

RENATO NUNES MARTINIANO DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS DE BASALTO
PRODUZIDOS POR DIFERENTES BRITADORES**

**São Paulo
2011**

RENATO NUNES MARTINIANO DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS DE BASALTO
PRODUZIDOS POR DIFERENTES BRITADORES**

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas
do curso de graduação do Departamento de
Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientadora: Dra. Carina Ulsen

Co-Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

**São Paulo
2011**

TF-2011
OL4c
3270472

M2011L

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700009059

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Renato Nunes Martiniano de
Caracterização de agregados miúdos de basalto produzidos
por diferentes britadores / R.N.M. de Oliveira. -- São Paulo, 2011.
40 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo.

1. Caracterização tecnológica de minérios 2. Agregados
3. Britagem 4. Equipamentos de mineração I. Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de
Minas e de Petróleo II. t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas felicidades que o estudo proporciona.

À minha família.

Aos seguintes profissionais que me transmitiram seus conhecimentos:

1. Dra. Carina Ulsen e professor Henrique Kahn, do LCT-EPUSP, que plantaram, em mim, a semente da pesquisa científica.
2. Os colaboradores dos laboratórios da EPUSP, com os quais aprendi muito sobre as práticas laboratoriais.
3. Leonardo Motta, da Embu S.A., que me possibilitou aprender na prática o dia a dia da Mineração Juruaçu.
4. Todos os colaboradores da Mineração Juruaçu que me transmitiram, na prática, seus conhecimentos na área da mineração.
5. O grupo de Tecnologia de Processos & Inovação da Metso, representado por José Silvio Corsini, Edis Nunes, Bruno Pereira e Julio Almeida, pelo apoio e ajuda neste trabalho.
6. Julio Silva, engenheiro de britadores da Metso, pelo suporte e motivação para realizar este trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados dos estudos de caracterização mecânica e tecnológica de agregados miúdos produzidos por dois tipos de britadores diferentes. O objetivo consistiu em demonstrar que esse material apresenta alto grau de dificuldade nas etapas de cominuição e em verificar as propriedades morfológicas e microestruturais dos produtos provenientes de diferentes mecanismos de fragmentação.

Em razão da alta resistência à compressão, os agregados miúdos de rocha basáltica são comumente produzidos por britadores cônicos, que utilizam o mecanismo de compressão/atrição para fragmentar a rocha. Entretanto, a utilização da prensa de rolos de alta pressão (PRAP), onde apenas há compressão como mecanismo de fragmentação, pode ser uma alternativa para esta função.

Sabe-se que esse equipamento traz benefícios para a indústria mineral no que se refere ao consumo de energia e redução da carga circulante. Entretanto a utilização do britador na mineração de agregados é recente e pouco se conhece sobre as características do seu produto.

Os resultados demonstraram melhoria na morfologia das partículas (tanto a esfericidade como a relação de aspecto). Do ponto de vista microestrutural foi observado partículas fissuradas em ambos os produtos. Encontrou-se, através da microscopia óptica, uma maior quantidade de fissuras no produto da PRAP. Porém, a quantidade de poros pequenos no produto do britador cônico é maior, sugerindo maior fissuração do agregado.

ABSTRACT

This paper presents the results of mechanical and technological characterization of aggregates produced by two different crusher machines. The aim was to demonstrate that this material provides a high degree of difficulty in comminution and to verify the morphological and microstructural properties of the products from different fragmentation mechanisms.

Due to the high compressive strength, aggregates of basaltic rock are usually produced by cone crushers by compression/attrition mechanisms to break the rock. However, the high pressure grinding roll (HPGR), in which only compression forces are present, can be an alternative to this function.

It is known that this equipment provides benefits for the mining industry in terms of energy consumption and reduction of the circulating load. However its application in quarry is recent and just little is known about the characteristics of its product.

The results showed improvement on particles morphology (both sphericity and aspect ratio). From the viewpoint of microstructure, fractured cracks were observed in both products. It was observed, by optical microscopy, a greater number of fractures in HPGR product. However, the amount of small pores in the product of the cone crusher is higher, suggesting greater fractured aggregate.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVO.....	7
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL	8
3.2 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO	8
3.2.1 Compressão/atrito.....	8
3.2.2 Impacto: rocha x rocha	9
3.2.3 Compressão.....	10
3.3 CARACTERIZAÇÃO	11
3.3.1 Teste de britabilidade	12
3.3.2 Teste de carga pontual	12
3.3.3 Índice energético para moinho de bolas.....	14
3.3.4 Distribuição granulométrica e morfologia	15
3.3.5 Análise de microfissuras.....	16
4 MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1 AMOSTRAGEM.....	17
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ROCHA BASÁLTICA	17
4.2.1 Índice de abrasão de Bond.....	18
4.2.2 Índice de abrasão e de britabilidade de Macon.....	18
4.2.3 Massa específica e massa unitária	18
4.2.4 Índice de capacidade volumétrica	19
4.2.5 Índice de resistência e distribuição granulométrica.....	19
4.2.6 Índice da lamelaridade.....	20
4.2.7 Teste de carga pontual.....	20
4.2.8 Índice energético para moinho de bolas.....	20
4.2.9 Índice energético para moinho de barras.....	21
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS PRODUZIDOS POR DIFERENTES MECANISMOS DE BRITAGEM.....	21
4.3.1 Distribuição granulométrica e morfologia	21
4.3.2 Análise de microfissuras.....	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ROCHA BASÁLTICA	22
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS PRODUZIDOS POR DIFERENTES MECANISMOS DE BRITAGEM.....	25
5.2.1 Distribuição granulométrica e morfologia das partículas.....	25
5.2.2 Análise de microfissuras.....	27
6 CONCLUSÕES	30
7 BIBLIOGRAFIA.....	31

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil brasileira encontra-se em uma situação privilegiada devido às obras de infra-estrutura e habitação. Neste cenário, o consumo de matérias-primas, entre elas os agregados (gráudo e miúdo), vem aumentando. Por ser esse insumo responsável por aproximadamente 80% em massa das matérias-primas desse setor, sua produção tornou-se fundamental.

Porém, devido à exaustão de portos de areia, principalmente nas proximidades dos grandes centros consumidores, os agregados miúdos têm sido produzidos artificialmente, desde a década de 1980, por meio da britagem de rochas graníticas, calcárias e basálticas.

Nas minerações de agregados, o agregado miúdo (fração abaixo de 4,8 mm) é obtido por meio da britagem terciária e/ou quaternária em britadores cônicos (item 3.2.1) ou em britadores de impacto eixo vertical (VSI, item 3.2.2). A escolha do mecanismo de britagem é baseada, principalmente, na relação de redução por consumo de energia e, posteriormente, pelo consumo das peças de desgaste e pelas características dos produtos obtidos.

Considerando que as rochas graníticas são menos resistentes ao impacto e mais abrasivas em relação às basálticas, utiliza-se preferencialmente o britador de eixo vertical, onde o desgaste de peças e o poder de quebra são menores quando comparados com os britadores cônicos. Em contra partida, o britador cônico é normalmente utilizado para britar rochas basálticas, pois fornece mais energia para a quebra da rocha.

Um equipamento recentemente desenvolvido e passível de ser utilizado na cominuição de rochas basálticas é a prensa de rolos de alta pressão (PRAP). Uma unidade desse equipamento foi adquirida no início de 2011 pelo Grupo S. (item 3.2.3) e instalada na unidade Pedreira. P., localizada na região noroeste do estado de São Paulo, a 340 km da capital.

Devido à sua alta resistência mecânica à compressão (item 3.3.2) e ao impacto (NUNES FILHO, 2007), o britador cônico e o de eixo vertical não se mostraram eficientes na produção de agregados miúdos a partir da britagem de rochas basálticas. Por outro lado, em razão do grande poder de cominuição desse novo equipamento, o produto requerido foi facilmente gerado. Entretanto ficou a incerteza a respeito de suas propriedades morfológicas, principalmente no que se refere à presença ou não de microfissuras.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência das propriedades mecânicas da rocha na sua fragmentação e comparar as características morfológicas e microestruturais de areias artificiais produzidas a partir da britagem de rocha basáltica por meio da PRAP e do britador cônico.

O escopo do trabalho envolveu:

1. Amostragem da areia artificial produzida por britador cônico e pela prensa de rolos de alta pressão.

2. Caracterização mecânica do minério: índice de abrasão de Bond e de Macon, índice de britabilidade de Macon, índice energético de Bond para moinho de bolas e de barras, massa específica e unitária, índice de capacidade volumétrica e de resistência, índice de lamelaridade e teste de carga pontual.
3. Caracterização tecnológica da areia artificial: distribuição granulométrica, morfologia das partículas e caracterização microestrutural com foco na identificação de microfissuras.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Agregados para construção civil

Agregados são materiais granulares, sem forma ou volume definidos com dimensões e propriedades para uso em obras da engenharia civil (LA SERNA e REZENDE, 2009).

Em relação à dimensão, são classificados pela NBR9935 (ABNT, 2005b) em agregados graúdos (com mais de 95% em massa retida na peneira de abertura de malha 4,75 mm), miúdos (pelo menos 95% em massa passante na peneira de abertura de malha 4,75 mm) e finos (material granular que passa na peneira com abertura de malha de 0,150 mm).

Devido à escassez de areia natural, às restrições ambientais e aos bloqueios de jazidas, principalmente nas maiores metrópoles brasileiras, associado à crescente demanda de agregados para a construção civil, criou-se a seguinte alternativa para obtenção dessa matéria-prima: produção artificial de areia a partir da britagem de rochas.

3.2 Mecanismos de fragmentação

Os dois principais mecanismos de fragmentação de rochas são: impacto e compressão (WILLS, 2006). Dependendo das características do minério, cada mecanismo apresenta vantagens e desvantagens.

Para a britagem terciária ou quaternária de rochas graníticas, é utilizado o mecanismo de fragmentação de impacto denominado rocha contra rocha, em britadores de impacto vertical, uma vez que o desgaste de peças e a energia de quebra são menores quando comparados com outros mecanismos.

Por outro lado, as rochas basálticas, que são menos abrasivas (APÊNDICE A), porém mais resistentes à quebra, necessitam mais energia para a cominuição. Logo, o mecanismo de fragmentação mais utilizado é o compressão/atrição.

3.2.1 Compressão/atrição

Os britadores cônicos (BC), tal como o esquema ilustrado pela Figura 1, são equipamentos que reduzem a granulometria das partículas a partir de forças de compressão e atrição (CHAVES, 2003).

Operam com um eixo oscilante, sendo que a britagem ocorre entre um elemento fixo (revestimento da carcaça ou do bojo) e um elemento móvel interno (manto), montado sobre o eixo. Seu movimento oscilante é gerado por um eixo

excêntrico rotacionado por coroa e pinhão. A excentricidade do elemento interno de britagem (a camisa do cone) é a diferença entre a maior abertura de saída (APA = Abertura Posição Aberta) e a menor abertura de saída (APF = Abertura Posição Fechada), sendo este um dos fatores que determina a capacidade do britador cônico (METSO, 2005).

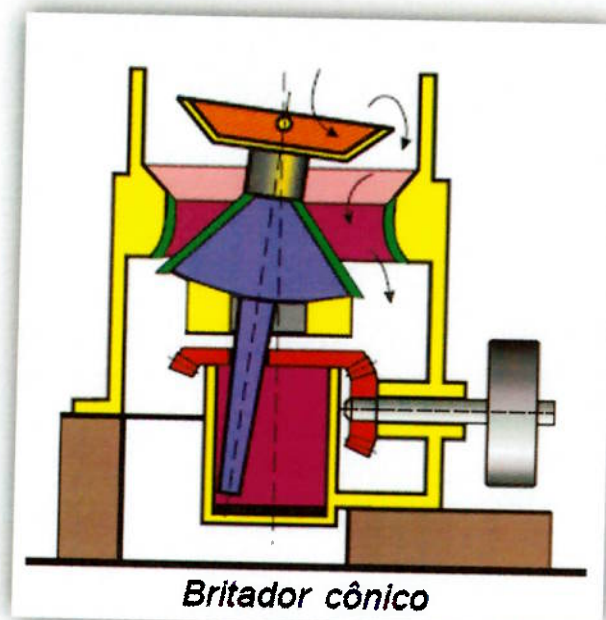


Figura 1 – Esquema de funcionamento do britador cônico (METSO, 2005)

Ao elevar/abaixar o elemento móvel, é possível ajustar a APA e APF, o que é vantajoso caso seja requerido gerar produtos com granulometrias diferenciadas ou manter as mesmas condições de operação com este elemento desgastado (CHAVES, 2003).

A fragmentação do material por compressão entre o revestimento ocorre de maneira contínua ao redor da câmara. Entretanto, há a atrição dele contra o revestimento, o que eleva os custos com peças de desgaste (CHAVES, 2003).

3.2.2 Impacto: rocha x rocha

Um equipamento que se utiliza do impacto de rocha contra rocha para a cominuição do minério é o britador de impacto de eixo vertical (CHAVES, 2003), cujos principais elementos são: tubo de alimentação, rotor, comporta da cascata e chute de descarga (Figura 2).

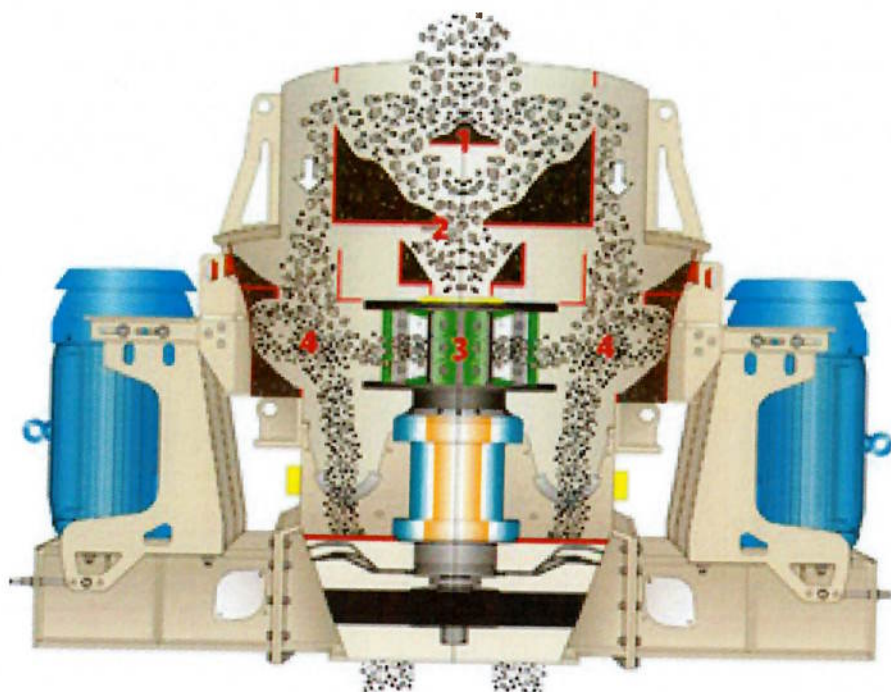


Figura 2 – Esquema de funcionamento do britador de eixo vertical (METSO, 2005)

A comporta da cascata é responsável por dividir o fluxo da alimentação em duas partes. A primeira passa pela lateral do rotor e não sofre nenhuma aceleração. A segunda alimenta o rotor e, devido à alta velocidade de rotação desse componente, é lançada em direção do outro fluxo ocasionando o choque rocha-rocha. O choque das partículas pode ser contra o material depositado na carcaça do equipamento (também conhecido como "morto"), provocando, novamente, um impacto rocha-rocha (CHAVES, 2003).

A fragmentação de rocha contra rocha reduz o consumo de peças de reposição e propicia a melhora da morfologia das partículas, vantagem particularmente relevante em comparação aos outros mecanismos de fragmentação. Entretanto, se a rocha apresentar alta resistência ao impacto, esse equipamento torna-se inviável devido à baixa relação de redução.

3.2.3 Compressão

O mecanismo de fragmentação por compressão ocorre nos equipamentos conhecidos como prensa de rolos de alta pressão (PRAP) (CHAVES, 2003 e WILLS, 2006), ilustrado na Figura 3.

A tecnologia desse equipamento consiste em dois rolos com rotações opostas montados sobre uma estrutura que resista aos esforços de reação à compressão do minério (CHAVES, 2003). Um dos rolos é fixo e o segundo move-se sobre trilhos, sendo sua posição ajustada pela pressão exercida por pistões hidráulicos (MORLEY, 2006).

A alimentação é introduzida na abertura entre os rolos e o mecanismo de quebra que o minério sofre é de compressão entre partículas. A pressão exercida pelo sistema hidráulico é fundamental para o desempenho de cominuição do equipamento (MORLEY, 2006).

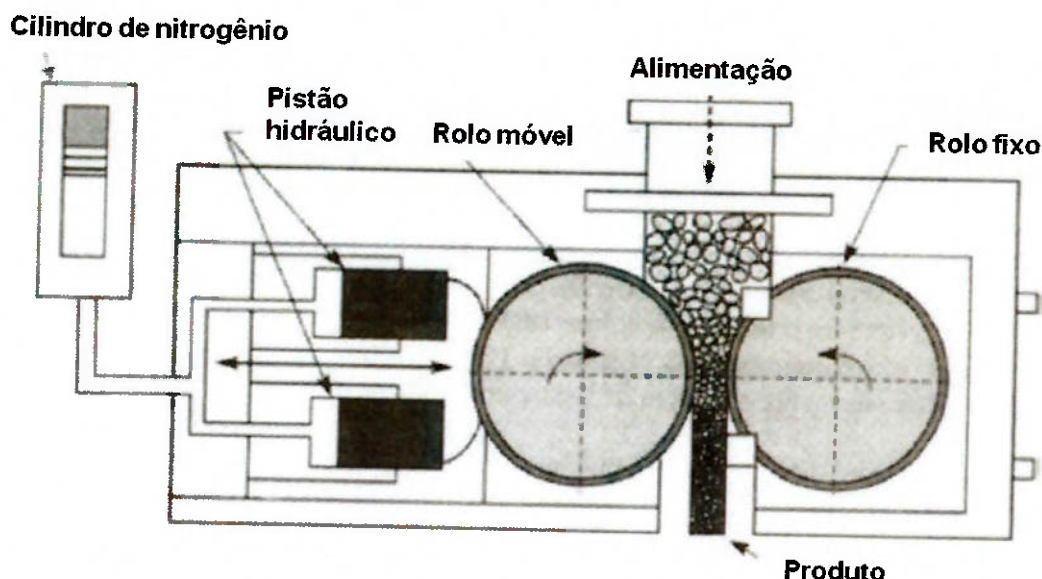


Figura 3 – Prensa de rolos de alta pressão (adaptado de WILLS, 2006)

Em razão do alto desgaste dos rolos, esses equipamentos eram comumente utilizados para minérios de baixa abrasividade. Entretanto, com o avanço da tecnologia, foram desenvolvidas superfícies dos rolos com maior resistência (cravamento de pinos de alta resistência) para que essa máquina seja usada em outras aplicações (MORLEY, 2006).

Seu uso é motivado devido à alta eficiência energética quando comparado com os outros britadores. Essa eficiência é consequência da lenta aplicação de carga sobre as partículas, o que reduz a perda de energia na forma de ruído e de calor (MORLEY, 2006).

3.3 Caracterização

A caracterização das propriedades mecânicas da rocha é fundamental para o dimensionamento de equipamentos e para a definição do consumo de peças de desgaste (METSO, 2005).

O comportamento das rochas sobre a ação de britagem e de moagem varia significativamente, mesmo quando elas pertencem a uma mesma formação geológica (METSO, 2005). Assim, o dimensionamento de equipamentos para a etapa de cominuição e a distribuição granulométrica dos produtos, baseados apenas em tabelas de fornecedores, são em sua maioria equivocados. A fim de reduzir as incertezas das etapas de cominuição, diversos testes laboratoriais devem ser realizados (METSO, 2005).

A simulação do processo da cominuição (em particular a moagem) é fundamental, pois é a maior responsável pelo consumo de energia elétrica (WILLS, 2007), pelo custo operacional com o consumo de peças de desgaste (CHAVES, 2003) e pela importância dessa etapa nos processos da usina de beneficiamento (WILLS, 2007).

A caracterização tecnológica é aplicada na indústria mineral, com o objetivo de estudar as propriedades dos materiais e seus comportamentos no processo de beneficiamento (SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997), além de estabelecer as

associações das fases presentes para dar suporte às etapas de exploração mineral ou lavra e às atividades de beneficiamento/usina ou de adequação para a indústria de transformação (SANT'AGOSTINHO e KAHN, 1997; PETRUK, 2000).

Dependendo do material em estudo, uma alternativa de pesquisa é determinada e ensaios e análises laboratoriais são realizados. O objetivo do estudo dos concentrados obtidos no beneficiamento é verificar os teores e a distribuição dos elementos úteis. Por outro lado, os rejeitos são caracterizados para avaliar as perdas de minerais úteis e a composição para disposição adequada (PETRUK, 2000).

3.3.1 Teste de britabilidade

O teste de britabilidade fornece dados para garantir o melhor dimensionamento e as melhores condições de operação do britador de mandíbulas (METSO, 2005).

Consiste em britar a amostra em um britador de mandíbulas de escala laboratorial (mandíbula 2015) para comparar, em relação a um minério padrão de referência, a capacidade volumétrica, os esforços solicitados durante a britagem e a distribuição granulométrica do produto (METSO, 2005).

Testes auxiliares padronizados, como o de determinação do índice de abrasão de Bond (Bond, 1964) e de Macon (THURO, SINGER, KÄSLING e BAUER, 2007), do índice de lamelaridade, a massa específica segundo a NBR 9776 (ABNT, 1986) e da massa unitária segundo a NBR 7251 (ABNT, 1982) e o índice energético simplificado de barras devem ser também realizados.

3.3.2 Teste de carga pontual

O teste de carga pontual é um método rápido, simples e alternativo ao ensaio de compressão uniaxial, que visa à determinação da resistência mecânica à compressão. Porém, em decorrência dessas características, o teste de carga pontual incorpora erro de correlação ao comparar os dois métodos (ISRM, 1985).

Segundo a International Society of Rock Mechanics (ISRM), há três métodos de determinação do índice de resistência à carga pontual: diametral, axial e em blocos (regulares ou não). A Figura 4 ilustra as amostras para cada tipo de teste.

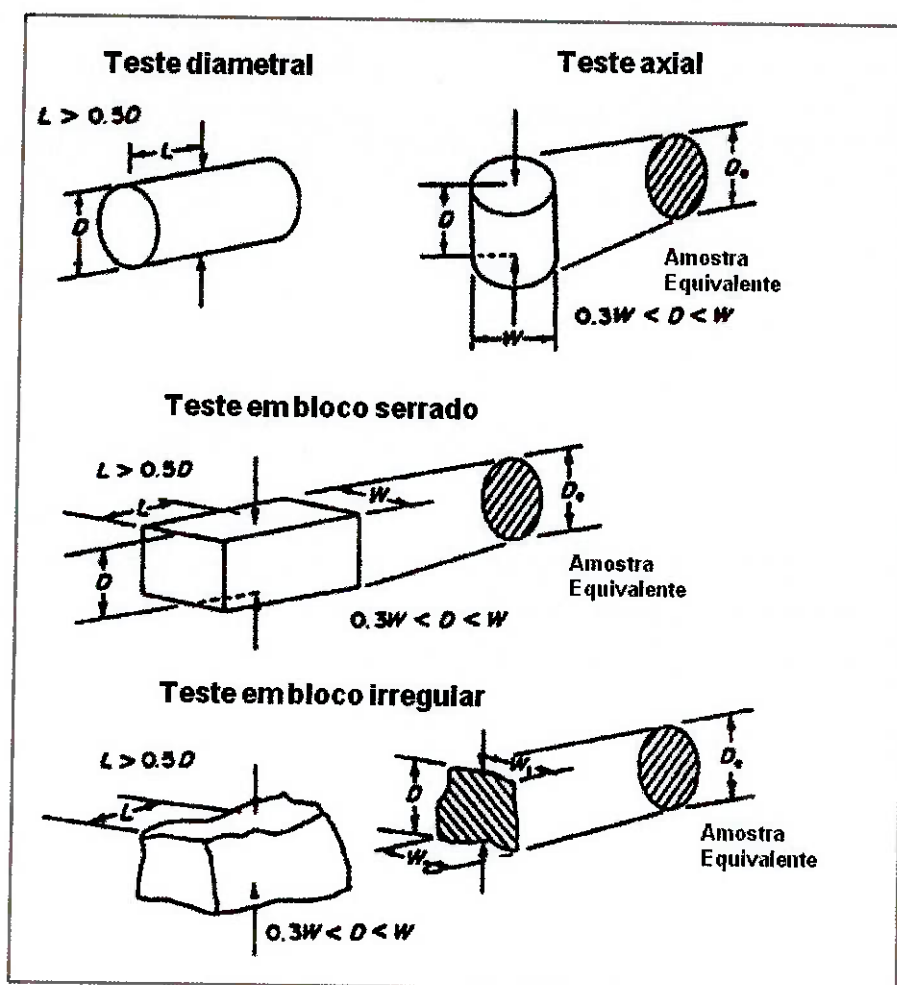


Figura 4 – Amostras para o teste de carga pontual

O teste padrão consiste em romper um corpo de prova com 50 mm de diâmetro. Nesse caso, o índice é calculado da seguinte forma:

$$I_{s(50)} = \frac{P}{D^2}$$

I_{s50} Índice de compressão à carga pontual para diâmetro equivalente de 50 mm
 P Pressão de fratura do corpo de prova
 D Diâmetro do corpo de prova

Para amostras com diâmetros diferentes de 50 mm ou em forma de bloco (regular ou não), deve-se aplicar à equação anterior um fator de correção.

$$I_{s(50)} = F \frac{P}{D^2} \quad \text{com} \quad F = \left(\frac{D \text{ ou } D_e}{50} \right)^{0,45} \quad e \quad D_e = \sqrt{\frac{4WD}{\pi}}$$

Onde:

- F Fator de correção para corpos de prova com diâmetro diferente de 50 mm
- D Diâmetro de corpos de prova diferente de 50 mm
- D_e Diâmetro equivalente para corpos de prova com formato de blocos

Devem ser realizadas no mínimo dez rupturas para que os dois maiores e os dois menores índices sejam desconsiderados e uma média dos valores restantes calculada.

Com intuito de determinar a resistência à compressão uniaxial deve-se multiplicar o índice determinado pelo teste de carga pontual por uma constante que é objeto de investigação de muitos pesquisadores.

$$\sigma_c = \alpha \cdot I_{s(50)}$$

Na Tabela 1 estão alguns valores de referência para tal constante.

Tabela 1 – Valores de referência para a constante multiplicadora do teste de carga pontual

Valore de α	Referência
24,0	BROCH e FRANKLIN (1972)
24,0	BIENIAWSKI (1974)
22,7	BIENIAWSKI (1975)
24,0	BROOK (1980)
	READ, THORNTON e REGAN (1980)
16,0	(1) Rochas sedimentares
20,0	(2) Basalto
20-25	ISRM (1985)

3.3.3 Índice energético para moinho de bolas

O processo de cominuição, principalmente a moagem, é o maior responsável pelo consumo de energia na indústria mineral (WILLS 2006). Por isso, toda a teoria desenvolvida para a redução de tamanho de partícula está vinculada ao consumo de energia (FIGUEIRA, PRETTI e VALLE, 1985).

Desta forma, Bond postulou a seguinte lei empírica, conhecida como a 3ª lei da cominuição: “A energia consumida para reduzir de tamanho um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho da partícula.”

O índice energético de Bond é o parâmetro de cominuição que indica a resistência do minério à moagem e, numericamente, é a energia necessária (expressa em kWh por tonelada curta) requerida para reduzir um material de tamanho teórico infinito a 80% passante na malha de teste (100 malhas Tyler ou 150 μm) (FIGUEIRA, PRETTI e VALLE, 1985).

Segundo a NBR 11376 (ABNT, 1990), o método de determinação do valor do índice energético consiste em utilizar:

1. Moinho, liso, de diâmetro e comprimento igual a 12 polegadas com rotação de 70 rpm.
2. Alimentação com material abaixo de 3,35 mm e não contendo mais do que 28% de passante na malha de teste.
3. Carga moedora de 285 bolas de aço (massa específica de 7,83 g/cm³) pesando 20,125 kg, distribuídas da seguinte forma:

Diâmetro das bolas (mm)	36,5	30,2	25,4	19,1	15,9
Quantidade	43	67	10	71	94

4. Moagem a seco em circuito fechado e carga circulante de 250% no equilíbrio.

Este índice energético é calculado da seguinte forma:

$$IE = \frac{44,5}{Am^{0,23} \times Mob^{0,82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)}$$

Onde:

- IE Índice energético para moagem em kWh/st
 Am Abertura da malha de teste em μm
 P Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa do produto em μm
 F Abertura da peneira pela qual passa 80% da massa da alimentação em μm
 Mob Média dos últimos três valores do índice de moabilidade no equilíbrio

3.3.4 Distribuição granulométrica e morfologia

A análise granulométrica é indispensável para os estudos de desempenho de agregados, uma vez que pesquisas comprovam a interferência do tamanho das partículas nas propriedades reológicas de argamassas (Oliveira, STUART *et al.*, 2000; COSTA, 2006) e concretos (PILEGGI e PANDOLFELLI, 1999; OLIVEIRA, STUART *et al.*, 2000; PILEGGI e PANDOLFELLI, 2002).

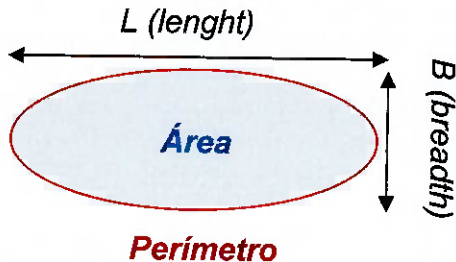
Existem diversos métodos e equipamentos para que se determine a distribuição de tamanho de partículas. A escolha do sistema de análise granulométrica deve ser feita com base no tamanho das partículas, na possibilidade de operação em meio aquoso e na necessidade de fracionamento da amostra. Vale destacar que as técnicas de determinação de tamanho de partículas medem propriedades diferentes e, portanto, os resultados referem-se a distintos diâmetros médios, cujos resultados não podem ser comparados diretamente (ALLEN, 1997).

O estudo da forma da partícula é de fundamental importância, pois tais características físicas influenciam no comportamento reológico e no estado endurecido de argamassas e concretos (OLIVEIRA, STUART *et al.*, 2000).

Adicionalmente, é crescente o interesse pelo empacotamento das partículas nas diferentes áreas da engenharia civil. Uma revisão dos fatores que afetam o empacotamento de partículas, tais como distribuição granulométrica, morfologia das partículas, textura superficial e porosidade de partículas, foi objeto de estudo de Castro e Pandolfelli (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Entre os principais parâmetros utilizados para caracterizar a forma da partícula estão a esfericidade e a relação de aspecto (SWIFT, 2007). Define-se esfericidade como a relação entre a área e o perímetro da partícula (Figura 5) enquanto a relação de aspecto é determinada pela relação entre a menor e a maior dimensão da partícula.

$$ES = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (\text{esfericidade})$$

$$B/L = \frac{X_{max}}{X_{min}} \quad (\text{relação de aspecto})$$


O diagrama mostra uma partícula ovalada com uma borda vermelha. Uma seta horizontal no topo indica o comprimento 'L (length)'. Uma seta vertical à direita indica a largura 'B (breadth)'. O interior da ovala é preenchido com uma cor azulada e rotulado 'Área'. A borda vermelha é rotulada 'Perímetro'.

Figura 5 – Determinação da morfologia da partícula

Anteriormente aos anos 1970, os procedimentos para determinar a morfologia das partículas envolviam trabalhos manuais com emprego de contadores de pontos e utilização de acessórios mecânicos e eletromecânicos acoplados com porta-amostras de microscópios ópticos (CHAYES, 1956; DUNLEVEY, 1991). Com a introdução de técnicas de análise de imagem, os erros de interpretação são minimizados, uma maior quantidade de amostra pode ser analisada, a duração dos procedimentos reduzida e a repetibilidade elevada (SWIF, 2007).

3.3.5 Análise de microfissuras

Como consequência da elevada energia necessária para reduzir o tamanho da partícula, esta talvez apresente microfissuras internas. Isso pode representar diversas vantagens para a indústria mineral, entre elas a redução do índice energético e a criação de “acessos” para a lixiviação do ouro (CHAVES, 2003).

As possíveis microfissuras podem ser analisadas com o auxílio da microscopia óptica (MO) de luz refletida. Essa ferramenta permite aumento de até 1500 vezes (GOLDENSTEIN, 2007) e é, geralmente, utilizada para identificar e quantificar as fases minerais bem como definir as associações das fases de interesse.

A preparação das amostras para MO envolve a obtenção de uma alíquota representativa por sucessivas etapas de amostragem, embutimento em resina e polimento até se obter uma superfície plana.

As fissuras podem atingir a superfície e, conseqüentemente, aumentar a porosidade das partículas. Dessa forma, a porosimetria, determinada a partir da intrusão de mercúrio, usualmente utilizada para determinar indiretamente a porosidade das partículas, pode ser uma medida quantitativa das fissuras. Porém, deve-se ter cuidado para se analisar uma amostra não representativa, em razão da restrição de massa para cada análise.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado com amostras coletadas da Pedreira P., do Grupo S., localizada na região noroeste do Estado de São Paulo, a 340 km da capital, na fronteira Província Magmática Paraná-Etendeka com as formações geológicas mais

recentes, como os sedimentos do Grupo Bauru. A rocha constituinte é de cor cinza escura e afanítica¹ (ISQUIERDO, 2008).

A Província Magmática Paraná-Etendeka estende-se pelo centro sul do Brasil, Argentina, Paraguai, e Uruguai (ISQUIERDO, 2008). Em Etendeka, na Namíbia, localiza-se a continuidade do derrame basáltico na África.

O fluxograma experimental é apresentado simplificadaamente na Figura 5 e descrito em detalhes a seguir.

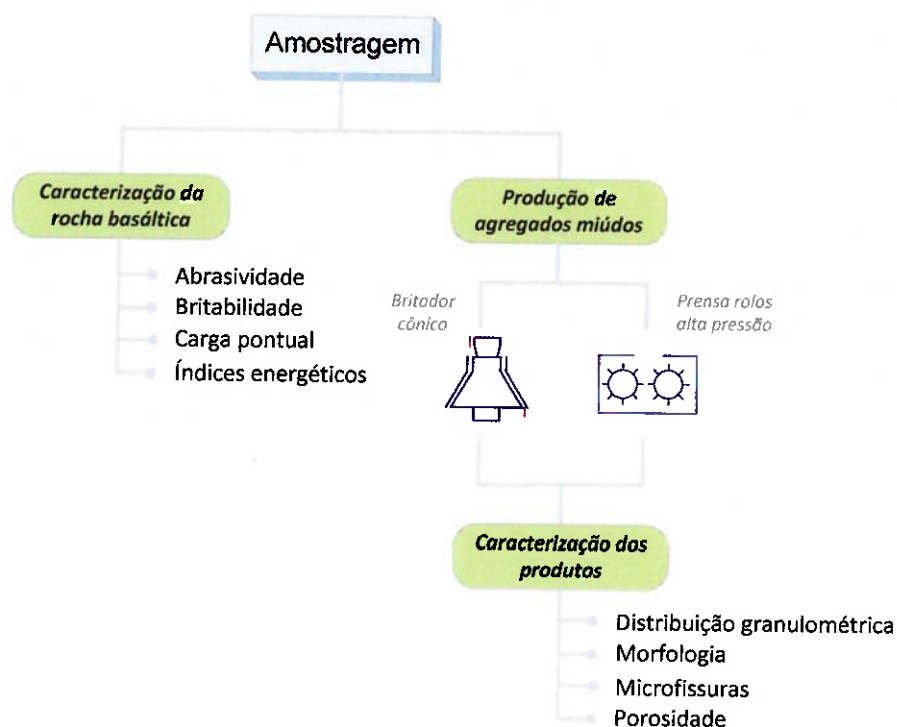


Figura 6 – Fluxograma experimental

4.1 Amostragem

A caracterização da rocha basáltica foi conduzida em amostras coletadas na pilha do produto da britagem primária (para o teste de carga pontual) e na pilha de pedra 2 (-25+12 mm, para os demais testes).

Os estudos conduzidos nos agregados miúdos produzidos por britador cônico e pela prensa de rolos de alta pressão² foram realizados, respectivamente, na pilha de estoque de areia de brita e no transportador de correia do produto.

4.2 Caracterização da rocha basáltica

A composição química da amostra foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) a partir de amostras fundidas (DUTRA e GOMES,

¹ O termo *afanítica* é utilizado principalmente em rochas ígneas, micro ou criptocristalinas, em que os grãos de minerais são tão pequenos que não podem ser reconhecidos macroscopicamente.

² Durante a amostragem, a PRAP estava ajustada para funcionar a uma pressão de 2,5 N/mm², o que corresponde a 2,5 vezes a pressão de uma prensa de rolos convencional.

1984) com tetraborato de lítio anidro, em espectrômetro de fluorescência de raios X Axios Advance, marca PanAlytical, e determinação da perda ao fogo (ou perda por calcinação) a 1.050° C.

A composição mineralógica foi determinada por difratometria de raios X (FORMOSO, 1984; BISH e POST, 1989), método do pó, em difratômetro de raios X, marca PANalytical, modelo X'Pert PRO com detector X'Celerator. A identificação das fases cristalinas, abaixo discriminadas, foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007).

A caracterização das propriedades mecânicas da alimentação do britador foi realizada segundo os procedimentos descritos na sequência.

4.2.1 Índice de abrasão de Bond

O índice de abrasão de Bond corresponde à perda de massa de uma palheta padrão após esta sofrer com a abrasão do minério caracterizado. O procedimento está padronizado conforme a metodologia exposta por Bond em 1964 (Bond, 1964). Consiste, basicamente, na obtenção de quatro alíquotas de amostras padronizadas (massa e granulometria) que são introduzidas em um tambor, também padrão (rotação e dimensões), contendo uma palheta com dureza e dimensões específicas.

Após quadro ciclos, nos quais a palheta sofreu com a abrasividade do minério, a perda de massa da palheta corresponde ao índice de abrasão de Bond.

4.2.2 Índice de abrasão e de britabilidade de Macon

Tanto o índice de abrasividade quanto o de britabilidade são determinados no mesmo procedimento experimental, descrito por Thuro, Singer, Käsling, e Bauer (THURO, SINGER, KÄSLING, e BAUER, 2007) conforme a Norma Francesa P18-579 (NF, 1990). Esse ensaio utiliza uma alíquota de amostra, com granulometria específica, e um tambor padronizado. A palheta, com dimensões e dureza conhecida, é fixada ao eixo do motor e é rotacionada a 4500 rpm durante cinco minutos.

O índice de abrasão de Macon corresponde à perda de massa em gramas da palheta por tonelada de material testado. Esse valor é utilizado para o melhor dimensionamento de peças de desgaste de britadores.

Já o índice de britabilidade de Macon consiste na porcentagem passante de material após o ensaio na peneira de malha 1,60 mm. Esse valor indica a facilidade do material em ser britado, o que resulta no melhor dimensionamento de equipamentos de britagem.

4.2.3 Massa específica e massa unitária

A NBR 9776 (ABNT, 1986) expõe a metodologia e o procedimento para determinar a massa específica do agregado miúdo. Consiste em medir a massa de uma alíquota e em seguida inseri-la numa proveta com água. A massa específica é determinada pela relação entre a massa e o volume deslocado.

A massa unitária é determinada segundo a NBR 7251 (ABNT, 1982). O procedimento é parecido com o anterior, porém em vez de medir o volume deslocado de água, o ensaio é realizado a seco para medir o volume do agregado solto.

4.2.4 Índice de capacidade volumétrica

A determinação do índice de capacidade volumétrica consiste em relacionar o tempo necessário para britar a amostra a ser analisada com uma amostra padrão e as massas unitárias de ambas.

O teste é realizado em duplicata com 10 quilogramas de amostra em cada alíquota. Assim, a câmara do britador 2015 é mantida sempre cheia para que as condições dos testes não sejam diferentes.

A relação entre os tempos e a massa unitária é dada por:

$$C = 100 \frac{T_0 \cdot Y_0}{T \cdot Y}$$

Onde:

- C Índice de capacidade volumétrica
- T_0 Tempo necessário para britar a amostra padrão
- T Tempo necessário para britar a amostra
- Y_0 Densidade aparente da amostra padrão
- Y Densidade aparente da amostra

4.2.5 Índice de resistência e distribuição granulométrica

O índice de resistência consiste em relacionar os esforços necessários para britar a amostra a ser analisada com a amostra padrão. Para tal finalidade, os esforços solicitados durante a britagem do material são medidos por sensores elétricos de resistência (*strain gage*) instalados na mandíbula do britador 2015.

A relação é dada por:

$$R = 100 \frac{P_0}{P}$$

Onde:

- R Índice de resistência
- P_0 Força na abanadeira quando a amostra padrão é processada
- P Força na abanadeira quando a amostra a ser analisada for processada

O produto do britador de mandíbula 2015 é amostrado e uma das partes é peneirada na série Tyler de peneiras para determinar se a distribuição granulométrica do produto é mais grossa ou mais fina que o produto do material padrão do teste.

4.2.6 Índice da lamelaridade

Este ensaio consiste em verificar a lamelaridade do produto da britagem. O produto é dito lamelar se a maior dimensão é igual ou superior a três vezes a menor dimensão.

Com o auxílio de um gabarito com duas guias, uma ao lado da outra, ambas em forma de V, é possível verificar se a maior dimensão é três vezes, ou mais, a menor dimensão. Isso porque a relação entre os ângulos das duas guias resulta num cateto oposto três vezes maior que o outro.

Assim, verifica-se a posição que a maior dimensão ocorre na guia com o ângulo maior. Em seguida, no mesmo ponto, mede-se a menor dimensão na guia de menor abertura. Se a partícula passar pela segunda guia, ela é considerada lamelar.

Logo, a massa das partículas lamelares sobre a massa inicial é o índice de lamelaridade, que é calculado por:

$$L = 100 \frac{M_0}{M}$$

Onde:

L Índice de lamelaridade
 M_0 Massa das partículas lamelares
 M Massa total da amostra

4.2.7 Teste de carga pontual

O teste de carga pontual foi conduzido segundo a ISRM (ISRM, 1985). Como as amostras foram coletadas da pilha de rachão (produto do britador primário), foi necessário realizar as correções do tamanho da partícula, como exemplificado no item 3.3.2. No total, foram realizados 20 testes, número acima do recomendado, que são 10 para amostras homogêneas. Dessa forma, foram descartados os dois maiores e dois menores valores para determinar o valor médio do índice de compressão à carga pontual para diâmetro equivalente de 50 mm (Is50).

Entre os valores de referência para a constante multiplicadora (Tabela 1), o que melhor se aplica nas amostras deste trabalho é o determinado por Read, Thornton e Regan (READ, THORNTON e REGAN, 1980), uma vez que eles determinaram o valor dessa constante para basaltos.

4.2.8 Índice energético para moinho de bolas

O procedimento para este ensaio é descrito pela norma NBR 11376 (ABNT, 1990) e consiste basicamente nas atividades abaixo.

Coleta de 10 kg de material, seco, britado abaixo de 3,35 mm, homogeneização e amostragem em pilha alongada para determinação da distribuição granulométrica, massa unitária e umidade.

A abertura do teste padronizado é de 100 malhas Tyler ou 150 μ m.

Inicialmente, a amostra é preparada para o primeiro ciclo de moagem, cujo número de rotações e massa inicial são determinados de acordo com a

granulometria e a massa unitária. Após cada ciclo, o produto do moinho é peneirado e o material abaixo da malha de teste é retirado e uma nova alimentação é introduzida ao circuito. Para os ciclos seguintes, a amostra deve ser moída até produzir uma carga circulante de 250%. O procedimento é repetido até que a proporção de material passante na malha teste seja constante.

4.2.9 Índice energético para moinho de barras

Trata-se de uma simplificação do método de Bond, para moinho de barras, e por isso não há referências a respeito deste teste. Entretanto, utilizam-se inúmeros dados empíricos que relacionam a porcentagem de material, menor que 1,19 mm, gerada após a moagem em moinho de barras com o consumo de energia por tonelada.

Desta forma, é possível prever, de modo simplificado, o índice energético de Bond para moinho de barras.

4.3 Caracterização dos agregados miúdos produzidos por diferentes mecanismos de britagem

Os produtos gerados pelos dois diferentes mecanismos de cominuição foram caracterizados quanto aos procedimentos descritos na sequência.

4.3.1 Distribuição granulométrica e morfologia

Para determinar a granulometria do produto obtido após a britagem no britador cônico e na prensa de rolos de alta pressão, foi utilizado o peneiramento a úmido nas seguintes malhas: 4,35; 3,36; 2,38; 1,19; 0,59; 0,30 e 0,15 mm.

A análise morfológica foi realizada na alimentação e nos produtos dos dois britadores para verificar se houve uma melhora ou piora da morfologia das partículas após a britagem. A caracterização das partículas foi realizada por análise de imagens dinâmica (WITT, JOACHIM *et al.*, 2008; LIST, KÖHLER *et al.*, 2010) em tempo real conduzida no analisador de tamanho e forma de partículas CAMSIZER, fabricado pela Retsch, com análise de cerca de um milhão de partículas em poucos minutos.

Foi preparada uma alíquota representativa para cada amostra dos produtos, com aproximadamente dois quilos, e uma amostra da alimentação, que por ser mais grossa, continha quatro quilos. O material abaixo de 0,15 mm foi retirado de todas as amostras para maior agilidade da análise, uma vez que essa granulometria consome mais tempo para ser processada. Todos os ensaios foram realizados em duplicatas para garantir a repetibilidade do ensaio.

4.3.2 Análise de microfissuras

Para a análise de microfissuras foram feitas três seções polidas para cada produto dos britadores, em três faixas granulométricas diferentes, as quais são: -4,36+3,35 mm; -3,35+2,36 mm e -2,36+1,19 mm. As seções foram caracterizadas em microscópio óptico de luz refletida.

Os produtos foram amostrados até aproximadamente 15 gramas em divisores de amostras rotativos com o objetivo de aumentar a representatividade das alíquotas.

Foi realizada uma varredura por linhas em todas as seções para verificar a existência de microfissuras. Ao encontrar partículas com microfissuras, foram tiradas fotografias delas e, em seguida, as fissuras foram destacada com cor vermelha. A magnificação utilizada em todas as frações foi de 50 vezes. Outros aumentos foram testados, porém como as seções foram feitas com granulometria relativamente grossa para a microscopia óptica, não foi possível tirar fotos nítidas para expor neste trabalho.

A porosidade do material, determinada pela intrusão de mercúrio, no equipamento AutoPore IV 9500 da Micromeritics, pode quantificar, de forma indireta, as fissuras (WEBB e ORR, 1997; WEBB, 2001). Em decorrência da alta pressão que o equipamento opera (60000 psi), o mercúrio preenche as possíveis fissuras abertas, ou seja aquelas que atingiram a superfície da partícula.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização da rocha basáltica

Os resultados da análise química indicam que os principais óxidos presentes são SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MnO , MgO e TiO_2 e totalizam mais de 90% do total da amostra (Tabela 2). A semelhança na composição química de diferentes frações granulométricas demonstra a homogeneidade da rocha estudada para as frações acima de 0,15 mm.

Tabela 2 – Resultado da análise química

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5	PF
50,1	12,6	15,7	8,35	4,34	2,76	1,40	3,12	0,23	0,34	0,87

A análise mineralógica da amostra, por difratometria de raios X (Figura 7) permitiu identificar como principais minerais presentes plagioclásio (labradorita) e piroxênio (augita/pigeonita); minerais em menores proporções são ilmenita, magnetita e quartzo. O fósforo, identificado na análise química, pode ser atribuído a presença de apatita como mineral acessório comumente em porções intersticiais (ISQUIERDO, 2008).

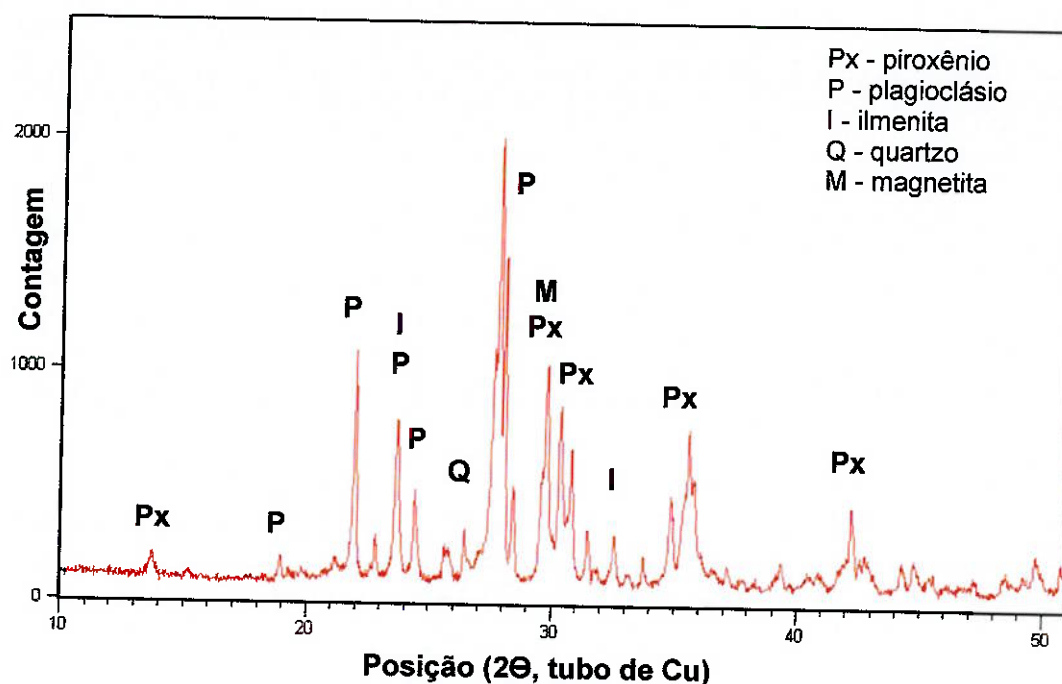


Figura 7 – Resultado da difração de raios X

Um sumário dos resultados da caracterização da rocha basáltica é apresentado na Tabela 3. Os resultados completos de todos os testes, bem como as tabelas de referências para os valores obtidos estão nos apêndices A, B e C

Tabela 3 – Resultados da caracterização da rocha

Nome do teste	Resultado
Abrasão de Bond	Média - perda de massa de 0,175 g
Abrasão de Macon	Média - perda de massa de 772 g/t
Britabilidade de Macon	Difícil britagem - 27,5% de material abaixo de 1,6 mm
IE de Bond para barras	Difícil moagem - IE de 18 kWh/t
IE de Bond para bolas	Elevado - IE de 16,24 kWh/t
Densidade real	$M_e = 2,86 \text{ t/m}^3$
Densidade aparente	$M_u = 1,79 \text{ t/m}^3$
Capacidade volumétrica	$T = 78,10 \text{ s}$; $Y = 1,79 \text{ t/m}^3$; $T_0 = 63,04 \text{ s}$; $Y = 1,56 \text{ t/m}^3$ $C = 68,99\%$ (usar valores mínimos de capacidades)
Resistência	$P = 4111,40 \text{ kgf}$; $P_0 = 2302,34 \text{ kgf}$; $IR = 178,57\%$ (elevado, deve-se consultar a área da engenharia)
Lamelaridade	Amostra cúbica. % de partículas lamelares = 10,19%
Análise granulométrica	Produto de britagem mais grosso do que amostra padrão de referência (Figura 8)
Teste de carga pontual	$Is50 = 7,0 \text{ MPa}$ (140-175 MPa)

A Figura 8 ilustra a granulometria, realizada a seco, do produto obtido após a britagem no britador 2015. A curva em vermelho é a granulometria da amostra padrão utilizada como referência nos testes e a curva em azul é a da amostra testada.

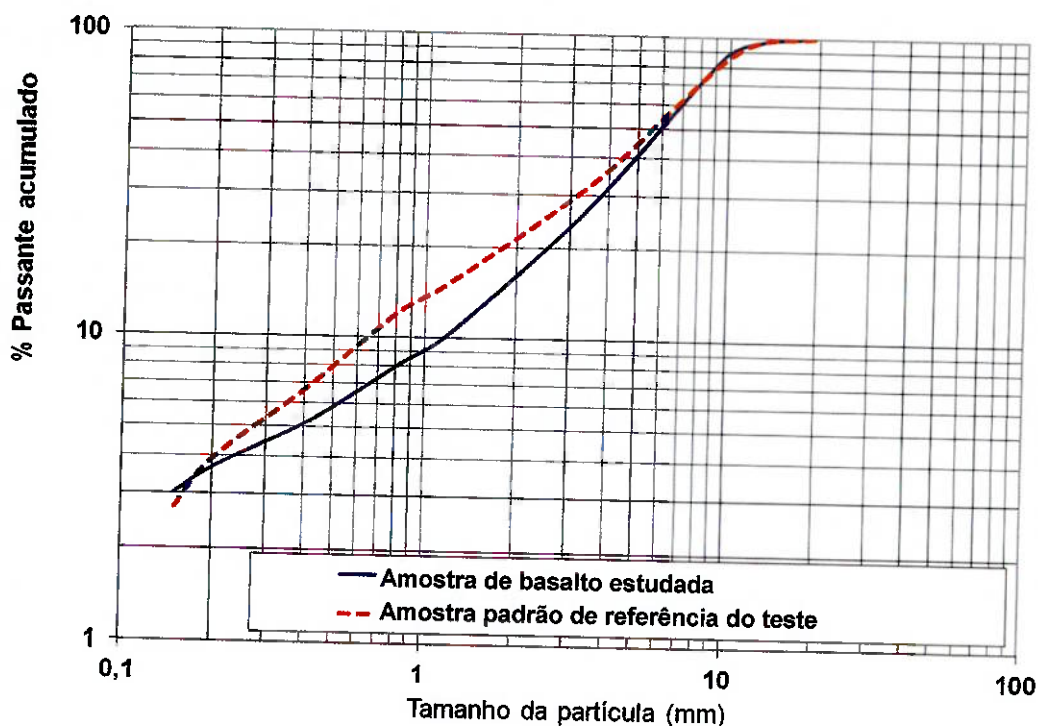


Figura 8 – Distribuição granulométrica do produto do britador 2015

Os testes de caracterização mecânica da alimentação comprovam o que foi encontrado na literatura para rochas basálticas.

A amostra apresentou alta resistência à compressão, determinada indiretamente pelo teste de carga pontual. O valor encontrado foi de 140 MPa, considerando a constante multiplicadora determinada por Read, Thornton e Regan para rochas basálticas (Tabela 1). Essa propriedade influenciou o resultado de outros testes. A britabilidade de Macon, o índice energético para moinho de barras e de bolas, o índice de capacidade volumétrica e de resistência e a granulometria comprovam essa influência.

Para todos os testes mencionados, o resultado indicou que a amostra é de difícil britagem/moagem, que resulta numa granulometria mais grossa (na britagem) e num consumo elevado de energia (na moagem).

Os testes de abrasividade, tanto o de Bond como o de Macon, indicaram média abrasividade da amostra. Novamente, comprova o que foi encontrado na literatura (apêndice A, B e C).

Devido a estas características, a utilização da prensa de rolos de alta pressão é justificada, pois este equipamento fornece energia suficiente para a quebra da rocha e o desgaste dos rolos não é muito elevado.

5.2 Caracterização dos agregados miúdos produzidos por diferentes mecanismos de britagem

5.2.1 Distribuição granulométrica e morfologia das partículas

Os resultados comparativos da distribuição granulométrica, realizada a úmido, da alimentação e dos produtos obtidos no britador cônico e na prensa de rolos de alta pressão são ilustrados na Figura 9.

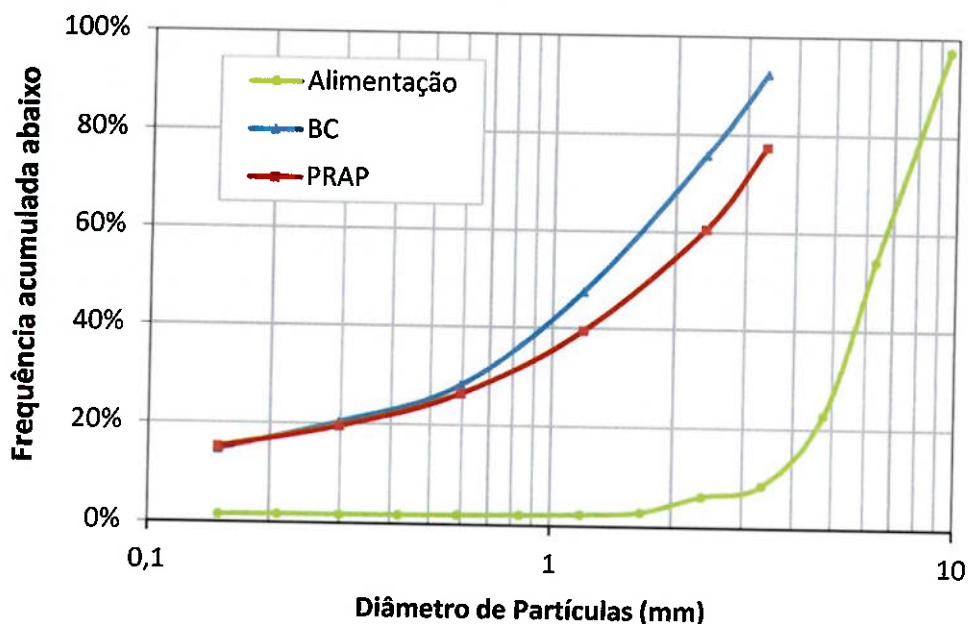


Figura 9 – Distribuição granulométrica dos produtos dos dois britadores

O produto do britador cônico (BC) apresenta distribuição granulométrica mais fina do que a da prensa de rolos de alta pressão. Porém, a diferença não é muito expressiva.

A análise da morfologia da alimentação e dos produtos da britagem é apresentada em termos da média da esfericidade (Figura 10) e da relação B/L (Figura 11) por fração granulométrica.

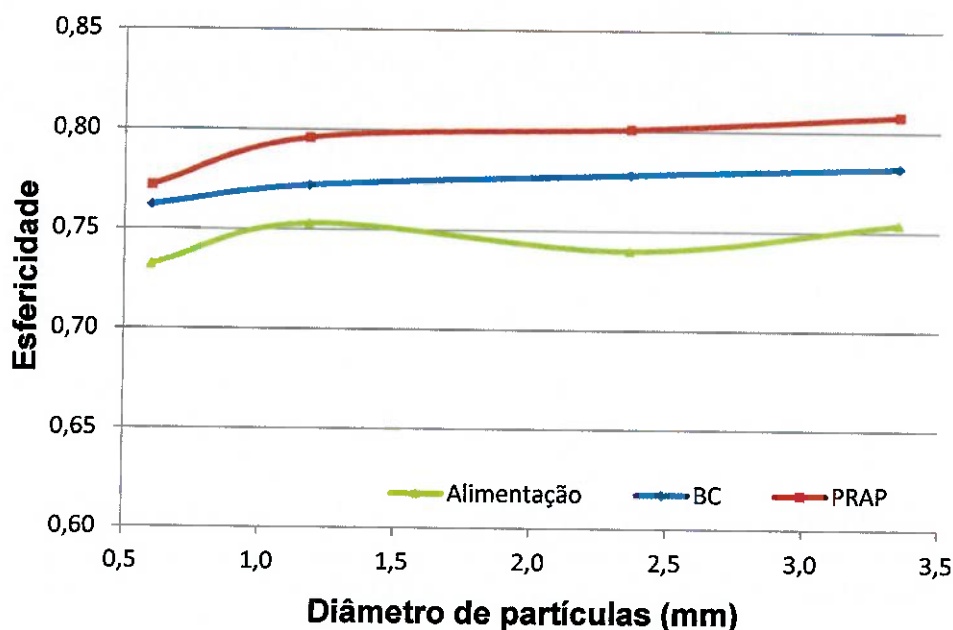


Figura 10 – Esfericidade da alimentação e dos produtos do BC e da PRAP

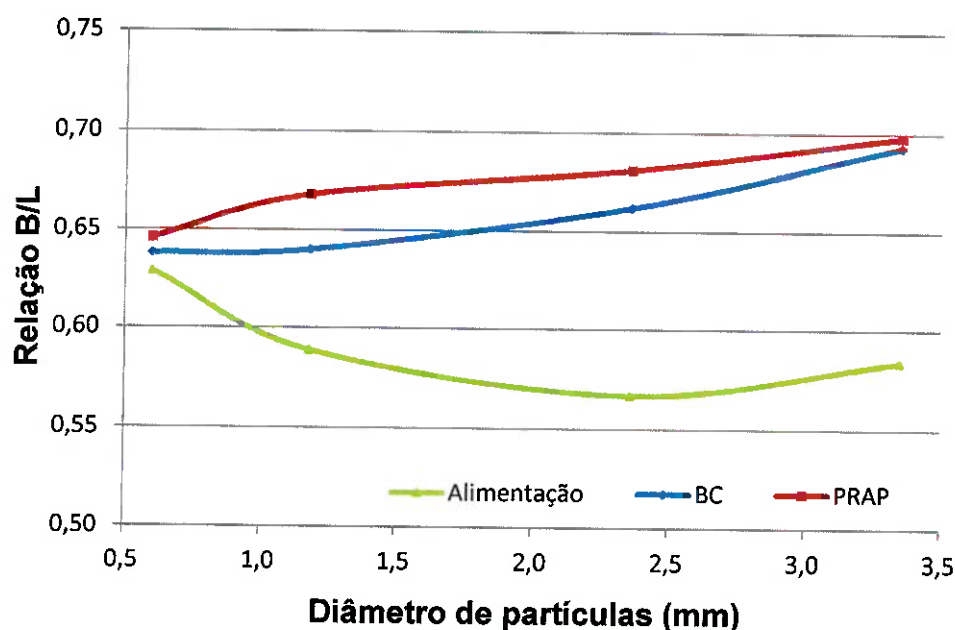


Figura 11 – Relação B/L para a alimentação e para os produtos do BC e da PRAP

É possível verificar que em ambas as propriedades, esfericidade e relação B/L, os produtos da PRAP e do BC apresentam melhores propriedades do ponto de vista morfológico. Isso significa que as partículas geradas por esta etapa de britagem, são mais cúbicas do que as partículas, de mesma granulometria, da alimentação.

Ao comparar a geração de partículas cúbicas entre os dois mecanismos de fragmentação, a PRAP mostrou-se mais eficiente do que o BC. Isso é comprovado pela maior média apresentada, por fração granulométrica, da esfericidade (Figura

12) e da relação B/L (Figura 13). Pode-se concluir que, uma maior quantidade de partículas cúbicas foi gerada pela prensa em comparação com o britador cônico.

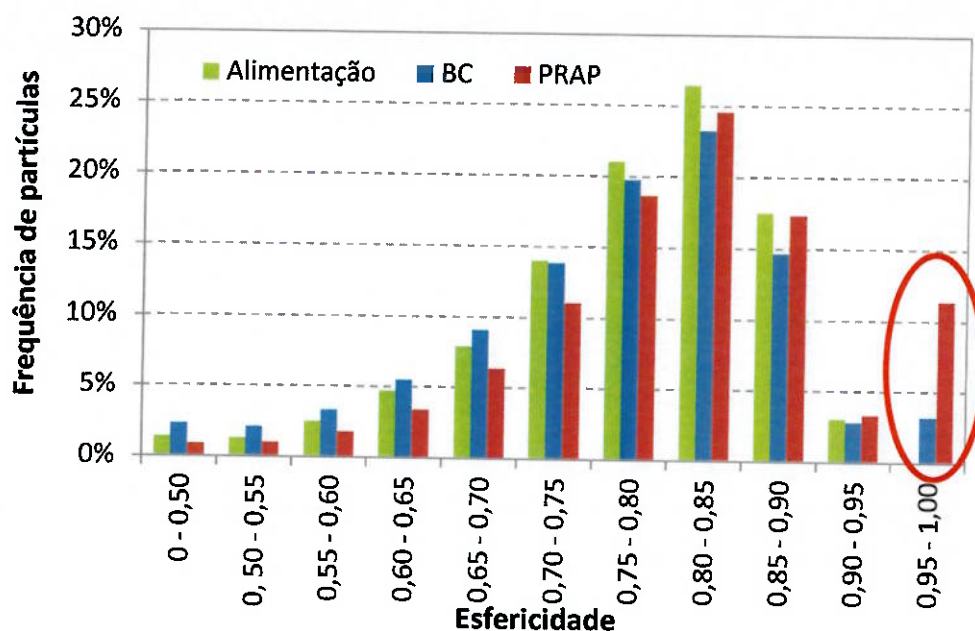


Figura 12 – Frequência de partículas por classe de esfericidade

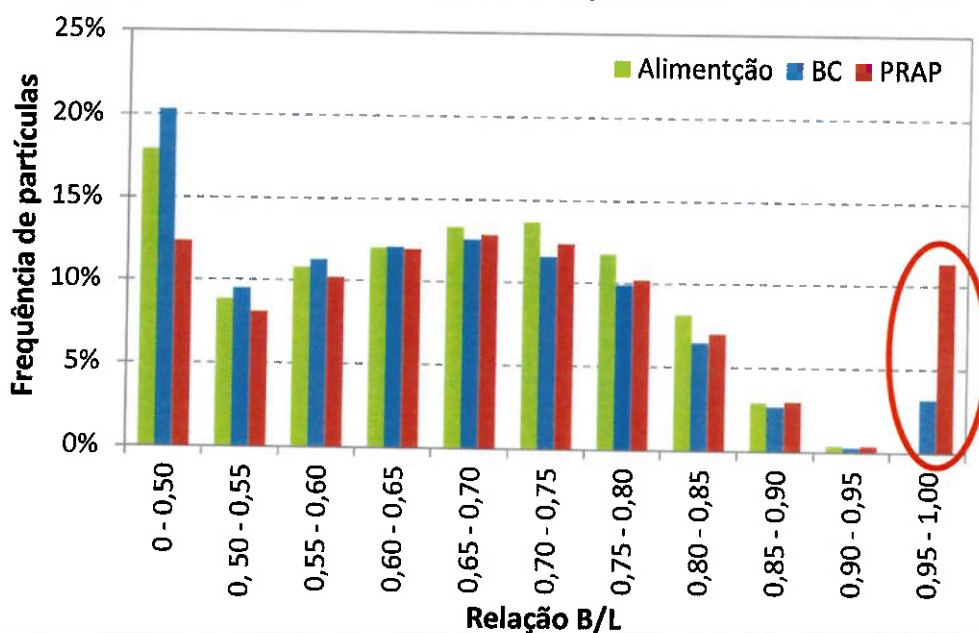
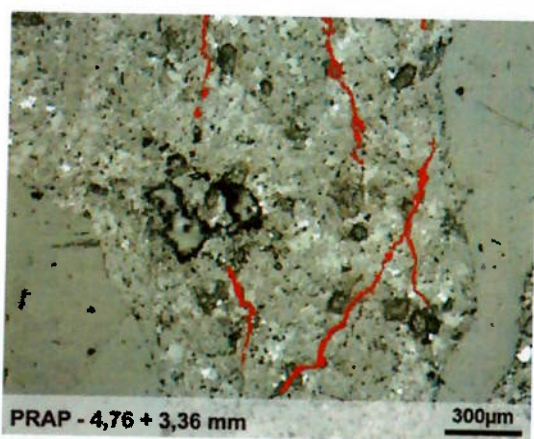


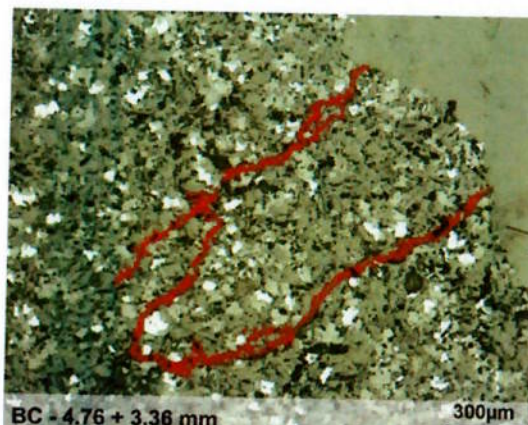
Figura 13 – Frequência de partículas por relação de aspecto B/L

5.2.2 Análise de microfissuras

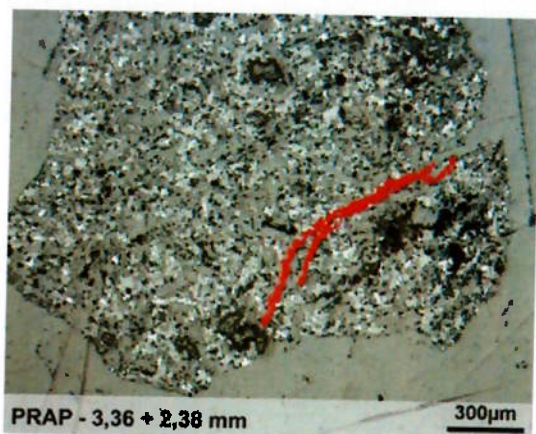
Fotografias ilustrativas de microfissuras identificadas nos produtos, obtidas por microscopia óptica de luz refletida, são apresentadas na Figura 14. As fissuras observadas foram destacadas em vermelho para maior facilidade de identificação; as imagens originais são apresentadas no apêndice D.



PRAP - 4,76 + 3,36 mm
PRAP, fração -4,76+3,36 mm



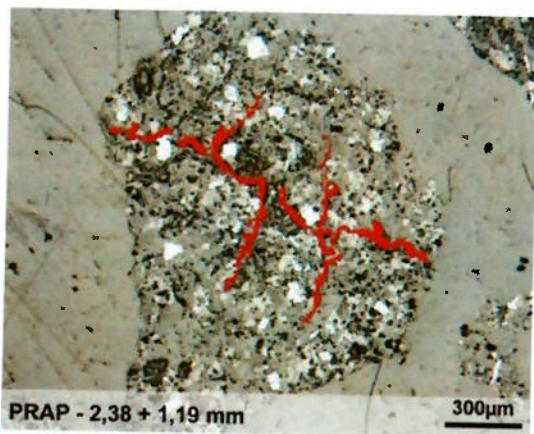
BC - 4,76 + 3,36 mm
Britador cônico, fração -4,76+3,36 mm



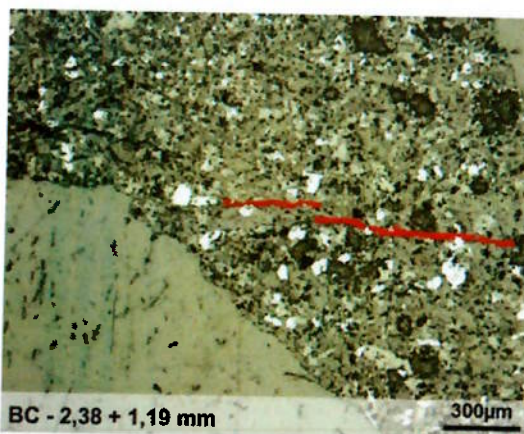
PRAP - 3,36 + 2,38 mm
PRAP, fração -3,36+2,38 mm

Não foram encontradas partículas com fissuras nessa fração.

Britador cônico, fração -3,36+2,38 mm



PRAP - 2,38 + 1,19 mm
PRAP, fração -2,38+1,19 mm



BC - 2,38 + 1,19 mm
Britador cônico, fração -2,38+1,19 mm

Figura 14 – Imagens obtidas em microscópio óptico. Em detalhes, as microfissuras destacadas em vermelho

Foi possível observar, a presença de microfissuras nos produtos provenientes dos dois mecanismos de britagem. Porém, notou-se maior quantidade de fissuras no produto da PRAP.

Tanto na fração mais grossa, como na mais fina, foi possível encontrar microfissuras em ambos os produtos dos britadores, porém, na intermediária, observou-se esse comportamento apenas no produto da PRAP.

Esse tipo de observação serve apenas para indicar qualitativamente a presença ou não das microfissuras. Porém, para afirmar que as amostras provenientes de qualquer mecanismo de britagem apresentam ou não as microfissuras, é necessário uma quantidade maior de seções polidas para elevar a representatividade da amostra analisada.

O resultado do ensaio de intrusão de mercúrio, realizado em duplicata, está apresentado na Figura 15. O comportamento das duas amostras até a pressão de 10.000 psi é bem parecido. Após esse valor, a amostra do britador cônico sofreu maior intrusão, o que indica uma maior porosidade desta.

Ao final do teste, a porosidade da amostra do BC atingiu 1,93% e a da PRAP 1,59%. Com esses resultados, não foi possível quantificar, de modo indireto, as possíveis fissuras, uma vez que se esperava maior intrusão do mercúrio tendo em vista a elevada quantidade de fissuras do produto da PRAP observadas ao microscópio óptico.

É importante ressaltar que o mercúrio é intrudido apenas nos poros expostos ou conectados, ou seja, para quantificar as fissuras, estas teriam que atingir a superfície da partícula. As imagens adquiridas por microscopia ótica ilustram a partícula polida, de modo que não é possível afirmar se a fissura é exposta ou inclusa.

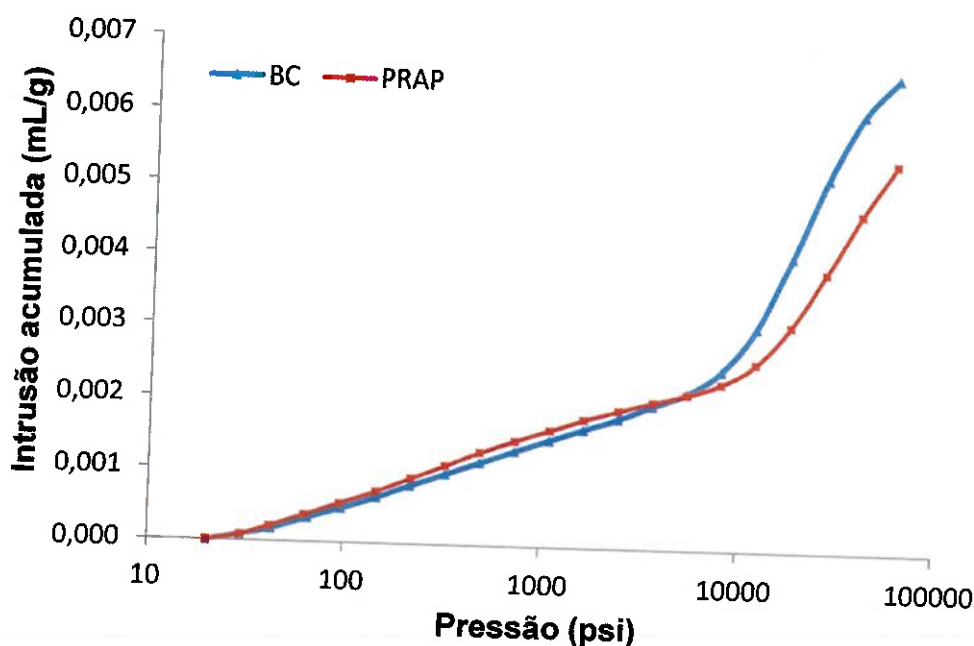


Figura 15 – Intrusão acumulada de mercúrio com o aumento da pressão

6 CONCLUSÕES

Os resultados da caracterização das propriedades mecânicas do basalto na sua fragmentação estão dentro dos valores encontrados na literatura. A resistência à compressão, determinada pelo indiretamente, resultou em 140 MPa e a abrasividade, obtida dois métodos diferentes, representa abrasão moderada.

Essas duas características influenciaram no comportamento deste material quando submetido à cominuição, resultando numa difícil britagem (com granulometrias mais grossas que o padrão) e no alto consumo de energia na moagem.

A análise morfológica (esfericidade e relação de aspecto) dos produtos indicou uma geração de agregado miúdo de melhor qualidade, em relação às duas propriedades estudadas, através de ambos os mecanismos de fragmentação. Entretanto, a prensa de rolos de alta pressão (PRAP) mostrou-se mais eficiente que o britador cônico (BC), pois gerou mais partículas com esfericidade e relação de aspecto ótima (classe entre 0,95 e 1,00).

A análise microestrutural indicou a presença de partículas microfissuradas em ambos os mecanismos de fragmentação. Entretanto, o produto da PRAP apresentou maior quantidade de fissuras quando comparado com o produto do BC. Essa verificação foi realizada com caráter qualitativo em apenas seis seções polidas (três para cada mecanismo de fragmentação), o que resulta em baixo número de partículas analisadas.

A porosidade determinada por porosimetria com intrusão de mercúrio resultou em valores inferiores a 2% tendo em vista a baixa porosidade da rocha. Porém, observou-se pela curva de intrusão do mercúrio, que para elevadas pressões, o produto do britador cônico apresenta maior quantidade de poros pequenos, sugerindo maior fissuração do agregado.

Para confirmação do desempenho dos agregados miúdos produzidos a partir da britagem de rochas na construção civil, sugere-se que estes sejam estudados na composição de concretos e argamassas para avaliação do desempenho reológico e resistência mecânica.

7 BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, T. *Particle size measurement: Powder sampling and particle size measurement*. 5. London: Chapman & Hall, 1997. 525 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS: *NBR 7251 - Agregado em estado solto: determinação da massa unitária, especificação*. Rio de Janeiro, 1982.
- _____: *NBR 9776 - Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman, especificação*. Rio de Janeiro, 1986.
- _____: *NBR-9935: Agregados - Terminologia*. 2005b.
- _____: *NBR 11376: Moinho de bolas, determinação do índice de trabalho*. Rio de Janeiro, 1990.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1974. *Estimating the strength of rock materials*. J. S. African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 74, No.8. pp. 312 -320.
- BIENIAWSKI, Z.T. *The Point Load Test in Geotechnical Practice*. Eng. Geol., Sept., 1975, pp. 1-11.
- BISH, D. L.; POST, J. E. *Modern powder diffraction*. Washington: Mineralogical Society of America, 1989.
- BRASIL. DNPM. *Estudo de um método simplificado para determinação do "índice de trabalho" e sua aplicação à remoagem*. Hedda V Figueira, Luis. A Preti e Luiz R. M. Valle. – Brasília, 1985.
- BROCH, E.; FRANKLIN J.A. *The Point Load Strength Test*. Int. Journal Rock Mech. Min. Sci 9, 1972, pp. 669-697.
- CASTRO, A.; PANDOLFELLI, V. *Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil*. Cerâmica, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.
- CHAVES, A. P.; PERES, A.E.C. *Tratamento de minérios - Britagem, peneiramento e moagem*. Volume 3. São Paulo: Editora Signus, 2006. 250 p.
- CHAYES, F. *Petrographic modal analysis*. New York: John Wiley, 1956. 113 p.
- COSTA, M.R.M.M. *Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos*. 2006. 131 p. Tese (Doutorado) - Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- DUNLEVEY, J.N. *Modal analysis by computer assisted point counting*. In: International Congress on Applied Mineralogy 3, 1991. Petroria. Proceedings. Petroria: 1991.

Estratigrafia de basaltos na região de Santa Cruz do Rio Pardo (SP): uma abordagem geoquímica. F.A. ISQUIERDO. – São Paulo, 2008. 29p.

DUTRA, C.V.; GOMES, C.B. *A fluorescência de raios X na geologia.* In: GOMES, C. B. (Ed.). *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia.* São Paulo: Blucher/Pró-Minério, 1984. 84-158 p.

BOND, F.C. *Lab equipment and tests help predict metal consumption in crushing and grinding.* Eng. J., 165 (1964), pp. 169–175

FORMOSO, M.L.L. *Difratometria de raios-X.* In: GOMES, C. B. (Ed.). *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia.* São Paulo: Blucher/Pró-Minério, 1984. 1-43 p.

GOLDENSTEIN, H. *Microscopia óptica.* Notas de aula PMI2201. 2007.

HOEK, E.; BROWN, E.T. 1980b. *Empirical Strength Criterion for Rock Masses.* Institute of the Geotechnical Engng. Division, ASCE, Vol. 106, No. GT9, Paper 15715, sep, pp. 1013- 1035

ISRM. International Society of Rock Mechanics Commission on Testing Methods. *Suggested Method for Determining Point Load Strength.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 22, 1985, pp.51-60.

LA SERNA, H.A.; REZENDE, M.M. *Agregados para a construção civil.* DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral: https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4008: 34 p. 2009.

LIST, J.; KÖHLER, U.; WITT, W. *Innovations in Dynamic Image Analysis: down to 1 µm.* In: World Congress on Particle Technology (WCPT6), 2010. Nuremberg, Germany. Proceedings.Nuremberg, Germany: SPE, 2010.

METSO MINERAL. *Manual de britagem.* Sorocaba, Metso Mineral, 2005, 5a edição.

Modelo de previsão de produtos para britadores de impacto de eixo vertical (VSI) / E.S. NUNES FILHO. – São Paulo, 2007. 40p.

MORLEY, C. *High pressure grinding rolls - a technology review.* Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME). EUA: 2006.

NERGRI, F.A.; MONTANHEIRO, T.J.; JANASI, V.A.; REIS, P.M. 2006. *Mapa de distribuição das rochas vulcânicas nas Folhas Piraju/SP e Jacarezinho SP/PR,* XLIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Anais. Sociedade Brasileira de Geologia, Aracaju, SE. p 247.

NORMALISATION FRANÇAISE P18-579. 1990. *Granulats: Essai d'abrasivité et de broyabilité.* AFNOR Association française de normalisation, Paris.

OLIVEIRA, I.R. *et al. Dispersão e empacotamento de partículas - princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico.* Fazendo Arte Editorial, 2000.

PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, V.C. *Reflexões sobre distribuição granulométrica e sua correlação com a reologia de concretos refratários*. Ceramic News, Special South America, p. 6-13, 1999.

_____. *Reologia e distribuição granulométrica de concretos refratários bombeáveis*. Cerâmica, v. 48, p. 11-16, 2002.

PETRUK, W. *Applied Mineralogy in the Mining Industry*. 1. Elsevier Science, 2000.

READ J.R.L, THORNTON P.N, REGAN W.M. *A Regional Approach to the Point Load Test. Proceeding of the Aust-NZ Geomech. Conference 2, 1980*, pp. 35-39

SANT'AGOSTINHO, L.M.; KAHN, H. *Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerais*. 1997. 29 p. Dissertação (Boletim técnico) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SWIFT, G.A. *Characterization of coarse aggregate angularity using digital image processing*. 2007. 70 p. Dissertação – Msc in Geological Engineering, University of Missouri-Rolla, Missouri.

THURO, K.; SINGER, J.; KÄSLING, H; BAUER, M. 2007. *Determining abrasivity with the LCPC Test*. In E. Eberhardt, D. Stead & T. Morrison (eds.). *Proceedings of the 1st Canada – U.S. Rock Mechanics Symposium*, 27.-31.05.2007, Vancouver B.C., London: Taylor & Francis

WEBB, P. A. *An Introduction To The Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction And Presentation of Experimental Data*. Norcross: Micromeritics Instrument Corp. 2001.

WEBB, P. A.; ORR, C. *Analytical Methods in Fine Particle Technology*. 1 edition. Norcross, USA: Micromeritics Instrument Corporation, 1997. 301 p.

WILLS, B.A. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical aspects of Ore Treatment*. 7. oxford: 2006b. 444 p.

WITT, W.; JOACHIM, L.; ULRICH, K. *Possibilities of Dynamic Image Analysis in the Laboratory and Process Environment*. In: *Particulate Systems Analysis*, 2008. Stratford-upon-Avon, UK. *Proceedings. Stratford-upon-Avon, UK: 2008*.

APÊNDICE A - TESTE DE BRITABILIDADE

Crushability Test / Teste Britabilidade			
Customer / Cliente:	Pedreira do Pardo		
Contact / Contato:			
Material:	Basalto	Date / Data:	26/07/2011
Project / Projeto:	Trabalho de Formatura		
Origin / Origem:	Santa Cruz do Rio Pardo - SP		
Request / Solicitação:		Code / Código	
Execution / Realização:	Renato Oliveira, Edison Pereira		
METHODOLOGY DESCRIPTION / DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA			
<p>Real crusher behavior establishment by testing small sample of mineral and comparing the results with values from the measurements with used material as standard.</p> <p>Sample size - 50 kg of 1-1/2" (25-12 mm) material.</p> <p>The precision of the prevision is directly connected with the fact of how representative is the sample.</p> <p>In case of not uniform geology the higher amount of samples is recommended.</p> <p>Estabelecimento do comportamento real dos britadores a partir de teste de pequena amostra de mineral ou rocha, comparando os resultados obtidos com medições realizadas com material utilizado como padrão.</p> <p>Amostra de 50 Kg de material com granulometria 1-1/2" (25-12mm).</p> <p>A precisão da previsão está diretamente ligada com a representatividade da amostra testada.</p> <p>Caso a mina não seja geologicamente uniforme, recomenda-se um número maior de testes.</p>			
1 ABRASION INDEX / ÍNDICE DE ABRASÃO (BOND)		Aj=	0,175 g
Equipment - Rotating drum with pallet (Bond Type)		Method - Wear in grams of pallets after one hour work	
Equipamento - Tambor rotativo com palheta (Tipo Bond)		Medição - Desgaste em gramas de palheta após uma hora de trabalho	
Reference/Referência			
Low / Baixa		Average / Média	
Limestone/Calcário	0,001 - 0,03	Basalt/Basalto	0,20 - 0,30
Dolomite/Dolomita	0,030 - 0,10	Hematite/Hematita	0,20 - 0,35
Non Abrasive / Não abrasivo:		Abrasive / Abrasivo:	
< 0,05		0,35 - 0,55	
Slightly Abrasive / Ligeiramente abrasivo:		Very Abrasive / Muito Abrasivo:	
0,05 - 0,15		> 0,55	
Average Abrasion / Média abrasão:		0,15 - 0,35	
<p>Note: The abrasion index corresponds to the loss of weight in gram of a steel vane, of dimensions standardized (500HB or 50 HRC)</p> <p>Nota: O índice de abrasão corresponde à perda de peso em gramas de uma palheta de aço de dimensões padronizadas (500HB ou 50 HRC)</p> <p>* Approximate value of wear of parts on crushing machine regarding abrasion index and power consumption, see "Crushing Manual" Metso Minerals, chapter 8-24.</p> <p>* Valores aproximados de desgaste de peças nas máquinas de britagem relacionados com o índice de abrasão e potência consumida, ver "Manual de Britagem" Metso Minerals, capítulo 8-24.</p>			
1.1 ABRASION INDEX / ÍNDICE DE ABRASÃO (MACON)		Aj=	772 g/t
Equipment: Abrasimeter Cylinder, methodology used by Nordberg as a Abrasion index parameter in Bruno's software			
Equipamento - Cilindro Abrasímetro, metodologia utilizada pela Nordberg como parâmetro de índice de abrasão no software Bruno.			
Reference/Referência			
Non Abrasive / Não abrasivo:		Abrasive / Abrasivo:	
0 - 100		1200 - 1700	
Slightly Abrasive / Ligeiramente abrasivo:		Very Abrasive / Muito Abrasivo:	
100 - 600		> 1700	
Average Abrasion / Média abrasão:		600 - 1200	
<p>Note: The abrasion index corresponds to the loss of weight in gram of a steel vane, of dimensions standardized (25x50x5 with 110-121 HB)</p> <p>Nota: O índice de abrasão corresponde à perda de peso em gramas de uma palheta de aço de dimensões padronizadas (25x50x5 de dureza 110-121 HB)</p>			
1.1.2 CRUSHABILITY / BRITABILIDADE (MACON)		Cr=	27,50 %
Equipment: Abrasimeter Cylinder, methodology used by Nordberg as a crushability parameter in Bruno's software			
Equipamento - Cilindro Abrasímetro, metodologia utilizada pela Nordberg como parâmetro de britabilidade no software Bruno.			
Reference/Referência			
Very easy / Muito fácil:		Difficult / Difícil:	
> 50		20 - 30	
Easy / Fácil:		Very Difficult / Muito difícil:	
40 - 50		0 - 20	
Average / Médio:		30 - 40	
<p>Note: After 5 minutes, the triturated material is selected, in screen of 1.6 millimeters. The passing material corresponds to the crushability index.</p> <p>Nota: Após 5 minutos, o material triturado é selecionado, em tela de 1.6 milímetros. O material passante corresponde ao índice de britabilidade.</p>			
2 WORK INDEX / ÍNDICE DE TRABALHO (BOND)		Wi=	18,15 kWh/st
Equipment - Rod mill 1'x2'		Measurement on 16 ASTM	
Equipamento - Moimho de barras 1'x2'		Medição na malha 16 ASTM (1,19 mm)	
Reference/Referência			
Limestone/Calcário		Hematite/Hematita	
8 - 11		9 - 14	
Dolomite/Dolomita		Granite/Granito	
9 - 13		14 - 20	
Very easy / Muito fácil:		Difficult / Difícil:	
< 6		14 - 18	
Easy / Fácil:		Very Difficult / Muito difícil:	
6 - 10		> 18	
Average / Médio:		10 - 14	
<p>* Value of Wi presented here should not be used for sizing of grinding mills.</p> <p>* O valor de Wi aqui apresentado não deve ser utilizado para o dimensionamento de moinhos.</p>			
3 BULK DENSITY / DENSIDADE APARENTE		Y =	1,79 t/m³
Density of sample / Densidade de amostra: 1/2" - 0 (12-0mm)			
4 SPECIFIC GRAVITY (SOLID DENSITY) / PESO ESPECÍFICO		Yr =	2,86 t/m³
Solid sample density / Densidade de amostra sólida			
JAW CRUSHER CRUSHABILITY / BRITABILIDADE BRITADOR DE MANDÍBULAS			
STANDARD MATERIAL DATA / DADOS DO MATERIAL PADRÃO			
Equipment:	Crusher 75x50mm - Smooth Jaw Plates. CSS=4,5mm - Load Cell on Toggle		
Equipamento:	Britador 75 x 50 - Mandíbulas lisas CSS = 4,5 mm APF com célula de carga.		
Measurements:	Bulk Density (4), Capacity (5), Strength (6), Flakiness (7) and Product Curve (8)		
Medição:	Densidade aparente (4), Capacidade (5), Esforços (6), Lamelalidade (7) e Granulometria do produto (8)		
Sample:	10kg of mineral with 3/4"-1/2" size (19,1 - 12,7 mm)		
Amostra:	10 Kg de mineral ou rocha com tamanho 3/4"-1/2" (19,1-12,7 mm)		
Reference:	Granite from Quarry Holcim (Brasil) Ltda - Unit. Sorocaba-SP-Brazil		
Referência:	Granito da Pedreira Holcim (Brasil) Ltda - Unidade Sorocaba-SP-Brasil		
Abrasion Index / Índice de abrasão (Bond) = 0,430 g	Bulk density / Densidade aparente = 1,53 t/m³		
Abrasion Index / Índice de abrasão (Macon) = 1604 g/t	Real density / Densidade real = 2,68 t/m³		
Crushability Index / Índice de britabilidade (Macon) = 47,14%	Product Flakiness Index = 4 %		
Work Index to ASTM 16 (1,19mm) / Índice de trabalho = 14,15 Kwh/st	Índice de lamelalidade Produto = 4 %		

5 VOLUMETRIC CAPACITY INDEX / ÍNDICE DE CAPACIDADE VOLUMÉTRICA			
Time to crush standard material / Tempo para britar material padrão	C=	68,99	%
Time to crush sample of tested mineral or rock / Tempo para britar amostra de mineral ou rocha testado	T0=	63,04	sec / seg
Apparent density of standard material / Densidade aparente do material padrão	T1=	78,10	sec / seg
	Y0=	1,53	t/m³

Volumetric Capacity Index / Índice de Capacidade Volumétrica

$$C = 100 \left(\frac{T_0}{T} \cdot \frac{Y_0}{Y} \right)$$

References / Referências

- C = 90-110% - allow use of standard calculating methods / usar as médias das capacidades indicadas nos manuais
 C < 90% - the minimum values from capacity figures should be used / usar os valores mínimos indicados nos manuais
 C > 110% - the maximum value from capacity figures can be used / usar valores máximos dos manuais

6 STRENGTH INDEX / ÍNDICE DE RESISTÊNCIA

Toggle force when standard material is processed / Força na abanadeira quando a amostra padrão é processada
 Toggle force when tested mineral or rock is processed / Força na abanadeira quando o mineral ou rocha é processado

R=	178,57	%
P0=	2302,34	kgf
P1=	4111,40	kgf

Strength Index / Índice resistência

$$R = 100 \frac{P_1}{P_0} \%$$

References / Referências

- R=90-110 The smallest leaflet setting can be used / Fechamento mínimo indicados nos manuais podem ser utilizados
 R=70-90 The minimum setting can be reduced 20% / Pode-se reduzir os fechamentos mínimos em 20%
 R=110-150 The minimum setting must be increased 20% / O fechamento mínimo deverá ser aumentado em 20%

Note: If R is out of described values consult crushing engineering

Note: Se o R estiver for a dos números listados, consultar a Engenharia de britagem

7 PRODUCT FLAKINESS INDEX / ÍNDICE DE LAMELARIDADE DO PRODUTO

Method: It is analyzed the 300g sample of fine crushing with size 1/2"-3/8" (13-10mm).
 Metodologia: É coletado uma amostra de 300 g do material britado com granulometria 1/2"-3/8" (13-10mm).
 Separating the particle with length 3 or more time bigger than smaller dimension.
 Separar-se as partículas com comprimentos 3 vezes iguais ou maiores que a menor dimensão.

Sample weight / Peso da amostra Q0= 400 g Flat particle weight / Peso das partículas lamelares

Q1= 40,77 g

Flakiness Index / Índice de lamelaridade

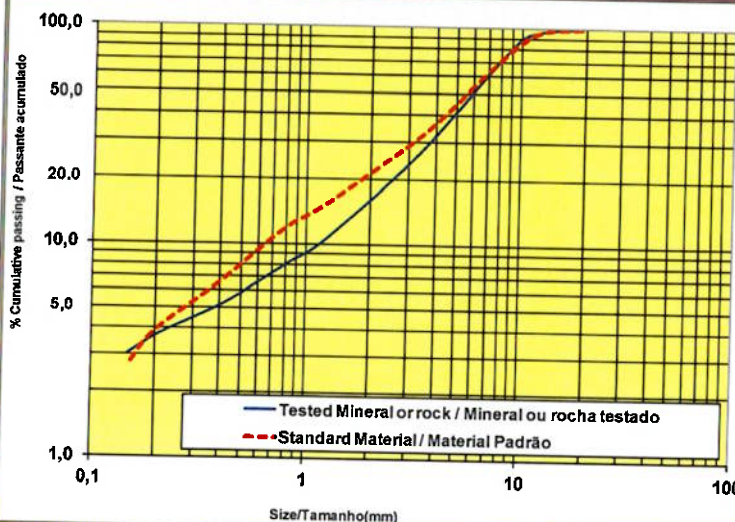
$$L = 100 \frac{Q_1}{Q_0} \%$$

References / Referências

L=0-20% - cubical material / material cúbico L=20-40% - flakiness tendency / tendência lamelar

L>40% height flakiness / Altamente Lamelar

8 PRODUCT DISTRIBUTION / DISTRIBUIÇÃO DO PRODUTO



Distribution/Distribuição		Correction/Correção	
Size/Tamanho	Passing Passante	Standard Padrão	Tested Testado
mm	%	%	%
19.1	100,0		
12.7	96,8	80	88
9.52	85,5		
3.36	26,3	60	73
1.19	10,2		
0.84	8,2	40	60
0.42	5,3		
0.21	3,8	20	48
0.15	3,0		
Fundo	0,0	6	33
Geração de finos < 0,15mm		2,7	0,0
Fine Generation < 0,15mm			

Note:

The product curve of cone and Jaw can be draw for tested mineral displacing the tested mineral displacing the standard distribution using the size factor from the table given for 80, 60, 40, 20, 6 % of passing material.

Nota:

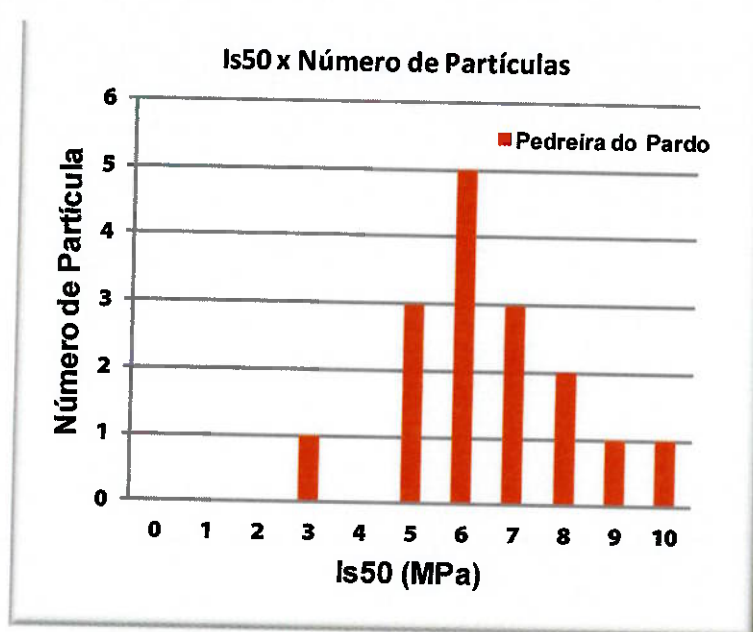
Pode-se desenhar as curvas do produto para o mineral ou rocha testado para as mandíbulas e cones usando os fatores corretivo na tabela para 80, 60, 40, 20, 6 % de material passante

É de se esperar que, em outros equipamentos de britagem ocorra um desvio proporcional ao apresentado neste teste, portanto sugerimos que, para cálculos de instalação de plantas sejam corrigidas as curvas granulométricas de tais equipamentos na mesma proporção.
 It is expected that in other crushing equipment occurs a proportional deviation presented in this test, therefore we suggest to correct / adjust the size distribution for plant calculation

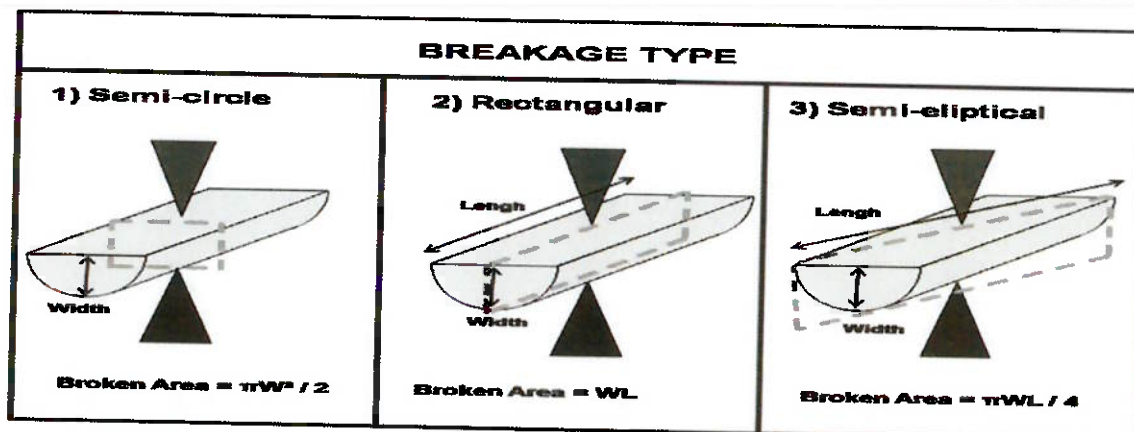


APÊNDICE B - TESTE DE CARGA PONTUAL

Is50	Frequencia	
	Acumulada	Simples
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	1
4	1	0
5	1	3
6	4	5
7	9	3
8	12	2
9	14	1
10	15	1
11	16	0
12	16	0
13	16	0
14	16	0
15	16	0



#	Width (mm)	Length (mm)	Peak Load (kN)	Breakage Type	Actual Broken Area	D ² Equiv	Is = (P/D _e ²)	F = (D ² Equiv / 2500) ^{0.225}	Is ₅₀ = F(P/D ² Equiv)
1	29,2	51,0	26,1	2)	1489,3	1896,3	0,0138	0,9397	12,9
2	37,8	54,5	26,7	2)	2059,0	2621,6	0,0102	1,0107	10,3
3	33,0	65,0	4,5	2)	2147,0	2733,6	0,0016	1,0203	1,7
4	31,2	83,5	25,0	2)	2606,1	3318,2	0,0075	1,0658	8,0
5	28,3	77,9	17,8	2)	2206,9	2809,9	0,0063	1,0266	6,5
6	28,2	64,3	15,9	2)	1815,7	2311,8	0,0069	0,9825	6,7
7	30,0	74,5	18,4	2)	2237,2	2848,5	0,0065	1,0298	6,6
8	34,7	63,2	18,8	2)	2191,1	2789,8	0,0067	1,0250	6,9
9	32,6	65,9	19,0	2)	2148,0	2734,9	0,0069	1,0204	7,1
10	38,4	56,0	14,3	2)	2148,0	2734,9	0,0052	1,0204	5,3
11	32,9	72,6	15,2	2)	2385,4	3037,2	0,0050	1,0448	5,2
12	39,7	68,1	26,7	2)	2706,4	3445,9	0,0078	1,0749	8,3
13	34,9	57,9	7,8	2)	2018,4	2569,9	0,0030	1,0062	3,0
14	37,7	73,3	20,4	2)	2763,4	3518,5	0,0058	1,0799	6,3
15	35,2	97,7	14,5	2)	3435,5	4374,2	0,0033	1,1341	3,7
16	31,3	78,0	21,7	2)	2439,1	3105,5	0,0070	1,0500	7,3
17	36,5	66,4	22,7	2)	2425,7	3088,4	0,0073	1,0487	7,7
18	29,2	53,8	26,6	2)	1573,1	2002,9	0,0133	0,9513	12,6
19	59,6	31,3	23,5	2)	1864,3	2373,7	0,0099	0,9884	9,8
20	46,0	62,8	18,7	2)	2886,5	3675,2	0,0051	1,0906	5,5
Média	34,0	65,9	19,9		2260,1	2877,6	0,0067	1,0309	7,0
6	3,4	7,9	4,0		276,5	352,0	0,0017	0,0283	1,7



APÊNDICE C - ÍNDICE ENERGÉTICO

Bond Ball Mill Work Index

Client:	Pedreira do Pardo	Closing sieve:	100 [#Tyler]
Sample:	Basalto	Closing sieve:	0,149 [mm]
Contact:		Initial Mass (C):	1267,00 [g]
Origin:	Santa Cruz do Rio Pardo	IPP (Ideal Potencial Product):	362,00 [g]
Executed By:	Júlio Almeida	Material Density:	1,810 [t/m ³]
Local:	Sorocaba	% of passing product of the initial mass:	13,18 [%]
Date:	18/07/2011		

Laboratory Sheet

Cycle [#]	Feed [g]	Product [g]	Product [g]	Deviation [g]	Retained [g]	Fresh Feed [g]	Moability [g/r]	Rotations [#]
	S	T= C-M	U= T-S	D= IPP-R	M= R-T	R= T	V= U/Q	Q= (IPP-S)/V
1	167,03	287,57	120,54	-905,00	979,43	1,267,00	1,205	100
2	37,90	342,00	304,10	74,43	925,00	287,57	1,130	269
3	45,08	378,93	333,85	20,00	888,07	342,00	1,192	280
4	49,94	365,29	315,35	-16,93	901,71	378,93	1,204	262
5	48,15	363,83	315,68	-3,29	903,17	365,29	1,210	261
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								

Moability

(n-2)	1,192 [g/rotation]
(n-1)	1,204 [g/rotation]
(n)	1,210 [g/rotation]

*Average of the last three moability numbers (GBP) [g/rotation]
Moability 1,202 [g/rotation]

Circulating Load

Fresh Feed	1267,00 [g]	Circulating Load	247,54 [%]
Passing Product	364,56 [g]		

Passing Product

(n-1)	365,29 [g]
(n)	363,83 [g]

*Average of the last 2 or 3 cycles passing product
Passing Product 364,56 [g]

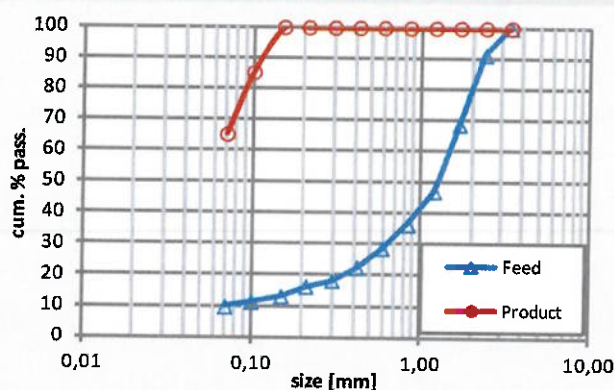
Work Index Evaluation

F ₈₀	2,024 [mm]
P ₈₀	0,092 [mm]

WI	16,24 [kWh/t]
WI	14,73 [kWh/st]

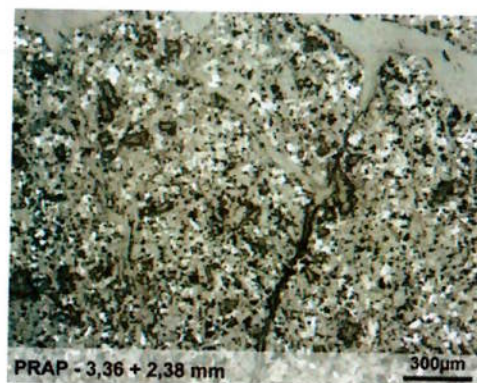
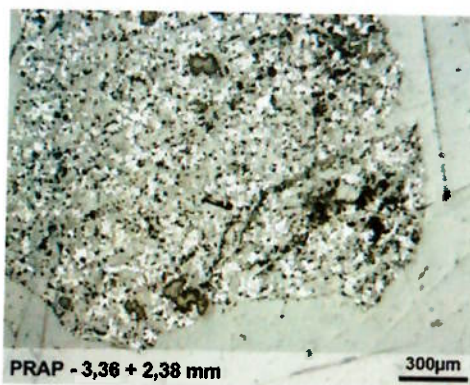
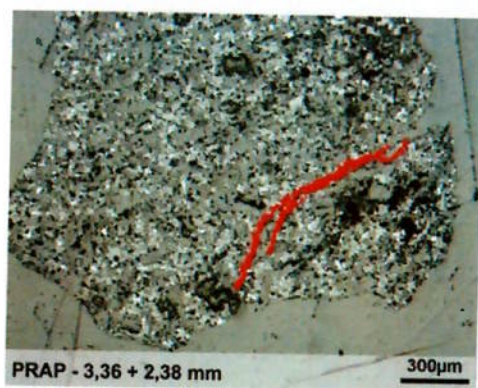
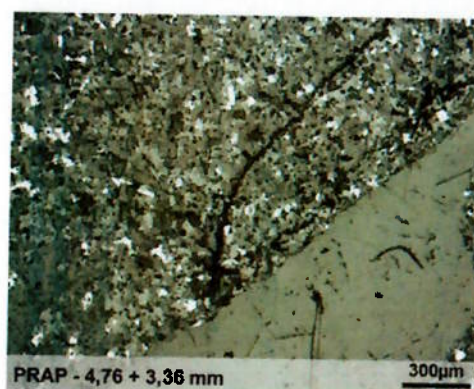
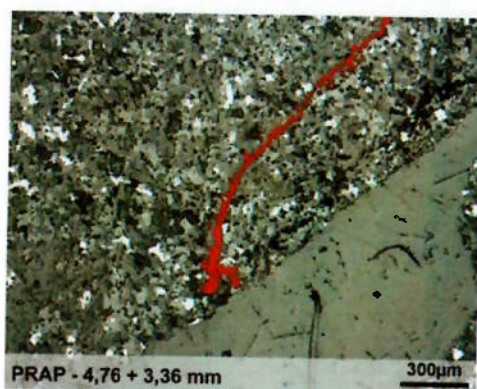
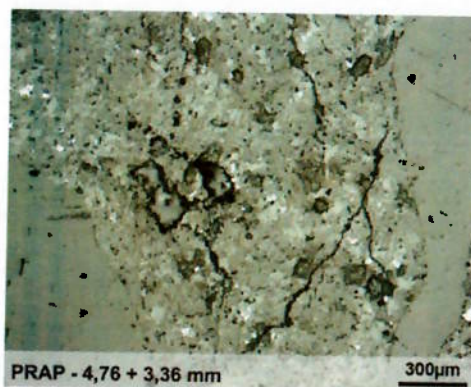
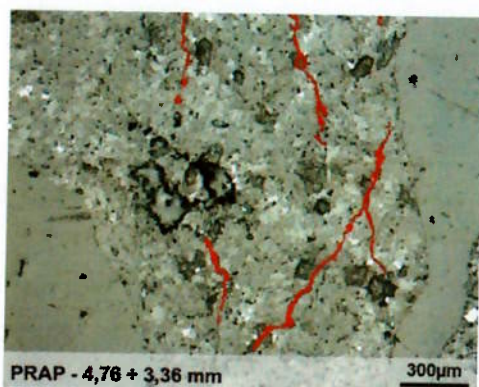
Size Distribution

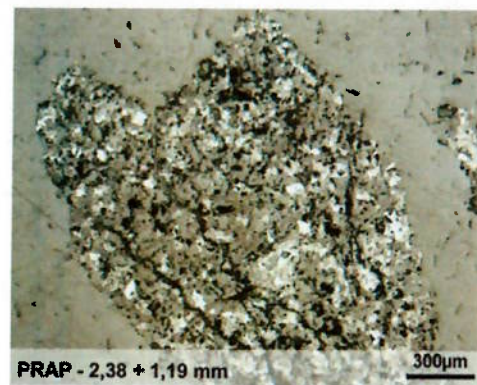
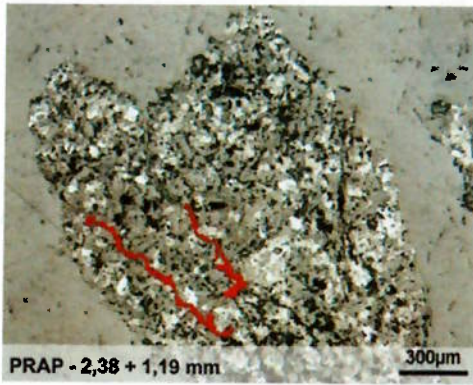
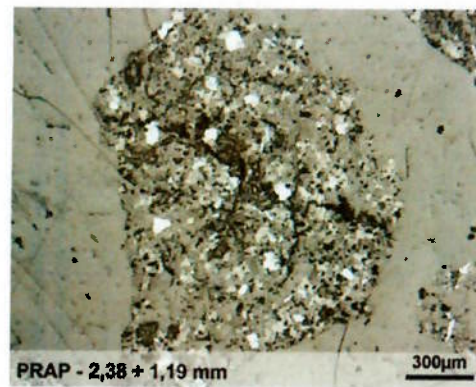
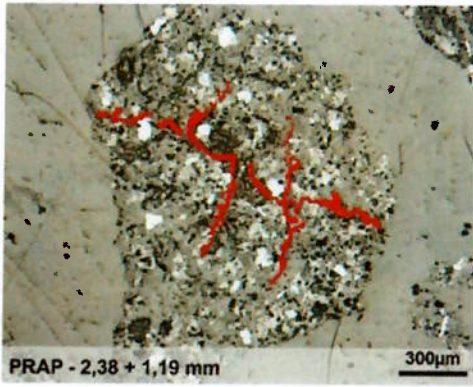
Size [ASTM]	Size [mm]	Feed cum. % pass.	Product cum. % pass.
6	3,36	100,0	100,0
8	2,38	91,3	100,0
12	1,68	68,7	100,0
16	1,19	47,3	100,0
20	0,84	36,6	100,0
30	0,59	28,9	100,0
40	0,42	22,6	100,0
50	0,30	18,4	100,0
70	0,21	16,3	100,0
100	0,15	13,2	100,0
140	0,10	11,3	85,4
200	0,07	9,7	65,2



APÊNDICE D - FOTOGRAFIAS EM MICROSCÓPIO ÓPTICO DE LUZ REFLETIDA

Produtos da prensa de rolos de alta pressão





Produtos do britador cônico