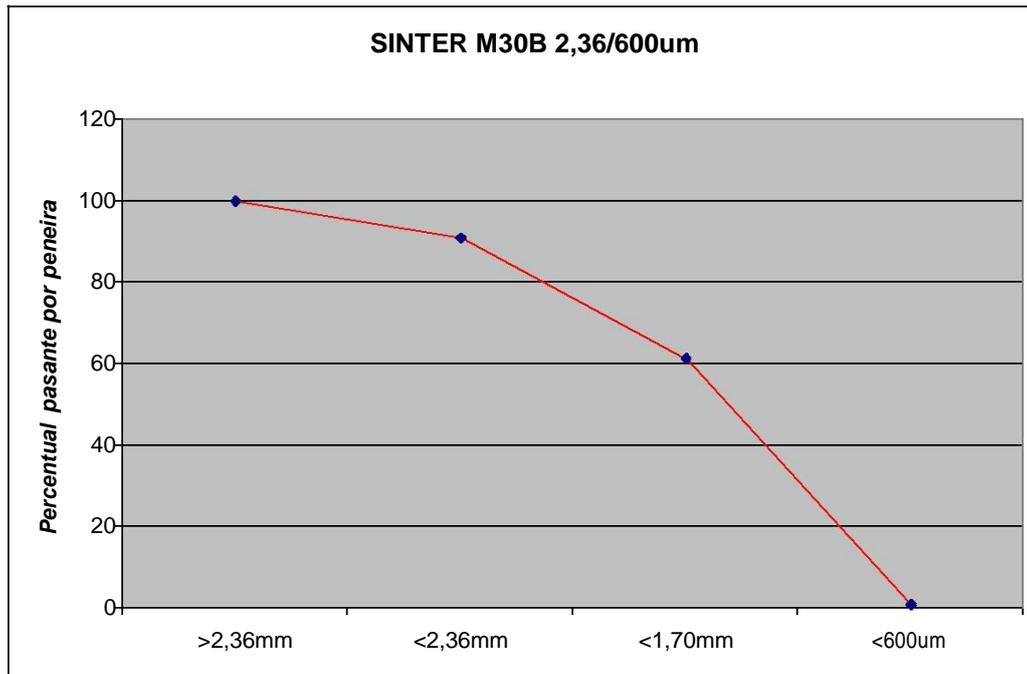
Produtividade: 12,02 toneladas/hora

- fração grossa (4,75/2,36mm) = 34%
- fração média (2,36/600µm) = 35%
- fração fina (<600µm) = 31%

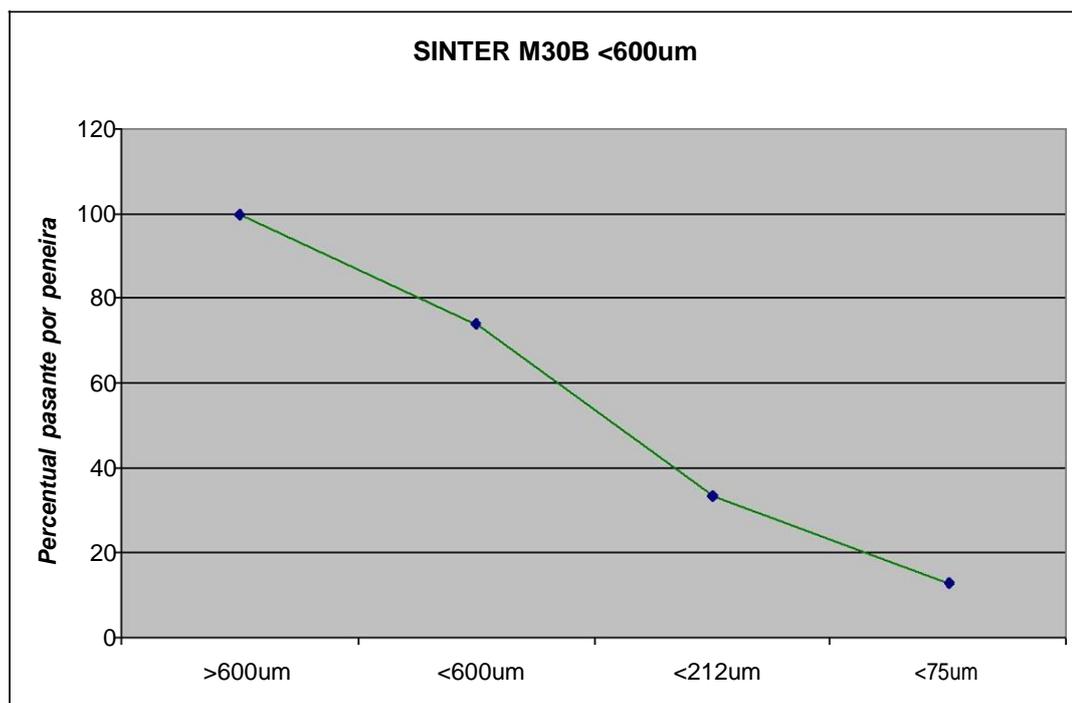
A distribuição granulométrica grossa, média e fina encontrada do material britado no Barmac pode ser observada nas figuras 17, 18 e 19. Ensilando apenas uma fração (<600µm) a produtividade foi de 4,84 toneladas/hora.



Fonte: Produzido pelo Autor



Fonte: Produzido pelo Autor



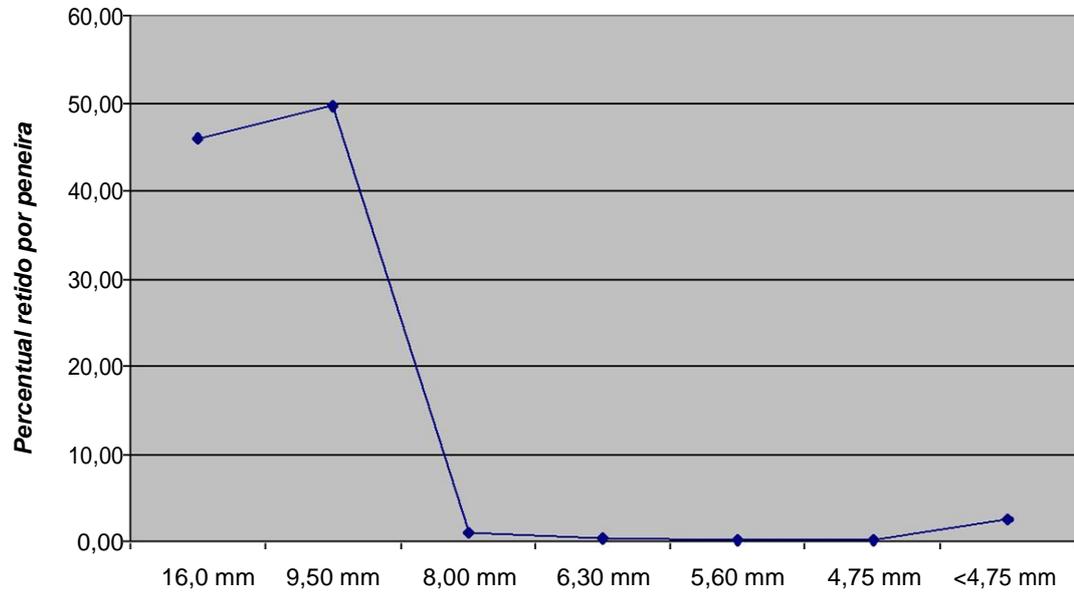
Fonte: Produzido pelo Autor

4.3 Distribuição granulométrica da carga circulante

As figuras 20 e 21 representam os gráficos da distribuição granulométrica na alimentação do britador e da carga circulante no circuito de britagem do Barmac. Foi encontrado um tamanho médio das partículas na alimentação entre 16 mm e 8mm. A distribuição granulométrica da carga circulante encontrada foi entre 5,60mm e 4,75mm em

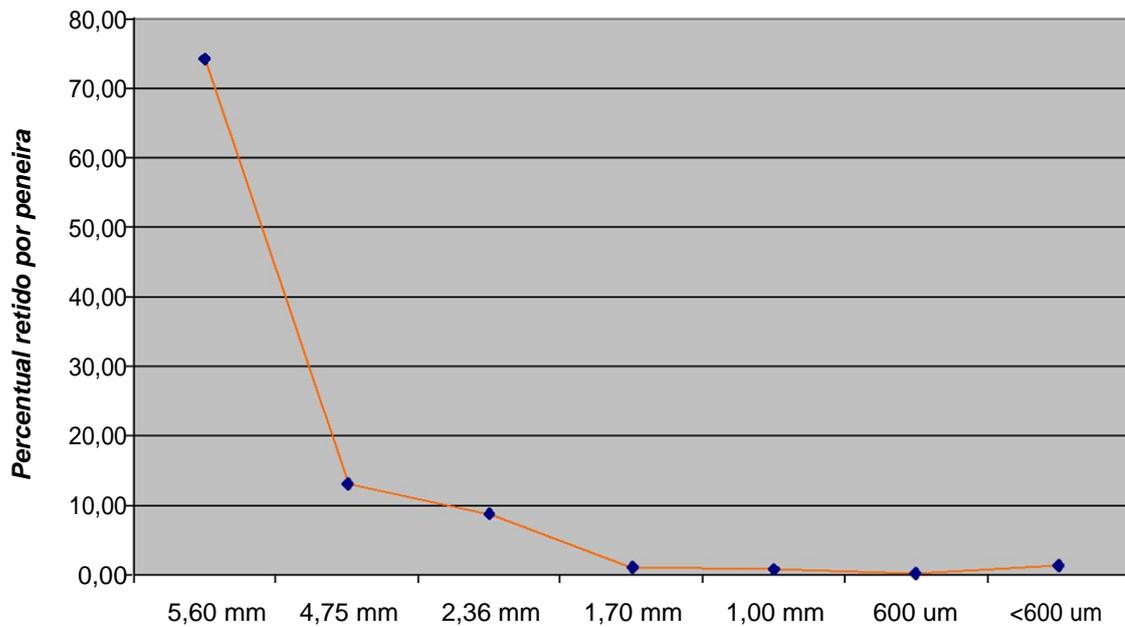
sua maioria, o que indica que são as partículas que retornam ao britador para serem fragmentadas.

Granulometria de alimentação do britador Barmac (Sinter M30B)



Fonte: Produzido pelo autor

Granulometria da carga circulante do britador Barmac (Sinter M30B)



Fonte: Produzido pelo autor

5 CONCLUSÃO

Após o fim da reforma realizada na linha de produção concluiu-se que:

- houve um aumento da produtividade superior a 50%, o que possibilitou a fábrica atender a demanda dessa matéria-prima britada para clientes internos e externos;

- a linha apresentou capacidade de produzir e estocar, diminuindo as interferências por silo cheio, o que ocasionava ociosidade na linha de moagem;

- o novo *lay-out* da linha de produção manteve a distribuição granulométrica do material dentro do padrão exigido para sua aplicação na fábrica, ou seja, o moinho de martelo e as peneiras instaladas mantiveram o material adequado dentro das faixas granulométricas permitidas e exigidas;

- a utilização do britador de impacto Barmac triplicou a produtividade comparando com a linha de produção utilizada;

- o custo de moagem por tonelada com peças de desgaste no Barmac é 12% mais barato em relação ao moinho de martelo utilizado na linha;

- a curva granulométrica do material britado no Barmac, também atende as faixas granulométricas exigidas pela equipe de engenharia do processo.

- utilizar o britador impacto autógeno (Barmac) é uma possibilidade viável, porém requer mais investimento para o local, pois para instalar um equipamento desse porte, terá que ser feita outra mudança no

layout da linha, como elevação do telhado e retirada dos equipamentos que não serão utilizados

REFERÊNCIAS

- BANERJEE, Subrata. Properties of refractories. In: SCHACHT, C. A. **Refractories Handbook**. Schacht Consulting Services Pittsburgh, 2004.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ed. São Paulo: LTC, 2006.
- MATOS, José Vale. **Apostila básica sobre refratários**. [S.I.:s.n.] 2006
- MATOS, Jose Vale. **Introdução a refratários** [S.I.:s.n.] 2009.
- MANUAL de britagem Faço. São Paulo: Svedala, 1994.
- MATSUDA, Sigueru Oscar. **Apostila sobre moagem de refratários**. 1. ed. Belo Horizonte, 2007.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Beneficiamento de minérios**. Disponível em: <http://www.pormin.gov.br/biblioteca/arquivo/beneficiamento_de_minerio.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2013
- MULLIN, J.W. **Criystallization**. .ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.
- PAGLIOSA, Carlos. **Curso de refratários: 2008** [S.I.:s.n.] 2008.
- REED, J. S. **Introduction to the principles of ceramic processing**. New York: A Wiley-interscience publications, 1986.
- SILVA, A. D. A. **Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri Cearense na Formulação de Argamassa**. Recife, 2008.