

EDIS SIQUEIRA NUNES FILHO

**MODELO DE PREVISÃO DE PRODUTOS
PARA BRITADORES DE IMPACTO DE EIXO VERTICAL (VSI)**

**São Paulo
2007**

EDIS SIQUEIRA NUNES FILHO

ESTUDANTE DE

ENGENHARIA DE MINAS

**MODELO DE PREVISÃO DE PRODUTOS
PARA BRITADORES DE IMPACTO DE EIXO VERTICAL (VSI)**

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.

Orientador: Prof. Dr. Homero
Delboni Jr.

São Paulo
2007

EPMI
TE 2007
N922m
lymo 1669844

FICHA CATALOGRÁFICA

M2007k

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700006121

Nunes Filho, Edis Siqueira

Modelo de previsão de produtos para britadores de impacto
de eixo vertical (VSI) / E.S. Nunes Filho. -- São Paulo, 2007.
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.Modelagem mate-
mática 3.Granito 4.Basalto I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Homero Delboni Júnior, pelos ensinamentos, idéias e amizade.

A minha equipe de trabalho da Metso Minerals, em especial ao Engenheiro Eduardo Nozawa e o Técnico Edílson Pereira, pela ajuda no dia a dia, nos experimentos e nas sugestões.

Aos meus colegas de turma, pelo apoio, companheirismo e incentivo em todos os momentos.

Ao corpo docente do PMI, pela minha formação.

A todos os funcionários do departamento, pela dedicação e pelo ótimo atendimento aos alunos.

RESUMO

Os britadores de impacto de eixo vertical ou *vertical shaft impactor* (VSI) são utilizados em circuitos industriais de cominuição, principalmente na produção de agregados para a construção civil. O emprego destes britadores se deve principalmente as características do produto gerado tais como formato arredondado de partícula e granulometria fina. Embora muito utilizado, os VSI ainda não possuem um modelo de previsão de produtos confiável. Por este motivo, a fim de conhecer melhor o produto gerado neste equipamento, atualmente são necessários testes em escala piloto e grande quantidade de amostras.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo para previsão de produtos de britadores tipo VSI, utilizando ensaios em laboratório e em planta piloto. Os resultados obtidos mostraram aderência razoável aos dados experimentais e, sobretudo, melhores resultados do que os obtidos através de simulações com base no modelo atualmente empregado.

A execução de mais ensaios, com diferentes tipos de minérios e diferentes condições de processamento, permitirá a investigação das limitações do modelo desenvolvido, de forma a torná-lo mais robusto.

PALAVRAS-CHAVE: Britador de impacto de eixo vertical, cominuição, caracterização de minerais e modelagem.

ABSTRACT

The vertical shaft impact crushers are largely used in industrial circuits of comminution, mainly in the production of civil construction materials. The use of these crushers is based in the product characteristics such as rounded particle shape and fine size. Although widely used, the VSI do not have a trusted prediction product model. Therefore, in order to better know the product generated in this equipment, currently tests are needed on pilot scale and large amount of samples.

The main of this work was developed a model for prediction VSI crusher product, using lab and pilot plant tests. The results showed reasonable adherence comparing with experimental data, and some improvement comparing with the current model.

More tests execution, with different ore types and different operation conditions, will allowed investigate the model developed limitations in order to make it more robust.

KEY-WORDS: Vertical shaft impact crusher, comminution, mineral characterization and modeling.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Cominuição.....	9
2.1.1	Mecanismos de fragmentação.....	9
2.2	Ensaios de fragmentação.....	10
2.2.1	Ensaios de impacto sobre partículas individuais.....	10
2.2.2	<i>Drop Weight Tester</i> (DWT) e conceitos associados.....	11
2.3	Britadores tipo VSI.....	13
2.3.1	Características gerais e componentes.....	13
2.3.2	Princípios de operação.....	14
2.3.3	Fragmentação do produto.....	15
2.3.4	Principais aplicações.....	17
2.4	Modelagem e simulação de processos.....	17
2.4.1	Modelos de cominuição.....	17
2.4.2	Classes de modelos para cominuição.....	18
2.4.3	Modelos fenomenológicos.....	19
2.4.4	Modelo de VSI.....	19
2.4.5	Simulação.....	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1	Ensaios em laboratório – DWT.....	20
3.2	Ensaios na planta piloto – Barmac 3000.....	21
3.3	Modelagem.....	22
4	RESULTADOS.....	23
4.1	Resultados DWT.....	23
4.2	Resultados dos ensaios em planta piloto.....	25
4.3	Resultados do modelo desenvolvido.....	26
5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	30
6	CONCLUSÕES.....	32
7	REFERÊNCIAS.....	33

FIGURAS

Figura 2.1 - <i>Drop Weight Tester</i> e suas partes principais.....	11
Figura 2.2 – Resultados experimentais típicos do DWT.....	12
Figura 2.3 – Curvas t_n para obtenção da distribuição granulométrica a partir de t_{10}	13
Figura 2.4 – Desenho de representação das partes internas do VSI.....	14
Figura 2.5 – Distribuição granulométrica do produto - velocidade.....	15
Figura 2.6 – Distribuição granulométrica do produto - fluxo de cascata.....	16
Figura 2.7 – Distribuição granulométrica do produto - dureza do material.....	16
Figura 2.8 – Aplicações para VSI	17
Figura 2.9 – Relação entre energia e tamanho de partícula.....	18
Figura 3.1 – Fluxograma da planta piloto	21
Figura 3.2 – Esquema representativo do modelo.....	23
Figura 4.1 – Curvas $t_{10} \times Ecs$ para o Granito Cantareira.....	24
Figura 4.2 – Curvas $t_{10} \times Ecs$ para o Basalto Splice.....	24
Figura 4.3 – Curvas $t_{10} \times Ecs$ para ambos os minerais.....	25
Figura 4.4 – Distribuições granulométricas exp. – Granito - 55, 65 e 75 m/s.....	26
Figura 4.5 – Distribuições granulométricas exp. – Basalto - 55, 65 e 75 m/s.....	26
Figura 4.6 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Granito – 55 m/s.....	27
Figura 4.7 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Granito – 65 m/s.....	27
Figura 4.8 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Granito – 75 m/s.....	28
Figura 4.9 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Basalto – 55 m/s.....	28
Figura 4.10 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Basalto – 65 m/s.....	29
Figura 4.11 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Basalto – 75 m/s.....	29

TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação de Resistência ao Impacto segundo o produto Axb.....	13
Tabela 3.1 – Configurações dos testes de Drop Weight.....	20
Tabela 4.1 - Parâmetros do DWT para cada amostra.....	25

ANEXOS

Anexo A – Resultados dos ensaios em planta piloto com o Granito.....	33
Anexo B – Resultados dos ensaios em planta piloto com o Basalto.....	36

1 INTRODUÇÃO

Os britadores tipo VSI são utilizados em circuitos de cominuição. Geralmente são instalados nos últimos estágios da britagem, mais precisamente nas etapas de britagem terciária e quaternária.

A utilização deste equipamento se deve principalmente as características do seu produto. Os mecanismos de quebra que ocorrem com maior intensidade são a fragmentação por impacto rocha-contra-rocha, a atrição e a abrasão entre partículas. Por causa destes mecanismos são geradas partículas arredondadas e de granulometria fina, características excelentes para a qualidade do material usado, por exemplo, na construção civil.

As peculiaridades associadas ao VSI exigem extremo cuidado dos projetistas de circuitos de cominuição. A escala das operações e dos investimentos praticamente obriga a realização de cautelosas campanhas de investigação, dado o risco técnico associado. Sob tais exigências, a simulação é um recurso confiável, ao propiciar a visualização de diferentes cenários de modo rápido e eficaz, auxiliando a tomada de decisões.

A simulação de circuitos, entretanto, depende da qualidade dos modelos matemáticos empregados. Os modelos podem ser empregados na seleção de equipamentos, previsão de desempenhos e potência requerida por uma instalação.

Não existe atualmente um modelo matemático capaz de prever com boa precisão a granulometria do produto gerado no VSI. Assim, para a tomada de decisões é necessária a realização de ensaios em escala piloto, o que demanda a necessidade de grande quantidade de amostras, bem como recursos financeiros consideráveis.

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um modelo matemático para a previsão de produtos de equipamentos industriais, e compara os resultados com aqueles obtidos mediante o emprego do modelo atualmente usado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cominuição

Cominuição é o conjunto de operações de redução de tamanhos de partículas minerais, executado de maneira controlada e de modo a cumprir um objetivo pré-determinado. Isto inclui as exigências de controlar o tamanho máximo dos produtos e de evitar a geração de quantidades excessivas de finos. (Chaves, 1999)

As operações de cominuição incluem diversos estágios, cada qual mais apropriado ao tipo de minério e ao tamanho dos blocos ou partículas a serem processados. Embora a fragmentação seja iniciada no desmonte, a etapa inicial da cominuição é a britagem, responsável pela fragmentação dos blocos obtidos na lavra. A etapa posterior é a moagem, a qual cabe a fragmentação fina, cujo produto alimenta outros processos industriais de concentração, como a flotação e outros. A cominuição é um processo pouco eficiente, pois antecedendo a fratura, a partícula necessita sofrer esforços substanciais que se armazenan sob a forma de energia elástica e que, posteriormente, se perdem com a ruptura.

A maior parte da energia gasta no processamento de minérios é absorvida pela fragmentação e qualquer melhoramento na operação acarreta uma importante economia no processo. (Figueira, 2002).

A otimização do desempenho dos equipamentos de cominuição, ou maximização de sua eficiência econômica, trazem inúmeros benefícios para um projeto tais como a redução dos custos operacionais, o aumento da capacidade/produção, e o melhor desempenho dos processos subsequentes como resultados de uma melhor distribuição de tamanho dos produtos. (Napier-Munn et al. 1996)

2.1.1 Mecanismos de fragmentação

Os mecanismos de fragmentação envolvidos na cominuição são três, a abrasão, a compressão e o impacto. Beraldo (1987) descreve tais mecanismos sob o aspecto da natureza e do modo como as forças são aplicadas:

- **Abrasão** – Ocorre quando a força é insuficiente para provocar uma fratura em toda a partícula. Há concentração local de esforços, que provoca o aparecimento de pequenas fraturas, com surgimento de uma distribuição granulométrica de partículas finas ao lado da partícula original, cujo tamanho é pouco diminuído. Esse tipo de fratura pode ser provocado por atrito entre as partículas e/ou em moinhos de bolas com as partículas.
- **Compressão** – Ocorre quando a força é aplicada de forma lenta e permite que, com o aparecimento da fratura, o esforço seja aliviado. Assim, a intensidade da força total aplicada é pouco superior à resistência da partícula. Desse tipo de fratura resultam poucos fragmentos de grande tamanho. Ocorre em britadores de mandíbulas, giratórios, cônicos e em moinhos quando as partículas são comprimidas entre dois ou mais corpos moedores, ou partículas maiores.

- **Impacto** – Ocorre quando a força é aplicada de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência da partícula, como acontece, por exemplo, com britadores de impacto ou com moinhos, nas zonas de queda de bolas ou barras cadentes. Resulta desse tipo de fratura uma distribuição granulométrica de partículas finas.

A britagem, dependendo de forças de compressão, impacto ou abrasão exige um volume de partícula onde possa se desenvolver. Fica portanto restrita aos tamanhos maiores. A fratura se desenvolve segundo as tensões principais de cisalhamento, de inclinação constante em relação à direção das tensões de compressão. Em consequência, as partículas tendem a apresentar certa cubicidade e faces relativamente planas.

A britagem tem necessariamente uma relação de redução pequena. As forças aplicadas são elevadas e a geometria do equipamento tem importância fundamental. As relações de redução para cada etapa de britagem podem ser aproximadas por:

- Britagem Primária - 8:1
- Britagem Secundária - 6 a 8 : 1
- Britagem terciária - 4 a 6:1
- Britagem Quaternária - 20:1

Estes são valores aproximados de relação de redução para etapas de britagem podendo variar de acordo com o tipo de equipamento escolhido para cada caso e o tipo de minério processado. O escopo do trabalho está intimamente ligado a etapa de maior relação de redução, ou seja, à britagem quaternária, onde os VSI são empregados na maioria dos casos.

2.2 Ensaios de fragmentação

Ensaios de fragmentação têm por objetivo a obtenção de parâmetros que caracterizem o comportamento da quebra. Existem diversos ensaios disponíveis, cada um adequado a um propósito. Os ensaios mais detalhados são aqueles que consideram a relação entre a energia aplicada e a redução de tamanho obtida.

2.2.1 Ensaios de impacto sobre partículas individuais

A grande vantagem dos ensaios sobre partículas individuais é a avaliação isolada das características do material. A caracterização com base no mecanismo de impacto é executada em equipamentos duplo pêndulo e *drop weight*, ou queda de peso.

Um equipamento duplo pêndulo foi utilizado inicialmente por Faherwald em 1938 para avaliar a influência da velocidade de impacto na geração de finos. Bond em 1946 utilizou um mesmo tipo de dispositivo para avaliar as forças de impacto e elaborou o “ensaio de britabilidade”. No mesmo ano Gaudin e Hukki avaliaram a distribuição granulométrica e a relação com a energia específica de quebra. Em 1985 Narayanan fez observações acerca da energia específica de cominuição associada à fragmentação e obteve parâmetros aplicáveis a modelos de cominuição. (Napier Munn *et al.* 1996)

O uso de equipamentos *drop weight* para estudo de quebra de partículas data da mesma época dos equipamentos duplo pêndulo, entretanto nos estudos para caracterização de quebra por impacto, o *drop weight* mostra vantagens ao pêndulo. Uma dessas vantagens é poder empregar energias maiores para partículas maiores, mais próximas, portanto do regime de moagem em moinhos AG/SAG.

2.2.2 Drop Weight Tester (DWT) e conceitos associados

O DWT é um equipamento para ensaios de fragmentação que permite que fragmentos de rocha sejam submetidos, individualmente, ao impacto de um peso cadente. O peso é elevado até uma dada altura, o que lhe confere uma determinada energia potencial que, após liberação, converte-se em energia de movimento, aplicando um impacto sobre a partícula. É um equipamento robusto, disposto sobre uma base de concreto, conforme o desenho esquemático da Figura 2.1.

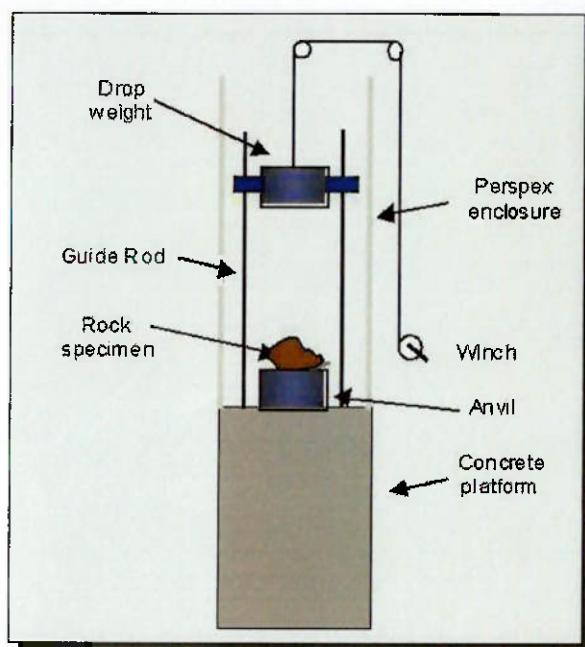


Figura 2.1 - *Drop Weight Tester* e suas partes principais de Chieregati (2001).

O procedimento padronizado de ensaio no DWT emprega grupos de partículas de mesma fração granulométrica, denominados lotes, sob variados níveis de energia específica (E_{cs} ou *specific comminution energy*). O equipamento pode ser configurado para fornecer a energia de impacto desejada, conforme a equação descrita por Napier-Munn *et al.* (1996).

$$E_{cs} = \frac{0,0272 \cdot M \cdot (h_i - h_f)}{m} \quad (1)$$

- Ecs - energia específica de cominuição (kWh/t) - razão entre a energia aplicada e a massa da partícula,
- 0,0272 - constante para conversão de unidades,
- M - massa do peso cilíndrico (kg),
- h_i - altura inicial (cm)
- h_f - altura remanescente após o impacto (cm) e
- m - massa média de cada partícula (g).

Do peneiramento dos produtos dos lotes ensaiados, é calculado o parâmetro t_{10} , que representa a porcentagem passante na malha de tamanho igual a 1/10 do tamanho da partícula inicial. Este parâmetro é, portanto, uma forma de quantificar a magnitude da fragmentação. A Figura 2.2 apresenta resultados experimentais típicos do ensaio DWT.

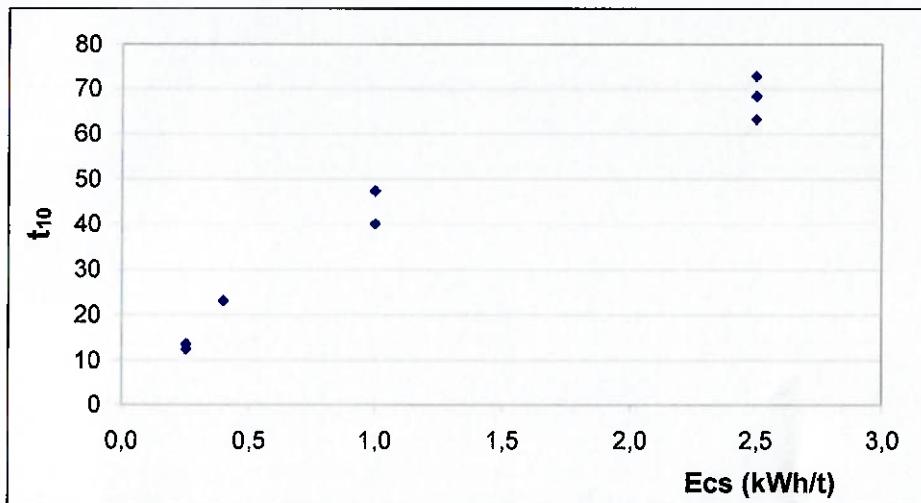


Figura 2.2 – Resultados experimentais típicos do DWT

A relação entre t_{10} e a Ecs é parametrizada pela seguinte equação, desenvolvida por Whiten (*apud* Delboni, 1999):

$$t_{10} = A(1 - e^{-b \cdot Ecs})$$

(2)

A - valor de t_{10} para energias muito altas.

b - coeficiente associado ao crescimento inicial.

A e b são conhecidos como parâmetros ou coeficientes de fragmentação por impacto e são obtidos através de regressões. Segundo Delboni, a resistência ao impacto é também representada produto $A \times b$, assim denominado **IQ** ou **índice de quebra**. Quanto mais elevado o produto, menos resistente é o minério, conforme a classificação apresentada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação de Resistência ao Impacto segundo o produto Ax_b

Intervalo de valores do IQ Menor	Maior	Resistência ao impacto
10	19,9	Extremamente Alta
20	29,9	Muito Alta
30	39,9	Alta
40	49,9	Moderadamente Alta
50	59,9	Média
60	69,9	Moderadamente Baixa
70	89,9	Baixa
90	149,9	Muito Baixa
> 150		Extremamente Baixa

O parâmetro t_{10} também está relacionado à distribuição granulométrica do produto de fragmentação, através das relações normalizadas entre o próprio t_{10} e os demais t_n . Estas relações foram desenvolvidas por Narayanan e Whiten (1983 e 1988), ao comparar as distribuições granulométricas de diversos ensaios e submetê-las a regressões, conforme a Figura 2.3.

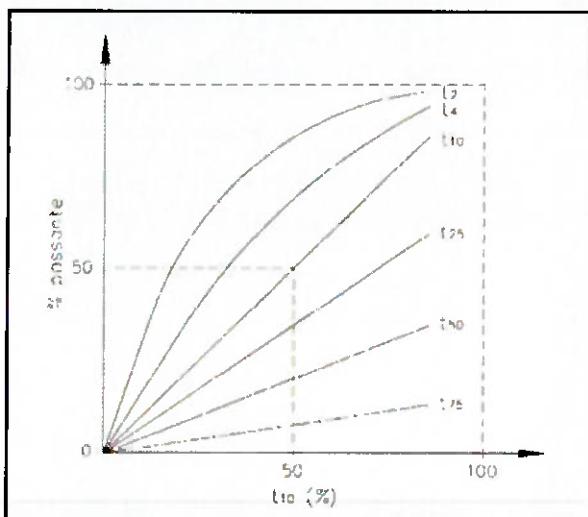


Figura 2.3 – Curvas t_n para obtenção da distribuição granulométrica a partir de t_{10} .

2.3 Britadores tipo VSI

2.3.1 Características gerais e componentes

Os britadores VSI são fabricados em chapas de aço, eventualmente com reforços. É necessário prover portas de inspeção de dimensões compatíveis ou permitir a abertura da carcaça. Nos modelos grandes, isto pode exigir macacos hidráulicos ou outros dispositivos mecânicos. Internamente os equipamentos são revestidos de placas

de desgaste. Quando operando com materiais grudentos, úmidos ou plásticos, pode haver a tendência de entupimento. As soluções mais comuns são o uso de rotores reversíveis e alimentação central móvel, acionável em caso de atolamento (Chaves, 1999).

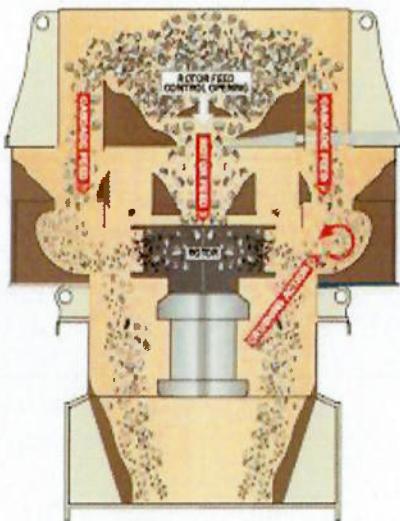


Figura 2.4 – Desenho de representação das partes internas do VSI

Os componentes principais dos VSI são: tubo de alimentação, rotor, comporta da cascata, câmara de britagem e chute de descarga.

2.3.2 Princípios de operação

Os VSI possuem um rotor que atua como uma bomba de alta velocidade. Este rotor exerce uma força sobre a rocha seca capaz de ejetar um fluxo contínuo de partículas diretamente a câmara de britagem do equipamento.

O material é alimentado pela parte superior da máquina sendo, na seqüência, acelerado pelo rotor e alcançando velocidades periféricas superiores a oitenta e cinco metros por segundo. A descarga do rotor também ocorre de forma contínua na câmara de britagem. Devido a este processo ocorre a formação de um forro dentro da câmara de britagem do equipamento que promove a ação de fragmentação rocha-contra-rocha.

Um segundo fluxo de material pode ser alimentado sob a forma de cascata na parte lateral do rotor. Isto cria uma turbulência e um acúmulo de partículas dentro da câmara de britagem com potencial melhoria na energia transferida. Em combinação com outras variáveis de processo como diâmetro do rotor, velocidade e perfil da câmara de britagem, a cascata pode reduzir o desgaste e ainda fornecer um controle eficiente dos mecanismos de cominuição.

Para fornecer as condições ideais de alimentação, um silo deve ser colocado antes do britador. Este silo garante uma alimentação consistente para o VSI que é vital para manter cheia a câmara de britagem proporcionando uma operação equilibrada.

2.3.3 Fragmentação do produto

A fragmentação do produto do VSI é influenciada pelas seguintes variáveis:

- Velocidade do rotor;
- Efeito cascata;
- Granulometria da alimentação;
- Características do material

a) Velocidade do Rotor

À medida que aumenta a velocidade do rotor, maiores relações de redução ocorrem na câmara de britagem. Isto também está relacionado com uma maior geração de finos.

A seleção da velocidade do rotor é função da aplicação no processo. Maiores velocidades de rotação (acima de 50 m/s), principalmente para a britagem fina, resultam em maiores relações de redução, melhorando o formato de partícula e gerando grande quantidade de finos (menor que 4,75 mm). Baixas velocidades de rotação (menores que 50 m/s) são usadas geralmente para britagem branda e desaglomeração.

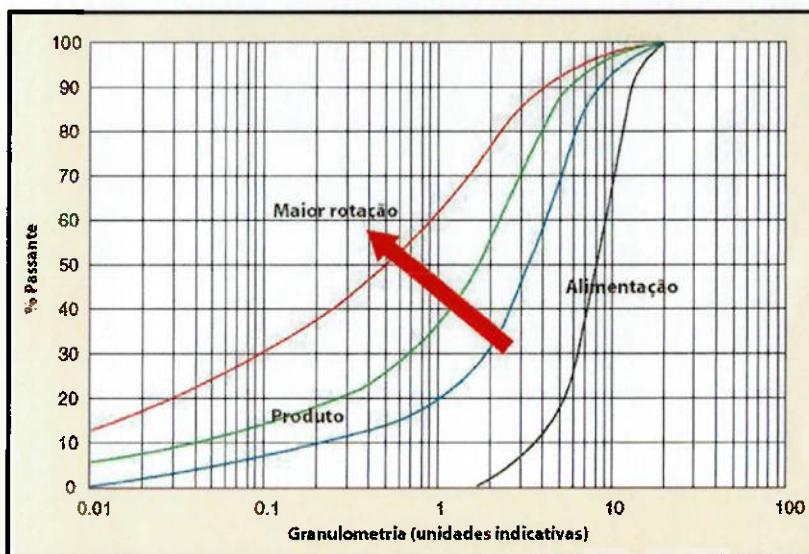


Figura 2.5 – Distribuição granulométrica do produto em função da velocidade do rotor

b) Efeito Cascata

Além do fluxo pelo rotor o material que entra no VSI tem a possibilidade de fluir na câmara de britagem via comporta de cascata. A combinação entre o fluxo da cascata e o fluxo do rotor permite ajustar o produto do equipamento.

Os benefícios obtidos pelo fluxo de cascata variam dependendo das características do material, alimentação e a seleção dos parâmetros do equipamento. Experiências em campo mostram que materiais com durezas brandas e médias fragmentam mais rapidamente na cascata que materiais duros (Metso Manual de Aplicação, 2002).

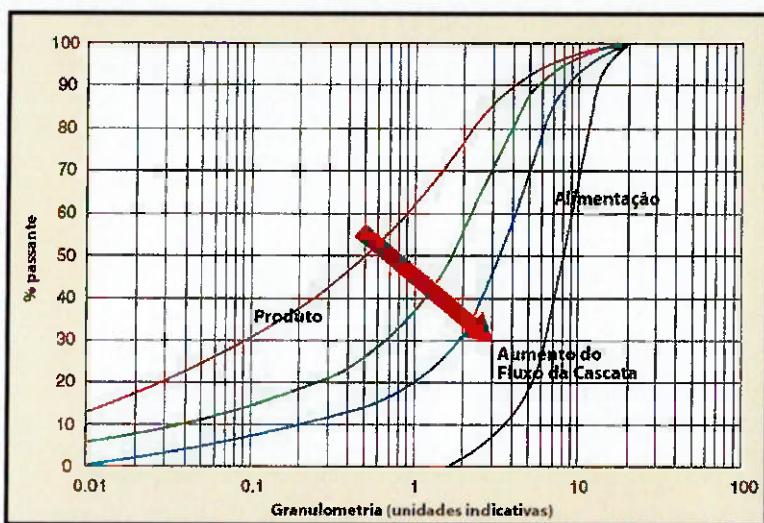


Figura 2.6 – Distribuição granulométrica do produto em função do fluxo de cascata

c) Granulometria de alimentação

O tamanho da maior partícula na alimentação determina a fluidez dos sólidos pelo tubo de alimentação. Tamanhos grandes podem causar entupimento e danos no equipamento. Esse fator é particularmente importante face à alimentação geralmente bitolada do equipamento.

d) Características do material

À medida que aumenta a resistência dos minerais, ocorrem menores relações de redução na câmara de britagem. Materiais abrasivos são responsáveis pelo maior desgaste de peças.

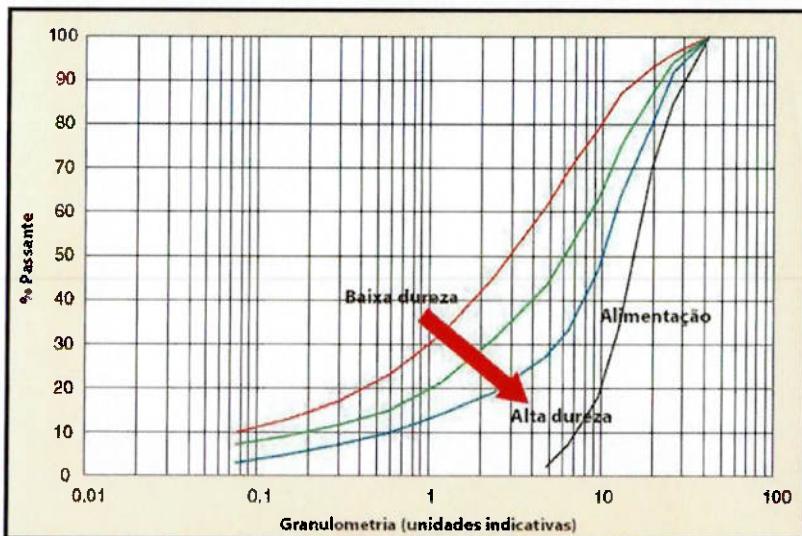


Figura 2.7 – Distribuição granulométrica do produto em função da dureza do material

2.3.4 Principais aplicações

Equipamentos VSI são empregados em pedreiras principalmente em função de produzir agregados de alta qualidade e formato cúbico. Aplicações típicas dos VSI são na produção de base para rodovias, pedrisco para capa selante, agregados para concreto e asfalto e areia artificial.

Nestas aplicações, podem ser operados em circuito aberto ou fechado, dependendo dos tipos de agregados e das especificações exigidas.

Na mineração (minerais metálicos), os VSI podem ser usados por sua alta capacidade e possibilidade de gerar produtos de granulometria bem fina, tais como material para alimentação de moinhos, *sinter feed* ou para operações de lixiviação.

Alumina Fundida Branca	Diorito	Nitrato de Sódio
Alumina Fundida Marrom	Dolerito	Norito/Anortita
Andesito	Dolomita	Ouro
Arenito	Escória de Aço	Perlita
Arenito Cinza	Escória de Cobre	Picrato
Barita	Escória de Flandres	Pórfiro
Basalto	Ferro-cromo	Produtos Cerâmicos
Bauxita	Ferro-manganês	Púmice
Bauxita Chinesa	Fosfato	Quartzito
Brecha	Giz	Quartzo Jasperóide
Calcário	Grafite	Refugo de Porcelana
Calcário Oolítico	Granada	Riolito/Dacito
Carbeto de Silício	Granito	Riolito Silicoso
Carborundo	Greda	Sal
Carvão	Grés	Sienito Nefelinico
Cascalho	Magnesita	Sílex Cárneo
Cascalho Moraine	Magnesita Calcinada	Sílex Pirônaco
Cassiterita	Magnetita	Sílica
Chalcocita	Malaquita	Silte
Cinza Fina Calcinada	Minério de Cobre	Toscanita
Clinquer de Cimento	Minério de Pb/Zn/Ag	Xisto
Conglomerado	Minério de Prata	Zeólito
Coque	Mulita	Zirconita

Figura 2.8 – Aplicações para VSI

2.4 Modelagem e simulação de processos

2.4.1 Modelos de cominuição

Historicamente a modelagem de circuitos de cominuição possui grande dependência da capacidade de processamento dos computadores devido à necessidade de um grande número de cálculos. Antes dos computadores, todos os modelos relacionavam energia aplicada a uma característica do produto gerado.

Em termos matemáticos, significa considerar um incremento de energia necessário para produzir um incremento de mudança, em termos de tamanho considerado.

Pesquisadores dos séculos XIX e XX aplicaram algumas idéias da física para desenvolver modelos e equações que tentassem descrever alguns processos. Kick em

1883 estabeleceu uma relação de energia constante por unidade de massa para uma relação de redução equivalente. Rittinger em 1867 considerou a energia constante por unidade de área superficial gerada.

Bond em 1952, com base em dados industriais propôs que a energia consumida é inversamente proporcional à raiz quadrada da abertura pela qual passam 80% do produto (P80).

Hukki em 1961 avaliou as regiões de aplicabilidade dos modelos até então existentes e obteve o diagrama da Figura 2.9. Para tamanhos próximos aos de britagem, a relação de Kick é apropriada. A teoria de Bond aplica-se a moinhos de barras e bolas. Para tamanhos menores, a teoria de Rittinger é mais apropriada.

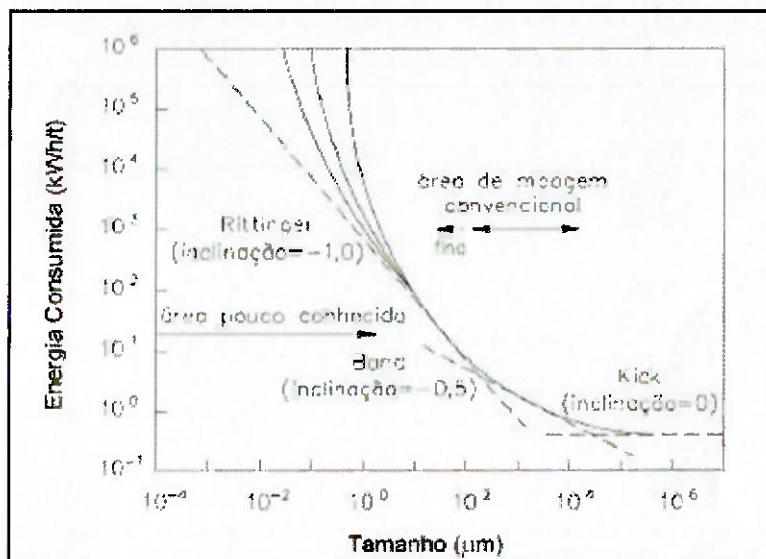


Figura 2.9 – Relação entre energia e tamanho de partícula

2.4.2 Classes de modelos para cominuição

Os modelos descritos no item anterior baseiam-se em relações globais entre energia e fragmentação e não consideram, por exemplo, a movimentação das partículas ou a quantidade de energia que não resulta em quebra.

Os modelos atuais podem ser classificados em aqueles que consideram apenas a distribuição de tamanhos da alimentação e do produto e outros que consideram as interações de cada elemento dentro do processo. Obviamente estes últimos, ou modelos fundamentais, requerem capacidade computacional muito mais elevada. Os modelos da primeira classe são de natureza empírica ou fenomenológica.

Os modelos fenomenológicos têm por base distribuições granulométricas de entrada e saída e as características da quebra. São, portanto, modelos baseados nos fenômenos de fragmentação, pouco enfatizando os princípios físicos envolvidos. Como exemplos podem ser citados os modelos do tipo balanço populacional (Napier-Munn *et al.*, 1996).

2.4.3 Modelos fenomenológicos

A base de modelos fenomenológicos é a linguagem matricial, que trata fluxos como vetores nos quais estão as distribuições granulométricas. Desta maneira, a função quebra, para um determinado tamanho, se torna um vetor de frações de partículas quebradas.

Alguns pesquisadores preferem funções contínuas ou integrais paramétricas ao invés de usar somatórios. Entretanto, funções analíticas não são necessariamente fiéis aos dados que representam.

2.4.4 Modelo de VSI

O modelo de Kojovic tem por base a energia aplicada à partículas individuais. O modelo assume que cada partícula se apropria de uma energia específica como consequência de sua aceleração gerada pela velocidade periférica do rotor.

$$\text{Energia por partícula (Ecs)} = \frac{\text{Energia Cinética}}{\text{Massa}} = \frac{\frac{1}{2} v^2}{3600} \quad [\text{kWh/t}]$$

Como mencionado anteriormente, a relação entre energia (Ecs) e fragmentação (t_{10}) pode ser descrita como:

$$t_{10} = A(1 - e^{-b \cdot Ecs})$$

Onde A e b são os parâmetros obtidos nos ensaios DWT. Com o parâmetro t_{10} é possível prever a distribuição granulométrica a partir das funções normalizadas t_n vs t_{10} , conforme mostra a figura 2.3.

2.4.5 Simulação

Simulação é a previsão do comportamento do circuito, mediante a aplicação de modelos. Estão presentes em modelos fluxos de massa, de água, à concentração de sólidos, à distribuição de tamanhos de partículas, à potência consumida, sendo tais previsões funções das propriedades dos minérios, das especificações dos equipamentos e das condições de operação.

O ponto forte da simulação como ferramenta para otimização é a sua capacidade de propiciar diferentes cenários de modo rápido e eficaz. Assim, a simulação permite a projeção de condições de operação de circuitos industriais, base, portanto, para o direcionamento de medidas de redução de custos, atendendo especificações.

Os modelos mecanísticos utilizados em simulação têm por base dois grupos de parâmetros. O primeiro consiste nas características do minério e, o segundo, nas características do equipamento. Evidentemente, a fidelidade das simulações é função da qualidade das informações de entrada dos modelos para representar a operação do VSI..

A otimização, deve assim seguir a seguinte seqüência: (1) a caracterização do material da alimentação, (2) a estimativa dos parâmetros do equipamento, (3) a execução de simulações com alterações de condições operacionais, configuração do circuito, parâmetros do equipamento etc., e (4) a verificação ou implementação das condições selecionadas. (Napier-Munn *et al.* 1996).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Ensaio em laboratório - DWT

O método de ensaio escolhido para caracterizar o material sob aspecto de resistência ao impacto foi o DWT, desenvolvido pelo JKMR (Julius Kruttschinitt Mineral Research Center, Austrália).

O ensaio DWT padrão consiste na aplicação de impacto para cinco frações granulométricas sob três níveis de energias específicas por fração, constituindo, portanto, 15 lotes com até 30 fragmentos por amostra, conforme descrito na Tabela abaixo:

Tabela 3.1 – Configurações dos lotes para ensaio DWT

Fração (mm)	Lote	Fragmentos	ECS (kWh/t)
-63,0 +53,0	1	10	0,40
	2	10	0,25
	3	10	0,10
-45,0 +37,5	4	15	1,00
	5	15	0,25
	6	15	0,10
-31,5 +26,5	7	30	2,50
	8	30	1,00
	9	30	0,25
-22,4 +19,0	10	30	2,50
	11	30	1,00
	12	30	0,25
-16,0 +13,2	13	30	2,50
	14	30	1,00
	15	30	0,25

A primeira etapa consistiu em selecionar partículas para a execução de ensaios DWT. As partículas foram coletadas em pilhas cônicas previamente preparadas sendo que o material estava bitulado entre 25 e 10 mm. Assim os ensaios foram executados somente para as duas menores frações do DWT que são -22,4 + 19,0mm e -16,0 + 13,2mm.

Foram realizados, portanto, seis ensaios para cada tipo de minério, variando a energia específica aplicada. Para o Granito Cantareira realizamos três ensaios na faixa - 22,4 + 19,0mm variando a energia específica em 0,25; 1,0; e 2,5 kWh/t, seguidos de mais três ensaios na faixa -16,0 + 13,2mm. Para o Basalto foi executado o mesmo procedimento.

Após cada ensaio, o material foi recolhido e enviado ao peneiramento. Com o resultado da análise granulométrica foi possível calcular o valor de t_{10} .

De posse do gráfico dos valores experimentais foi possível construir a curva Ecs vs t_{10} . Utilizando a ferramenta *solver* do Excel foi possível encontrar os valores dos parâmetros A e b que melhor ajustavam os resultados experimentais, conforme fórmula (2).

3.2 Ensaios na planta piloto – Barmac 3000

A planta piloto possui três equipamentos principais. Um silo, um alimentador de correia e um britador de impacto de eixo vertical, modelo Barmac 3000.

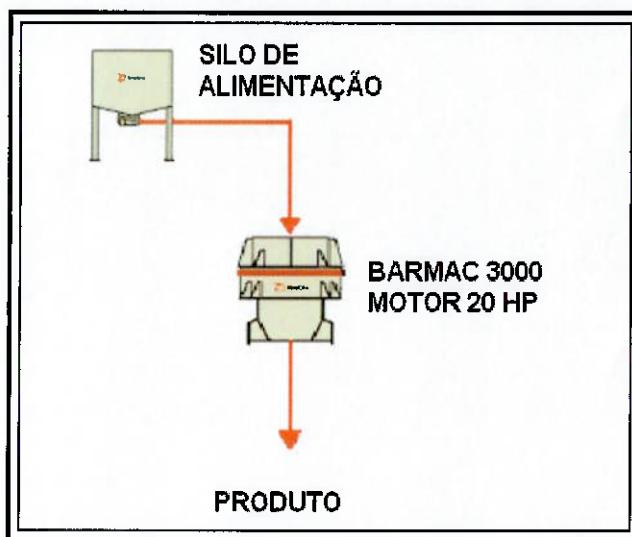


Figura 3.1 – Fluxograma da planta piloto

Os ensaios foram realizados em circuito aberto, conforme mostra a Figura 3.1. Para iniciar o ensaio foi necessário carregar e transportar o material até o silo de alimentação usando uma pequena pá carregadora. Durante todo o teste a taxa de alimentação foi controlada através da medida da corrente do motor do Barmac 3000. Todo o ensaio foi monitorado dentro de uma sala de controle e foi possível variar a vazão de alimentação e a velocidade de rotação do rotor de forma a garantir a maior estabilidade de processo.

Como padrão de ensaio foi estipulado cinco minutos de operação para cada velocidade. Este tempo foi suficiente para encher a câmara de britagem com o material e assim estabilizar o sistema.

Após cada ensaio o circuito foi parado e um metro de material das correias de alimentação e produto foi submetido ao peneiramento.

3.3 Modelagem

O modelo de Whiten para britadores está baseado nas etapas sucessivas de seleção e fragmentação, conforme ocorrem na câmara de britagem. A etapa de seleção tem por base a função abaixo descrita.

$C(x) = 0.0$	$x < K_1$
$C(x) = 1.0 - \left(\frac{K_2 - x}{K_2 - K_1}\right)^{K_3}$	$K_1 < x < K_2$
$C(x) = 1.0$	$x > K_2$

(3)

Fragments maiores que certo tamanho (K_2) são sempre selecionados para quebra. O parâmetro K_1 define o tamanho máximo abaixo do qual não há fragmentação. Entre os dois parâmetros, K_1 e K_2 , o parâmetro K_3 define a seleção das partículas que serão fragmentadas. No modelo aqui desenvolvido foi utilizada a função classificação de Whiten.

A função quebra foi definida de acordo com a seguinte seqüência. Primeiramente foi inserida uma constante K na equação da energia específica de comunicação no modelo de Kojovic.

- $E_{cs,corr} = K \cdot \frac{\text{Energia Cinética}}{m} = K \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot v^2}{3600} \quad [\text{kWh/t}]$

A partir da energia específica corrigida usamos a equação (2) para determinar o parâmetro de quebra.

- $t_{10} = A [1 - \exp(-b \cdot E_{cs,corr})]$

Uma vez definido o parâmetro t_{10} a distribuição granulométrica completa é calculada mediante a aplicação das funções normalizadas t_n vs t_{10} , conforme mostrado na Figura 2.3.

Os principais motivos para a introdução desta constante foram:

1. A velocidade da partícula pode não ser a mesma do rotor,
2. A partícula pode sofrer fragmentação de segunda, terceira ou mais ordens dentro da câmara de britagem,
3. O mecanismo de colisão pode ocorrer de diversas maneiras:
 - Contra o colchão interno de material protetor
 - Contra outra partícula em movimento
 - Contra o próprio revestimento da câmara de britagem

2. A partícula pode sofrer fragmentação de segunda, terceira ou mais ordens dentro da câmara de britagem,
3. O mecanismo de colisão pode ocorrer de diversas maneiras:
 - Contra o colchão interno de material protetor
 - Contra outra partícula em movimento
 - Contra o próprio revestimento da câmara de britagem

A consequência deste ajuste foi a modificação do parâmetro de fragmentação do material permitindo a avaliação de sua influência no resultado final.

A Figura 3.2 ilustra o funcionamento do modelo criado. O “vetor f ” de alimentação é multiplicado pela “matriz C” (*função classificação*). O material é então dividido em dois fluxos, o fluxo que sofre e o que não sofre cominuição. O fluxo que não sofre cominuição segue diretamente ao produto e o fluxo que sofre cominuição entra em uma segunda matriz, a “matriz A” (*função quebra*) que fornece a granulometria do produto da quebra destas partículas.

Este fluxo de material fragmentado se junta ao fluxo de material não fragmentado para formar o “vetor p ”, produto final do processo.

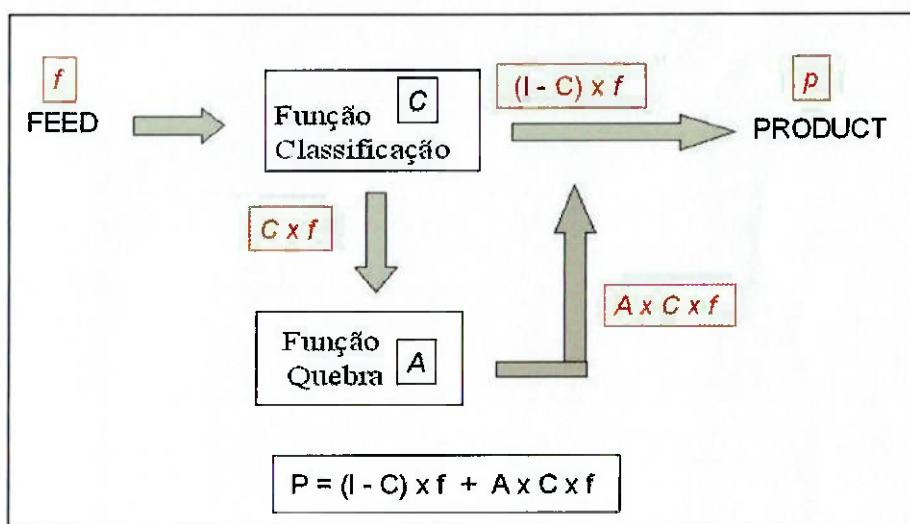
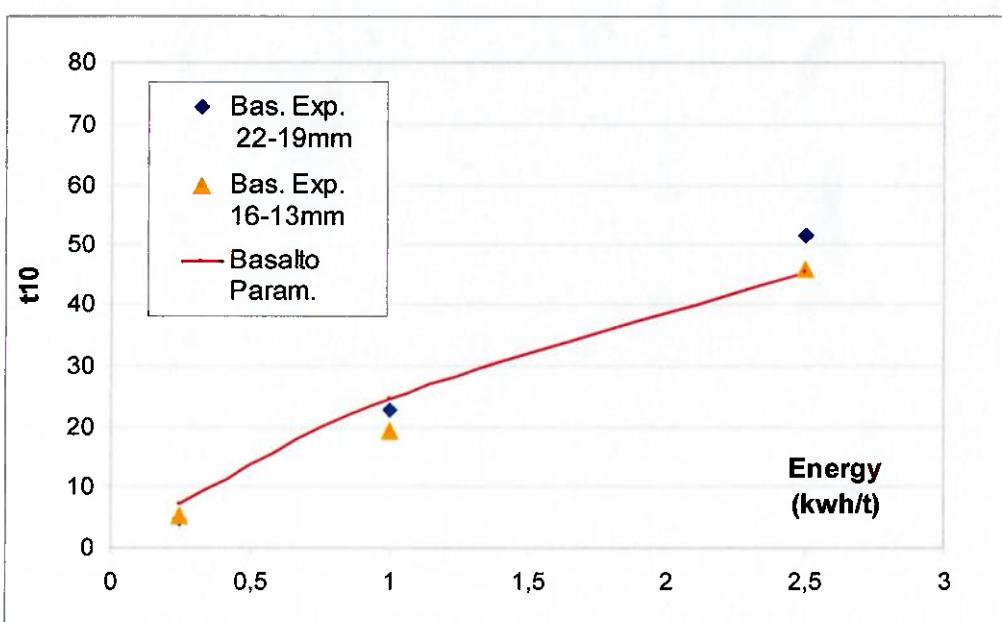
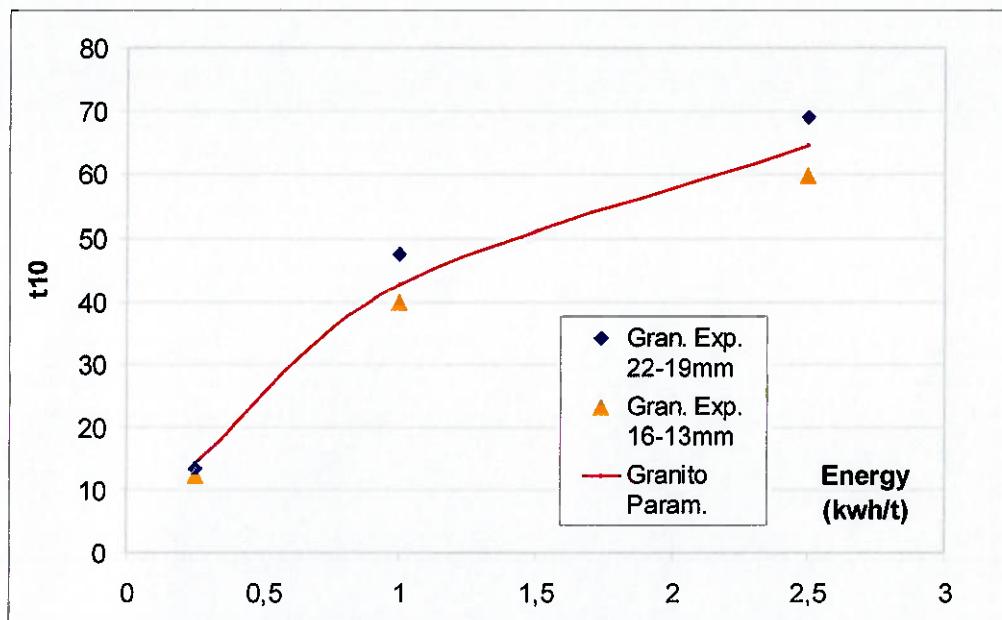


Figura 3.2 – Esquema representativo do modelo

4 RESULTADOS

4.1 Resultados DWT

Os gráficos apresentados abaixo mostram os valores experimentais t_{10} vs E_{cs} e a curva parametrizada dos valores de t_{10} associados às respectivas energias específicas de cominuição para o Granito Cantareira e Basalto Splice, conforme obtido pelos respectivos ensaios DWT.



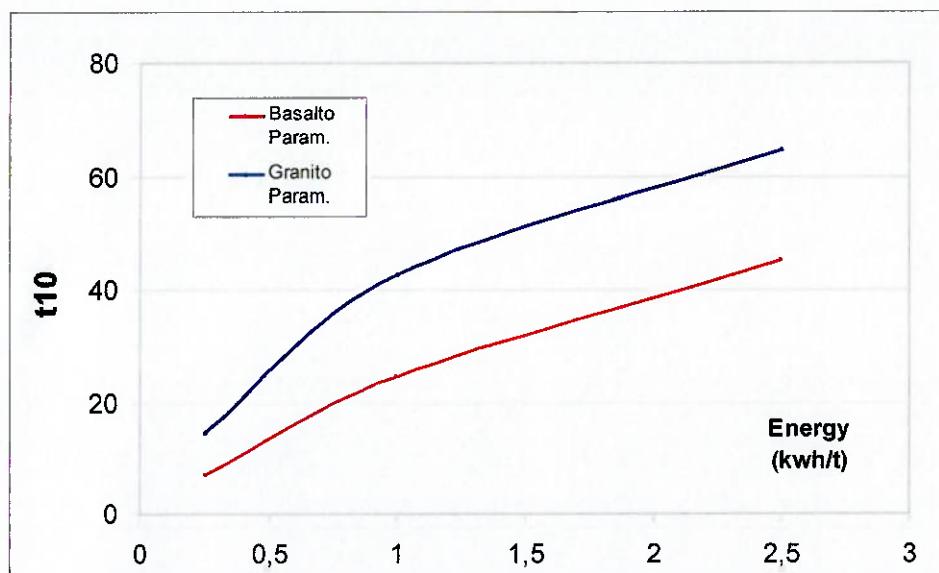


Figura 4.3 – Curvas $t_{10} \times Ecs$ para ambos os minerais

A tabela a seguir mostra os valores de A e b para cada mineral, obtido a partir de regressões, e o valor de Axb, parâmetro que representa a resistência à fragmentação por impacto.

Tabela 4.1 - Parâmetros do DWT para cada amostra

	GRANITO	BASALTO
A	72,44	65,381
b	0,891	0,4698
A*b	64,54	30,72
RESISTENCIA AO IMPACTO	MODERADAMENTE BAIXA	MUITO ALTA

4.2 Resultados dos ensaios em planta piloto

Os gráficos abaixo representam as distribuições granulométricas da alimentação e dos produtos gerados pelo Barmac 3000 operando nas três diferentes velocidades de rotação.

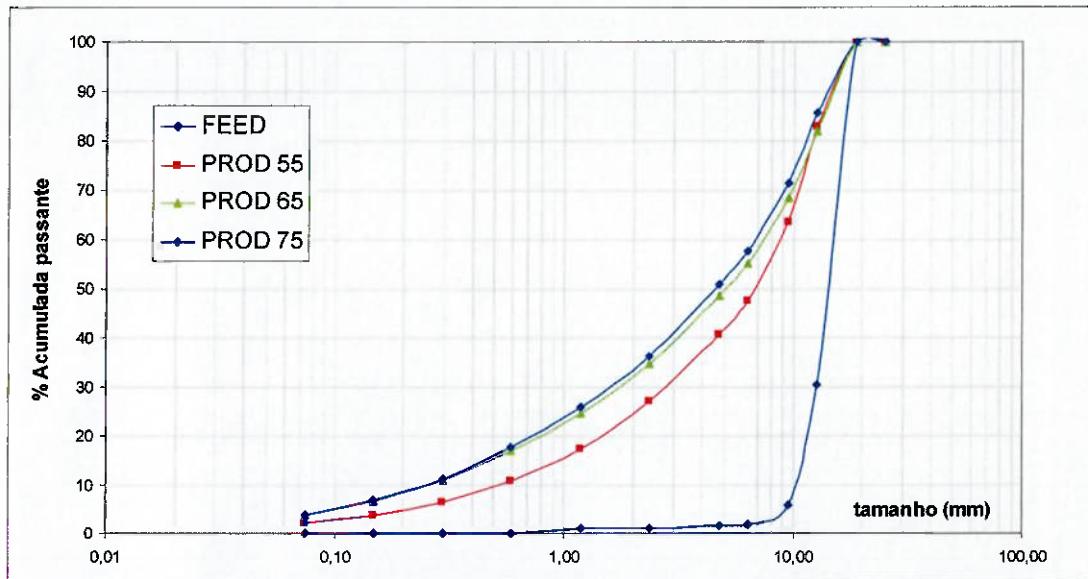


Figura 4.4 – Distribuições granulométricas experimentais – Granito - 55, 65 e 75 m/s

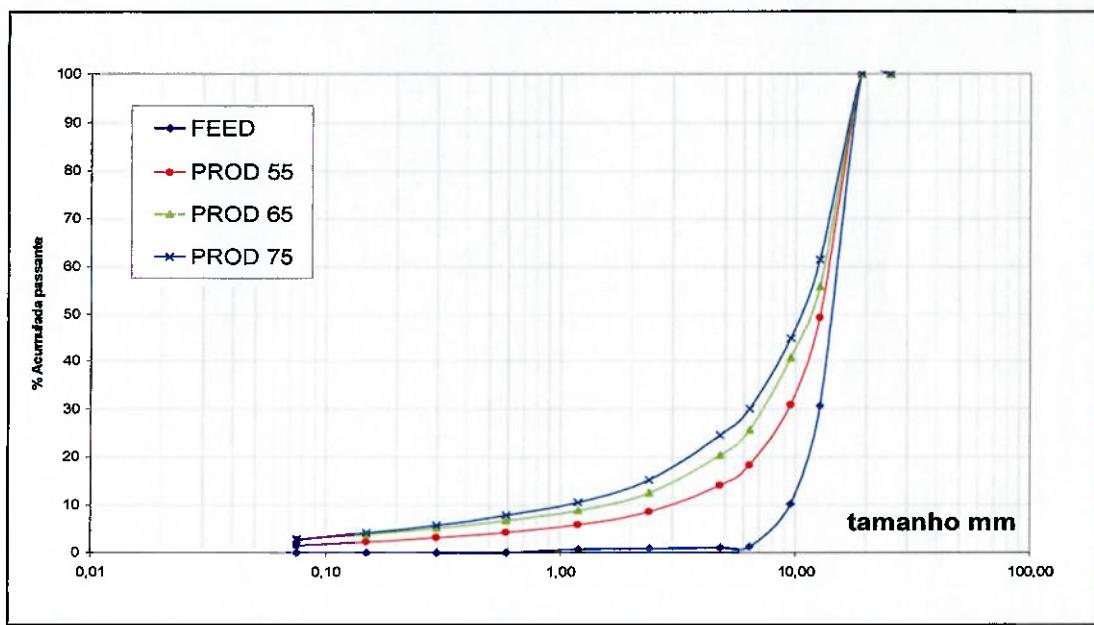


Figura 4.5 – Distribuições granulométricas experimentais – Basalto - 55, 65 e 75 m/s

4.3 Resultados do modelo desenvolvido

Os gráficos abaixo mostram um comparativo entre as distribuições granulométricas dos produtos gerados pelo Barmac 3000 e as distribuições granulométricas dos produtos obtidos pelo modelo desenvolvido, segundo as velocidades de rotação.

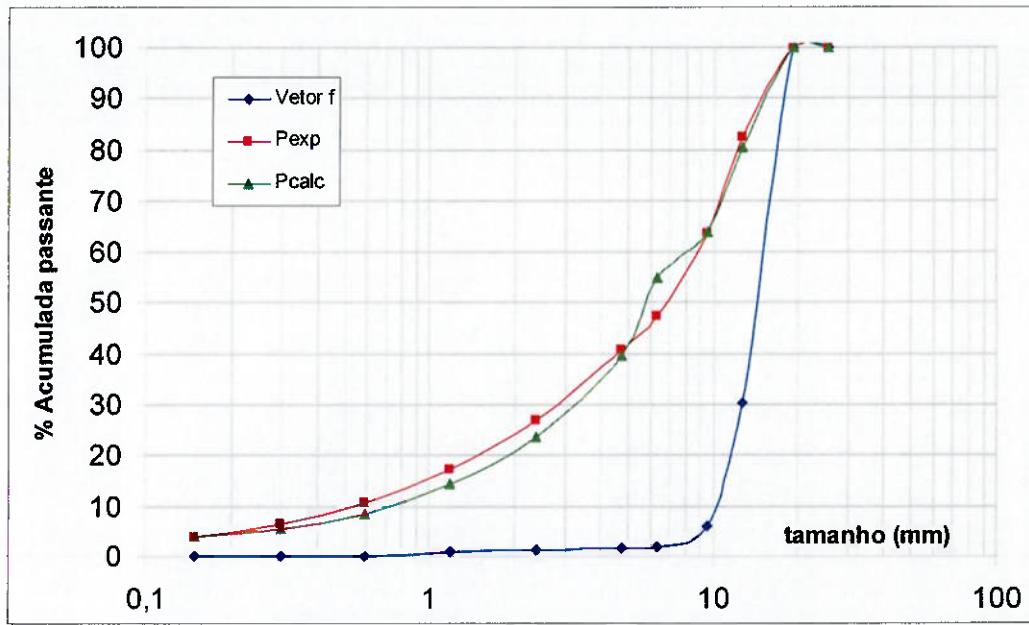


Figura 4.6 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Granito – 55 m/s

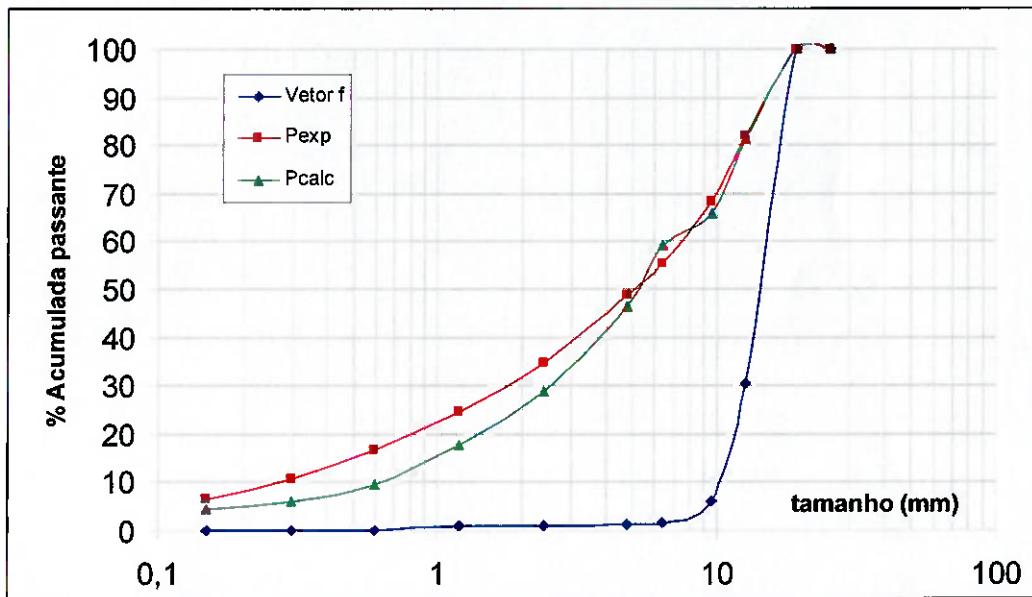


Figura 4.7 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Granito – 65 m/s

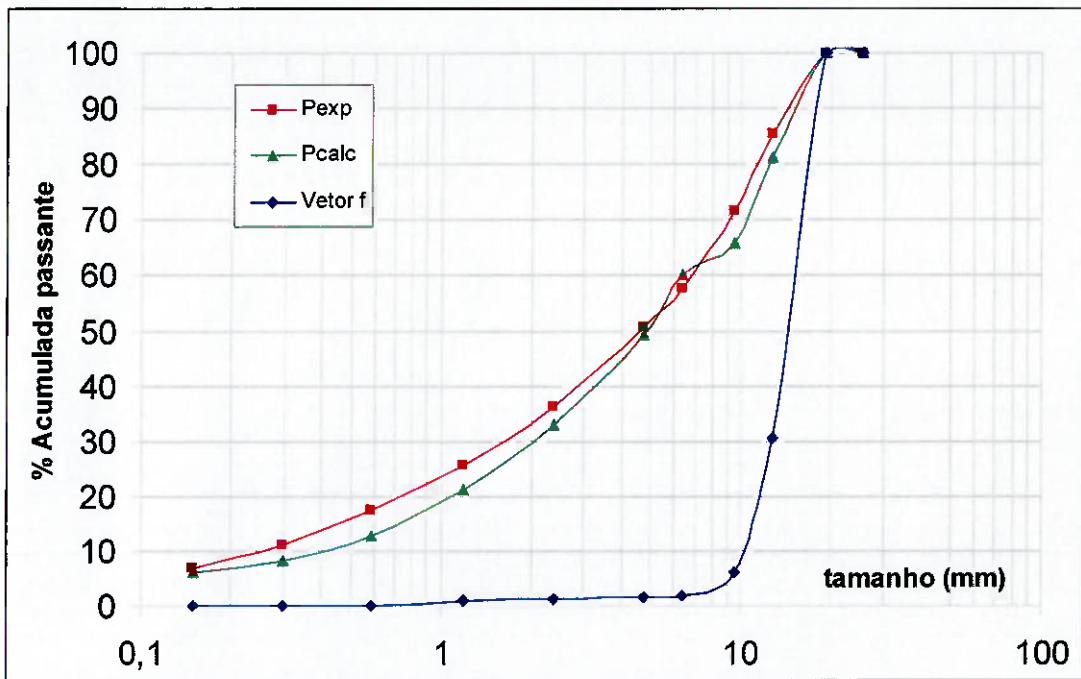


Figura 4.8 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Granito – 75 m/s

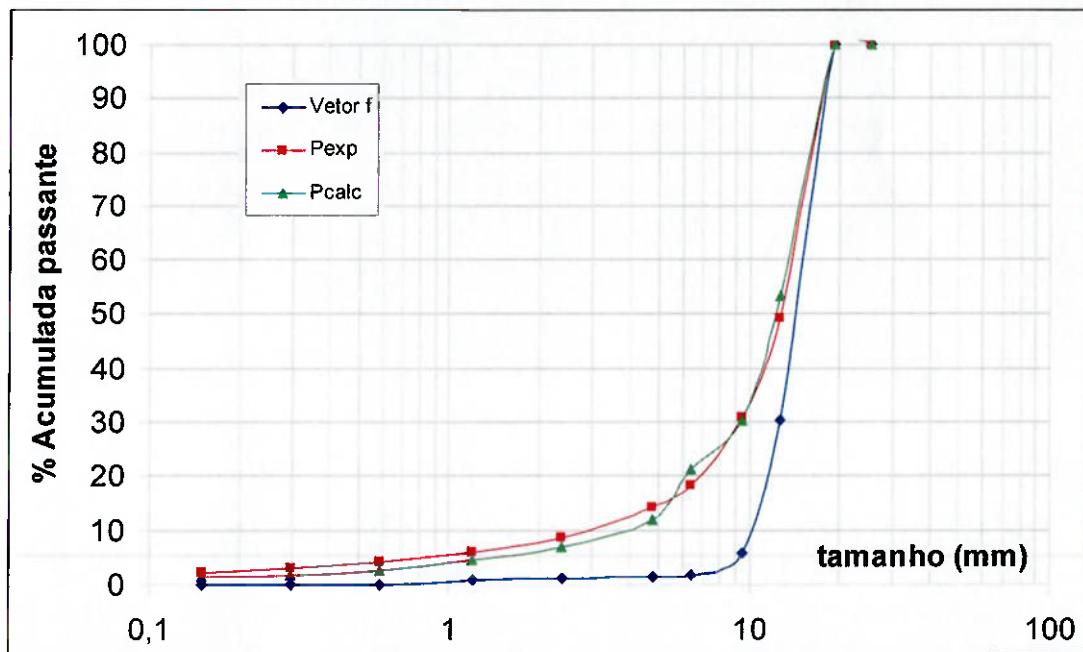


Figura 4.9 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Basalto – 55 m/s

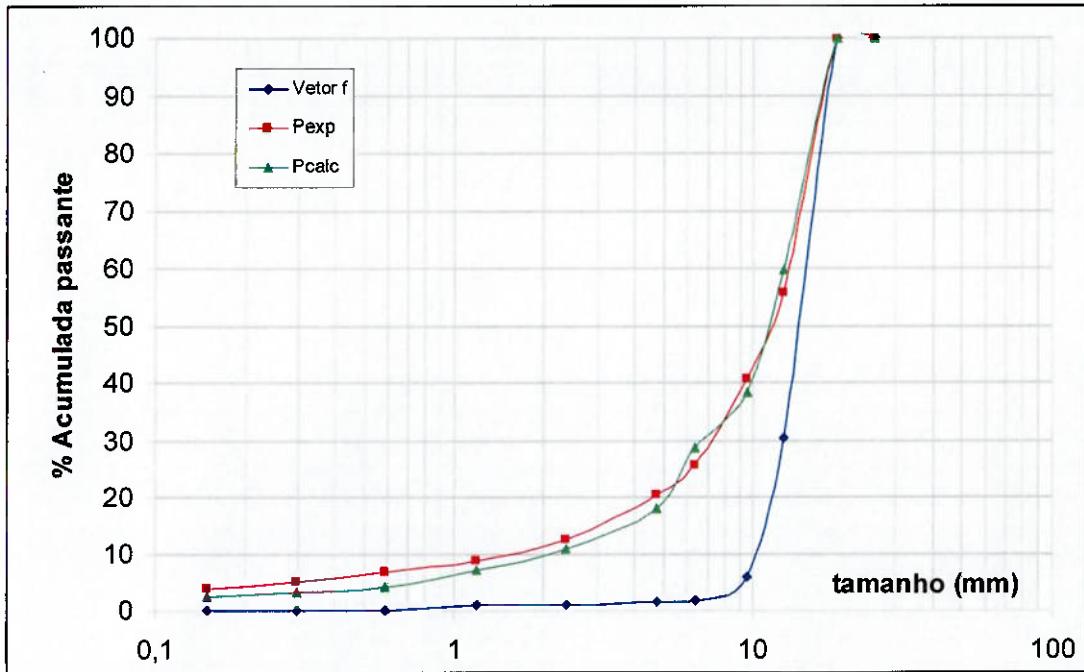


Figura 4.10 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Basalto – 65 m/s

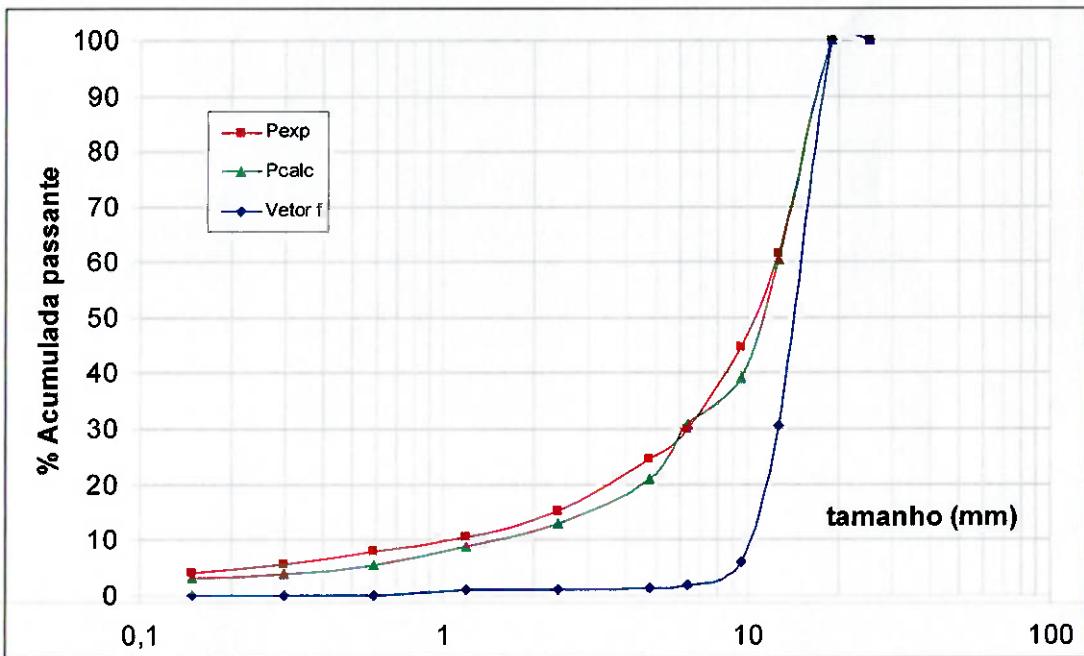


Figura 4.11 – Distribuições granulométricas exp. e cal. – Basalto – 75 m/s

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como visto nos resultados de DWT, o basalto possui uma resistência muito maior ao impacto se comparado ao granito.

Nos testes em planta piloto foi observado que quanto maior a velocidade periférica de rotação do VSI, maior a fragmentação do material. Para o granito operando em velocidade média (65 m/s) a redução pode ser observada pelas porcentagens passantes acumuladas em 80 e 30%.

- $f_{80} = 17 \text{ mm}$ e $p_{80} = 11 \text{ mm}$
- $f_{30} = 10,5 \text{ mm}$ e $p_{30} = 2 \text{ mm}$

No caso do basalto esta relação redução diminui bastante comprovando a dureza do mineral.

- $f_{80} = 17 \text{ mm}$ e $p_{80} = 15 \text{ mm}$
- $f_{30} = 10,5 \text{ mm}$ e $p_{30} = 7,5 \text{ mm}$

A aplicação do modelo indicou os seguintes valores para as constantes K1, K2 e K3.

Tabela 5.1- Valores das constantes da função classificação

	GRANITO	BASALTO
K1	7	7
K2	18	18
K3	1,8	0,6

Os valores de K1 e K2 foram os mesmos, tanto para o Granito quanto para o Basalto. A única variável de ajuste da *função classificação* foi a constante K3. Vale ressaltar que os valores de K1 e de K2 ficaram muito próximos aos valores do bottom size e top size da alimentação, respectivamente.

O valor numérico da constante K (*função quebra*) que melhor se ajustou aos resultados experimentais foi K = 2,0. Conforme mostrado no item 3.3 a maior energia fornecida à fragmentação é aqui analisada como fragmentações sucessivas na câmara de britagem.

As Figuras 5.1 e 5.2 comparam os valores experimentais com os valores do modelo atual e do modelo desenvolvido para uma situação típica de ensaio.

Nota-se que o modelo atual apresentou mais finos na região dos grossos e mais grossos na região dos finos. As alterações feitas propiciaram maior aderência dos pontos melhorando a precisão de granulometria do produto.

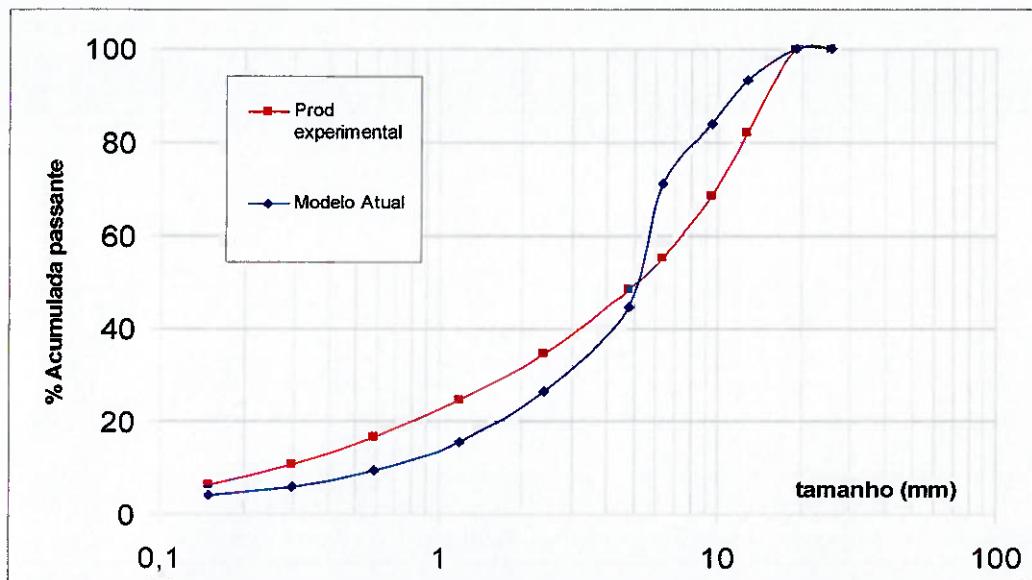


Figura 5.1 – Distribuição granulométrica do produto exp. e do modelo atual

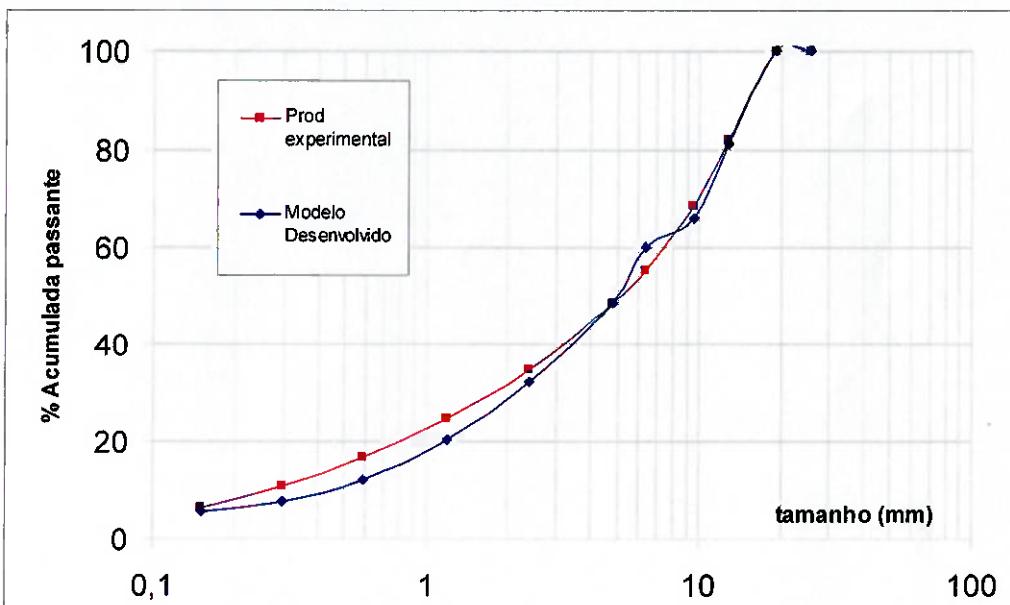


Figura 5.2 – Distribuição granulométrica do produto exp. e do modelo desenvolvido

6 CONCLUSÕES

Os resultados de ensaios em planta piloto demonstraram que:

- Maiores velocidades do rotor resultam em maiores fragmentações.
- O material caracterizado como de menor resistência apresentou granulometria de produtos mais fina no VSI em relação ao material de maior resistência.

O modelo aqui desenvolvido foi ajustado para representar de modo mais adequado os resultados experimentais. O ajuste consistiu no aumento de energia associado às quebras referentes a impactos de segunda ou mais ordens.

O modelo final apresentou resultados considerados razoáveis para representar os ensaios executados.

Recomenda-se uma base de dados mais ampla para o desenvolvimento de ajustes, de forma a tornar o modelo mais robusto.

7 REFERÊNCIAS

BERALDO, J.L. Objetivos da Cominuição & Teoria sobre Processos de Cominuição. In: **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**. São Paulo: Edgar Blücher, 1987. p.1-19.

CHAVES A.P. Britagem. In: **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios**. São Paulo: Signus Editora, 1999. p. 425.

CHIREGATI A.C. **Novo Método de Caracterização Tecnológica para Cominuição de Minérios**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, 2001.

FIGUEIRA H.V.O.; ALMEIDA S.L.M de. Cominuição. In: LUZ, A.B. da. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. p. 113-130.

KLIMPEL R.R.; AUSTIN L.G. Statistics of Random Fracture. In **Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers**, 1968. p. 219-224. v.4.

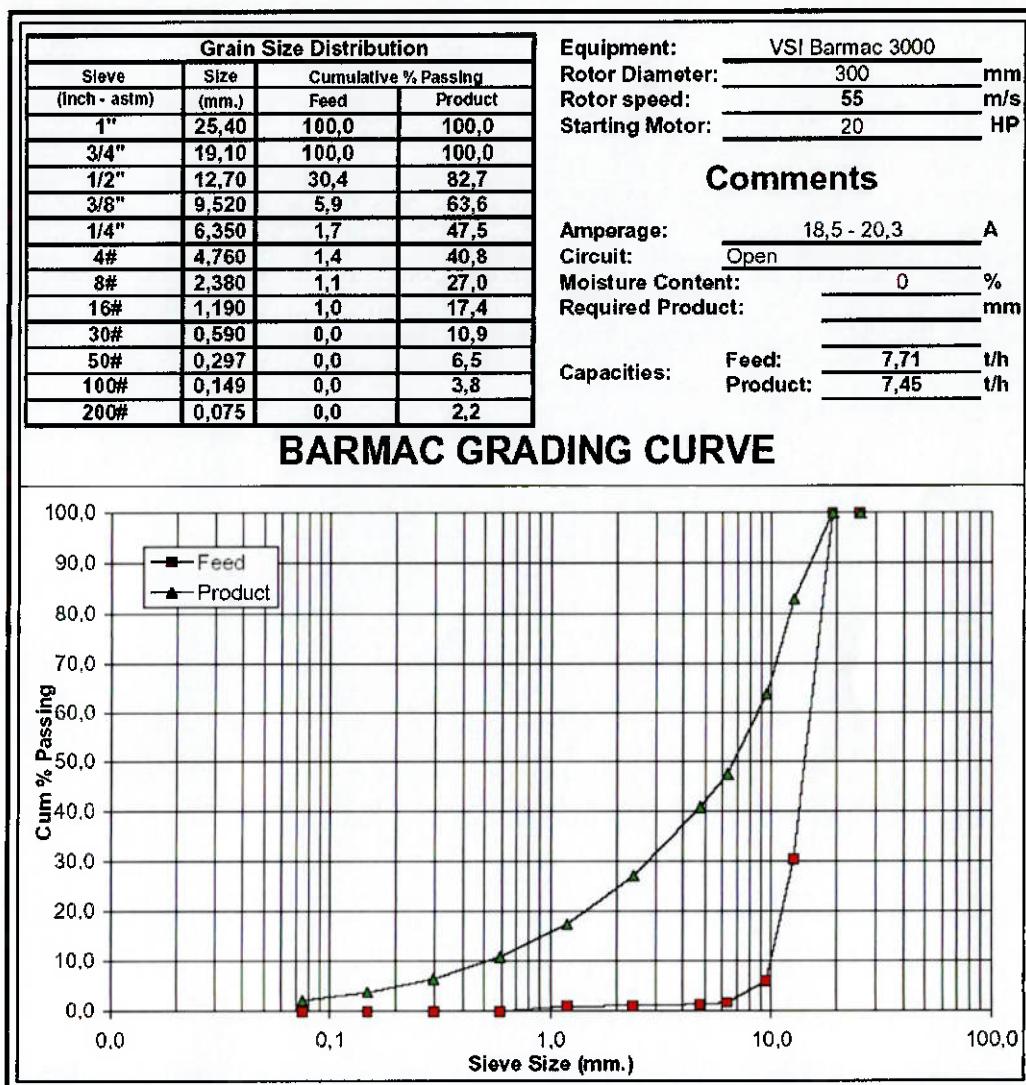
NAPIER-MUNN T.J.; MORREL, S.; MORRISON, R.D.; KOJOVIC, T. **Mineral Comminution Circuits – Their Operation and Optimisation**. Brisbane-AU: Napier-Munn,T.J. Ed., JKMR, 1996.

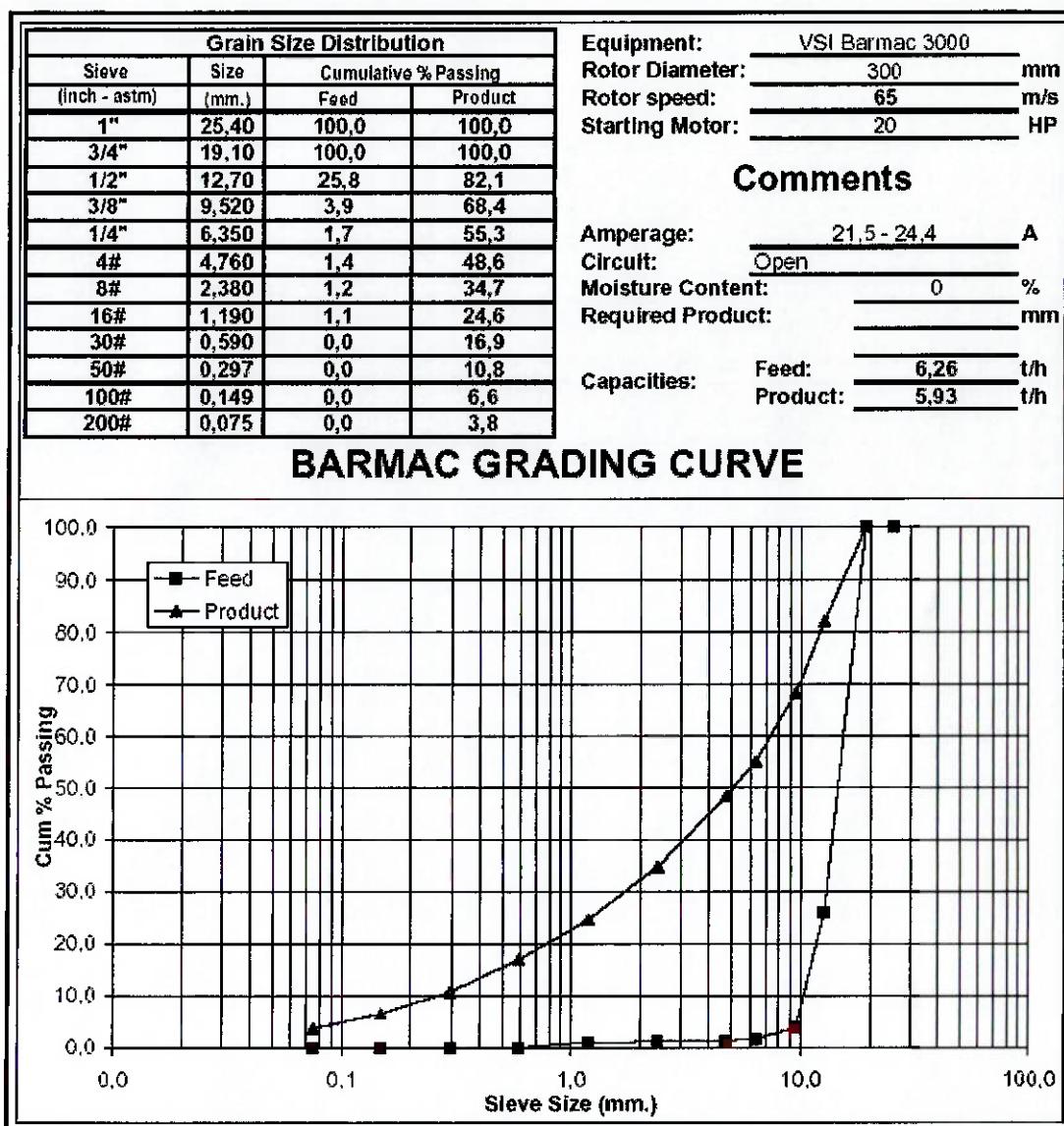
NARAYANAN S.S.; WHITEN W.J. **Breakage characteristics for ores for ball mill modeling**. Australian Institute of Mining and Metallurgy. n. 286, 1983

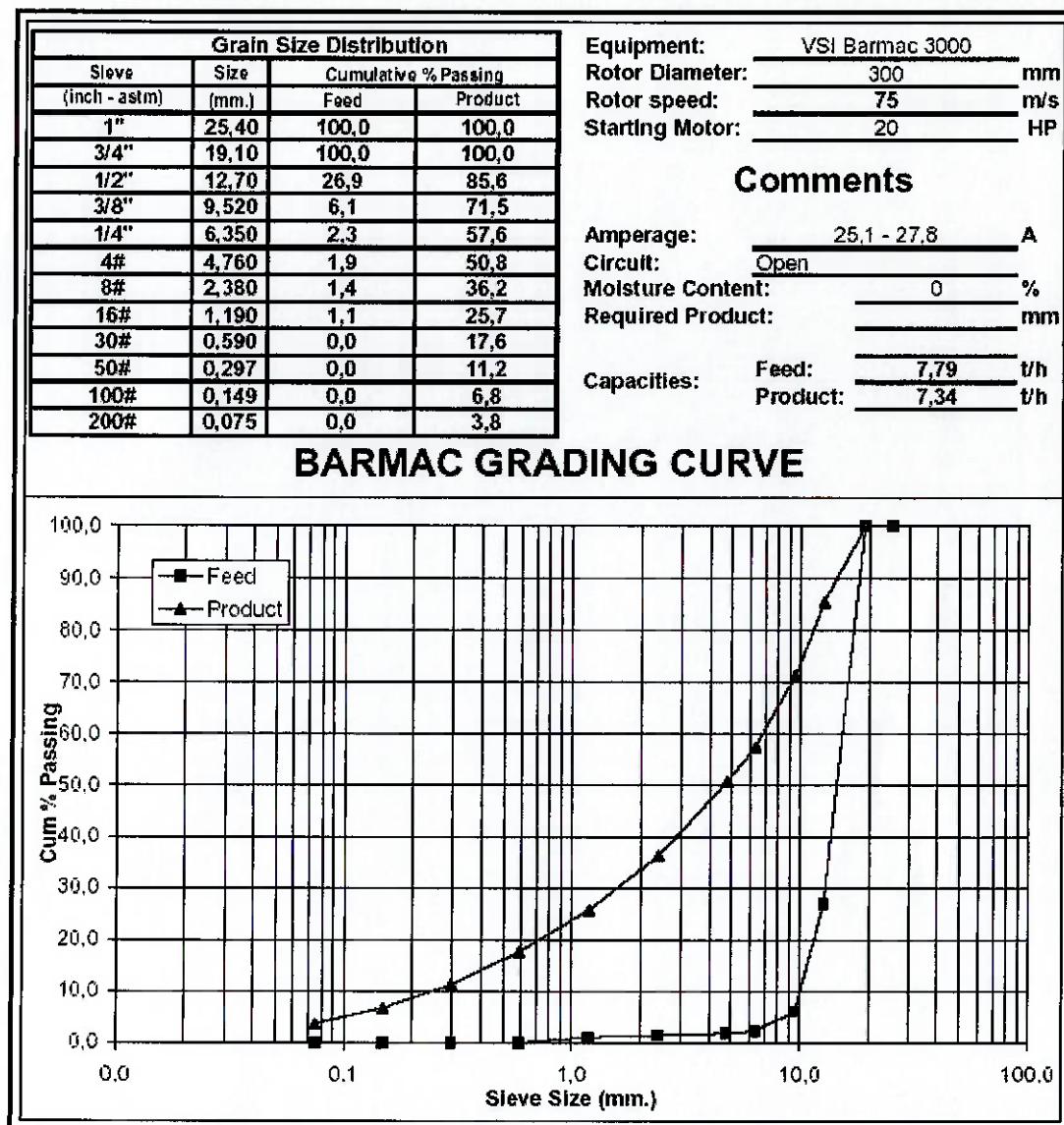
NARAYANAN S.S.; WHITEN W.J. **Determination of comminution characteristics from single-particle breakage tests and its application to ball-mill scale-up**. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section C, v.97, 1988. p.C115-124.

WHITEN, W.J. **Simulation and Model Building for Mineral Processing**. PhD. Thesis, University of Queensland, Australia, 1972.

ANEXO A – Resultados dos ensaios em planta piloto com o Granito







ANEXO B – Resultados dos ensaios em planta piloto com o Basalto

