

CARACTERÍSTICAS DE FRAGMENTAÇÃO E MICROESTRUTURAS DE
ROCHAS E SEU COMPORTAMENTO NA BRITAGEM PARA A PRODUÇÃO DE
AGREGADO

Patricia Bomfim das Neves

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.

Prof. Edson Farias de Mello, D.Sc.

Prof. Ericksson Rocha e Almendra, D.Sc.

Prof. Sérgio de Castro Valente, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2005

NEVES, PATRICIA BOMFIM DAS

Características de Fragmentação e Micro-
estruturais de Rochas e seu Comportamento na
Britagem para a Produção de Agregado[Rio de
Janeiro] 2005

XXI, 129p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de
Materiais, 2005)

Dissertação – Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Processamento Mineral

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

"Toda manhã em algum lugar da África,
uma gazela acorda e sabe que terá
que correr muito de um leão para
não morrer.

Toda manhã em algum lugar da África,
um leão acorda e sabe que terá que
correr muito atrás de uma gazela
para não morrer de fome.

Portanto, quando o sol surgir, não
importa se você é um leão ou uma
gazela, com certeza será melhor
começar a correr.

O único lugar em que o sucesso vem
antes do trabalho é no dicionário.
Não pare nunca, porque a vitória
sorri somente para aqueles que
não param no meio do caminho.

Sucesso é conseguir o que você quer,
felicidade é gostar do
que você conseguiu."

AGRADECIMENTOS

Durante o período do Mestrado muitas mudanças aconteceram na minha vida, umas muito boas, e outras nem tão boas assim...

Muitas vezes pensei em desistir, mas sempre tinha alguém ao meu lado e uma voz dentro de mim, que me indicavam que eu tinha que seguir em frente, não podia jogar tudo pro alto...

Agora estou aqui escrevendo os agradecimentos da minha tese, e um filminho está passando na minha mente... Quantas pessoas chegaram, quantas pessoas partiram, quantos acontecimentos, quantas dúvidas, quanta certeza, quanta ansiedade, quanta paciência, quanto desânimo, quanta força, quanta tristeza, quanta alegria... Enfim quanta confusão, um misto de sentimentos... Mas foram assim os últimos dois anos e meio da minha vida! Não foi fácil! Mas, cheguei ao fim!

Sempre tive bem claro em minha mente, que uma coisa que nunca podemos esquecer, temos que levar conosco a qualquer lugar, e muito bem guardada para que não se perca, é a gratidão. E por eu estar aqui hoje, escrevendo essas linhas, sou grata a muitas pessoas, algumas continuam ao meu lado, outras nem sempre estão, e há ainda aquelas que nunca mais vão estar. Entretanto, todas elas contribuíram, e muito, para minha tese chegar ao fim, mesmo que com um olhar, um sorriso, um aperto de mão ou um tapinha no ombro. Então, não posso deixar de agradecê-las e citá-las aqui.

Agradeço a Deus por SEMPRE se fazer presente em minha vida, me iluminando e guiando, para que seja possível tornar realidade todos os meus desejos.

Tenho que dizer também meu obrigada a minha família, meus pais e irmão, que me deram incentivo e apoio para chegar aqui.

Obrigada a todos os meus parentes, tios, tias, primos, primas, em especial a minha madrinha, pelos papos, sempre me incentivando, e não me deixando desistir... É madrinha, eu mergulhei de cabeça, entrega total... Ao querido tio Joacyr pelos elogios sem fim, que sempre me fazem olhar pra frente e ter vontade de lutar mais, e mais, para crescer e alcançar meus objetivos.

Meu agradecimento a todos os professores que direta ou indiretamente, contribuíram para que esta jornada chegasse ao fim. Em especial, ao Professor Marcelo,

pela orientação, pela troca de experiência, pelos puxões de orelha. Enfim, por ter me dado à oportunidade, e não ter me deixado desistir dela.

Tenho que registrar meu agradecimento ao Engenheiro Bernardo Piquet, por ter me apresentado ao mundo das pedreiras. Sua visão prática sobre o funcionamento de uma pedreira foi primordial para este projeto.

Agradeço a equipe da linha de pesquisa EDSM do grupo de estudos em petrologia do Departamento de Geociências da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e ao Professor Sérgio Valente, pelas análises mineralógicas e petrográficas realizadas. Obrigada ao pessoal do Instituto Geológico Mineiro, Eng. Machado Leite, Eng.^a Cristina e Eng. Farinha por terem contribuído com algumas análises microestruturais.

O pessoal do LTM também foi muito importante durante esse tempo, e quero dizer TODO o pessoal. Agradeço aos técnicos, Jacinto e João, e aos estagiários que muito contribuíram na parte experimental, e também não deixaram de me dar aquela força moral. A todos os colegas de laboratório que sempre estavam dispostos a ajudar, a dar uma mãozinha. Pelos pesados sacos de amostras, ou melhor brita, que me ajudaram a carregar, obrigadíssimo Edu, Alfredo e Emerson. Pela realização, organização e acompanhamento de ensaios na célula de carga de impacto para medida de energia, obrigada Alfredo, Marko e Emerson. Por sempre usar as peneiras reservadas para os projetos de pedreiras, valeu Marko. Não posso esquecer dos gatilhos do Carlos Magno, sempre pronto a dar um “jeitinho” em algo que não estava adequadamente funcionando, obrigada. Pelos serviços de consultoria em informática, obrigadão Emerson. Pela ajuda na análise de alguns resultados no MatLab, valeu, Rodrigo. Por ter encaminhado amostras para análise de fluorescência de raios-X, obrigada Roberta. Pelo exemplo do que é ser uma pesquisadora de verdade, valeu Marisa. Pela companhia na volta pra casa e os papos super construtivos, obrigadinha Nívia, desculpe, NívEa. Agradeço também ao grande amigo Edu, pelos toques e sugestões que muito contribuíram para este trabalho. Não posso deixar de lembrar do Tião, Patrícia, Zuin, Anderson, Camila, obrigada pessoal. Enfim, muito obrigada a todos do LTM, pela força, pelo apoio, pelo incentivo, pelos papos cabeça, pelos papos não cabeça, pelas bricadeiras, pela troca de experiência, enfim por tudo. Todos vocês são muito importantes pra mim, os levarei sempre no meu coração.

Agradeço também aos meus colegas de curso, pelas horas de estudos, trabalhos de grupo, brincadeiras... Aos amigos do Laboratório de Eletroquímica, Monique, Falcão e Izaura (Zora).

Não posso deixar de agradecer à minhas irmãs natecanas macaenses, Dri, Lu e Elô, por sempre estarem dispostas a oferecer uma palavra de incentivo e de carinho. Todos os momentos que passamos juntas em Macaé foram muito importantes pra mim, eu cresci muito. Claro que não vou esquecer das amigas Débora e Aline pela força. Meninas, sem vocês não teria sobrevivido em Macaé, e nem teria chegado aqui.

Meus mais sinceros agradecimentos aos amigos que sempre estiveram, diga-se de passagem, tenho certeza que sempre estarão, ao meu lado em todos os momentos sejam eles bons ou não, Fernando, Zuleica, Lourdes, Antônia, Luciana, Cássia, Elaine, Fernanda, Fernanda Minha Amiga, Camila, Babi.

Agradeço também às orações do Pe. Vanderson e Pe. Jerferson, apesar da distância, sei que de longe estavam sempre orando e dando força neste meu projeto. Obrigada também ao Pe. Mazine, pelas orações, pela presença, por me ouvir e pelo ombro amigo.

Muito obrigada também a todo o pessoal das empresas Pedreira Vigné, Pedra Sul Mineração, Pedreira Santa Luzia e Pedreira Embu, pelo fornecimento de amostras, dados, esclarecimento de dúvidas e apoio nas campanhas de amostragem.

O apoio financeiro do CNPq e da Finep (CT-Mineral) também foi muito importante para realização desse trabalho e por isso não posso deixar de agradecer.

Enfim eu gostaria de agradecer a todas as pessoas que direta e indiretamente contribuíram para minha formação, saibam que muitas vezes, um simples olhar, ou uma simples frase, um simples bom dia, me ajudaram e muito. Todos vocês foram muito importantes para mim, para eu chegar aqui.

MUITO OBRIGADA!

MUITO OBRIGADA!

MUITO OBRIGADA!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CARACTERÍSTICAS DE FRAGMENTAÇÃO E MICROESTRUTURAS DE
ROCHAS E SEU COMPORTAMENTO NA BRITAGEM PARA A PRODUÇÃO DE
AGREGADO

Patricia Bomfim das Neves

Dezembro/2005

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O comportamento de partículas no interior de britadores não é trivial, devido à complexidade do modo com que os esforços aplicados são distribuídos entre as partículas. Portanto, entender as características de quebra dos materiais pode facilitar a compreensão de tal comportamento. Este trabalho estuda as características de quebra de rochas provenientes de quatro unidades produtoras de brita, localizadas na região Sudeste do Brasil. As características de quebra foram determinadas a partir de ensaios com partículas individuais na célula de carga de impacto.

Observou-se que alguns materiais têm suas características de quebra fortemente dependentes do tamanho inicial de partícula, enquanto outros materiais não apresentam tal dependência. Esse fato está intimamente relacionado com a microestrutura do material. Em geral, materiais com grande quantidade de defeitos na sua microestrutura tendem a não apresentar dependência do tamanho inicial de partícula nas características de quebra. Por outro lado, materiais com pequenas quantidades de defeitos demonstram dependência do tamanho inicial de partícula.

Com base nos resultados da caracterização de quebra por impacto dos materiais foi possível estabelecer relações entre a fragmentação e a energia de cominuição, e prever o comportamento de tais materiais na britagem. Previsões da energia mínima de cominuição para os materiais foram comparadas com a energia consumida por britadores industriais tendo-se observado que a eficiência energética da britagem varia de 15% a 53%, dependendo da alimentação e do *lay-out* do circuito.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FRAGMENTATION AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF
ROCKS AND THEIR BEHAVIOR IN CRUSHING FOR AGGREGATES
PRODUCTION

Patricia Bomfim das Neves

December/2005

Advisor: Luís Marcelo Marques Tavares

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The behavior of particle inside crushers is not straightforward, due to complexity in the way that the load is distributed among particles. Therefore, to understand the breakage characteristics of the materials can facilitate the understanding of such behavior. This work shows the study of breakage characteristics of rocks originated from four quarries located in the Southeastern region of Brazil. These characteristics were measured by testing single-particles using the impact load cell.

The results have showed that the breakage of some materials strongly depends on the initial particle size, while others do not show such dependence. This fact was associated with the material microstructure. In general, materials that present a greater proportion of pre-existing flaws do not show dependence on the initial particle size in relation to the breakage characteristics. On the other hand, materials that present a smaller proportion of pre-existing flaws show the mentioned dependence.

Based on the results of the breakage characterization by impact it was possible to establish the relationships between particle breakage and the associated comminution energy, and to predict the material behavior in crushing. Predictions of the minimum comminution energy were compared to the energy consumed in industrial crushers and it was observed that the energy efficiency of crushing circuits varies from 15% to 53% depending on the feed material and circuit lay-out.

ÍNDICE

Capítulo 1 – Introdução e Objetivo	1
1.1 – Introdução	
1.2 - Objetivo	
Capítulo 2 – Revisão da Literatura	4
2.1 – Fragmentação de Partículas	
2.2 – Processos de Britagem	
2.3 – Teorias de Análise de Processos de Cominuição	
2.4 – Métodos para Análise de Fragmentação	
2.5 – Célula de Carga de Impacto	
2.6 – Fatores que Influenciam a Fragmentação de Partículas	
2.7 – Função Quebra	
2.8 – Aplicações da Caracterização de Materiais quanto à Fragmentação	
2.9 – Simulação de Circuitos Industriais de Cominuição	
Capítulo 3 – Materiais e Métodos	45
3.1 – Medida de Massa Específica	
3.2 – Ensaio de Fragmentação de Partículas Individuais	
3.3 – Ensaio de Medida de Energia de Fratura, Resistência e Rigidez de Partículas	
3.4 – Índice de Lamelaridade e Alongamento de Partículas	
3.5 – Ensaio de Impactos Repetidos de Partículas Individuais	
3.6 – Ensaio de Resistência à Abrasão	
3.7 – Análise Microestrutural	
3.8 – Análise do Comportamento de Partículas na Britagem	

Capítulo 4 – Resultados e Discussão	56
4.1 – Caracterização Química, Mineralógica e Textural	
4.2 – Massa Específica e Forma das Partículas	
4.3 – Quebra de Partículas Individuais	
4.3.1 – Fratura de Partículas	
4.3.2 – Fragmentação de Partículas	
4.3.3 – Suscetibilidade a Quebra por Impactos Repetidos	
4.3.4 – Relações entre Quebra de Partículas e Microestrutura	
4.4 – Fragmentação de Partículas por Abrasão	
4.5 – Britagem Industrial	
4.5.1 – Circuitos de Britagem Estudados	
4.5.2 – Ajuste dos Parâmetros das Funções Quebra e Classificação	
4.5.3 – Cálculo do Consumo Energético de Britadores	
4.6 – Simulação em Circuito Padrão de Britagem	
Capítulo 5 – Conclusões	121
Capítulo 6 – Referência Bibliográfica	124

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Fragmentação de um gnaisse em um britador H-36, com APF de 9,5mm, com o mesmo operando com a câmara afogada ou não (Svensson e Steer, 1990)

Tabela 2.2 – Características das células de carga de impacto

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Resumo dos ensaios realizados na célula de carga de impacto

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Composição química média (%) das amostras estudadas (P.F. é a perda ao fogo)

Tabela 4.2 – Tipos de rochas das quatro pedreiras estudadas

Tabela 4.3 – Resumo das características de alteração das amostras analisadas

Tabela 4.4 – Composição mineralógica média da amostra da Pedreira Vigné

Tabela 4.5 – Composição mineralógica média da amostra da Pedra Sul
Mineração

Tabela 4.6 – Composição mineralógica média da amostra da Pedreira Santa
Luzia

Tabela 4.7 – Composição mineralógica média da amostra da Pedreira Embu

Tabela 4.8 – Resumo dos resultados de medida de densidade (g/cm^3)

Tabela 4.9 – Parâmetros da equação 2.21 para os materiais estudados

Tabela 4.10 – Parâmetros de quebra por fragmentação

Tabela 4.11 – Ajuste dos parâmetros das equações 2.20 e 2.24

Tabela 4.12 – Valores do parâmetro de suscetibilidade de quebra por impactos
repetidos dos materiais estudados (γ)

Tabela 4.13 – Valores de t_a do ensaio de abrasão

Tabela 4.14 – Produção média das pedreiras

Tabela 4.15 – Síntese das características operacionais dos britadores amostrados

Tabela 4.16 – Síntese do ajuste dos parâmetros das equações 2.24, 2.26 e 2.27

Tabela 4.17 – Parâmetros da simulação de energia ótima

Tabela 4.18 – Comparação entre consumo energético calculado e ótimo das pedreiras

Tabela 4.19 – Valores dos parâmetros médios das funções quebra e classificação usados nas simulações

Tabela 4.20 – Produção média considerando materiais no circuito padrão

Tabela 4.21 – Comparação entre consumo energético calculado e ótimo dos britadores do circuito padrão

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1 – Curvas esforço-deformação para compressão uniaxial de quartzito (a) e arenito (b) (Jaeger e Cook, 1969)

Figura 2.2 – Mecanismos de fragmentação de partículas (King, 2001)

Figura 2.3 – Simulação de tensões e das trincas em uma partícula sob carregamento diametral sem confinamento das mesmas (Tang et al., 2001)

Figura 2.4 – Curvas de energia e tensão de carregamento de uma partícula sob um carregamento diametral sem confinamento (Tang et al., 2001)

Figura 2.5 – Etapas da fragmentação de partículas individuais por impacto (Tavares, 1997)

Figura 2.6 – Desenho esquemático de um britador cônico (www.metso.com)

Figura 2.7 – Britador de mandíbulas

Figura 2.8 – Britador giratório

Figura 2.9 – Esquema de uma prensa pistão utilizada em ensaios de compressão lenta onde a é a amplitude de movimento do ensaio e h é a altura do leito de partículas (Carvalho, 2003)

Figura 2.10 – Esquema de um pêndulo duplo (Chieregati, 2001)

Figura 2.11 – Esquema do *drop weight tester* do JKMRRC (Napier-Munn et al., 1996)

Figura 2.12 – Esquema da célula de carga de impacto do Utah Comminution Center (Tavares, 1997)

Figura 2.13 – Perfil típico da fratura de uma partícula medido pela célula de carga de impacto LTM (Tavares e Lima, 2005a)

Figura 2.14 – Barra de Hopkinson (Bearmann et al., 1997)

Figura 2.15 – Diagrama esquemático da eletrônica da célula de carga de impacto (Lima, 2005)

Figura 2.16 – Configuração do circuito de Wheatstone usado na condensadora de sinais R_1 , R_2 , R_3 e R_4 são as resistências dos strain gauges, R_a e R_b

são resistências fixas e R_v é a resistência variável, obtida com o uso de um potenciômetro

Figura 2.17 – Cálculo do parâmetro t_{10} a partir de análises granulométricas de produtos de ensaios de fragmentação

Figura 2.18 – Relação entre t_{10} e a energia específica de impacto – também chamada energia específica de cominuição (Ecs)

Figura 2.19 – Influência do tamanho de partícula e energia específica de impacto nos valores de t_{10} de uma amostra de bauxita (Pereira et al., 2004)

Figura 2.20 – Efeito da forma da partícula na fragmentação (Napier-Munn et al., 1996)

Figura 2.21 – Distribuição de tamanho resultante de ensaios de fragmentação de apatita com 2,0 x 2,8 mm utilizando diferentes energias de impacto (Tavares, 1997)

Figura 2.22- Distribuição de tamanho resultante de ensaios de fragmentação de amostras de calcário com 4,0 x 4,75 mm, siltito com 6,7 x 8,0 mm, mármore com 4,0 x 4,75 mm e minério de ferro com 4,0 x 4,75 mm (Tavares, 1997)

Figura 2.23 – Dados de entrada e de saída de um simulador de estado estacionário (Neves, 2002)

Figura 2.24 – Modelo para as unidades de operação (Neves, 2002)

Figura 2.25 – Etapas para otimização do processo produtivo de uma usina (Neves, 2002)

Capítulo 3

Figura 3.1 – Balança utilizada para determinação de densidade

Figura 3.2 – Células de carga de impacto do LTM com barras de diâmetro: (a) 19 mm, (b) 63 mm e (c) 100 mm

Figura 3.3 – Configuração da célula de carga de impacto de alta resolução (9 mm): 1: sistema de disparo a vácuo; 2: barra com strain gauges; 3: condensadora de sinais; 4: bloco conector BNC-2110; 5: multímetro digital; 6: bomba de vácuo e 7: válvula de disparo do impactor

Figura 3.4 – Moinho utilizado para ensaios de abrasão

Capítulo 4

Figura 4.1 – Macroscopia das amostras analisadas, sendo (a) Vigné; (b) Pedra Sul Mineração; (c) Santa Luzia; (d) Embu

Figura 4.2 – Fotomicrografias de amostras da Pedreira Vigné

Figura 4.3 – Fotomicrografias de amostras da Pedra Sul Mineração

Figura 4.4 – Fotomicrografias de amostras da Pedreira Santa Luzia

Figura 4.5 – Fotomicrografias de amostras da Pedreira Embu

Figura 4.6 – Distribuição de densidade dos materiais estudados

Figura 4.7 – Comparação entre os índices de lamelaridade e alongamento para os materiais das Pedreiras Vigné, Pedra Sul Mineração e Santa Luzia

Figura 4.8 – Distribuição de energia de fratura para o material da Pedreira Vigné

Figura 4.9 – Distribuição de energia de fratura para o material da Pedra Sul Mineração

Figura 4.10 – Distribuição de energia de fratura para o material da Pedreira Santa Luzia

Figura 4.11 – Distribuição de energia de fratura para o material da Pedreira Embu

Figura 4.12 – Relação entre energia mediana de fratura e tamanho de partícula para o material da Pedreira Vigné

Figura 4.13 – Relação entre energia mediana de fratura e tamanho de partícula para o material da Pedra Sul Mineração

Figura 4.14 – Relação entre energia mediana de fratura e tamanho de partícula para o material da Pedreira Santa Luzia

Figura 4.15 – Relação entre energia mediana de fratura e tamanho de partícula para o material da Pedreira Embu

Figura 4.16 – Distribuição de resistência à fratura de partícula para o material da Pedreira Vigné

Figura 4.17 – Distribuição de resistência à fratura de partícula para o material da Pedra Sul Mineração

Figura 4.18 – Distribuição de resistência à fratura de partícula para o material da Pedreira Santa Luzia

Figura 4.19 – Distribuição de resistência à fratura de partícula para o material da Pedreira Embu

Figura 4.20 – Relação entre tamanho inicial de partícula e resistência à fratura

- Figura 4.21 – Distribuição de rigidez das partículas para o material da Pedreira Vigné
- Figura 4.22 – Distribuição de rigidez das partículas para o material da Pedra Sul Mineração
- Figura 4.23 – Distribuição de rigidez das partículas para o material da Pedreira Santa Luzia
- Figura 4.24 – Distribuição de rigidez das partículas para o material da Pedreira Embu
- Figura 4.25 – Relação entre tamanho e rigidez de partícula para os materiais das Pedreiras Vigné e Embu
- Figura 4.26 – Análise granulométrica após ensaios na CCI para o material da Pedreira Vigné
- Figura 4.27– Análise granulométrica após ensaios na CCI para o material da Pedra Sul Mineração
- Figura 4.28– Análise granulométrica após ensaios na CCI para o material da Pedreira Santa Luzia
- Figura 4.29– Análise granulométrica após ensaios na CCI para o material da Pedreira Embu
- Figura 4.30 – Relação entre tamanho de partícula, energia específica de impacto e t_{10} para a amostra da Pedreira Vigné
- Figura 4.31 – Relação entre tamanho de partícula, energia específica de impacto e t_{10} para a amostra da Pedra Sul Mineração
- Figura 4.32 – Relação entre tamanho de partícula, energia específica de impacto e t_{10} para a amostra da Pedreira Santa Luzia
- Figura 4.33 – Relação entre tamanho de partícula, energia específica de impacto e t_{10} para a amostra da Pedreira Embu
- Figura 4.34 – Comparação do IQ para cada tamanho calculado com base na energia de impacto
- Figura 4.35 – Relação entre t_{10} e energia normalizada para a Pedreira Vigné
- Figura 4.36 – Relação entre t_{10} e energia normalizada para a Pedra Sul Mineração
- Figura 4.37 – Relação entre t_{10} e energia normalizada para a Pedreira Santa Luzia
- Figura 4.38 – Relação entre t_{10} e energia normalizada para a Pedreira Embu

- Figura 4.39 – Ajuste da função quebra (eq.2.24) para o material da Pedreira Vigné
- Figura 4.40 – Ajuste da função quebra (eq.2.24) para o material da Pedra Sul Mineração
- Figura 4.41 – Ajuste da função quebra (eq.2.24) para o material da Pedreira Santa Luzia
- Figura 4.42 – Ajuste da função quebra (eq.2.24) para o material da Pedreira Embu
- Figura 4.43 – Comparação entre dados experimentais e simulados dos ensaios de impactos repetidos para a Pedreira Vigné
- Figura 4.44 – Comparação entre dados experimentais e simulados dos ensaios de impactos repetidos para a Pedra Sul Mineração
- Figura 4.45 – Comparação entre dados experimentais e simulados dos ensaios de impactos repetidos para a Pedreira Santa Luzia
- Figura 4.46 – Comparação entre dados experimentais e simulados dos ensaios de impactos repetidos para a Pedreira Embu
- Figura 4.47 – Análise granulométrica após ensaios de abrasão para os materiais estudados
- Figura 4.48 – Fluxograma da rebitagem da Pedreira Vigné (Neves, 2002)
- Figura 4.49 – Fluxograma da rebitagem da Pedra Sul Mineração (Neves, 2002)
- Figura 4.50 – Fluxograma da rebitagem da Pedreira Santa Luzia
- Figura 4.51 – Fluxograma da rebitagem da Pedreira Embu
- Figura 4.52 – Distribuição granulométrica da alimentação da rebitagem das pedreiras
- Figura 4.53 – Comparação entre razão de redução e consumo específico de britadores
- Figura 4.54 – Relação entre capacidade e APF dos britadores
- Figura 4.55 – Comparação entre os dados medidos e simulados para os britadores H4000 e 436 da Pedreira Vigné
- Figura 4.56 – Comparação entre os dados medidos e simulados para o britador H3000 da pedreira Vigné
- Figura 4.57 – Comparação entre os dados medidos e simulados para os britadores S3000 e H4000 da Pedra Sul Mineração

- Figura 4.58 – Comparação entre os dados medidos e simulados para o britador H3000 da Pedra Sul Mineração (D – revestimento desgastado, N – revestimento novo, MC – revestimento para britagem média-grossa e MF – revestimento para britagem média-fina)
- Figura 4.59 – Comparação entre os dados medidos e simulados para os britadores S4000 e TS-120 da Pedreira Santa Luzia
- Figura 4.60 – Comparação entre os dados medidos e simulados para o britador 4-36 da Pedreira Santa Luzia
- Figura 4.61 – Comparação entre os dados medidos e simulados para os britadores da Pedreira Embu
- Figura 4.62 – Comparação entre consumo energético específico medido e calculado
- Figura 4.63 – Efeito da energia relativa (E^*) usada em cada estágio no consumo energético total para gerar um produto com 100% passante em 5mm para o material da Pedra Sul Mineração
- Figura 4.64 – Variação da granulometria do produto com os estágios hipotéticos de britagem para a Pedreira Vigné
- Figura 4.65 – Relação entre energia total consumida e tamanho de partícula do produto com 80% passante
- Figura 4.66 – Comparação entre produto medido e simulado considerando a energia ótima de britagem para a Pedreira Vigné
- Figura 4.67 – Comparação entre produto medido e simulado considerando a energia ótima de britagem para a Pedra Sul Mineração
- Figura 4.68 – Comparação entre produto medido e simulado considerando a energia ótima de britagem para a Pedreira Santa Luzia
- Figura 4.69 – Comparação entre produto medido e simulado considerando a energia ótima de britagem para a Pedreira Embu
- Figura 4.70 – Produto simulado da rebitagem do circuito padrão para os materiais estudados

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

A	valor limite de t_{10}
APF	abertura de posição fechada
b	inclinação da curva E_{cs} x t_{10}
B	função quebra
C	velocidade de propagação de onda na barra
C_i	função classificação do tamanho i
d_1	menor tamanho de partícula que o britador pode comprimir
d_2	maior tamanho de partícula que pode passar pelo britador no instante de maior abertura
d_p	tamanho de partícula
d_{p0}	parâmetro do efeito de tamanho de partícula na energia de fratura
D_n^*	acúmulo de dano no n ésimo impacto
e	coeficiente de restituição
E^*	energia normalizada
E_∞	energia específica de fratura de partículas de tamanho infinito
E_{50}	energia específica mediana de fratura
E_c	energia consumida na fragmentação da partícula
E_{cs}	energia específica de impacto
E_i	energia de impacto
E_n	energia específica de impact após o n ésimo impacto
E_r	energia absorvida na deformação elástica da barra
E_{res}	energia residual do sistema
F_{80}	abertura de peneira na qual passam 80% da alimentação
F_c	tensão de fratura
F	força local
g	aceleração da gravidade
h	altura de queda do impactor

I	corrente elétrica
IA	índice de alongamento
IL	índice de lamelaridade
IQ	índice de quebra do material
$K_{b,r}$	rigidez da esfera e da barra
k	constante das leis da cominuição
k_p	rigidez da partícula
K	constante da função quebra
K_e	coeficiente de deformação local
m_b	massa da esfera
m_p	massa média do lote de partículas
m_{sec}	massa da partícula seca
m_{sub}	massa da partícula submersa em água
M	massa do impactor
M_1	massa total de partículas
M_2	massa de partículas lamelares
M_3	massa de partículas alongadas
n	parâmetro da função classificação
n_1	parâmetro da função quebra
n_2	parâmetro da função quebra
N	número total de partículas
P	potência do britador
P_c	potência calculada do britador com base em ensaios de partículas individuais
P_n	potência do britador operando vazio
P_{80}	abertura de peneira na qual passam 80% do produto
Q	parâmetro para cálculo de potência do britador
R	resistência elétrica
S	área da seção transversal da barra
t	tempo
T	taxa de alimentação
t_{10}	percentagem de material passante em uma peneira de tamanho igual a 0,1 do tamanho inicial da partícula
t_a	constante de resistência à abrasão do material

t_f	tempo de contato final
v_0	velocidade inicial de impacto
W	quantidade específica de trabalho consumida
WI	índice de trabalho
x	abertura da peneira
x_1	tamanho de partícula representativo da alimentação
x_2	tamanho de partícula representativo do produto
x_i	vazão mássica do tamanho i no interior do britador
y	tamanho representativo de partícula
$Y_{b,r}$	módulo de Young da esfera e da barra
Y_p	módulo de Young da partícula

Gregos

α	parâmetro da função quebra de Rosin-Rammler truncada
β	fator de forma da partícula
δ	parâmetro da função quebra
γ	constante de acúmulo de dano
η	parâmetro do modelo normalizado de t_{10}
λ	parâmetro da função classificação
$\mu_{b,r}$	coeficiente de Poisson da esfera e da barra
μ_p	coeficiente de Poisson da partícula
ρ	densidade
$\rho_{\text{água}}$	densidade da água
σ_p	resistência da partícula
ϕ	parâmetro do efeito de tamanho de partícula na energia de fratura

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVO

1.1 – Introdução

Em geral a primeira etapa em circuitos de tratamento de minérios é a cominuição, a qual pode ser entendida como o processo pelo qual materiais são reduzidos de tamanho a partir da aplicação de forças compressivas e/ou cisalhantes. Evidentemente, sem fragmentação não ocorreria a redução de tamanho, o que indica que com maior controle da fragmentação existirão possibilidades de melhorar a qualidade do processo de cominuição como um todo. Portanto, entender como a fragmentação ocorre e caracterizar o comportamento do material que está sendo cominuído é indispensável para desenvolver técnicas cada vez melhores e menos dispendiosas de redução de tamanho.

Os processos industriais de fragmentação de partículas são bastante complexos e apresentam baixa eficiência com relação à energia aplicada. Verifica-se que a quantidade de energia elétrica consumida na operação dos equipamentos é muito maior que aquela de fato necessária para fragmentar as partículas (Tavares, 2004a). Dessa forma, uma pequena elevação na eficiência energética de tais processos, que pode ser alcançada entendendo melhor as características de fragmentação das partículas, pode resultar em redução considerável do consumo de energia elétrica e também de custo (Neves e Tavares, 2004a).

Embora a cominuição seja uma etapa determinante para o desempenho técnico e econômico dos circuitos de processamento mineral, os métodos tradicionais utilizados para caracterização de minérios quanto à cominuição apresentam diversas limitações (Lima e Tavares, 2005a). Esses métodos determinam apenas índices de consumo de energia, como o índice de trabalho de Bond, desenvolvido na década de 50 (Bond,

1952), que fornece resultados que são utilizados, de maneira empírica, no dimensionamento de britadores e moinhos. Ainda assim, os métodos tradicionais foram e ainda são muito úteis dentro de seus respectivos domínios de aplicação. Entretanto, a utilização de novas técnicas e equipamentos na indústria visando promover ganhos substanciais de desempenho não pode ser analisada sem abordagens mais eficazes de caracterização da fragmentação de partículas. Dessa forma, surgiram e se tornaram populares novos métodos de caracterização, permitindo que por meio de seus resultados fossem desenvolvidos modelos matemáticos capazes de modelar praticamente todos os equipamentos de cominuição empregados na indústria.

Nas últimas décadas, novos métodos de caracterização têm permitido um melhor entendimento de como as partículas irão se comportar dentro de equipamentos de cominuição, visando correlacionar a energia aplicada e o produto resultante da fragmentação, assim como a resistência à fragmentação e o tamanho dos fragmentos, além de quantificar a tendência de geração de finos e ultrafinos (Chieregati, 2001). Dentre esses, merecem destaque o pêndulo duplo e o ensaio de queda de peso, cujo uso na simulação de britadores e moinhos foi popularizado pelo *Julius Kruttschnit Mineral Research Center* (JKMRC) da Austrália. Nesses ensaios, que serão descritos adiante, partículas contidas no intervalo de 63 a 13,2 mm são submetidas, uma a uma, ao impacto com energias aplicadas variadas (Napier-Munn et al., 1996). Uma importante aplicação desses ensaios é no projeto de novas instalações de britagem e moagem a partir de amostras de pequeno volume.

Baseando-se no método do JKMRC, Chieregati (2001) desenvolveu um estudo, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo que se mostrou bastante útil durante a fase inicial de empreendimentos mineiros, onde há disponibilidade de amostras provenientes de testemunhos de sondagem de pequeno diâmetro, pois permite determinar a variabilidade do minério na jazida, e por conseqüência seu comportamento em circuitos de processamento mineral. Esses estudo propôs um método de caracterização tecnológica baseado em ensaios de fragmentação por impacto de partículas individuais no intervalo de 22,4 x 19 mm.

Seguindo a mesma linha de pesquisa, Morell (2004) propôs um procedimento para previsão da energia necessária para cominuição em moinhos autógenos e semiautógenos, utilizando pequenas quantidades de amostras, as quais eram submetidas a ensaios de fragmentação de partículas individuais no *drop weight tester* do JKMRC. O

método é baseado na correlação entre os índices de fragmentação da rocha (A e b), sua resistência e a energia específica de fragmentação.

Ainda que sejam úteis na caracterização de partículas quanto à fragmentação, os métodos propostos por Chieregati (2001) e Morell (2004) podem levar a uma avaliação incorreta quando a resistência do minério varia com o tamanho de partícula, uma vez que são baseados em ensaios com apenas fração de tamanhos. Inclusive, Chieregati (2001) afirma que quanto maior a resistência do material, menor será a influência do tamanho inicial da partícula na resistência à fragmentação do mesmo. Entretanto, a dependência da resistência do material no efeito do tamanho inicial da partícula nas características de quebra do material precisa ser estudado em maior detalhe.

1.2 – Objetivo

O objetivo deste trabalho é caracterizar rochas usadas na produção de pedra britada quanto à fragmentação utilizando ensaios modernos de fragmentação por impacto de partículas individuais, correlacionando os resultados desses ensaios tanto às características microestruturais das rochas quanto ao seu comportamento na britagem industrial, por meio de cálculo do consumo energético na britagem e previsão da eficiência na utilização de energia elétrica.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 – Fragmentação de Partículas

As partículas são fragmentos de rochas formados por minerais. Os minerais são materiais cristalinos, onde os átomos se encontram em arranjos tridimensionais. A configuração da estrutura cristalina é fortemente determinada pelo tipo de ligações químicas entre os átomos, íons e moléculas constituintes, bem como de suas valências e tamanhos. Essas ligações interatômicas são intensas a pequena distância, e podem ser quebradas com a aplicação de esforços externos (Luz et al., 2002).

Quando uma partícula é submetida a esforços mecânicos superiores à sua resistência à ruptura, ocorre a propagação de trincas já existentes e a iniciação de novas trincas em seu interior, o que causa a fragmentação da partícula.

Os esforços mecânicos aplicados podem ser normais (compressão ou tração) ou tangenciais (cisalhamento). A resposta de qualquer sólido à aplicação de tais esforços se dá na forma de deformações, as quais podem ser classificadas como elásticas e inelásticas.

Deformações elásticas são aquelas em que a resposta do material aos esforços é afetada apenas pelo esforço presente, ou seja, a energia acumulada durante o carregamento é totalmente recuperada no instante em que as cargas são removidas (Dieter, 1961). Entretanto, existem materiais que respondem a esforços de forma não elástica. Esse comportamento, definido como inelástico, é o resultado de deformação permanente ou do efeito do tempo na deformação do material. Nas deformações inelásticas, ocorre consumo de energia e essa energia não é recuperável, constituindo o comportamento elasto-plástico e o visco-elástico (Dieter, 1961).

Os materiais rochosos em sua maioria se deformam de forma elástica, até muito próximo do instante de sua ruptura, como mostra a Figura 2.1 (a). Entretanto, em alguns casos, podem apresentar comportamento inelástico (Figura 2.1 (b)), caracterizando-os como elasto-plásticos, caso em que o resultado da aplicação de esforços é a deformação permanente do material (Tavares, 2004b).

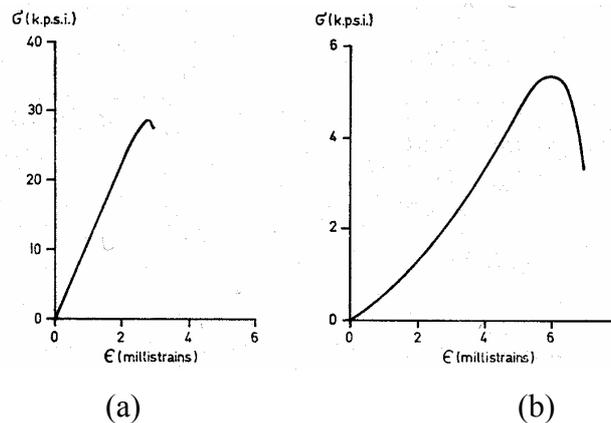


Figura 2.1 – Curvas esforço-deformação para compressão uniaxial de quartzito (a) e arenito (b) (Jaeger e Cook, 1969).

É muito importante destacar que o comportamento elasto-plástico apresentado por rochas é diferente daquele geralmente observado em metais. No caso de metais, esse comportamento é o resultado do acúmulo de discordâncias, enquanto que em rochas, é o resultado da evolução do dano de fraturamento do material que ocorre previamente à perda de integridade do sólido (Tavares, 2004b).

Quando se trata da fragmentação de materiais particulados, a abordagem em geral utilizada na mecânica da fratura, a qual se baseia na análise de esforços e deformações específicas, não é normalmente possível. Isso se deve ao fato das partículas apresentarem formatos irregulares, que faz com que a distribuição de tensões em seu interior resultante da aplicação dos esforços não seja conhecida, tornando tais processos bastante complexos (Schönert, 1988).

Durante a fragmentação, as forças de contato deformam as partículas criando um campo de tensões, e as partículas respondem criando trincas ou se deformando inelasticamente. Como mostrado na Figura 2.2, esse processo pode ocorrer pelos mecanismos de abrasão, clivagem ou estilhaçamento, os quais dependem do nível de energia aplicada (King, 2001).

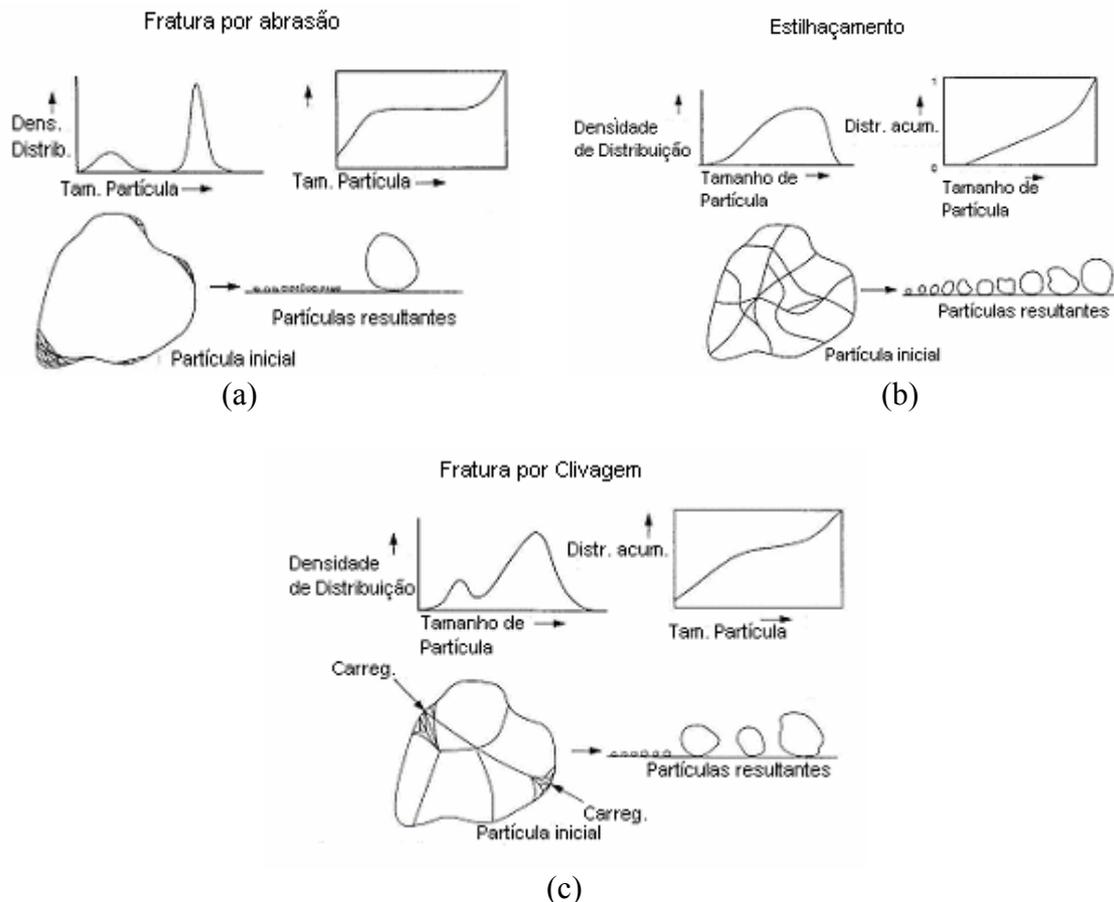


Figura 2.2 – Mecanismos de fragmentação de partículas (King, 2001).

O mecanismo de abrasão é caracterizado pela aplicação de esforços normais insuficientes para ruptura ou pela aplicação de esforços cisalhantes na superfície da partícula causando fragmentação superficial. O resultado é uma redução muito limitada de tamanho da partícula original e a geração de um grande número de partículas muito finas (Figura 2.2a).

O mecanismo de estilhaçamento (fratura desintegrativa) é caracterizado por elevadas taxas de aplicação de energia, sob condições de esforços compressivos. Nesse caso tem-se intensa fragmentação da partícula original, o que resulta em um amplo espectro de tamanhos de fragmentos (Figura 2.2b).

Por fim, o mecanismo de clivagem, o qual ocorre quando a intensidade de aplicação de energia é baixa, de maneira que são formados muitos fragmentos grossos e também partículas finas próximo aos pontos de aplicação dos esforços (Figura 2.2c).

Apesar da complexidade dos fenômenos envolvidos na quebra de partículas individuais, alguns modelos matemáticos têm encontrado sucesso na sua descrição.

Lin e Miller (1986) descreveram a quebra de partículas individuais como um problema tridimensional de percolação de ligações. Esse, em conjunto à suposição de um campo de tensão distribuído, foi usado para prever o percurso das trincas e, por meio de computação das áreas cercadas por ligações quebradas, simular a fragmentação em duas dimensões. Um modelo que descreve a fragmentação de partículas circulares como triângulos não-deformados e não-fraturados foi desenvolvido por Potapov e Campbell (1994). Esses pesquisadores usaram o método de elementos discretos para estimar as tensões e deformações resultantes do carregamento. As distribuições de tamanhos resultantes desses dois métodos foram bastante similares àqueles obtidos por meio de quebra de partículas individuais.

Tang et al. (2001) utilizaram um modelo de análise do processo de fratura da rocha (RFPA – *Rock Failure Process Analysis*), o qual permitiu identificar a origem da formação da trinca em um ensaio de fragmentação de uma partícula individual, utilizando carregamento lento e sem confinamento. Os pesquisadores observaram que a trinca não se origina no centro da partícula, mas sim em um local situado entre o centro da partícula e o ponto de aplicação de cargas (Figura 2.3). À medida que o carregamento continua, novas trincas são geradas, no entanto sem provocar deformações inelásticas, como mostra a Figura 2.3 (passos 0 a 50). No momento em que as trincas se multiplicam e alcançam a superfície da partícula (passo 51, na Figura 2.3) ocorre uma queda abrupta da força (Figura 2.4), ocorrendo a fratura da partícula. Como o carregamento não cessa, novas fraturas ainda ocorrem gerando partículas menores (passo 70 a 148 na Figura 2.3).

Foram desenvolvidos ainda outros métodos com o objetivo de descrever a fragmentação de partículas utilizando o desenvolvimento de teorias no campo da geometria fractal (Mandelbrot, 1983) e da mecânica de dano (Grady e Kipp, 1987).

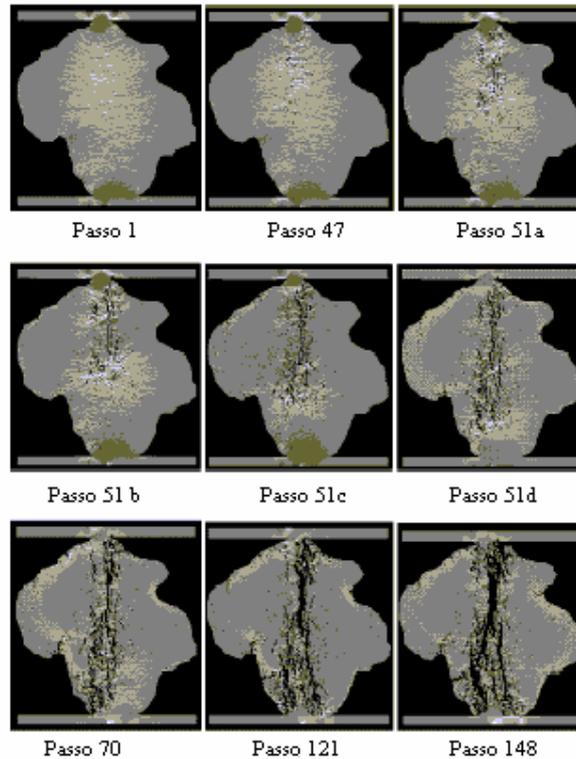


Figura 2.3 – Simulação de tensões e das trincas em uma partícula sob carregamento diametral sem confinamento das mesmas (Tang et al., 2001).

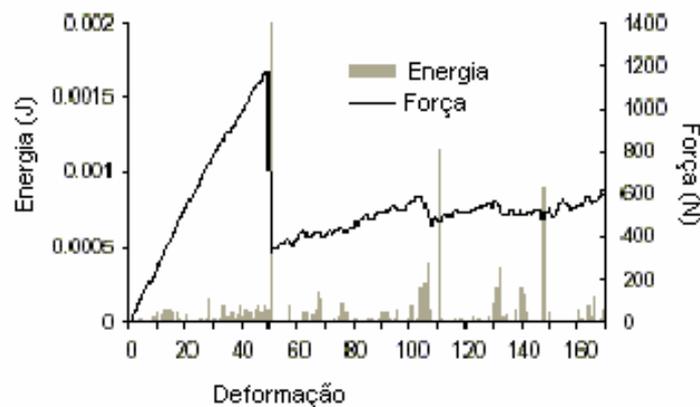


Figura 2.4 – Curvas de energia e tensão de carregamento de uma partícula sob um carregamento diametral sem confinamento (Tang et al., 2001).

O início do crescimento das trincas instáveis é governado pelo critério de Griffith, no entanto as técnicas convencionais de avaliação da mecânica da fratura não podem ser utilizadas, devido a grande dificuldade em calcular o campo de tensões no interior de uma partícula de forma irregular. O critério de Griffith é baseado na condição que a energia necessária para propagar a trinca é originária da energia de deformação

armazenada durante a aplicação dos esforços, ou seja, a energia de fratura da partícula. Para que a trinca cresça, não há nenhuma outra fonte de energia disponível a não ser a energia de deformação armazenada na partícula (Tavares e King, 1998a). Normalmente, a energia de fratura da partícula é maior que a energia dissipada na propagação da trinca, sendo o restante de energia inteiramente distribuído após a fratura, principalmente como energia cinética para as partículas "filhas", podendo resultar em fraturas secundárias. A presença de várias discontinuidades como contornos de grãos, poros, inclusões e até mesmo trincas, pode dissipar essa energia de deformação, podendo interromper o crescimento da trinca. Nesse caso, a fratura só ocorrerá quando essas trincas coalescerem, produzindo uma fratura macroscópica.

O processo de fragmentação de partículas não termina após a primeira trinca chegar à superfície. As partículas geradas ainda podem possuir uma energia cinética considerável, que pode ser dissipada durante um segundo estágio do processo. Portanto, como pode ser observado na Figura 2.5, a fragmentação de uma partícula submetida a impacto de um peso em queda a uma velocidade v_0 apresenta três estágios distintos (Tavares, 1997):

- Deformação da partícula;
- Fratura primária da partícula;
- Quebra e requebra da partícula produzindo fragmentos filhos.

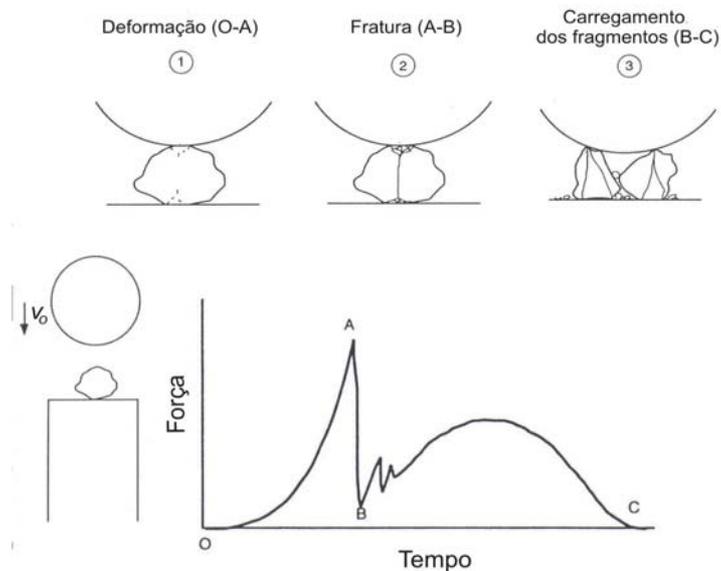


Figura 2.5 – Etapas da fragmentação de partículas individuais por impacto (Tavares, 1997).

2.2 – Processos de Britagem

A importância das operações de cominuição pode ser percebida em toda a sua magnitude se for destacado o fato que a maior parte da energia gasta no processamento de minérios é consumida nestas operações. Logo, grande parte dos custos operacionais de uma usina de tratamento de minérios se deve à cominuição (Neves e Tavares, 2004b).

Na indústria, o processo de cominuição é dividido em dois estágios, a britagem e a moagem. Tradicionalmente, o processo de britagem era entendido como a etapa responsável pela cominuição de material acima de 25mm (1”), enquanto a moagem era empregada na cominuição abaixo desse tamanho. Entretanto, na atualidade os britadores têm demonstrado grande aplicabilidade na cominuição de partículas com granulometrias cada vez mais finas. Por outro lado, alguns tipos de moinhos tubulares, como os moinhos autógenos e semi-autógenos, têm se mostrado eficazes na cominuição de material *run of mine*. Portanto, hoje é comum definir a moagem como a cominuição realizada em moinhos tubulares, independentemente do tamanho, e britagem como a cominuição realizada em todos os outros equipamentos nos quais as partículas são carregadas diretamente pelas partes móveis do equipamento (Tavares, 2004b).

As diferenças principais entre os vários equipamentos estão associadas aos métodos de aplicação de cargas e aos aspectos mecânicos da aplicação desses esforços a diferentes tamanhos de partículas. Quando a partícula é de tamanho grosso, a energia necessária para fraturar cada partícula individual é alta, embora a energia por unidade de massa seja tipicamente baixa. Conforme o tamanho da partícula diminui, a energia necessária para fraturar uma partícula diminui, mas a energia por unidade de massa aumenta rapidamente. Portanto, os equipamentos, que geralmente são usados na cominuição grossa, precisam ser robustos e de grande porte, enquanto que aqueles usados na cominuição fina devem ser capazes de distribuir energia em um volume relativamente grande (Tavares, 2004b).

A britagem consiste da quebra de partículas principalmente pela ação de esforços compressivos ou de impacto. Os esforços compressivos são aplicados, em geral, por meio do movimento periódico de aproximação e afastamento de uma superfície móvel contra outra fixa. Esse é o caso dos britadores de mandíbulas, britadores giratórios e britadores cônicos (Figura 2.6-2.8).

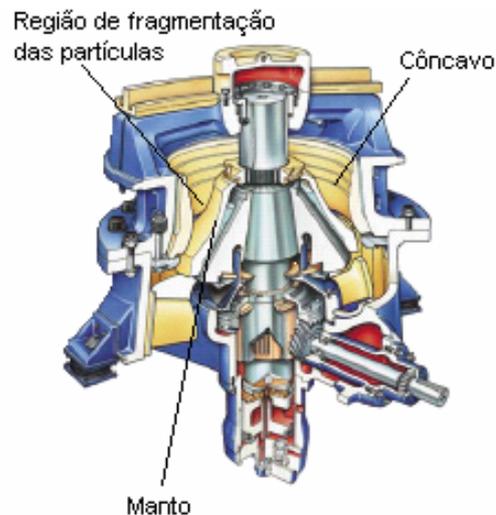


Figura 2.6 - Desenho esquemático de um britador cônico (www.metso.com).

Os esforços de impacto são resultantes da projeção de partículas contra elementos do britador ou do revestimento, como exemplo pode-se citar os britadores de impacto e de martelos, ambos com eixo horizontal, e o britador de impacto de eixo vertical (VSI).

Assim, os britadores podem ser classificados conforme o mecanismo usado, seja ele compressão ou impacto, e a aplicação de um determinado tipo de britador está vinculada ao tipo de material, à capacidade e à razão de redução desejada (Carvalho, 2003).

Uma importante aplicação dos processos de britagem é na produção de agregados para construção civil. Nessa indústria são utilizados britadores de mandíbulas, giratórios e cônicos, principalmente estes últimos, porque apresentam alta produtividade, baixo custo de operação e de manutenção e limitada taxa de desgaste dos revestimentos. Esse tipo de britador normalmente é empregado nos estágios de britagem secundária, terciária e quaternária.

A fragmentação de partículas no britador cônico é realizada pelo movimento de aproximação e distanciamento de um cone ou manto central em relação a uma carcaça invertida, chamada côncavo, conforme mostra a Figura 2.6. O movimento excêntrico do cone (girando em torno de um eixo que não é o do próprio cone) faz com que toda a área da carcaça seja utilizada para fragmentar as partículas, proporcionando uma maior capacidade de operação se comparados a britadores de mandíbulas.

Quando utilizados para a produção de brita para a construção civil, é comum a operação dos britadores cônicos com câmara cheia (afogados). A câmara de britagem

cheia permite maior eficiência de cominuição, maior produção de finos, e menor tendência à formação de partículas lamelares (Svensson e Steer, 1990). Essa última é considerada como uma das principais vantagens da operação com câmara cheia, pois quanto menor a lamelaridade melhor será a qualidade da brita, uma vez que partículas lamelares dificultam o bombeamento do concreto. Além disso, concretos produzidos a partir de brita com formato lamelar apresentam resistência inferior àqueles produzidos a partir de brita de formato isométrico (Briggs e Evertsson, 1998).

O fato de o britador trabalhar com câmara de britagem cheia requer um bom controle da taxa de alimentação. A Tabela 2.1 exemplifica o efeito da vazão de alimentação da câmara durante a fragmentação de gnaiss, com granulometria entre 3 e 25 mm, apresentando 50% das partículas com tamanho entre 3 e 9 mm, em um britador cônico H-36M. Pode-se notar que quando o britador opera afogado, o consumo de energia é o dobro da condição não afogado. Por outro lado, na condição não afogado, o produto se torna mais grosso e a vazão do produto diminui em cerca de 28% (Svensson e Steer, 1990).

Tabela 2.1- Fragmentação de um gnaiss em um britador H-36, com APF de 9,5 mm, com o mesmo operando com a câmara afogada ou não (Svensson e Steer, 1990)

Condição de operação	% < APF	% < 6 mm	Potência (kW)	Vazão (t/h)	Produção - 6 mm (t/h)
Afogado	72	50	90	107	54
Não Afogado	56	34	45	77	27

Para Svensson e Steer (1990), a APF não é o fator que determina a redução das partículas no interior do britador. A variável mais importante é a energia aplicada por tonelada de material. Para esses pesquisadores, o ajuste da APF é apenas uma forma de modificar a energia que está sendo aplicada nas partículas.

Os britadores de mandíbulas (Figura 2.7) são utilizados na britagem primária. Nesse caso, a britagem é realizada a seco, e razões de redução entre 2 e 3 são em geral alcançadas. Esse equipamento consiste de uma mandíbula fixa, e uma móvel ligada ao excêntrico, que fornece o movimento de aproximação e afastamento entre elas. Desta maneira, o bloco alimentado na boca do britador progressivamente desce entre as mandíbulas, enquanto é sujeito à compressão que causa a quebra do material (Tavares, 2004b).

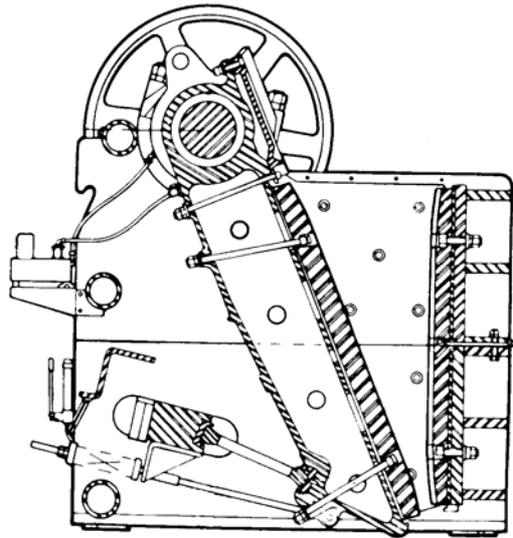


Figura 2.7 – Britador de mandíbulas.

Os britadores giratórios (Figura 2.8) em geral são utilizados nos estágios de britagem primária e secundária. Sua operação consiste do mesmo princípio de operação do britador cônico. A principal diferença entre eles é que os britadores cônicos apresentam o manto e o cone com longas superfícies aproximadamente paralelas, garantindo maior tempo de retenção do material nesta região. Além disso, nos britadores giratórios a descarga se dá pela ação da gravidade, enquanto nos cônicos é feita pelo movimento do cone (Tavares, 2004b).

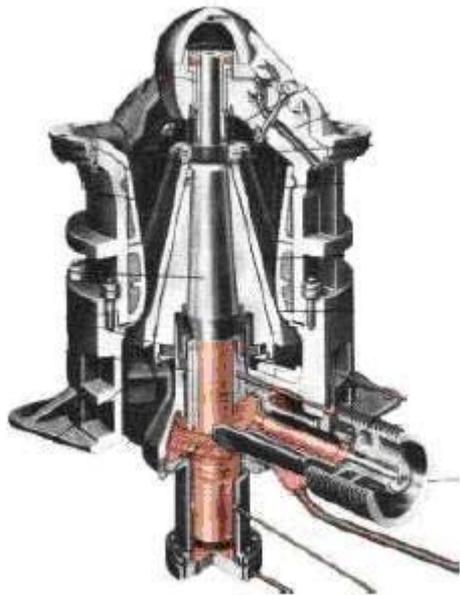


Figura 2.8 – Britador giratório.

Tendo sido dada uma visão geral do modo como as partículas respondem a esforços aplicados e dos equipamentos utilizados para aplicação dos mesmos, no restante deste capítulo serão discutidas teorias e métodos utilizados para analisar a fragmentação de partículas, assim como os principais fatores que afetam o processo.

2.3 – Teorias de Análise de Processos de Cominuição

Em geral, os processos de cominuição demandam uma quantidade muito grande de energia para fragmentar cada tonelada de material. A principal razão para isso é que a partícula deve ser submetida a grandes esforços antes que ocorra qualquer fratura substancial. Estimativas indicam que a maioria dos processos industriais de cominuição é muito pouco eficiente com relação à energia teórica necessária para criar uma nova superfície (Austin et al., 1984).

Dessa forma, durante muito tempo, os processos de cominuição foram estudados somente pelo enfoque da energia consumida, o que é óbvio devido ao fato de a energia representar uma parcela importante nos custos da cominuição. Todos os modelos anteriores de avaliação do processo de fragmentação associavam a energia consumida ao grau de redução de tamanho, expresso como porcentagem passante em uma determinada peneira (Chierigati, 2001).

Sabe-se que quanto mais fino o produto, maior a quantidade de energia necessária para se alcançar uma redução de tamanho equivalente. Portanto, energia e fragmentação podem ser relacionadas por (Napier-Munn et al., 1996):

$$dE = -k \frac{dx}{x^n} \quad [2.1]$$

na qual: dE é a energia incremental necessária para produzir uma redução de tamanho dx , K é uma constante e x é o tamanho de partícula.

No século XIX, Kick e Rittinger partiram de diferentes postulados para demonstrar que:

$$\text{- Kick: } E = K \ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) \quad [2.2]$$

$$\text{- Rittinger: } E = K\left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1}\right) \quad [2.3]$$

As equações 2.2 e 2.3 são denominadas “Leis da Cominuição”.

Em 1952, Fred Bond, a partir de diversos estudos de fragmentação em moinhos de bolas e de barras, propôs a chamada ‘Terceira Lei da Cominuição’, dada por:

$$E = K\left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}}\right) \quad [2.4]$$

Em todas as equações acima, x_1 é o tamanho de partícula representativo da alimentação e x_2 o tamanho de partícula representativo do produto.

Enquanto Rittinger estabeleceu que a energia consumida na cominuição é proporcional à nova superfície gerada, sendo a área específica dos materiais granulares inversamente proporcional ao diâmetro das partículas, Kick sugeriu que a energia consumida na cominuição depende apenas da razão de redução, sendo independente da granulometria original das partículas. Bond, por sua vez, considerou que o trabalho demandado na cominuição é inversamente proporcional à raiz quadrada da abertura pela qual passa 80% do produto (Kelly e Spottiswood, 1982).

As teorias de Rittinger e Kick não são geralmente muito úteis em aplicações industriais de dimensionamento de equipamentos, pois são aplicáveis fora das condições usuais de cominuição.

Contudo, com base na teoria de Bond foram desenvolvidos os ensaios de Bond de britagem e moagem, os quais são métodos tradicionais, utilizados até hoje. De acordo com essa teoria, a energia consumida na cominuição de uma alimentação com F_{80} (abertura de peneira na qual passam 80% da alimentação, dada em μm) que é cominuída até P_{80} (abertura de peneira na qual passam 80% do produto, dada em μm) é igual a diferença entre a energia necessária para reduzir um material de tamanho teoricamente infinito até F_{80} e a energia necessária para reduzir o mesmo material de tamanho infinito até P_{80} . Bond expressou essa relação da seguinte maneira:

$$W = 10WI \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad [2.5]$$

e

$$P = T W \quad [2.6]$$

onde: W é a quantidade específica de trabalho consumida em kWh/t, WI é o índice de trabalho (*work index*), uma constante específica do material que expressa a resistência do material à britagem e à moagem, e T , a vazão de alimentação nova do circuito em t/h e P , a potência demandada em kW.

As principais vantagens do método de Bond são a sua simplicidade e funcionalidade, além da boa precisão, desde que utilizado dentro do intervalo de condições usuais de cominuição. A experiência em sua utilização, entretanto, tem demonstrado que o método possui limitações (Chierigati, 2001):

- Tende a ser ineficiente na previsão do que realmente acontece em um circuito fechado, quando a vazão da alimentação aumenta, a menos que o desempenho do classificador seja ajustado para enfrentar as novas condições;
- Não é apropriado para sistemas onde as formas das distribuições granulométricas da alimentação e do produto diferem;
- Não é um bom método de previsão para a moagem de rochas de frações mais grossas, particularmente para o comportamento de moinhos autógenos (AG) e semiautógenos (SAG) (apesar de ter sido adaptado para tais circunstâncias);
- É incerto para partículas com características incomuns de peneiramento (forma acircular), apesar de esse ser um problema observado para qualquer técnica que utiliza o peneiramento na determinação do tamanho de partículas.

Além dessas limitações, a ciência dos materiais mostra que a ruptura se inicia em pontos de fraqueza, como contornos de grão. A maior parte das rochas contém trincas de diversos tamanhos, de modo que partículas maiores têm maior número de trincas de maior tamanho disponíveis para iniciar a ruptura. Quando o tamanho da partícula é reduzido, com aplicação de esforços, as trincas maiores tendem a se tornar superfícies

externas da partícula. Outras evidências sugerem que as trincas controlam a ruptura de materiais particulados, mas ainda não existe um método satisfatório que quantifique a distribuição de trincas, apesar de a tecnologia de microscopia eletrônica de varredura oferecer algumas possibilidades (Chierigati, 2001). Entretanto, durante a preparação das amostras para serem analisadas por microscopia eletrônica são induzidas trincas, e durante análise é difícil distinguir essas das trincas que já estavam presentes no material.

Portanto, atualmente, tem-se procurado estudar o processo de cominuição sob o enfoque da cinética de fragmentação das partículas, buscando-se o desenvolvimento de modelos de processos, bem como o estudo da relação entre os parâmetros desses modelos e as variáveis operacionais. Esses modelos podem ser utilizados em trabalhos de otimização e de controle de processos, e ainda ter grande utilidade no dimensionamento de instalações.

2.4 – Métodos para Análise de Fragmentação

Desde a década de 60, muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de explicar o fenômeno de fragmentação de partículas, em geral baseando-se em três tipos diferentes de carregamento compressivo: carregamento compressivo lento, carregamento por queda de peso e carregamento por impacto balístico (Tavares e King, 1998b). Diferentes métodos são utilizados em estudos de fragmentação de partículas. Existem aqueles em que partículas são lançadas contra uma superfície rígida ou são atingidas por um objeto em movimento como um martelo (Austin, 2002), visando a reproduzir seu comportamento em britadores de impacto. Nos ensaios de queda livre ou autofragmentação de partículas, as partículas são soltas de uma determinada altura para previsão do seu comportamento em moinhos autógenos e semiautógenos (Diniz e Tavares, 2001). Entretanto, a maior parte dos equipamentos de cominuição se baseia na aplicação de esforços compressivos às partículas, de modo que os ensaios de compressão lenta, o pêndulo duplo, ensaios de queda de peso e a barra de Hopkinson são os que melhor representam esses equipamentos.

Os ensaios de compressão lenta consistem em fragmentar uma partícula ou um leito de partículas pela aplicação de esforços compressivos aplicados pelas superfícies planas de uma prensa pistão, como mostra a Figura 2.9. É possível, além de determinar as características de fragmentação das partículas, obter informações como a relação

entre o tamanho da partícula e a sua tensão de fratura e também a energia necessária para fraturar a mesma (Carvalho, 2003).

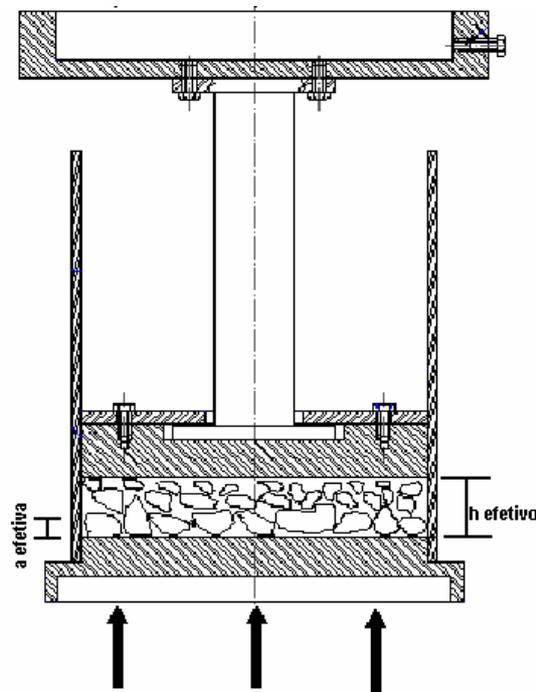


Figura 2.9 – Esquema de uma prensa pistão utilizada em ensaios de compressão lenta onde a é a amplitude de movimento do ensaio e h é a altura do leito de partículas (Carvalho, 2003).

No ensaio do pêndulo duplo, as partículas são fragmentadas individualmente, por meio do impacto de um pêndulo (pêndulo de impacto) a uma altura conhecida, sobre um outro pêndulo de balanço, onde a partícula é fixada (Figura 2.10). Esse foi o equipamento de fragmentação de partículas originalmente utilizado na caracterização da fragmentação no *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre* (JKMRC). Os resultados obtidos permitem estabelecer a energia de cominuição associada a um dado grau de fragmentação e a distribuição granulométrica do produto, sendo possível determinar a função quebra específica para o material. Narayanan e Whiten (1988) demonstraram sua aplicação na modelagem de processos de cominuição. Apesar de ser um equipamento simples, sua operação e os resultados obtidos possuem algumas limitações (Napier-Munn et al., 1996):

- Tempo elevado para a realização do ensaio;

- Limite de energia e tamanho de partícula;
- Cálculo impreciso da energia de fragmentação, devido ao movimento secundário do pêndulo de balanço.

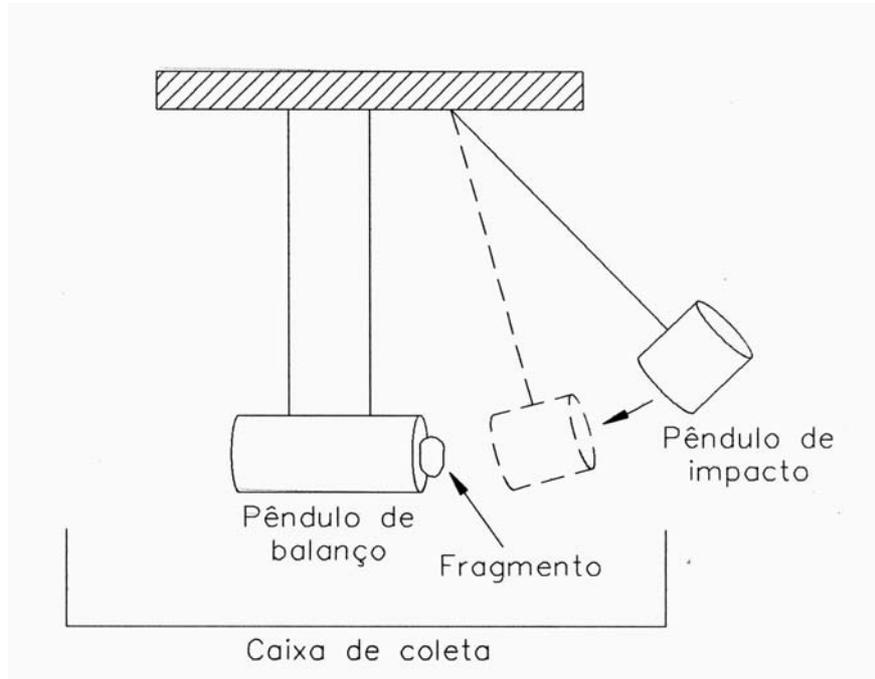


Figura 2.10 – Esquema de um pêndulo duplo (Chierigati, 2001).

Os ensaios de queda de peso consistem em fragmentar uma ou mais partículas sobre uma superfície rígida pelo impacto de um objeto em queda como, por exemplo, uma esfera. Os resultados desse ensaio fornecem as características de fragmentação das partículas e o consumo de energia para que isso ocorra. Com relação ao ensaio do pêndulo duplo, o ensaio de queda de peso apresenta como vantagens (Bearmann et al., 1997):

- Ampla faixa de energia aplicada à partícula;
- Curto tempo de operação;
- Ampla faixa de tamanho de partícula;
- Permite estudar a fragmentação de leito de partículas.

Vários tipos de equipamentos para ensaio de queda de peso têm sido desenvolvidos desde 1938. No JKMRC, o *drop weight tester* (DWT) substituiu o ensaio

de pêndulo duplo. Esse equipamento consiste de uma base metálica e um cilindro de aço dotado de duas guias laterais (Chieregati, 2001), como é ilustrado na Figura 2.11.

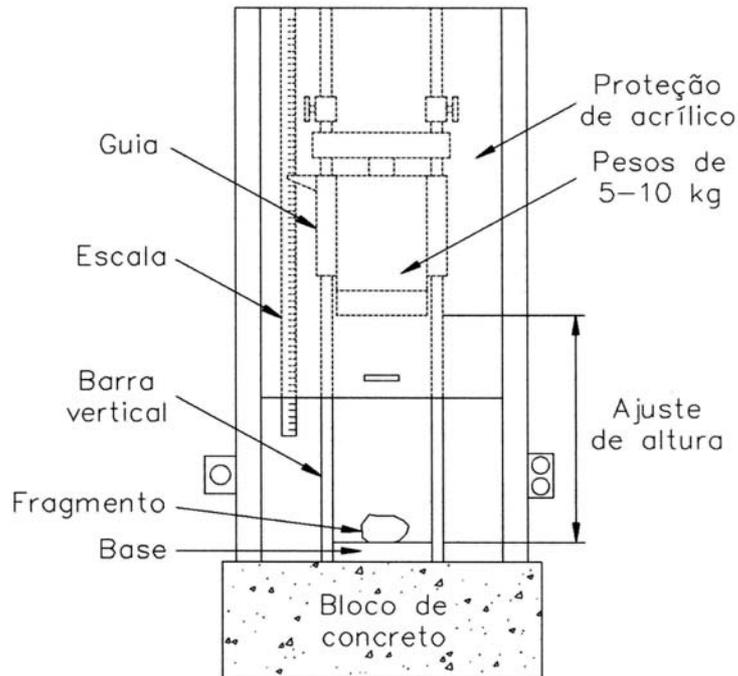


Figura 2.11 – Esquema do *drop weight tester* do JKMRC (Napier-Munn et al., 1996).

A célula de carga de impacto (CCI) é um tipo especial de aparelho de queda de peso desenvolvido no *Utah Comminution Center* e consiste de uma longa barra vertical de aço onde as partículas são colocadas e impactadas por uma bola em queda livre (Tavares e King, 1998a). A Figura 2.12 mostra o esquema do equipamento.

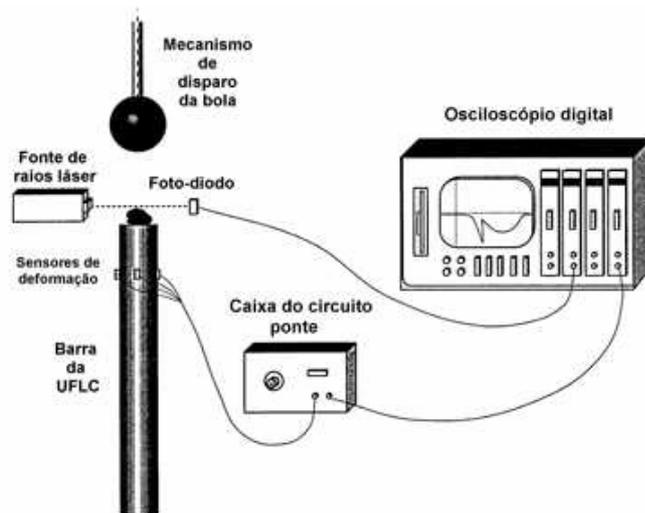


Figura 2.12 – Esquema da célula de carga de impacto do *Utah Comminution Center* (Tavares, 1997).

Outro equipamento também utilizado em estudos de fragmentação de partículas é a barra de Hopkinson, a qual é similar à CCI. Ela consiste de uma barra de aço horizontal, onde é colocada a partícula que será impactada e comprimida pela colisão da barra de impacto. O esquema desse equipamento é mostrado na Figura 2.14 (Bearmann et al., 1997).

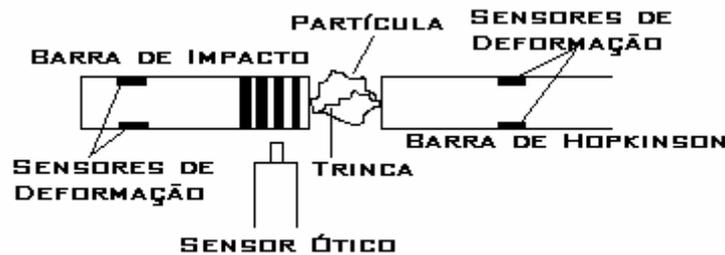


Figura 2.14 – Barra de Hopkinson (Bearmann et al., 1997).

A barra de Hopkinson tem sido utilizada para analisar várias características de fragmentação de partículas (Bearman et al., 1997):

- Definição da força para fratura primária;
- Variação da resistência com a forma da partícula;
- Definição da energia crítica de fratura;
- Medida da resistência do material;
- Relação entre produção de finos e energia;
- Relações empíricas para a medida de tenacidade a fratura de materiais.

No Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE/UFRJ, foram recentemente projetadas e construídas três células de carga de impacto (CCI). O objetivo dos ensaios é permitir a determinação da força e da energia necessárias para fratura da partícula quando esta é carregada dinamicamente em compressão. Essa determinação é feita por meio do histórico força-tempo da partícula como mostra a Figura 2.13. No momento da fratura da partícula observa-se que a força sobre a partícula é rapidamente reduzida.

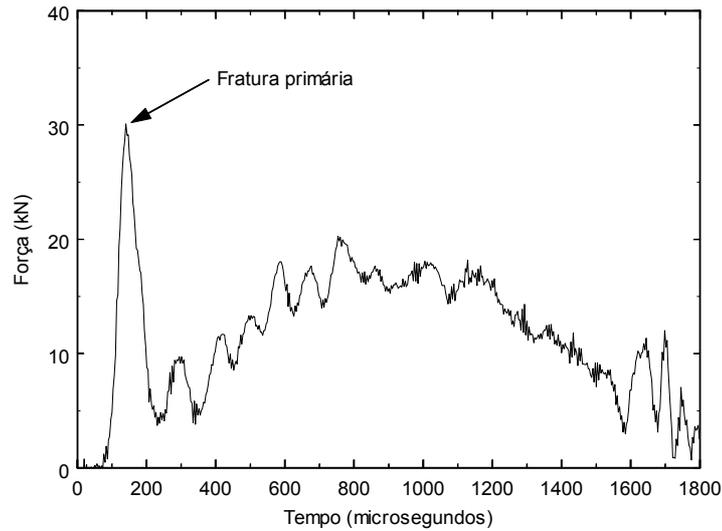


Figura 2.13 – Perfil típico da fratura de uma partícula medido pela célula de carga de impacto do LTM (Tavares e Lima, 2005a).

Uma vez que é utilizada no desenvolvimento deste trabalho, a célula de carga de impacto é descrita a seguir com maior detalhe.

2.5 – Célula de Carga de Impacto

A célula de carga de impacto (CCI) é equipada com sensores de deformação de alta sensibilidade (*strain gauges*) que permitem a medida de forças e deformações sofridas por uma partícula durante o impacto. Dessa forma, é possível se obter importantes medidas para análise das características de fragmentação de materiais. A Figura 2.15 mostra um esquema da parte eletrônica do sistema da célula de carga de impacto (Lima, 2005).

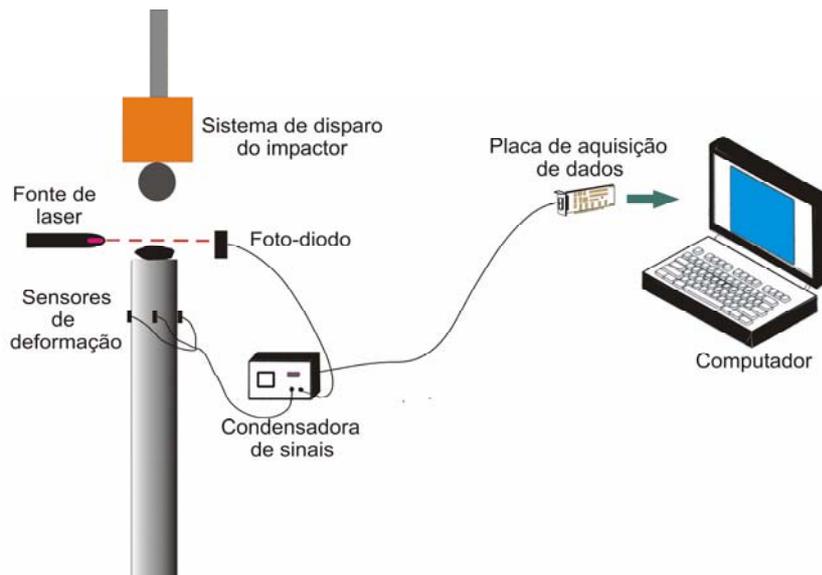


Figura 2.15 - Diagrama esquemático da eletrônica da célula de carga de impacto (Lima, 2005).

O ensaio tem início com o posicionamento de uma partícula, previamente pesada, no topo da barra de aço. Uma bola de aço é solta a partir de uma altura conhecida e selecionada de modo a garantir que todas as partículas da amostra fraturem. A bola cai em queda livre até chocar-se com a partícula. No instante em que a bola cruza o feixe de laser, a aquisição de dados é iniciada. O impacto, que causa a deformação e fratura da partícula, também é responsável pela propagação de uma onda compressiva no interior da barra de aço. A passagem dessa onda de compressão causa uma deformação muito pequena, mas mensurável, nos sensores de deformação (*strain gauges*) de alta resolução posicionados lateralmente na barra metálica. Essas deformações se transformam em alterações das resistências elétricas (R_1 , R_2 , R_3 e R_4) dos *strain gauges*. Esse sinal é, em seguida, condicionado com o auxílio de uma condensadora de sinais que usa um circuito-ponte de Wheatstone (Figura 2.16) e transformado em microvoltagem, com armazenamento contínuo em um osciloscópio digital ou em um microcomputador (equipado com uma placa de aquisição de dados de alta resolução) para análise posterior. O aparelho é ainda equipado com uma caixa para a coleta dos fragmentos resultantes de cada ensaio, os quais são colocados junto com aqueles de ensaios com outras partículas do mesmo lote para que seja realizada a análise granulométrica após o ensaio (Tavares e Lima, 2005a). Com isso, o aparelho ainda permite avaliar a influência da energia de impacto aplicada (ou da energia efetivamente absorvida pelas partículas) na fragmentação.

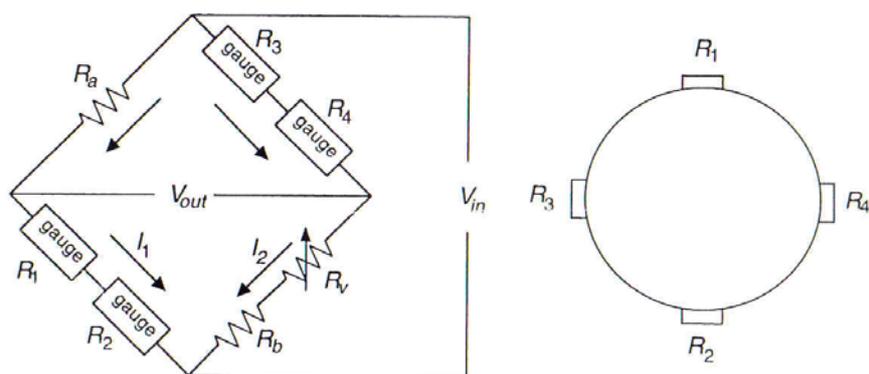


Figura 2.16 - Configuração do circuito de Wheatstone usado na condensadora de sinais. R_1 , R_2 , R_3 e R_4 são as resistências dos strain gauges, R_a e R_b são resistências fixas e R_v é a resistência variável, obtida com o uso de um potenciômetro.

A força exercida no topo da barra pela partícula durante um impacto é calculada a partir da lei de proporcionalidade dos sensores de deformação e da lei de Hooke. Considerando que não ocorre dispersão ou atenuação da onda do ponto de contato até a estação de medida (sensores) e que as deformações no interior da barra são predominantemente elásticas, o que é normalmente válido, e considerando também o baixo nível de tensões transmitidas na barra, Lima (2005) demonstrou a elevada acurácia do aparelho por meio de ensaios de calibração, tendo em vista a excelente correspondência entre os resultados experimentais e os teóricos obtidos pela lei de Hertz. Além disso, mostrou que o módulo de elasticidade calculado por meio da velocidade de propagação da onda elástica se mostrou comparável aos resultados obtidos com a técnica de ultrassom. Isso mostra que o procedimento adotado é válido.

No Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE-UFRJ foram projetadas e instaladas quatro células de carga com diâmetros da barra diferentes, quais sejam: 9 mm, 19 mm, 63 mm (Mainenti, 2002) e 100mm (Pereira, 2004).

Pereira et al. (2004) demonstraram que apesar da CCI com barra de diâmetro 100 mm possuir sistema de impacto por queda guiada, existe boa reprodutibilidade nos ensaios quando se compara as velocidades médias obtidas com o equipamento, com aquelas que representam a queda livre, com erros médios de 2%. No mesmo trabalho foram feitas comparações entre resultados obtidos com a CCI com barra de diâmetro 100mm e o DWT do JKMRC para as mesmas condições de ensaio, sendo observada muito boa correspondência entre os resultados.

As principais características de cada uma das células de carga de impacto são resumidas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características das células de carga de impacto

Diâmetro da CCI	100 mm	63 mm	19 mm	9 mm
Energia Máxima	1200 J	88 J	0,85 J	0,065 J
Tamanhos de partículas	106 – 9,5 mm	80 – 20 mm	20 – 2 mm	2 – 0,1 mm
Impactor	Plano	esfera ou plano	esfera ou plano	esfera ou plano
Disparo do impactor	Eletroímã	Eletroímã	Eletroímã	Vácuo
Sistema de impacto	queda guiada	queda livre	queda livre	queda livre

A seguir serão descritas as principais medidas que podem ser obtidas por meio de ensaios na célula de carga de impacto.

Relações entre Energia de Impacto e Fragmentação

Resultados de ensaios na célula de carga de impacto permitem relacionar a energia de impacto à distribuição granulométrica do produto, a qual é expressa pelo parâmetro t_{10} . A relação entre t_{10} e a energia de impacto é dada pela equação (Napier-Munn et al., 1996):

$$t_{10} = A(1 - e^{-bEcs}) \quad [2.7]$$

onde: t_{10} é a percentagem de material passante em uma peneira de tamanho igual a 0,1 do tamanho inicial das partículas (Figura 2.17), Ecs é a energia específica de fragmentação, A é o valor limite de t_{10} e b é a inclinação da curva $Ecs \times t_{10}$ (Figura 2.18). O produto dos parâmetros de quebra do material, A e b , denominado índice de quebra, ou IQ, pode ser usado como um índice de suscetibilidade do material à fragmentação por impacto.

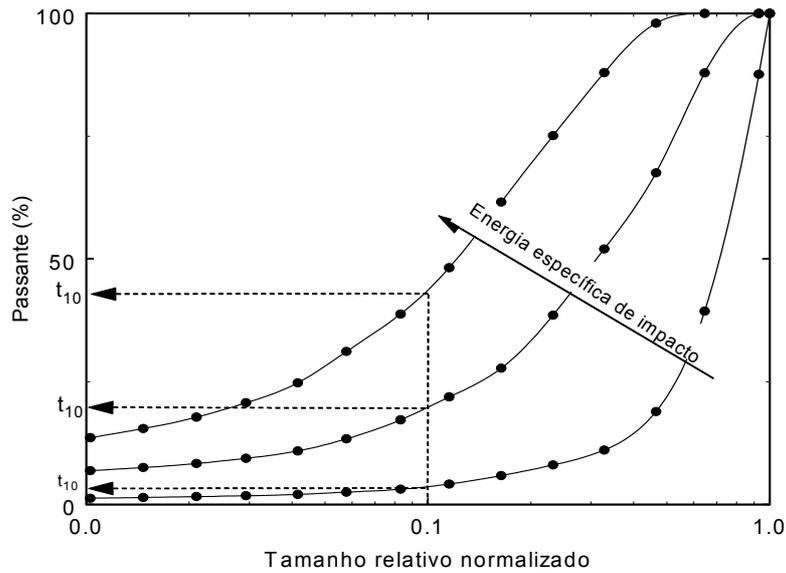


Figura 2.17 - Cálculo do parâmetro t_{10} a partir de análises granulométricas de produtos de ensaios de fragmentação.

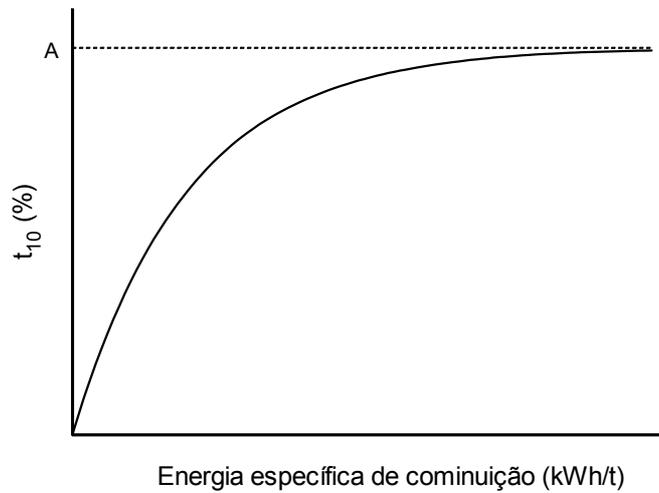


Figura 2.18 - Relação entre t_{10} e a energia específica de impacto – também chamada de energia específica de cominuição (E_{cs})

Energia de Fratura da Partícula

De acordo com Tavares (1999) o balanço de energia durante um impacto na CCI é dado por:

$$E_i = E_c + E_r + E_{res} \quad [2.8]$$

onde: E_i é a energia de impacto, E_c é a energia dissipada que representa a energia consumida na fragmentação da partícula e outras perdas como atrito, deformação plástica da barra e calor, E_r é a energia absorvida na deformação elástica da barra e E_{res} é a energia residual do impactor.

A energia consumida para deformação da barra é dada por:

$$E_r = \frac{1}{\rho SC} \int_0^{t_f} F^2(t) dt \quad [2.9]$$

onde $F(t)$ é o histórico tempo-força do evento de quebra, ρ é a densidade da barra, S é a área da seção transversal da barra, C é velocidade de propagação de onda na barra e t_f é o tempo de contato final.

O coeficiente de restituição do impactor dado por:

$$e \approx \frac{v_{res}}{v_0} = \left(\frac{E_{res}}{E_i} \right)^{1/2} \quad [2.10]$$

então, a Equação 2.8 pode ser rearranjada para se obter a energia de fratura:

$$E_c = E_i(1 - e^2) - \frac{1}{\rho SC} \int_0^{t_f} F^2(t) dt \quad [2.11]$$

O coeficiente de restituição pode ser calculado pela equação:

$$e = \left[E_i - v_0 \int_0^{t_f} F(t) dt - g \int_0^{t_f} F(t) t dt - \frac{1}{m_b} \left(\int_0^{t_f} F(t) dt \right)^2 \right]^{1/2} E_i^{-1/2} \quad [2.12]$$

na qual: g é a aceleração da gravidade e m_b é a massa da bola.

Por fim, pode-se calcular a energia necessária para a fragmentação das partículas (Tavares, 1997):

$$E_c = v_0 \int_0^{t_f} F(t)dt + g \int_0^{t_f} F(t)tdt - \frac{1}{2m_b} \left(\int_0^{t_f} F(t)dt \right)^2 - \frac{1}{\rho SC} \int_0^{t_f} F^2(t)dt \quad [2.13]$$

Resistência das Partículas

Tavares e King (1998a) demonstraram que a equação obtida por Hiramatsu e Oka (1966) pode ser usada para estimar a resistência de partículas sujeitas ao impacto na CCI, a qual é dada por:

$$\sigma_p = \frac{2,8F_c}{\pi d_p^2} \quad [2.14]$$

onde: F_c é a tensão de fratura e d_p é o tamanho de partícula.

Rigidez da Partícula

A rigidez da partícula é determinada com base na teoria de contato de Hertz. O coeficiente de deformação local dessa teoria, K_e , é dado por (Goldsmith, 1960):

$$K_e = \frac{k_p k_{b,r}}{k_p + k_{b,r}} \quad [2.15]$$

onde: $k_{b,r}$ é a rigidez da bola e da barra e k_p é a rigidez da partícula dadas por:

$$k_p = \frac{Y_p}{1 - \mu_p^2} \quad \text{e} \quad k_{b,r} = \frac{Y_{b,r}}{1 - \mu_{b,r}^2} \quad [2.16]$$

onde: Y é o módulo de *Young* e μ é o coeficiente de *Poisson*. Portanto, se o módulo de elasticidade e a razão de *Poisson* da partícula são conhecidos, a rigidez da partícula pode ser calculada diretamente pela equação 2.16. Como esses dados geralmente não são conhecidos, pode-se utilizar uma expressão simples que relaciona a energia de fratura da partícula com K_e (Tavares e King, 1998a), dada por:

$$K_e = \left(0,576 \frac{F_c^5}{d_p E_c^3} \right)^{1/2} \quad [2.17]$$

Dessa forma pode-se obter o valor de K_e , e com os dados de módulo de *Young* (210GPa) e o coeficiente de *Poisson* (0,29) da barra e da bola, feitas de aço, tem-se o valor da rigidez do sistema bola-barra ($k_{b,r}$) de aproximadamente 230GPa, e substituindo-se na Equação 2.16 calcula-se a rigidez da partícula k_p .

Suscetibilidade a Quebra por Impactos Repetidos

Em geral, uma partícula não quebra no primeiro impacto devido aos dois fatos descritos a seguir (Vervoorn e Austin, 1990):

- A resistência da partícula depende da sua orientação, então impactos repetidos são necessários antes que a orientação favorável, relativa aos defeitos pré-existentes, possa ser encontrada na partícula;
- Durante impactos repetidos, os defeitos pré-existentes podem aumentar e alcançar o tamanho ou concentração crítica.

Os resultados de ensaios de impacto repetido realizados na célula de carga de impacto permitem que a susceptibilidade do material à fratura seja obtida.

Tavares e King (2002) desenvolveram um modelo matemático, baseado na mecânica do dano, que descreve o aumento da probabilidade de quebra de partículas sujeitas a impactos repetidos com energia de baixa magnitude. Esse modelo apresenta apenas um parâmetro, portanto requer um esforço experimental muito pequeno para sua utilização. Esse parâmetro, denominado γ , mede a susceptibilidade do material à fratura a baixas energias de impacto.

Nesse estudo Tavares e King demonstraram que o parâmetro γ pode ser estimado por meio das seguintes equações:

$$E_n = E_{n-1}(1 - D_n^*) \quad [2.18]$$

e

$$D_n^* = \left[\frac{2\gamma}{(2\gamma - 5D_n^* + 5)} \frac{E_{cs}}{E_c} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad [2.19]$$

onde: D_n^* é a quantidade de dano induzido na partícula após n impactos.

Para aplicação do modelo as equações 2.18 e 2.19 devem ser calculadas simultaneamente. Visto que D_n^* está implícito na equação 2.19, deve ser usado um procedimento iterativo, o qual em geral converge com 10 interações. De acordo com a equação 2.19, quando a energia de fratura da partícula no n ésimo impacto é menor que a energia de impacto, toda a energia é absorvida e a partícula quebra. Por outro lado, se a energia de fratura é maior que a energia de impacto, a partícula irá absorver parte da energia de impacto e acumulará dano (Tavares e King, 2002).

Materiais com baixos valores de γ são capazes de acumular dano mesmo após impactos de baixa energia, enquanto aqueles com altos valores de γ apenas acumulam dano após impactos com energia muito próximas àquelas necessárias à fratura.

2.6 – Fatores que Influenciam a Fragmentação de Partículas

Um dos principais fatores que afetam a fragmentação de partículas é o seu tamanho. Sabe-se que geralmente a tensão necessária para fraturar partículas de menor tamanho é maior que aquela necessária para a fratura de partículas maiores (Austin, 2002), ou seja, as partículas menores são geralmente mais resistentes que as maiores. Esse aumento de resistência com a diminuição do tamanho é comumente observado em materiais frágeis e é explicado com bases no modelo de *Griffith* para fratura frágil. Segundo esse modelo a quantidade de microtrincas presentes nas partículas deve diminuir quando o tamanho da partícula diminui e como a tenacidade à fratura do material é constante, sua resistência aumenta (Tavares e King, 1998a).

Essa importante influência do tamanho da partícula deve ser considerada na descrição da fragmentação de partículas.

A Equação 2.7 pode ser expressa de modo a demonstrar a influência do tamanho de partícula na fragmentação da seguinte forma (Tavares, 2004a):

$$t_{10} = t_{10,max} \left(1 - e^{-\eta E_{cs} / E_{50}} \right) \quad [2.20]$$

na qual: $t_{10,max}$ é o valor limite de t_{10} , a constante η reflete a tendência do material a sofrer fraturas múltiplas e E_{50} é a energia de fratura mediana, que representa a energia

de impacto na qual metade das partículas sofre ruptura, a qual varia com o tamanho de partícula de acordo com (Tavares e King, 1998a):

$$E_{50} = E_{\infty} \left(1 + \left(\frac{d_{p0}}{d_p} \right)^{\phi} \right) \quad [2.21]$$

onde E_{∞} é a energia específica de fratura de partículas de tamanho infinito, d_{p0} e ϕ são constantes do material e d_p o tamanho da partícula.

Pode-se observar que a energia específica utilizada também é um fator que influencia a fragmentação de partículas. Assim, é preciso uma energia mínima para que se atinja a força necessária para fragmentar as partículas. Por outro lado, todas as partículas irão fragmentar com aplicação de energia suficientemente alta, como mostra a Figura 2.19 (Austin, 2002).

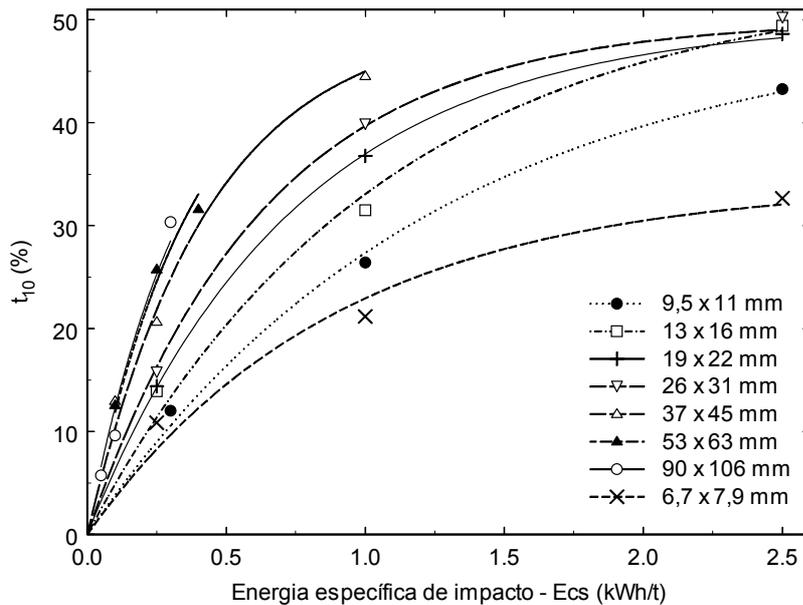


Figura 2.19 – Influência do tamanho de partícula e energia específica de impacto nos valores de t_{10} de uma amostra de bauxita (Pereira et al., 2004).

A forma das partículas também influencia no processo de fragmentação. Partículas lamelares e não-lamelares produzirão diferentes distribuições de tamanho após fragmentação. Segundo critérios utilizados no JKMRC, uma partícula é considerada lamelar se possuir pelo menos uma dimensão menor que 0,6 de sua dimensão média. Devido a sua menor seção transversal, quando se aplica uma certa

energia específica de impacto, a tendência é que seja gerada uma maior quantidade de finos (t_{10} maiores) na fragmentação de partículas lamelares (Figura 2.20).

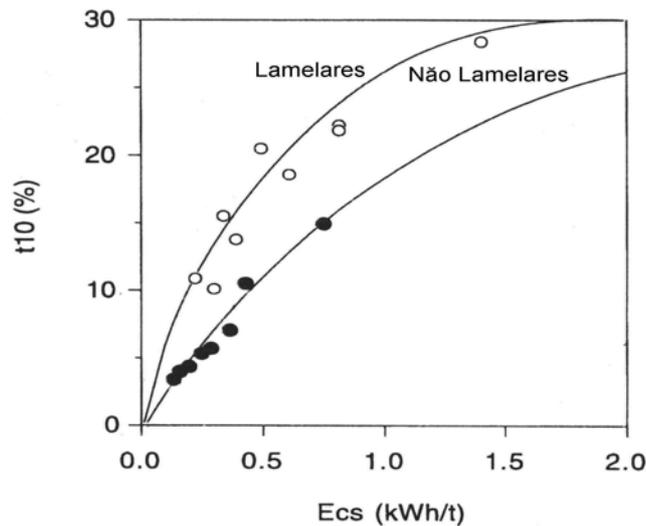


Figura 2.20 – Efeito da forma da partícula na fragmentação (Napier-Munn et al., 1996).

Esse efeito de forma da partícula também foi observado na simulação pelo modelo numérico *Rock Failure Process Analysis* (RFPA), usado para prever o comportamento de partículas quando são fragmentadas individualmente. Foi observado que quanto mais esféricas forem as partículas, maior será a sua resistência à fragmentação. Partículas irregulares possuem áreas com distribuição de tensões irregulares, as quais se deformam mais, formando dessa maneira mais trincas, diferente das partículas esféricas que possuem distribuição de tensão mais regular (Tang et al., 2001).

Pereira et al. (2004) demonstraram que um outro fator que influencia a fragmentação de partículas individuais, principalmente quanto à geração de finos, é a geometria do impactor, o qual pode ser esférico ou plano. Conforme observado em estudo anterior (Tavares, 1997), quando o impactor utilizado apresenta geometria da face de contato plana é gerada uma fragmentação mais intensa dos fragmentos grossos, o que se explica pelo fato de que o impactor esférico tem maior dificuldade, em relação ao plano, de capturar os fragmentos gerados nos primeiros estágios de fragmentação, os quais podem ser projetados para fora da zona ativa de fragmentação (menor quantidade de fratura secundária). Entretanto, Tavares (1997) mostrou que para baixas energias de impacto a influência da geometria do impactor é menos pronunciada. Isso ocorre porque nestes casos a maior parte da energia cinética do impactor é utilizada para a fratura

primária da partícula, ficando apenas uma pequena fração de energia para quebra subsequente de fragmentos (fratura secundária). O contrário ocorre quando são utilizadas maiores energias de impacto, pois nesse caso, uma pequena proporção da energia cinética é utilizada na fratura primária e a maior parte da energia disponível é utilizada para fratura subsequente de fragmentos.

Sabe-se da ciência dos materiais e da mecânica de rochas que um fator que influencia as propriedades mecânicas dos materiais é a taxa ou velocidade de carregamento (Grady e Kipp, 1987). Entretanto, sua importância na cominuição é questionável. Seus efeitos são significantes quando se considera uma ampla faixa de condições, indo desde carregamento lento (aproximadamente estático) até impacto balístico. Em equipamentos de cominuição (britadores e moinhos), as velocidades de carregamento são relativamente baixas, indo de 0,1 até 10 m/s como demonstrado por Prasher (1987). Além disso, Krogh (1979) por meio de ensaios de queda de peso com velocidade de impacto de 0,4 até 1,8 m/s, mostrou que quando a energia de impacto é constante, não há efeito da taxa de carregamento nos resultados de fragmentação. Por outro lado, Lima (2005) recentemente demonstrou que existem diferenças significativas entre o carregamento lento em uma prensa e o rápido na CCI, pois nesta última as partículas se comportam de forma menos deformável (maiores valores de rigidez), exibindo resistência à fratura superior. Isso faz com que energias de fratura maiores, porém não muito, fossem obtidas com a CCI. Porém, no intervalo de velocidades usadas na CCI, a influência da velocidade de impacto na energia de fratura, considerando uma energia de impacto aproximadamente constante, é muito pequena (Lima, 2005).

Lima (2005) também abordou a questão da influência do teor de umidade na fragmentação de partículas, por meio de ensaios de amostras de bauxita sob diferentes condições (seca, baixo teor de umidade e alto teor de umidade), observando que o aumento do teor de umidade resultou em aumentos tanto da resistência das partículas quanto da energia de fratura. Esse aumento significativo contradiz os resultados de Yashima et al. (1976), o que pode ser explicado pelo efeito combinado da elevada porosidade e a elevada concentração de materiais argilosos na amostra analisada, que causa uma intensificação do comportamento plástico do minério quando com alto teor de umidade (Tavares e Lima, 2005b).

A microestrutura do material também afeta significativamente as suas propriedades mecânicas, e, portanto afetará também as características de fragmentação de partículas. Segundo Tavares (2000) a fratura de materiais monofásicos parece ser

controlada pela iniciação da trinca, o que indica que a energia de fratura da partícula será fortemente dependente do tamanho da partícula. Esses materiais quando comparados aos materiais policristalinos apresentaram menor fragmentação se impactados com energias relativas comparáveis. Segundo o autor a fratura dos materiais multifásicos (policristalinos) parece ser controlada pela propagação de trincas, de maneira que a energia de fratura das partículas será independente do seu tamanho original. Além disso, a fragmentação de materiais policristalinos foi maior quando apresentavam ligação intergranular fraca.

Middlemiss e King (1996) mostraram que medidas de fratura por indentação são bastante úteis para análise microestrutural de materiais. Essas medidas associadas a ensaios de fragmentação utilizando a CCI no *Utah Comminution Center* mostraram que existem relações entre a distribuição e tamanho das trincas e as características de fragmentação dos materiais. Desta forma, a quantidade de trincas presentes em um material influenciará a sua fragmentação, ou seja, partículas do mesmo material, com tamanho e formas similares podem apresentar diferentes resultados de fragmentação dependendo do número de trincas e distribuição dessas nas partículas.

2.7 – Função Quebra

A função quebra $B(x,y)$ pode ser definida como a proporção de partículas menores que o tamanho x resultante da fragmentação de partículas de tamanho y . Quando em testes de fragmentação de partículas individuais é utilizada uma grande quantidade de partículas com tamanhos contidos em um intervalo estreito, a distribuição de tamanho do produto representa a função quebra. Essa função não corresponde à distribuição granulométrica do produto final de um equipamento de cominuição, pois as partículas sofrem vários estágios de fragmentação. Entretanto, ela tem um importante papel na descrição quantitativa de processos de cominuição (Tavares, 1999).

Várias tentativas têm sido feitas para determinar a forma da função quebra para cada tipo diferente de mecanismo com base em princípios básicos. Portanto, existem diferentes formas funcionais para da função quebra.

A equação de Austin com três parâmetros é a mais utilizada (King, 1990). O modelo se baseia na idéia de que a população de fragmentos é composta por uma mistura de duas populações distintas: uma resultante dos esforços compressivos, e outra

dos esforços de tração. Cada uma tem uma distribuição acumulada que pode ser adequadamente modelada pela distribuição de Gaudin-Schuhmann:

$$B(x, y) \approx \left(\frac{x}{y}\right)^n \quad [2.22]$$

Diferentes valores do parâmetro da função quebra n , descrevem os fragmentos mais grossos produzidos principalmente pelos esforços de tração e os mais finos produzidos pelos intensos esforços de compressão próximos aos pontos de aplicação de carga. Desta forma, as distribuições podem ser somadas usando um fator de ponderação, sendo dada por:

$$B(x, y) = K\left(\frac{x}{y}\right)^{n_1} + (1 - K)\left(\frac{x}{y}\right)^{n_2} \quad [2.23]$$

O primeiro termo da equação 2.23 descreve a distribuição de tamanhos da fração na população produzida pelos esforços de compressão. De modo geral, considera-se que os dados de distribuição granulométrica são normalizáveis, ou seja, somente dependem da razão x/y . Caso os dados experimentais não sejam normalizáveis, as constantes K , n_1 e n_2 devem ser determinadas como função do tamanho y .

Pesquisadores do JKMRC preferem interpolar os dados de fragmentação de partículas individuais por Splines cúbicas (Napier-Munn et al., 1996). Neves e Tavares (2004a) utilizaram a função quebra na forma normalizável obtida a partir da função de Rosin-Rammler truncada, dada por (King, 2001):

$$B_{ij} = B(D_i; d_j) = 1 - \left(1 - t_{10j}\right) \left(\frac{9}{d_j / D_{i-1}}\right)^\alpha \quad [2.24]$$

sendo $d_j = (D_j D_{j+1})^{0.5}$, D_j são as aberturas das peneiras e α é um parâmetro que requer ajuste a partir de dados experimentais de fragmentação de partículas individuais.

Os valores de b_{ij} podem ser obtidos a partir da função quebra acumulada por

$$b_{ij} = B(D_{i-1}; d_j) - B(D_i; d_j) \quad \text{e} \quad b_{jj} = 1 - B(D_j; d_j) \quad [2.25]$$

O parâmetro t_{10} para cada classe de tamanho j pode ser determinado a partir de resultados de ensaios na célula de carga de impacto.

O fato da função quebra ser normalizável foi abordado por Tavares (1997). A maioria dos materiais estudados permitiu que a função quebra fosse normalizável devido os dados não apresentarem nenhum efeito de escala na fragmentação, como mostra a Figura 2.21. Contudo, alguns materiais policristalinos apresentaram algum efeito de escala na fragmentação, como ilustra a Figura 2.22. Esse efeito é representado por pontos de inflexão, os quais estão associados à fragmentação de materiais heterogêneos que tendem a fraturar nos contornos de grão. A inflexão das curvas ocorre normalmente no tamanho médio de grão das partículas. Portanto, para esses materiais a função quebra não é normalizável para tamanhos menores que este tamanho médio de grão.

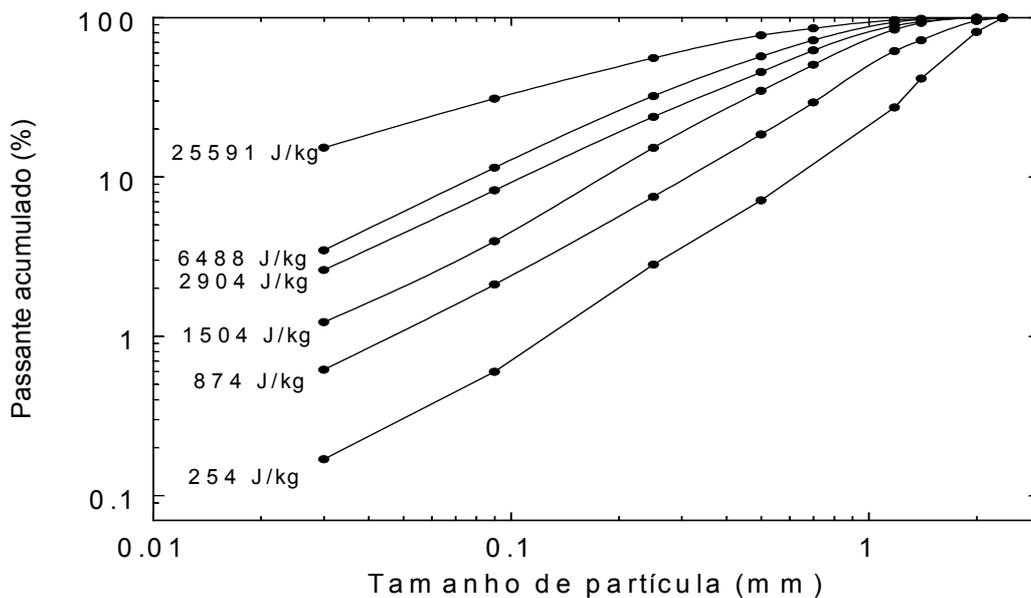


Figura 2.21 – Distribuição de tamanho resultante de ensaios de fragmentação de apatita com 2,0 x 2,8 mm utilizando diferentes energias de impacto (Tavares, 1997).

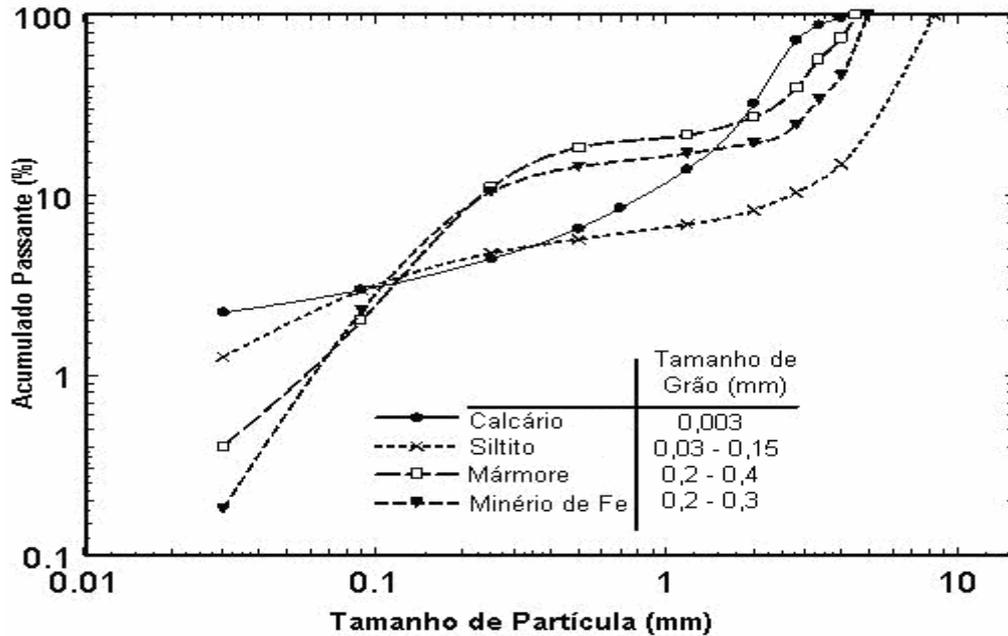


Figura 2.22 – Distribuição de tamanho resultante de ensaios de fragmentação de amostras de calcário com 4,0 x 4,75 mm, silito com 6,7 x 8,0 mm, mármore com 4,0 x 4,75 mm e minério de ferro com 4,0 x 4,75 mm (Tavares, 1997).

2.8 – Aplicações da Caracterização de Materiais quanto à Fragmentação

No JKMRC estudos de fragmentação de partículas individuais têm sido muito utilizados na previsão da operação de moinhos de bolas, autógenos e semi-autógenos. As relações entre energia e redução de tamanho resultantes de ensaios realizados utilizando o pêndulo duplo ou o *drop weight tester* são freqüentemente usadas para fornecer parâmetros do minério que serão usados nos modelos de simulação de moinhos de bolas, autógenos e semi-autógenos e britadores do simulador comercial de processos JKSimMet[®]. Os parâmetros dos equipamentos são calculados a partir de dados de amostragem do circuito. Tendo os modelos sido ajustados a um circuito existente, a operação do circuito de cominuição em distintas condições operacionais pode ser precisamente prevista, como é evidenciado em muitos estudos de otimização realizados. No projeto de novos circuitos, uma grande base de dados de tipos diferentes de minérios e desempenho de circuitos é usada para selecionar parâmetros de equipamentos e minérios para estudos de simulação (Napier-Munn et al., 1996).

Briggs e Bearman (1996) utilizaram uma Barra de Hopkinson Modificada (MHPB) para medida de resistência de partículas antes e depois da britagem, com o objetivo de analisar o efeito de diferentes tipos de britadores (cônicos, giratórios e de impacto) e também diferenças observadas na competência do material quando passa por vários estágios de britagem. Foi observado que britadores de impacto produzem partículas que apresentam pouca variação na resistência, quando comparadas à resistência das partículas da alimentação. Os britadores giratórios causam um grande grau de redução nas partículas, induzindo mais danos nas partículas e, portanto gerando produtos menos competentes, enquanto os britadores cônicos são menos enérgicos quanto ao grau de redução; portanto geram materiais mais competentes. Em outro estudo recente, Tavares (2005a) também demonstrou que o tipo de britador adotado influencia a resistência das partículas do produto.

Um estudo sobre operação de moinhos foi desenvolvido no *Utah Comminution Center*, procurando verificar a influência das características de cominuição do material e do meio de moagem. Esse procedimento contou com a determinação das características de fragmentação do material, por meio de testes de quebra de partículas individuais na CCI, que em conjunto com a simulação do movimento dos corpos moedores no interior do moinho, usando o método de elementos discretos (Mishra e Rajamani, 1992), pôde ser usado para prever a moagem em moinhos de bolas (King e Bourgeois, 1993). Alguns dos benefícios dessa abordagem incluem a capacidade de:

- Previsão do comportamento de diferentes tipos de moinhos, usando pequenas quantidades de amostras;
- Previsão do efeito da moagem em alimentações contendo misturas de materiais com diferentes moabilidades;
- Previsão da abrasão como função das condições de moagem.

As características de fragmentação de materiais podem ser utilizadas para calibração de modelos matemáticos que permitem a previsão do consumo energético de britadores, como proposto por Neves e Tavares (2004a). Esses modelos são necessários para descrever quantitativamente o desempenho de britadores para uso na simulação computacional.

O modelo usado para descrever a operação de britadores é baseado nas funções quebra (Equação 2.23) e função classificação proposta por Whiten (1972). A forma funcional desta última é dada por:

$$\begin{aligned}
 C(x) &= 0 & x \leq d_1 \\
 &= 1 - \left(\frac{x - d_2}{d_1 - d_2} \right)^n & d_1 \leq x \leq d_2 \\
 &= 1 & x \geq d_2
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} C(x) \\ = 1 - \left(\frac{x - d_2}{d_1 - d_2} \right)^n \\ = 1 \end{aligned}} \right\} \quad [2.26]$$

$$d_1 = \lambda \text{ APF} \quad \text{e} \quad d_2 = \delta \text{ APF} \quad [2.27]$$

Na Equação 2.26, d_1 representa o menor tamanho de partícula que o britador pode comprimir e, portanto quebrar, enquanto d_2 representa a maior partícula que pode passar através do britador no instante de maior abertura do ciclo, sendo ambos diretamente influenciados pela APF do britador (Eq. 2.27) (King, 1990). É comum utilizar o valor de $n = 2,3$ na Eq. 2.26 para todos britadores que operam por compressão. Os parâmetros λ e δ são ajustados a partir de dados industriais de britagem.

A previsão do consumo energético dos britadores é realizada com base no modelo originalmente proposto no JKMRC, o qual permite a previsão da energia consumida por britadores com base nas características de quebra do minério e da redução de tamanho que ocorre na britagem. O modelo, desenvolvido por Andersen (1988) é baseado no trabalho de Awachie (1983), é aplicável a vários tipos de britadores e fornece previsões bastante satisfatórias (Neves e Tavares, 2003 e Morrel et al., 1992). O mesmo é representado por:

$$P = QP_c + P_n \quad [2.28]$$

sendo P a potência efetivamente empregada pelo britador durante a operação, P_c a potência calculada com base em ensaios de partículas individuais, P_n a potência utilizada pelo britador operando vazio e Q um fator particular adimensional para um determinado britador, obtido por regressão linear, que tipicamente varia de 1,2 a 1,5 (Napier-Munn et al., 1996). Esses pesquisadores ainda demonstraram que a eficiência

energética de britadores é dada por $\frac{1}{Q}$, e varia de 70-80%. Nesse caso, para o ajuste é considerada a potência líquida consumida pelo britador, mas por outro lado não é considerada a energia ótima para fragmentação de partículas nos ensaios de quebra de partículas individuais.

O cálculo da potência com o ensaio no aparelho de queda de peso ou no pêndulo duplo, P_c , é baseado em:

$$P_c = \sum_{i=1}^j E_{cst_{10}i} C_i x_i \quad [2.29]$$

sendo que $E_{cst_{10}i}$ é a energia específica de cominuição para o valor predominante de t_{10} para o tamanho i (kWh/t), j é o número de intervalos de tamanho, C_i é a função de classificação do tamanho i (Equações 2.24 e 2.25) e x_i é a vazão mássica (em t/h) do tamanho i através da câmara de britagem. Portanto, P_c é a energia total requerida para reduzir a distribuição de tamanhos da alimentação até a distribuição do produto, caso toda a redução se realizasse no ensaio de impacto (Napier-Munn et al., 1996).

Uma aplicação recente de informações de fragmentação de partículas tem sido no cálculo da energia mínima de cominuição. Tavares (2004a) propôs um método de cálculo do consumo energético na cominuição de materiais, o qual utiliza informações da fragmentação de partículas individuais, obtidas por meio de ensaios na célula de carga de impacto, em conjunto com uma rotina computacional. Este método permite simular um processo de cominuição e classificação em múltiplos estágios, e prever a energia mínima necessária na cominuição de materiais. Os resultados da simulação mostraram que a energia total consumida depende significativamente da razão entre a energia específica usada em cada impacto e a energia média de fratura das partículas em cada classe de tamanho, sendo que a energia mínima corresponde a uma razão tipicamente entre 1,5 e 4. Além disso, comparações entre a energia mínima de cominuição e a energia consumida na moagem indicam que a eficiência energética é aproximadamente 30%. Estudos de avaliação da eficiência energética da britagem usando esse método ainda não foram realizados.

Portanto, a combinação de uma melhor compreensão das principais características de deformação e fragmentação de partículas, que podem ser medidas com ferramentas desenvolvidas recentemente, com várias técnicas que permitem a simulação

de equipamentos individuais, permitirá a substituição dos modelos puramente empíricos (Bond) e dos fenomenológicos (balanço populacional) que são usados na modelagem de moinhos e britadores (Tavares, 1997), por modelos mais realísticos.

2.9 – Simulação de Circuitos Industriais de Britagem

Unidades industriais de produção de brita, mesmo as de pequeno porte, possuem diversos estágios em seu processo produtivo, compreendendo o desmonte, carregamento, transporte, manuseio, peneiramento e britagem da rocha. A otimização do processo de produção dessas unidades no que diz respeito apenas à operação de britagem, que passa pela redução de custos e aumento da produtividade, com manutenção, ou melhoramento, dos parâmetros qualitativos do produto é freqüentemente difícil, quando é utilizado o método empírico da tentativa e erro, causando grandes perdas de produtividade (King, 1990; Napier-Munn e Lynch, 1992). Nesse caso, uma ferramenta de grande utilidade é a simulação computacional.

A simulação computacional pode ser utilizada para analisar e aperfeiçoar o desempenho dos circuitos de britagem de pedreiras. A principal vantagem da simulação é a diminuição do risco de perda de produção com paradas em decorrência do uso de metodologia empírica. Assim, com uso de um simulador de processo adequado é possível identificar problemas na usina de britagem, como por exemplo, britadores operando abaixo de suas capacidades, e determinar os ajustes necessários a serem realizados nos equipamentos, bem como no *lay-out* da mesma a fim de maximizar a produtividade e/ou reduzir os custos de processamento. Evidentemente, a precisão e a utilidade da simulação dependem fundamentalmente da qualidade dos modelos matemáticos empregados no simulador.

Um simulador de usinas de processamento mineral é um *software* capaz de prever operações da usina de acordo com características do minério de alimentação e do processo produtivo, ou seja, do fluxograma. A Figura 2.23 ilustra o fluxograma esquemático de um simulador, indicando os dados de entrada necessários e os resultados possíveis de serem obtidos (Neves, 2002).

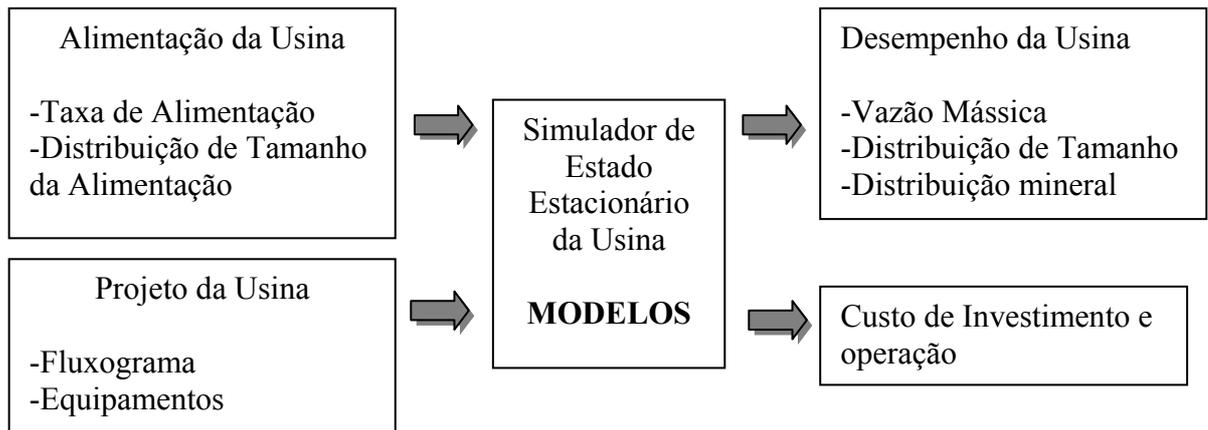


Figura 2.23 – Dados de entrada e de saída de um simulador de estado estacionário (Neves, 2002).

É importante destacar que a simulação em estado estacionário é de grande utilidade na análise de circuitos de britagem, pois permite que um grande número de hipóteses sejam consideradas com relação ao processo produtivo, que os equipamentos sejam dimensionados e que a configuração ótima de uma usina industrial seja encontrada em um tempo muito curto. A previsão de resultados da usina operando no estado estacionário sob dadas condições é chamada simulação direta, a qual descreve cada corrente da usina a partir da alimentação, especificações de equipamentos e parâmetros do modelo. Assim, a simulação direta é utilizada para prever a operação de uma usina completa (_____,1996).

Os principais componentes de um simulador são:

- O *software* de simulação, que oferece a interface entre o usuário e o simulador e também a coordenação de cálculos;
- Modelos matemáticos para as unidades de operação, que constituem o núcleo do sistema, como ilustrado no fluxograma da Figura 2.24.

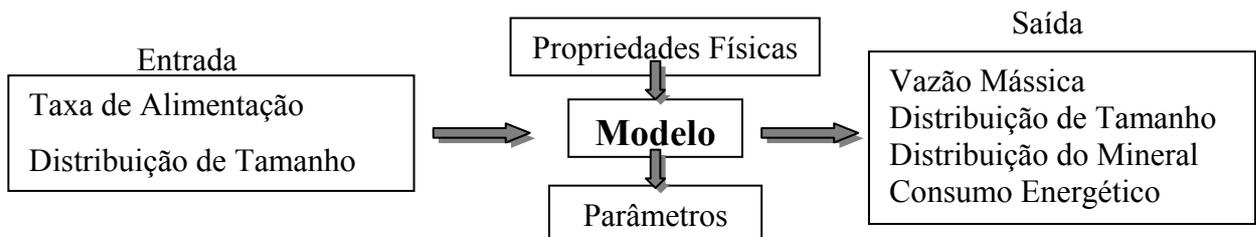


Figura 2.24 – Modelo para as unidades de operação (Neves, 2002).

O desenvolvimento de um simulador comercial requer recursos substanciais. Portanto não é surpreendente que o número de simuladores disponíveis e que têm alcançado importância significativa no mercado seja relativamente pequeno. Porém, muitos têm sido desenvolvidos por meio de pesquisas em universidades e centros de pesquisas (Napier-Munn e Lynch, 1992).

Alguns dos simuladores mais importantes atualmente são (Napier–Munn e Lynch, 1992):

- MODSIM, desenvolvido por R. P. King e outros pesquisadores na University of the Witwatersrand, e seus derivados MICROSIM e MODSIM – Utah;
- A série canadense CANMET de simulação, CAMP;
- GSIM, desenvolvido no laboratório Warren Spring, o qual possui o modelo de separação gravimétrica, GMODEL[®];
- O simulador dinâmico, SysCAD, e seu modelo de estado estacionário ProBal, desenvolvido por Kenwalt na África do Sul,
- O simulador de estado estacionário do Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre JKSimMet[®], e seus modelos derivados;
- O simulador Limn[®], baseado na planilha eletrônica Excel[®], da Microsoft;
- O simulador francês USIM PAC[®] desenvolvido pela BRGM, o qual é usado no presente trabalho;

O USIM PAC[®] é um simulador avançado que oferece uma grande capacidade para dados de entrada, apresentação de resultados e processamento de balanço de massa, permitindo a estimação de parâmetros e a simulação direta. Suas principais características são (____, 1996):

- Os dados de entrada e a apresentação dos resultados utilizam vocabulário e gráficos familiares aos indivíduos da indústria mineral. O fluxograma é mostrado em uma forma gráfica, e a maior parte dos parâmetros tem um significado físico claro, isso é: vazão mássica das correntes, classe de componentes, distribuição do mineral e de tamanho de partículas, abertura de posição fechada dos britadores, dimensões das peneiras, etc.;

- A entrada de dados é interativa, clara e simples. Os dados são armazenados de forma que permitam a exposição, reutilização ou modificação dos mesmos.

Como não é possível medir todos os parâmetros que afetam o comportamento do minério, resultados confiáveis podem ser obtidos se alguns parâmetros de calibração são ajustados com base em resultados experimentais. Os parâmetros de calibração do USIM PAC[®] incluem parâmetros do minério (propriedades físicas) e parâmetros específicos dos modelos de simulação dos equipamentos, permitindo ajuste quantitativo das equações para melhor descrever os resultados experimentais (_____, 1996).

As etapas necessárias para otimizar o processo produtivo de uma usina, com dimensionamento e/ou inclusão de equipamentos, visando aumentar a capacidade são descritas na Figura 2.25 (Neves, 2002).

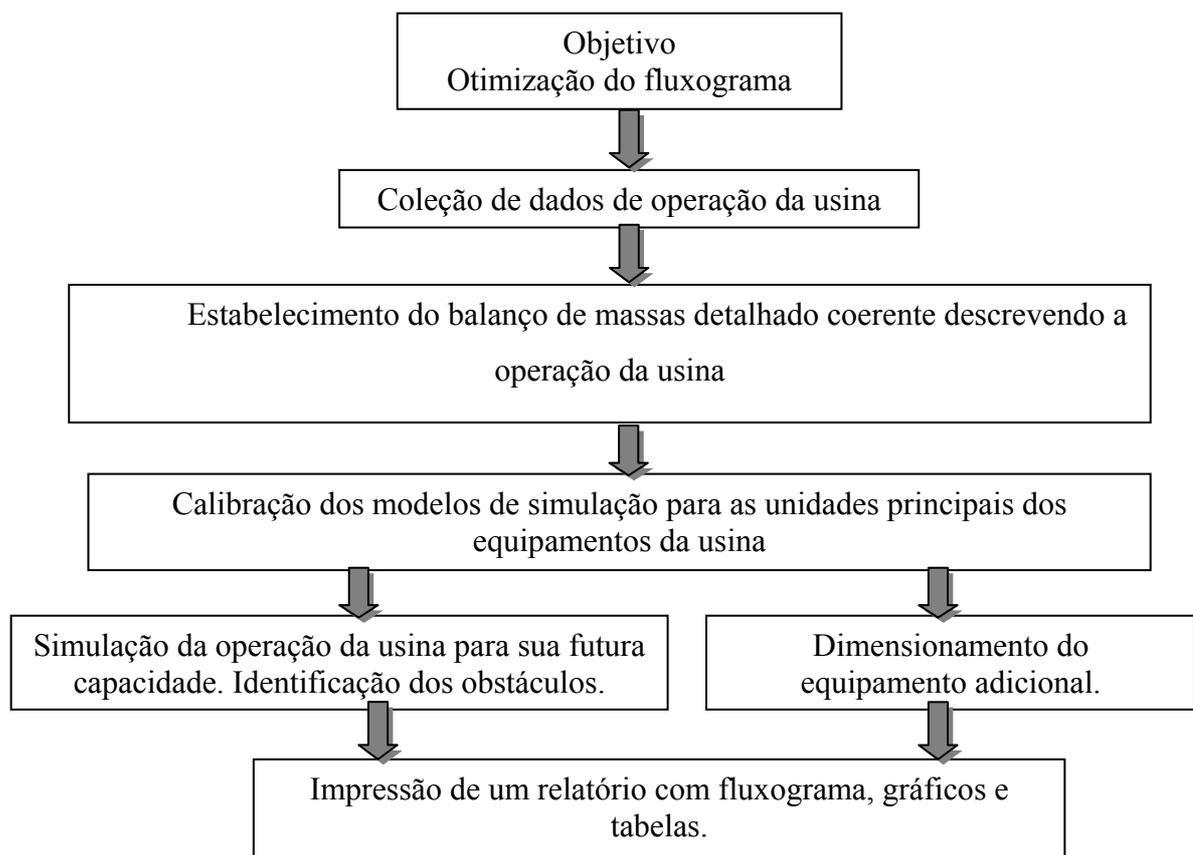


Figura 2.25 – Etapas para otimização do processo produtivo de uma usina (Neves, 2002)

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Para relacionar a influência das características microestruturais na fragmentação de partículas individuais na célula de carga foram analisadas amostras de quatro materiais diferentes. Esses materiais são utilizados na produção de brita para construção civil, sendo fornecidos, respectivamente, pelas empresas: Pedra Sul Mineração Ltda. (Mathias Barbosa – MG), Pedreira Santa Luzia Ltda. (Itaguaí – RJ), Pedreira Vigné Ltda. (Nova Iguaçu – RJ) e Embu Mineração e Comércio Ltda. (Embu – SP).

Todas as amostras foram coletadas na alimentação do circuito de rebitagem (britagem secundária) na forma de partículas com tamanho máximo de 106 mm, até tamanhos finos, sendo separadas por peneiramento a seco em intervalos estreitos de tamanhos para a realização dos ensaios que são descritos a seguir.

3.1 – Medida de Massa Específica

As medidas de densidade (ou massa específica) das partículas foram feitas por meio de pesagem hidrostática utilizando uma balança apropriada (Figura 3.1). Foram utilizadas 30 partículas de tamanho 9,5 x 6,7 mm para cada amostra.

As partículas eram pesadas uma a uma, primeiramente a seco e, em seguida, submersas em água. Com esses valores é possível obter a densidade das partículas por meio da equação:

$$\rho = \frac{m_{\text{sec}}}{(m_{\text{sec}} - m_{\text{sub}})} \rho_{\text{água}} \quad [3.1]$$

na qual ρ é a densidade relativa da partícula (g/cm^3), m_{sec} é a massa da partícula seca (g), m_{sub} é a massa da partícula submersa e $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água (1 g/cm^3).

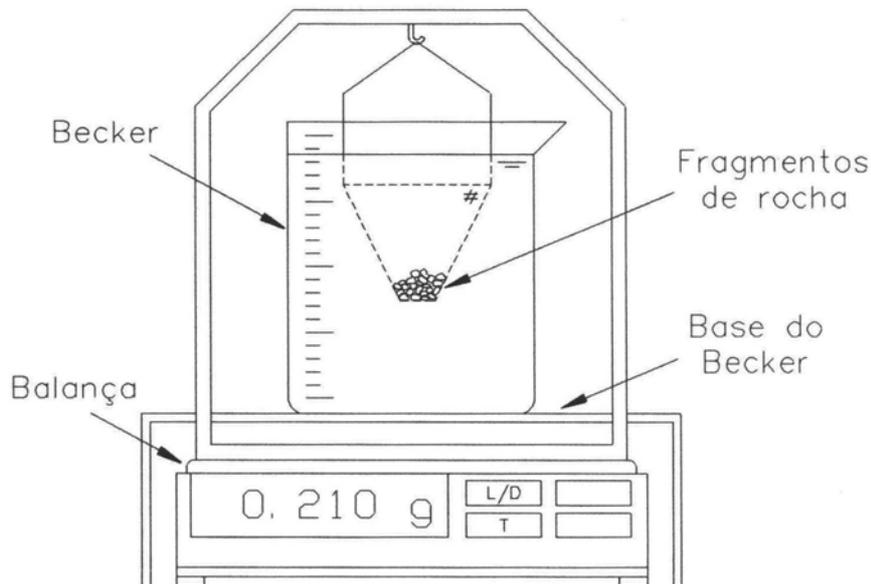


Figura 3.1 – Balança utilizada para determinação de densidade.

3.2 – Ensaio de Fragmentação de Partículas Individuais

Estes ensaios foram realizados nas células de carga de impacto do Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE/UFRJ (Figura 3.2). A preparação das amostras para os ensaios consiste da separação de frações estreitas de tamanhos (monotamanhos) indo desde 90 mm (quando disponíveis) até 2,36 mm. Para cada monotamanho foram separados lotes contendo de quinze a cem partículas, e medida a massa média de cada lote, m_p (g). As partículas de cada lote foram submetidas a impactos a diferentes níveis de energia, E_{cs} (kWh/t), variando desde 0,05 até 2,5 kWh/t. A energia específica utilizada em cada ensaio é função da altura de queda, h (cm) e da massa do impactor, M (kg). Para uma determinada energia, a altura de queda é obtida por:

$$h = \frac{E_{cs} m_p}{0,0272M} \quad [3.2]$$



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2 – Células de Carga de Impacto do LTM com barras de diâmetro: (a) 19 mm, (b) 63 mm e (c) 100 mm.

A Tabela 3.1 mostra um resumo dos níveis de energia, peso de impactor, número de partículas e célula de carga utilizada para cada lote.

Tabela 3.1 – Resumo dos ensaios realizados na célula de carga de impacto

Tamanho de Partícula (mm)	Quantidade de Partículas em cada lote	Massa do Impactor (Kg)	Energia Específica de Impacto (kWh/t)	CCI (mm)
90 x 75	15	60	0,30	100
		40	0,10	
		15	0,05	
63 x 53	30	50	0,90	100
		40	0,25	
		15	0,10	
45 x 37,5	50	50	1,00	100
		40	0,25	
		15	0,10	
31,5 x 26,5	50	50	2,50	100
		40	1,00	
		15	0,25	
22,4 x 19,0	50	15	2,50	100
		15	1,00	
		3	0,25	
16,0 x 13,2	50	15	2,50	100
		3	1,00	
		3	0,25	
11,2 x 9,5	100	3	2,50	100
		3	1,00	63
		0,7	0,25	
8,0 x 6,7	100	3	2,50	100
		3	1,00	63
		0,7	0,25	
5,6 x 4,75	100	0,7	2,50	63
		0,7	1,00	19
		0,3	0,25	
4,0 x 3,35	100	0,7	2,50	19
		0,3	1,00	
		0,1	0,25	
2,83 x 2,36	100	0,3	2,50	19
		0,1	1,00	
		0,1	0,25	

As partículas foram impactadas individualmente tomando-se o cuidado de retirar todos os fragmentos da barra antes do próximo impacto. Imediatamente após os ensaios, os fragmentos de cada lote eram recolhidos e analisados por peneiramento híbrido (úmido/seco) em um peneirador RO-TAP[®] pelo período de 10 minutos, utilizando uma

série de peneiras que segue a progressão geométrica de $\sqrt{2}$. Conforme adotado no Laboratório de Tecnologia Mineral, COPPE/UFRJ, perdas de material durante a coleta e peneiramento do material devem ser inferiores a 2%.

3.3 – Ensaio de Medida de Energia de Fratura, Resistência e Rigidez de Partículas

Para este ensaio foram separados lotes de amostras contendo um mínimo de 30, tipicamente 50 partículas, das frações 90 x 75 mm, 63 x 53 mm, 45 x 37,5 mm, 22,4 x 19 mm, 16 x 13,2 mm, 11,2 x 9,5 mm, 5,6 x 4,75 mm, 2,83 mm x 2,36 mm, 1,4 x 1,18 mm e 0,70 x 0,59 mm. A seleção das partículas foi feita de maneira aleatória, e o número significativo de partículas, superior àquele empregado em ensaios mecânicos, se deve à grande variabilidade associada à forma das partículas.

Cada partícula dos lotes era submetida a ensaios nas células de carga de impacto, a fim de determinar a distribuição de energias de fratura, resistência e rigidez das partículas. Para partículas menores que 2 mm os ensaios foram realizados na CCI com barra de diâmetro 9 mm (Figura 3.3), devido à maior resolução demandada na medida, o que é possível com o uso de barras de menor diâmetro.

Antes de iniciar o ensaio, as 50 partículas eram pesadas individualmente. O nível de energia adequado era determinado pela combinação do peso da bola e da altura de queda, de modo que todas as partículas pudessem ser fraturadas (conforme procedimento do Laboratório de Tecnologia Mineral COPPE/UFRJ, uma partícula é considerada fraturada se perde pelo menos 10% de seu peso original durante o impacto), mas sem serem estilhaçadas, pois isso dificultaria (para alguns materiais) a identificação do ponto de fratura. Desta maneira, o histórico tempo-força resultante permitiu que o pico correspondente à fratura primária fosse distinguido com facilidade.

O teste consiste em colocar no topo da barra as partículas na sua posição de maior estabilidade, a fim de impedir que a partícula mude de posição durante o impacto. O impactor é solto e o histórico tempo-força de cada partícula é armazenado usando o *software* de aquisição de dados *LabView*[®]. A barra é limpa para que outra partícula seja impactada, e ao final os fragmentos são coletados.

De posse do histórico tempo-força de cada partícula é possível determinar o tempo inicial e final da fragmentação primária das mesmas, e com auxílio de uma

planilha de Excel[®] aplica-se a equação 2.13 e tem-se a energia de fratura de cada partícula.

Substituindo-se a equação 2.14 na equação 2.17 e sabendo-se que $E_c = \frac{E_{cs}}{\beta \rho d_p^3}$,

tem-se:

$$\sigma_p = K_e^{2/5} (E_c \beta \rho)^{3/5} \quad [3.3]$$

na qual: β é o fator de forma da partícula, ρ é a densidade do material e E_c é a energia específica de fratura.

A Equação 3.3 representa a relação entre as três medidas obtidas por meio deste ensaio, a energia de fratura, a resistência e a rigidez da partícula, de forma independente do tamanho de partícula.

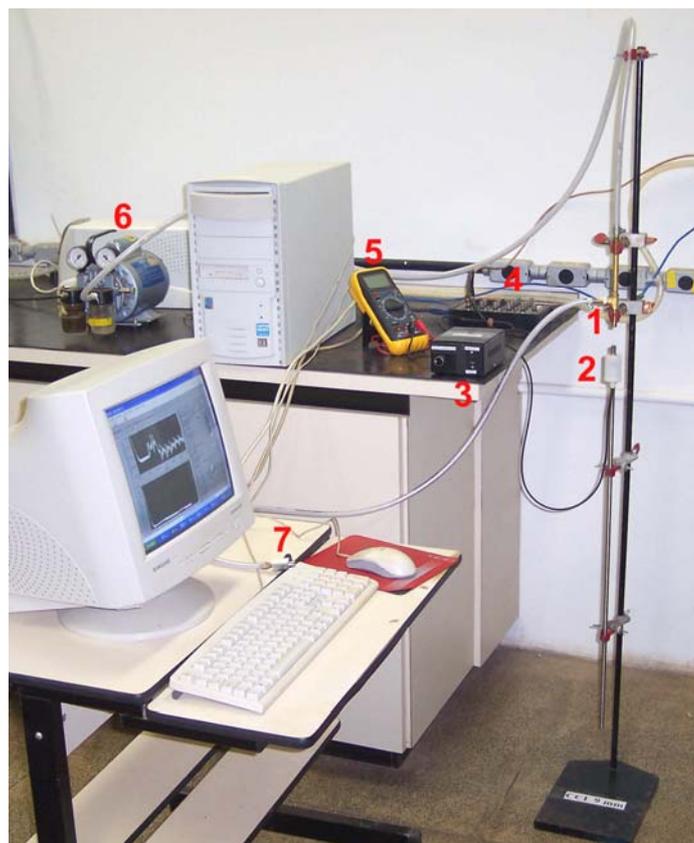


Figura 3.3 - Configuração da célula de carga de impacto de alta resolução (9mm): 1: sistema de disparo a vácuo; 2: barra com *strain gauges*; 3: condensadora de sinais; 4: bloco conector BNC-2110; 5: multímetro digital; 6: bomba de vácuo e 7: válvula de disparo do impactor.

3.4 – Índices de Lamelaridade e Alongamento das Partículas

Para análise da forma de partículas após ensaios de fragmentação na CCI foram determinados os índices de lamelaridade e alongamento das partículas com tamanho 9,5 x 6,7 mm resultantes da fragmentação de partículas com tamanho inicial de 45 x 37,5 mm, para os diferentes níveis de energia utilizados nos ensaios na célula de carga de impacto. Para os níveis de energia mais elevados foram ensaiadas um total da ordem de 800 partículas, enquanto que para aqueles com energia mais baixa foram ensaiadas cerca de 90 partículas. Estes ensaios foram realizados para os materiais das pedreiras Vigné, Pedra Sul e Santa Luzia.

Os índices de lamelação e alongamento foram determinados conforme a Norma Portuguesa da Junta Autónoma das Estradas (_____, 1980), sendo detalhadas a seguir (Neves, 2004). As medidas foram realizadas no Instituto Geológico e Mineiro de Porto (Portugal).

Índice de Lamelaridade

Para este ensaio todas as partículas contidas no intervalo de 9,5 x 6,7 mm eram pesadas e a massa M_1 determinada. Com o auxílio de um gabarito com abertura igual a 0,6 do tamanho da partícula (0,6 de 7,9 mm), testava-se a passagem das mesmas uma a uma pelo medidor. Eram testadas todas as posições da partícula. As partículas que conseguiam passar pelo medidor em pelo menos uma dimensão são consideradas lamelares. Por fim, essas partículas passantes pelo medidor eram pesadas, determinando-se, assim, a massa M_2 . O índice de lamelaridade (IL) é dado por:

$$IL = \frac{M_2}{M_1} 100 \quad [3.4]$$

Quando IL é maior que 35% as partículas são consideradas lamelares, enquanto que se IL está abaixo desse valor as mesmas são consideradas não-lamelares.

Índice de Alongamento

Para este ensaio todas as partículas contidas no intervalo de 9,5 x 6,7 mm eram pesadas, e determinada a massa M_1 . Com um gabarito com abertura igual a 1,8 do tamanho da partícula (0,6 de 7,9 mm), testava-se a passagem das mesmas uma a uma

pelo medidor. A maior dimensão da partícula era testada. As partículas alongadas são aquelas que são incapazes de passar pelo gabarito em pelo menos uma de suas posições. Por fim, eram pesadas todas as partículas retidas no gabarito, determinando-se a massa M_3 . O índice de alongamento (IA) é dado por:

$$IA = \frac{M_3}{M_1} 100 \quad [3.5]$$

Quando IA é maior que 40% as partículas são consideradas alongadas, enquanto que se IA está abaixo desse valor as mesmas são consideradas não-alongadas.

3.5 – Ensaio de Impactos Repetidos de Partículas Individuais

Este ensaio foi realizado na célula de carga de impacto com barra de 19mm, com o objetivo de determinar o índice γ (Equação 2.19) que mede a susceptibilidade do material à fratura a baixas energias de impacto (Tavares e King, 2002). Para sua realização foram utilizados 2 lotes, cada um contendo 100 partículas de tamanho entre 5,6 e 4,75 mm.

Para os dois lotes foram utilizados impactos de baixa energia, entre 0,025 e 0,15 kWh/t. Esses níveis de energia eram obtidos combinando-se o peso do impactor e a altura de queda adequada (Equação 3.2).

O procedimento adotado no ensaio consistiu em identificar e pesar cuidadosamente as partículas, submetendo, em seguida, uma a uma, a impactos repetidos (até um máximo de 20 impactos), até que tivessem sido fraturadas. É adotado o mesmo critério do ensaio de medida de energia para considerar uma partícula fraturada, ou seja, perda de um mínimo de 10% da massa.

Os resultados foram compilados e a proporção de quebra do material após cada impacto era estimada, por meio da solução das equações 2.17 e 2.18. Valores baixos da ordem de 2 indicam um material muito susceptível à fratura por impactos sucessivos, enquanto materiais com valor superior a 10 são encontrados para materiais com susceptibilidade excepcionalmente baixa à fratura por impactos repetidos (Tavares e King, 2002).

3.6 – Ensaio de Resistência a Abrasão

Os ensaios de abrasão foram realizados utilizando-se amostras de 3kg de cada material, com partículas com tamanho entre 53 e 37,5 mm. As mesmas foram colocadas em um moinho tubular de 300 mm de diâmetro por 300 mm de comprimento com quatro barras de elevação de 10 mm (Figura 3.4), e submetidas a moagem por um período de 10 minutos (na ausência de corpos moedores), a 70% de sua velocidade crítica. Após a retirada do produto do moinho foi feito peneiramento (a seco), seguindo uma série com razão igual à raiz quadrada de dois. Em seguida, foi feito o cálculo do valor de t_{10} da distribuição granulométrica obtida, e cálculo do parâmetro de abrasão t_a , o qual corresponde a $\frac{1}{10}$ do valor de t_{10} .

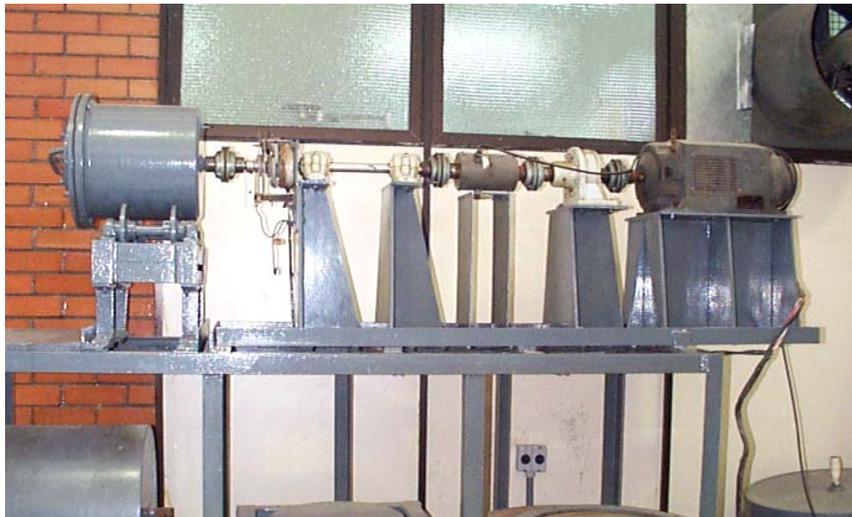


Figura 3.4 – Moinho utilizado para ensaios de abrasão.

Este ensaio é realizado com o objetivo de avaliar o comportamento dos materiais quando fraturados pelo mecanismo de abrasão (Figura 2.2a), procurando estabelecer a resistência à fragmentação por abrasão dos materiais. Segundo uma grande quantidade de ensaios realizados no JKMRC, valores de t_a variam de 0,2 (minérios mais resistentes à fragmentação por abrasão) até 2 (minérios menos resistentes à fragmentação por abrasão). É importante lembrar que este ensaio de abrasão não deve ser confundido com o ensaio de abrasividade da Allis-Chalmers, que mede a abrasão de metais causada por minérios estabelecendo o Índice de Abrasão (AI). Portanto, o parâmetro t_a representa a resistência do minério à fragmentação por abrasão, ao passo que o índice AI representa a abrasão causada pelo minério em corpos metálicos (Napier Munn et al., 1996).

3.7 – Análise Microestrutural

As análises microestruturais, ou seja, a determinação da textura, mineralogia, estrutura e classificação das amostras dos diferentes materiais estudados foram realizadas no Instituto Geológico Mineiro (IGM), Porto – Portugal (Neves,2004) e no Departamento de Geociências da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (Valente, 2005a), conforme descrito a seguir.

As amostras de partículas foram lavadas e escovadas, secas ao ar e etiquetadas, adotando-se os prefixos V, PS, SL e E para as pedreiras Vigné, Pedra Sul, Santa Luzia e Embu, respectivamente. Em seguida, foram selecionadas partículas que serviriam para confecção de lâminas petrográficas para as análises sob microscópio de luz transmitida.

Para preparação das lâminas petrográficas, as partículas de rocha foram serradas ao longo de seções previamente determinadas para a produção de fatias com cerca de 3 x 2 x 1 cm. Estas fatias foram colocadas em uma lâmina de vidro com dimensões de 4 x 2 x 0,3 cm, e desbastadas por abrasão úmida com alumina de granulação 100#, 300#, 600# e 1000# até que fosse atingida a espessura de aproximadamente 3 μ .

Após a preparação, as amostras foram submetidas a análises petrográficas sob escala macroscópica e microscópica, sendo esta última feita utilizando-se um microscópio petrográfico OLYMPUS B-40 de luz transmitida.

3.8 – Análise do Comportamento de Partículas na Britagem

A análise do comportamento de partículas em britadores operando em circuitos industriais foi realizada por meio de amostragem da alimentação e do produto de diferentes tipos de britadores cônicos e giratórios, nas usinas da Pedra Sul Mineração, Pedreira Vigné, Pedreira Santa Luzia e Pedreira Embu, operando com diferentes aberturas de posição fechada (APF). A amostragem das correias de alimentação e produto foi feita da seguinte forma (Neves, 2002):

- Para correias com material maior que 75 mm, as amostras foram retiradas de uma extensão de 5 m de correia. Esse material foi, em seguida separado em classes de tamanhos usando gabaritos de 200 mm, 150 mm, 100 mm e 75

mm. Para o material abaixo de 75 mm, foi retirada uma amostra representativa, numa extensão de 2 m de correia;

- Para correias com material menor que 75 mm, foram retiradas amostras em uma extensão de 2 m na correia.

Após a coleta das amostras, as mesmas foram ensacadas, pesadas e devidamente identificadas. Durante a amostragem foram coletados os seguintes dados:

- APF dos britadores, determinada por gabaritos de chumbo, os quais eram deformados até a abertura de posição fechada; intensidades de corrente dos britadores tanto carregados (cheios) como descarregados (vazios), a partir da leitura direta nos equipamentos na sala de controle;
- Tensão de alimentação e fator de fase dos motores dos britadores; velocidades das correias, sendo essas estabelecidas a partir do tempo gasto por uma marca para percorrer uma distância previamente determinada. Essa informação é fundamental para determinar a taxa de alimentação dos britadores.

Uma vez recebidas no LTM, as amostras foram quarteadas e peneiradas pelo método híbrido, a fim de determinar a sua distribuição granulométrica.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos em seis seções os resultados dos estudos realizados. Primeiro serão apresentadas as características químicas, mineralógicas e texturais dos materiais analisados. Em seguida são discutidos os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais quanto a fragmentação individual de partículas utilizando a célula de carga de impacto, seguidos dos resultados obtidos com o ensaio de fragmentação por abrasão. Por fim, será discutido o comportamento das partículas na britagem, por meio de ensaio realizados em laboratórios e em circuitos industriais de britagem.

4.1 – Caracterização Química, Mineralógica e Textural

A composição química dos materiais das Pedreiras Vigné, Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu, determinada por análises de fluorescência de raios-X, é apresentada na Tabela 4.1. Nota-se o alto teor de sílica das amostras, sendo que o material da Embu apresenta os maiores teores deste composto.

Tabela 4.1 – Composição química média (%) das amostras estudadas (P.F. é a perda ao fogo)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F
Vigné	60,05	17,85	4,10	0,24	0,88	1,99	1,68	7,53	0,96	0,18	4,18
Pedra Sul	67,11	14,71	4,57	0,07	1,82	3,79	2,28	4,45	0,49	0,11	0,40
Santa Luzia	59,26	15,82	6,66	0,10	3,45	5,42	3,17	3,04	1,04	0,26	1,00
Embu	72,42	12,97	4,29	0,06	0,62	1,83	2,32	2,90	0,74	0,25	1,08

A análise petrográfica sob escala macroscópica e microscópica dos materiais permitiu a identificação das litologias de cada uma das pedreiras. Com relação aos tipos de rochas encontrados, os mais comuns foram rochas metamórficas (gnaisses e granulitos) e rochas ígneas, tanto tipos plutônicas (granitóides e sienitos) como vulcânicas (traquitos). Não foi observado nenhum tipo de rocha sedimentar.

As amostras da Pedreira Vigné são sienitos e traquitos, sendo os sienitos mais abundantes, enquanto que as da Pedreira Santa Luzia são gnaisses e granitóides, sendo os gnaisses mais abundantes. As da Pedra Sul Mineração são granulitos, e as da Pedreira Embu são ortognaisses, mais especificamente, granodiorito gnaisse. A Tabela 4.2 mostra um resumo dos tipos de rochas encontrados, tendo como base a análise de um total de 98 amostras.

Tabela 4.2 – Tipos de rochas das quatro pedreiras estudadas

Tipo de Rocha	Vigné	Santa Luzia	Pedra Sul	Embu
Rocha Metamórfica	0 (0%)	25 (83%)	31 (100%)	6 (100%)
Rocha Ígnea Plutônica	21 (68%)	5 (17%)	0 (0%)	0 (0%)
Rocha Ígnea Vulcânica	10 (32%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (%)
Total de Amostras	31 (100%)	30 (100%)	31 (100%)	6 (100%)

Como pode ser observado na Tabela 4.2, a Pedra Sul Mineração e a Embu foram aquelas que apresentaram menor variedade com relação ao tipo de rocha, seguida pela Pedreira Vigné que apresentou somente rochas plutônicas, isto é, sienitos, e seus equivalentes vulcânicos, os traquitos. Entretanto a Santa Luzia apresentou ampla variedade petrográfica, incluindo diferentes tipos de gnaisses e granitóides, rochas metamórficas e ígneas plutônicas, respectivamente.

De um modo geral, as amostras das Pedreiras Vigné, Pedra Sul Mineração e Santa Luzia se encontram parcialmente alteradas. Isto significa que elas mantêm ainda boa consistência física, mas que seus minerais constituintes perderam ou suas cores ou seus brilhos característicos. Já o material da Pedreira Embu se encontra inalterado. A Tabela 4.3 mostra um resumo quanto a essas características.

Tabela 4.3 – Resumo das características de alteração das amostras analisadas

Característica	Vigné	Santa Luzia	Pedra Sul	Embu
Inalterada	0 (0%)	7 (23%)	0 (0%)	6 (100%)
Parcialmente Alterada	19 (61%)	18 (60%)	29 (94%)	0 (0%)
Alteradas	12 (39%)	5 (17%)	2 (6%)	0 (0%)
Total de Amostras	31 (100%)	30 (100%)	31 (100%)	6 (100%)

A Figura 4.1 mostra amostras representativas das quatro pedreiras em escala macroscópica.

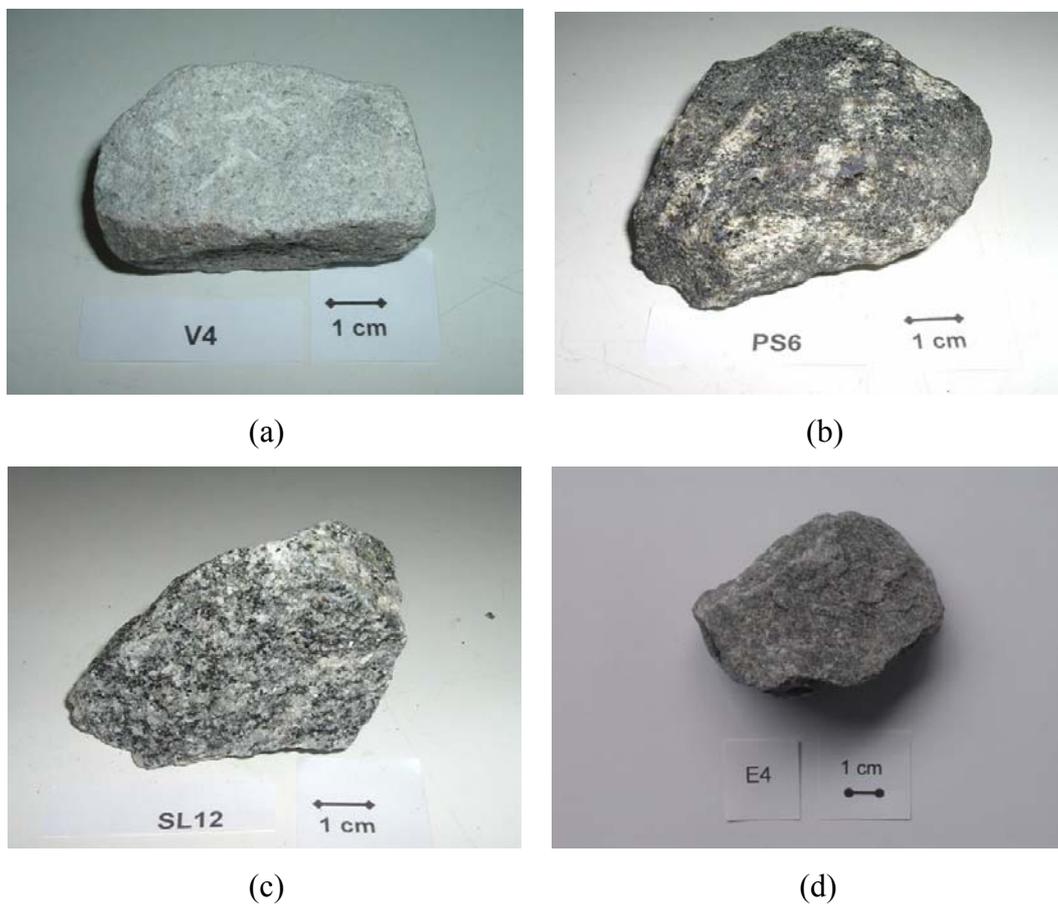


Figura 4.1 – Macroscopia das amostras analisadas, sendo (a) Vigné; (b) Pedra Sul Mineração; (c) Santa Luzia; (d) Embu.

As Tabelas 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 mostram a composição mineralógica, obtida a partir da análise microscópica de lâminas petrográficas para os materiais das Pedreiras Vigné, Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu, respectivamente.

Tabela 4.4 – Composição mineralógica média da amostra da Pedreira Vigné

Mineral	Sienitos (% em volume)	Traquitos (% em volume)
Álcali-feldspato	86	96
Plagioclásio	10	0
Biotita	4	4

Tabela 4.5 – Composição mineralógica média da amostra da Pedra Sul Mineração

Mineral	(% em volume)
Álcali-feldspato	32
Plagioclásio	21
Hiperstênio	15
Biotita	2
Quartzo	15
Hornblenda	12
Augita	3

Tabela 4.6 – Composição mineralógica média da amostra da Pedreira Santa Luzia

Mineral	(% em volume)
Microlina	21
Quartzo	23
Biotita	22
Ortoclásio	11
Plagioclásio	15
Andesina	4
Hornblenda	4

Tabela 4.7 – Composição mineralógica média da amostra da Pedreira Embu

Mineral	Ortognaisse (% em volume)	Veio de Quatzo (% em volume)
Álcali-feldspato	40	-
Plagioclásio	30	-
Quartzo	20	95
Biotita	7	-
Titanita	2	-
Apatita e Alanita	1	1
Porfiroclasto	-	2
Clorita e Mica Branca	-	2

As características mineralógicas e texturais analisadas no Laboratório de Petrografia e no Laboratório de Microscopia do Departamento de Geociências da

UFRuralRJ e no Instituto Geológico Mineiro do Porto – Portugal serão discutidas a seguir para cada uma das pedreiras.

Amostras da Pedreira Vigné

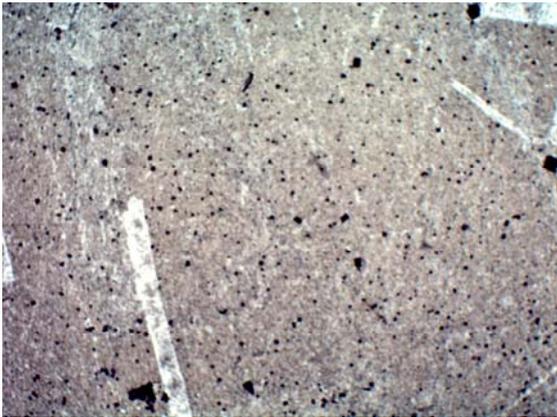
As amostras da Pedreira Vigné, constituídas por sienitos e traquitos, são constituídas essencialmente por álcali-feldspatos, em geral ortoclásio ou microclina (sienitos) e sanidina ou anortoclásio (traquitos). Os álcali-feldspatos constituem mais que 90%vol. dos componentes minerais das amostras de sienitos e traquitos da Pedreira Vigné. Estes minerais, quando inalterados a parcialmente alterados (isto é, saussuritizados, mas não caolinizados), têm dureza elevada, em torno de 7 na escala de Mohs (Valente, 2005a).

As amostras de sienitos e traquitos da Pedreira Vigné possuem texturas distintas. Os sienitos são holocristalinos, ou seja, são formados totalmente por cristais, enquanto que os traquitos são hipocristalinos, ou seja, formados por cristais e material devitrificado. Este último resulta da formação de substâncias criptocristalinas ou microcristalinas a partir de vidro vulcânico. No caso dos traquitos, o material devitrificado tem composição feldspática, e está em geral parcialmente alterado a alterado (Valente, 2005a).

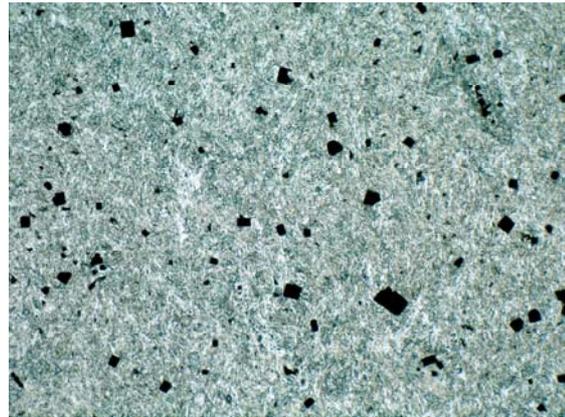
Além das diferenças de grau de cristalinidade citadas, há sienitos tanto equigranulares quanto inequigranulares, enquanto que tipos inequigranulares predominam dentre os traquitos. Estes últimos apresentam freqüentemente uma textura porfírica, onde fenocristais grossos de feldspato são circundados por uma matriz devitrificada muito fina e parcialmente alterada. Assim, as diferenças granulométricas entre minerais constituintes da matriz e fenocristais dos traquitos são bem maiores que aquelas observadas nos sienitos inequigranulares porfíricos da Pedreira Vigné. Em geral, as amostras apresentaram granulometria média a fina, ou seja, menor que 3mm (Valente, 2005a).

As amostras de sienitos e traquitos da Pedreira Vigné são, de um modo geral, isotrópicas, isto é, destituídas de estruturas, tanto planares quanto lineares. No entanto, os minerais constituintes estão um pouco fraturados e veios submilimétricos preenchidos por calcita, fluorita e/ou piritas são freqüentes nessas rochas.

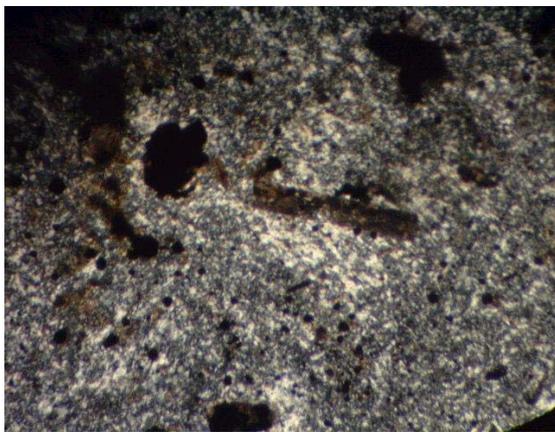
A Figura 4.2 mostra fotomicrografias de amostras da Pedreira Vigné, onde pode-se observar sua estrutura isotrópica, com poucas fraturas e cristais finos. Há ainda algumas regiões com cristais maiores alinhados (Neves, 2004).



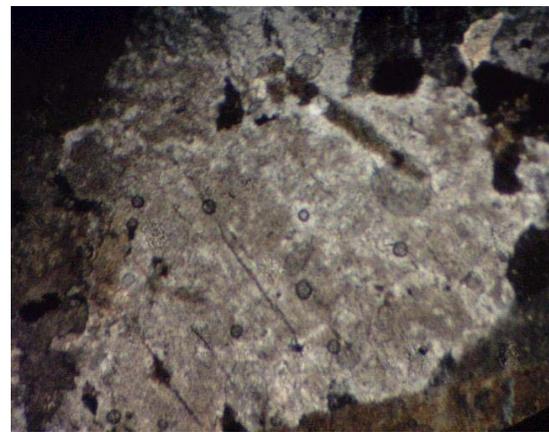
(a) Luz natural, aumento de 40x.



(b) Luz natural, aumento de 150x.



(c) Nicóis cruzados, aumento de 40x.



(d) Nicóis cruzados, aumento de 40x.

4.2 – Fotomicrografias de amostras da Pedreira Vigné.

Amostras da Pedra Sul Mineração

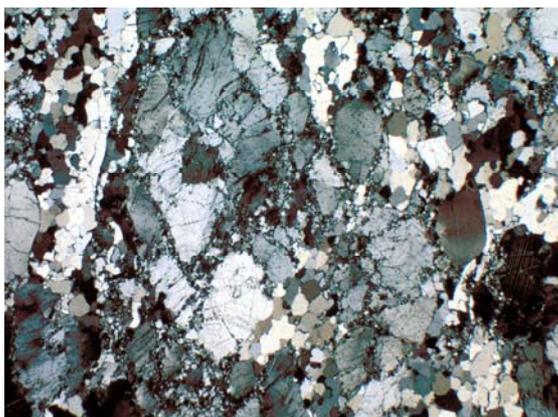
Conforme citado anteriormente todas as amostras da Pedra Sul Mineração analisadas são constituídas por rochas metamórficas, representadas por granulitos. Sua composição mineralógica é essencialmente anídrica, caracterizada por feldspatos e piroxênios. Anfibólios (hornblenda) constituem, no máximo, 20%vol. em algumas amostras, com uma média em torno de 10%vol (Tabela 4.5). Ainda ocorrem micas (biotita), sendo que mais restritamente (Valente, 2005a).

As amostras possuem uma textura granoblástica típica, com contatos poligonizados entre seus minerais constituintes. A granulometria é usualmente média a grossa, isto é, maior que 1mm (Valente, 2005a).

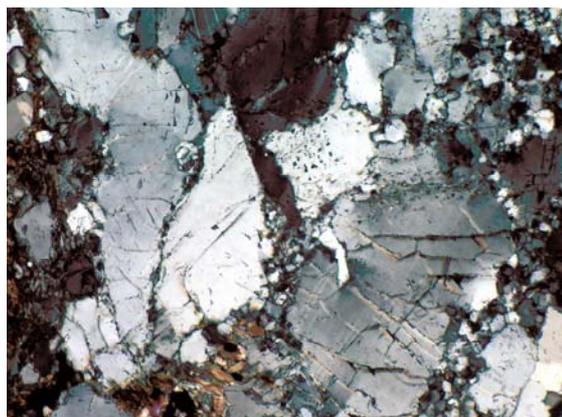
Os granulitos da Pedra Sul Mineração são isotrópicos e destituídos de foliações, mas lineações de estiramento envolvendo piroxênios e anfibólios foram encontradas em algumas amostras. Além disso, as rochas possuem comumente fraturas submilimétricas

e, sob escala de grãos, anfibólios e piroxênios também se encontram fraturados (Valente, 2005a).

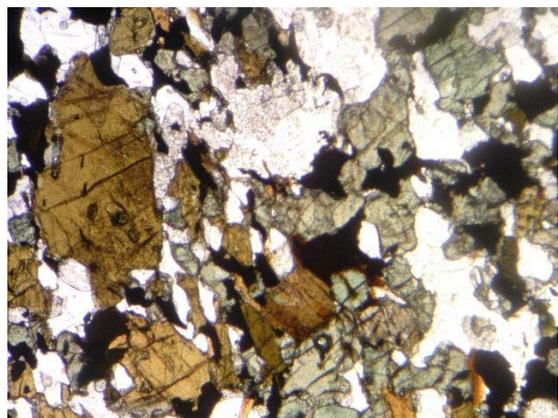
Fotomicrografias das amostras da Pedra Sul Mineração podem ser observadas na Figura 4.3. Nota-se um material altamente tectonizado, com grãos desde tamanhos muito finos, até muito grossos com muitas superfícies de fratura, ou seja, tanto os grãos maiores quanto os menores apresentam um intenso fraturamento (Neves, 2004).



(a) Nicóis cruzados, aumento de 40x.



(b) Nicóis cruzados, aumento de 150x.



(c) Nicóis paralelos, aumento de 40x.



(d) Nicóis cruzados, aumento de 150x.

Figura 4.3 – Fotomicrografias de amostras da Pedra Sul Mineração.

Amostras da Pedreira Santa Luzia

Como descrito inicialmente nesta seção, as amostras da Pedreira Santa Luzia são, em sua maioria, rochas metamórficas representadas por gnaiss, e, em menor quantidade, rochas ígneas intermediárias a ácidas plutônicas, representadas por granitóides (Tabela 4.2).

Embora as amostras incluam rochas de tipos distintos em sua maioria elas têm composição granítica, ou seja, são constituídas por quartzo, feldspatos e micas. Além

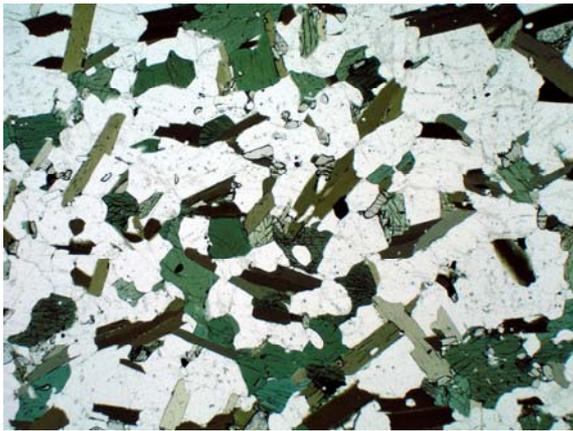
deste fato em comum, a maioria das rochas ígneas da Pedreira não é isotrópica (à semelhança dos gnaisses), mas tem uma foliação de fluxo dada pelo arranjo preferencial dos grãos de biotita (Valente, 2005a).

Os minerais félsicos (quartzo e feldspatos) constituintes das amostras de gnaisses dispõem-se comumente num arranjo granoblástico característico do processo de recristalização. Já os minerais máficos, predominantemente biotita, conferem aos gnaisses uma textura lepidoblástica dispondo-se segundo uma orientação planar preferencial (Valente, 2005a).

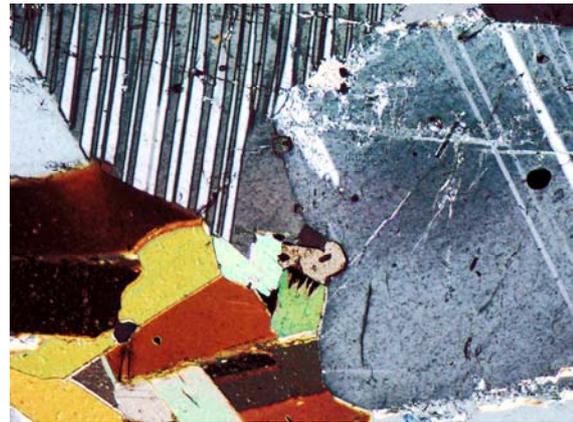
As amostras de gnaisses e granitóides da Pedreira Santa Luzia apresentam, predominantemente, texturas equigranulares ou inequigranulares seriadas, sendo, assim, destituídas de megacristais. Desse modo, as variações granulométricas dos minerais constituintes não são bruscas, mas sim, progressivas (Valente, 2005a). O material apresenta granulometria média, ou seja, desde 1 até 3 mm.

A estrutura mais comum das amostras de gnaisses da Pedreira Santa Luzia é um bandamento gnáissico caracterizado pela alternância de bandas centimétricas constituídas de minerais félsicos (quartzo e feldspatos) e máficos (biotita e/ou hornblenda). Sob escala de tamanho de grãos, as estruturas mais freqüentes, tanto nos gnaisses quanto nos granitóides da Pedreira Santa Luzia, são fraturas em quartzo e plagioclásio (Valente, 2005a).

A Figura 4.4 mostra fotomicrografias da amostra, onde observa-se um material com estrutura altamente granular, com muitos contornos, que representam regiões de fragilidade (Neves, 2004). Esses contornos em geral são poligonizados (120°).



(a) Nicóis paralelos, aumento de 40x.



(b) Nicóis cruzados, aumento de 150x.



(c) Nicóis paralelos, aumento de 100x.



(d) Nicóis paralelos, aumento de 100x.

Figura 4.4 – Fotomicrografias de amostras da Pedreira Santa Luzia.

Amostras da Pedreira Embu

Por meio de análise macroscópica de seis amostras desta Pedreira observou-se que cinco são de um litotipo e uma é constituída por um tipo de rocha que corta o litotipo representante das outras cinco.

As cinco primeiras amostras são constituídas por um ortognaisse, mais especificamente, um granodiorito gnaiss, o qual possui coloração cinza-claro e é inalterado. Com relação à quantidade de minerais máficos, a rocha possui menos de 10% de seu volume representado por esses minerais, sendo classificada como leucocrática. Este litotipo é holocristalino, ou seja, totalmente composto por substâncias cristalinas (minerais), e é equigranular com granulometria fina, com todos os grãos minerais inseridos numa mesma classe granulométrica, neste caso menor que 1 mm. A rocha possui uma foliação tectônica denotada pelo arranjo preferencial de grãos de biotita, e uma lineação de estiramento pouco pronunciada está contida nesta foliação, sendo denotada principalmente pela recristalização orientada dos grãos de quartzo. De

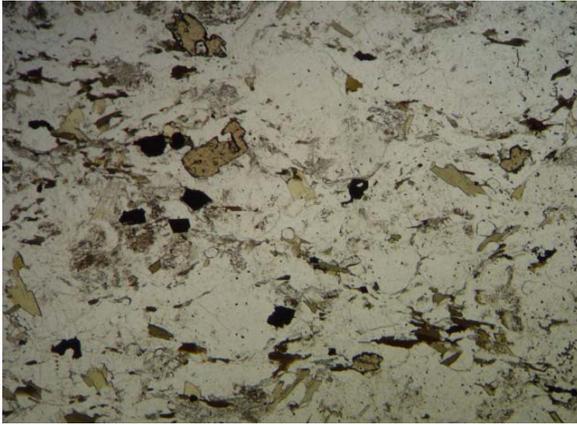
um modo geral, os minerais constituintes da rocha não estão fraturados (Valente, 2005b).

A última amostra da Pedreira Embu (amostra seis) é constituída por um veio de quartzo formado por segregação metamórfica em contato com o ortognaisse, se mostrando estar inalterada e holocristalina. Este veio, dada a sua característica monominerálica, é provavelmente de origem metamórfica e os grãos de quartzo, portanto, devem estar recristalizados, o que é corroborado pelo aspecto policristalino sob análise macroscópica. O veio de quartzo apresenta ainda fraturas submilimétricas ortogonais ao contato e à foliação do ortognaisse, as quais estão preenchidas parcialmente. No entanto, apesar da textura policristalina, o veio apresenta-se maciço, denotando a granulometria muito fina dos seus grãos de quartzo constituintes. A amostra é destituída de estruturas, à exceção da foliação do ortognaisse (Valente, 2005b).

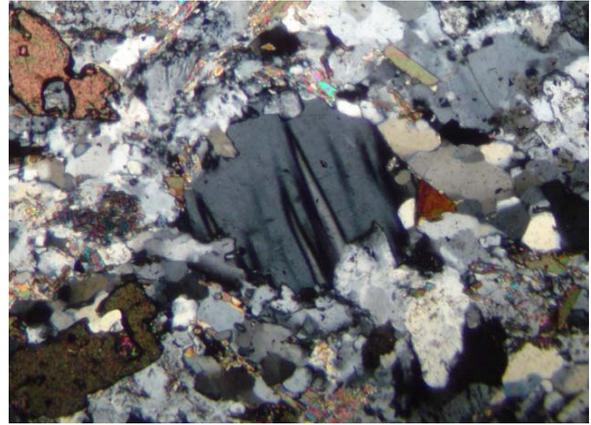
O contato entre o veio e o ortognaisse apresenta grãos de quartzo cominuídos e recristalizados. Localmente, porções do veio monominerálico de quartzo policristalino intrude o ortognaisse discordantemente, isso é, a intrusão faz um ângulo com a foliação ortognaisse (Valente, 2005b).

O ortognaisse da amostra 6 apresenta as mesmas características petrográficas descritas para as outras amostras, à exceção de uma zona de cloritização e muscovitização, com cerca de 0,5 cm de espessura, próximo ao contato, ou seja, é mineralizado em muscovita e clorita (em grãos disseminados) próximo do contato com o veio monominerálico de quartzo (Valente, 2005b).

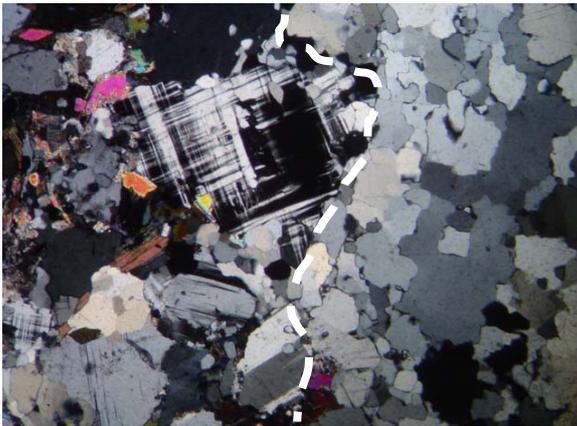
A Figura 4.5 mostra fotomicrografias da amostra, onde observa-se a foliação tectônica do ortognaisse (a), a granulometria fina da matriz (b), o contato entre o ortognaisse e o veio de quartzo (c) e o aspecto inalterado dos grãos de biotita (d).



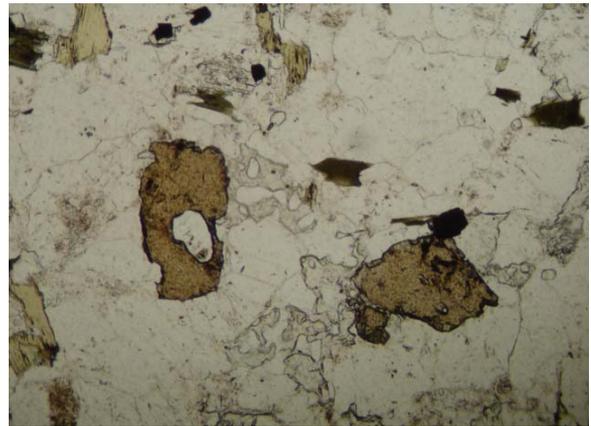
(a) Nicóis paralelos.



(b) Nicóis cruzados.



(c) Nicóis cruzados.



(d) Nicóis paralelos.

Figura 4.5 – Fotomicrografias de amostras da Pedreira Embu.

4.2 – Massa Específica e Forma das Partículas

As medidas das massas específicas (densidade), feitas por meio de pesagem hidrostática de partícula das amostras apresentaram alguma variabilidade. Portanto foi utilizado um tratamento estatístico dessas medidas, o qual consiste da ordenação dos resultados experimentais de forma ascendente, atribuindo os índices $i = 1, 2, \dots, N$ a cada uma das observações, onde N é o número total de partículas analisadas. Para a distribuição de densidade, os percentis foram estimados por:

$$P(\rho_i) = \frac{i - 0,5}{N} \quad [4.1]$$

A Figura 4.6 mostra a distribuição de densidade das amostra estudadas, e na

Tabela 4.8 tem-se um resumo dos resultados de medida de densidade.

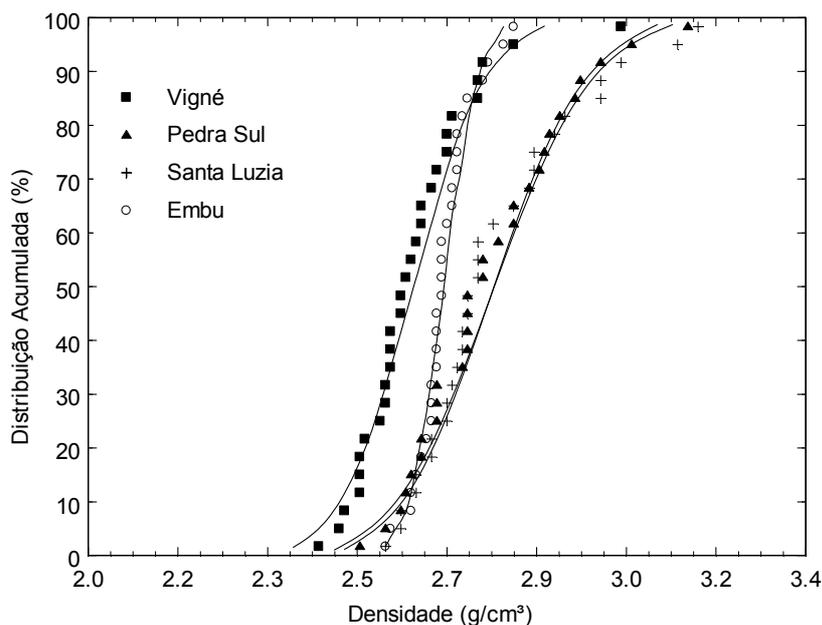


Figura 4.6 – Distribuição de densidade dos materiais estudados.

Tabela 4.8 – Resumo dos resultados de medida de densidade (g/cm³)

Amostra	Média	Desvio Padrão
Vigné	2,64	0,04
Pedra Sul	2,79	0,05
Santa Luzia	2,80	0,06
Embu	2,69	0,02

As partículas da Pedreira Vigné apresentam as menores densidades devido à sua composição predominantemente feldspática (Tabela 4.4). Por outro lado, a elevada proporção de minerais máficos resulta na maior densidade das partículas da Pedreira Santa Luzia (Tabela 4.6).

Os resultados de análise de forma das partículas após ensaios de impacto na CCI são mostrados na Figura 4.7. Observa-se que todos os materiais tendem a gerar partículas alongadas ($IA > 40\%$) após ensaios de fragmentação de partículas individuais na CCI. Com relação à lamelaridade, o material da Pedra Sul Mineração tende a gerar partículas lamelares, enquanto que o material da Pedreira Santa Luzia tende a gerar partículas não lamelares. Já o material da Pedreira Vigné apresentou lamelaridade mediana após os ensaios de fragmentação. Além disso, observou-se que quanto maior o

nível de energia utilizado no ensaio maior é a tendência de gerar partículas alongadas e lamelares para todos os materiais.

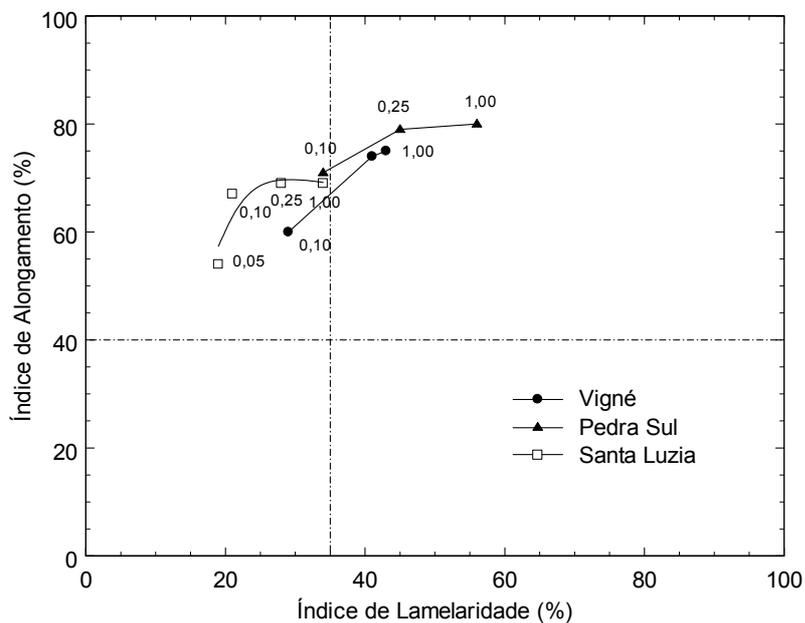


Figura 4.7 – Comparação entre os índices de lamelaridade e alongamento para os materiais das Pedreiras Vigné, Pedra Sul Mineração e Santa Luzia.

4.3 – Quebra de Partículas Individuais por Impacto

As características de quebra dos materiais analisados serão discutidas nessa seção, sendo divididas em quatro partes. Na primeira parte serão apresentados os resultados dos ensaios que caracterizam a fratura das partículas, que são as medidas de energia de fratura, resistência e rigidez das partículas. Na segunda parte serão apresentados os resultados com relação à fragmentação das partículas, ou seja, a influência do tamanho inicial e da energia específica de impacto na fragmentação dos materiais, além da resistência dos mesmos à fragmentação por impacto. Numa terceira etapa serão demonstrados os resultados de suscetibilidade à fratura por impactos repetidos das partículas. No final desta seção, todos esses resultados serão discutidos com base nas características microestruturais dos materiais, com o objetivo de explicar as distintas características de quebra encontradas nos materiais.

4.3.1 – Fratura de Partículas

As medidas de energia de fratura, resistência e rigidez para partículas de um mesmo tamanho apresentam uma grande variabilidade devido à uma série de fatores, como a influência da distribuição interna de defeitos, da forma da partícula, entre outros. Portanto, essas medidas devem ser descritas estatisticamente.

Os resultados de distribuição de medida de energia de fratura para as amostras da Pedreira Vigné, Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu são mostrados nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, respectivamente. No eixo das ordenadas é utilizada a escala de probabilidade normal.

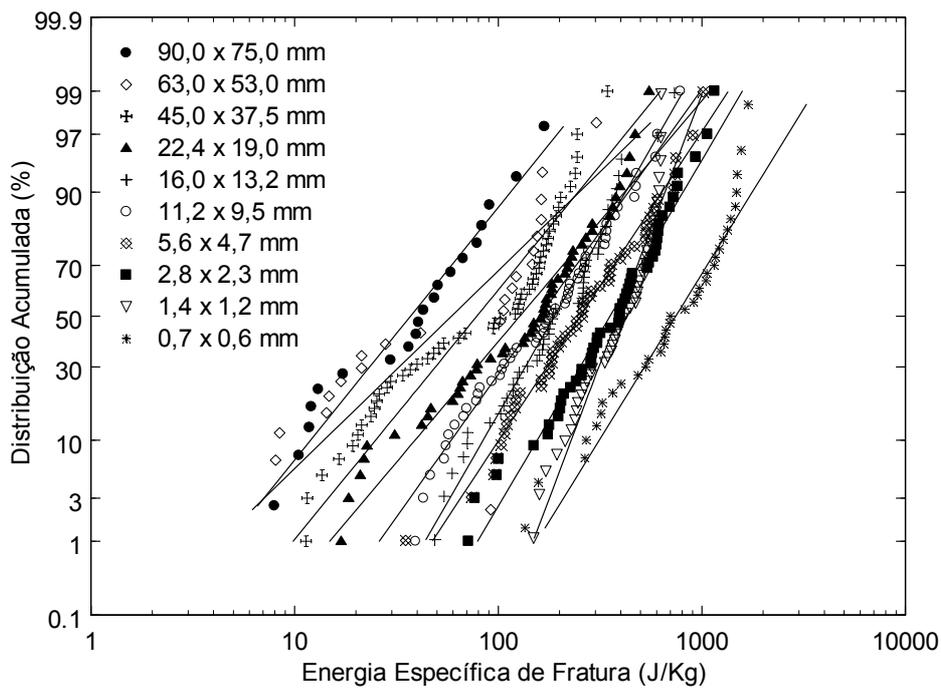


Figura 4.8 – Distribuição de energia de fratura para o material da Pedreira Vigné.

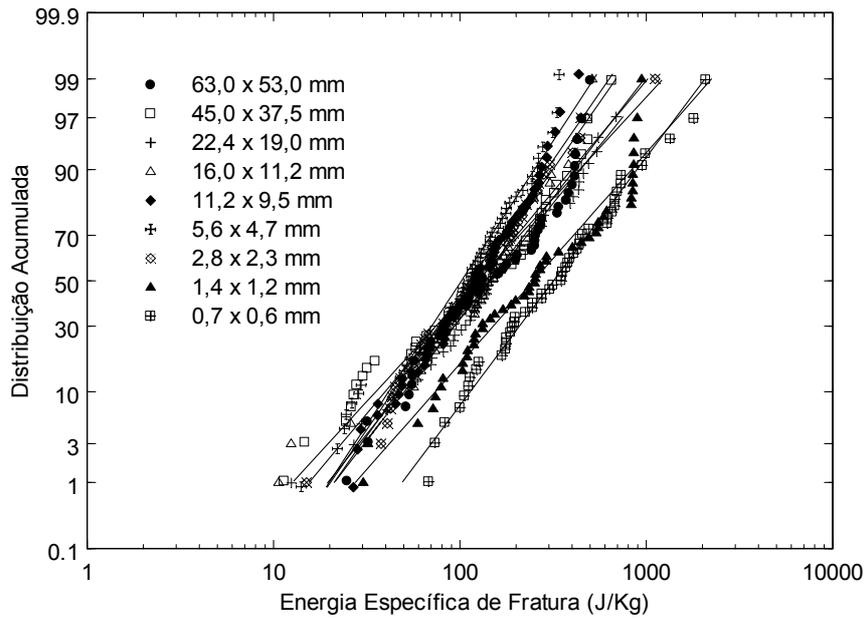


Figura 4.9 – Distribuição de energia de fratura para o material da Pedra Sul Mineração.

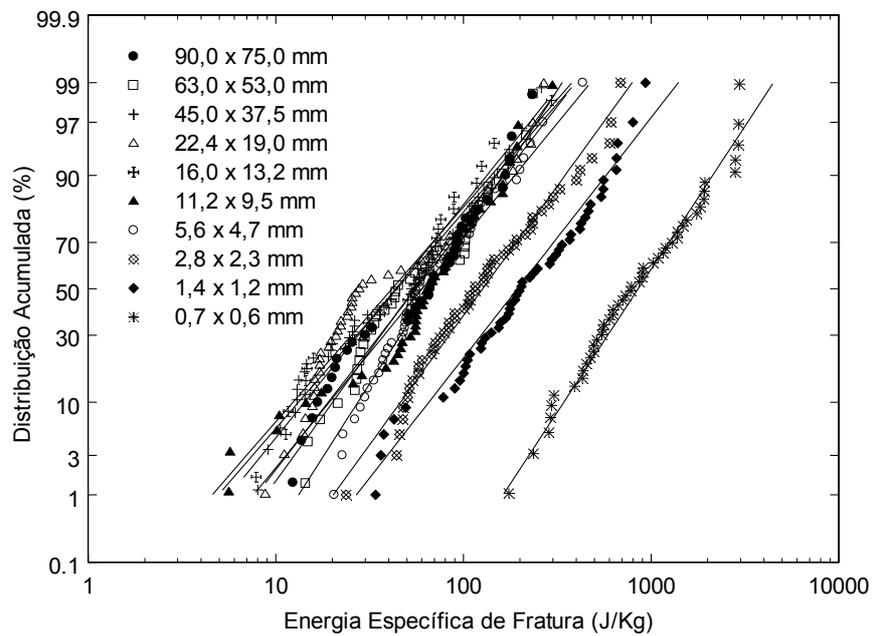


Figura 4.10 – Distribuição de energia de fratura para o material da Pedreira Santa Luzia.

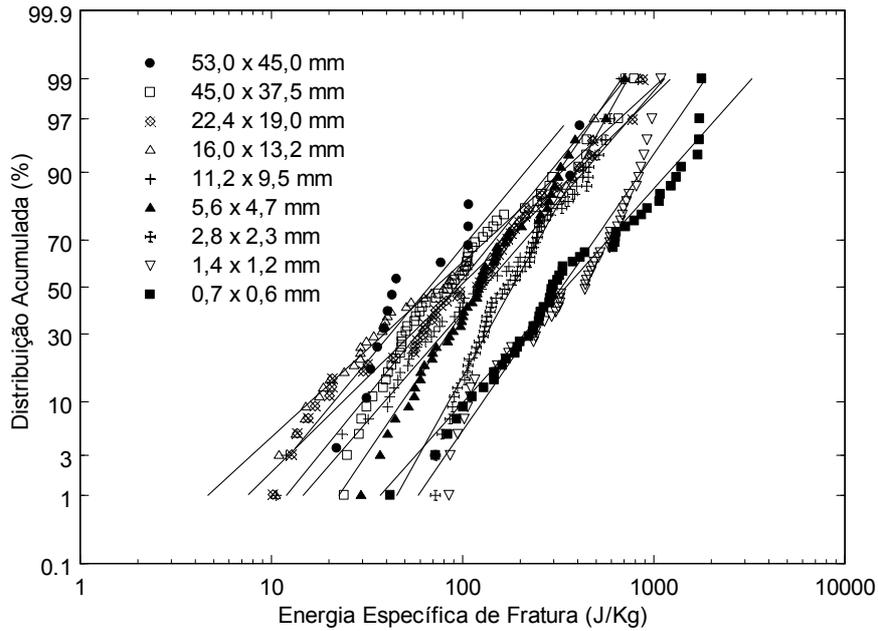


Figura 4.11 – Distribuição de energia de fratura para o material da Pedreira Embu.

Nas Figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15, são mostrados resumos da relação entre energia de fratura medida, e tamanho inicial de partícula, para as amostras das Pedreiras Vigné, Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu, bem como o ajuste dos parâmetros da equação 2.21 a esses dados medidos. Na Tabela 4.9 são mostrados os valores ótimos desses parâmetros.

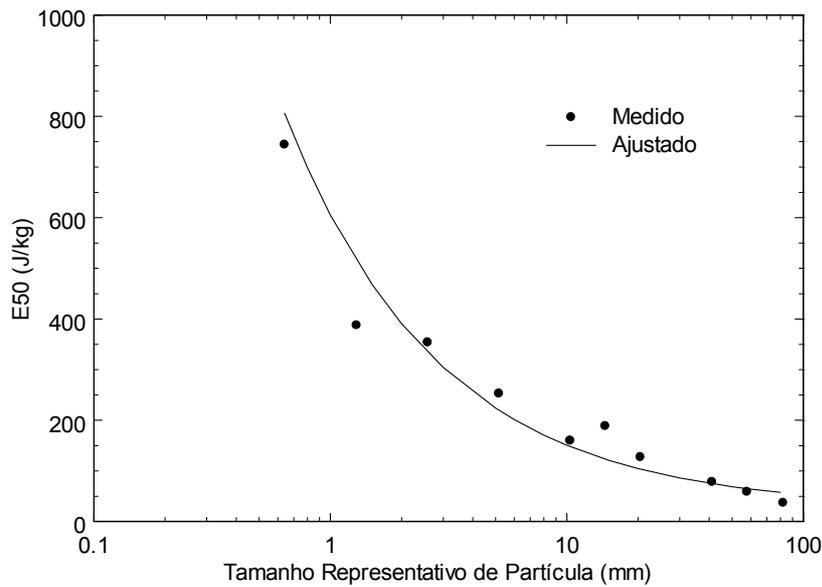


Figura 4.12 – Relação entre energia mediana de fratura e tamanho de partícula para o material da Pedreira Vigné.

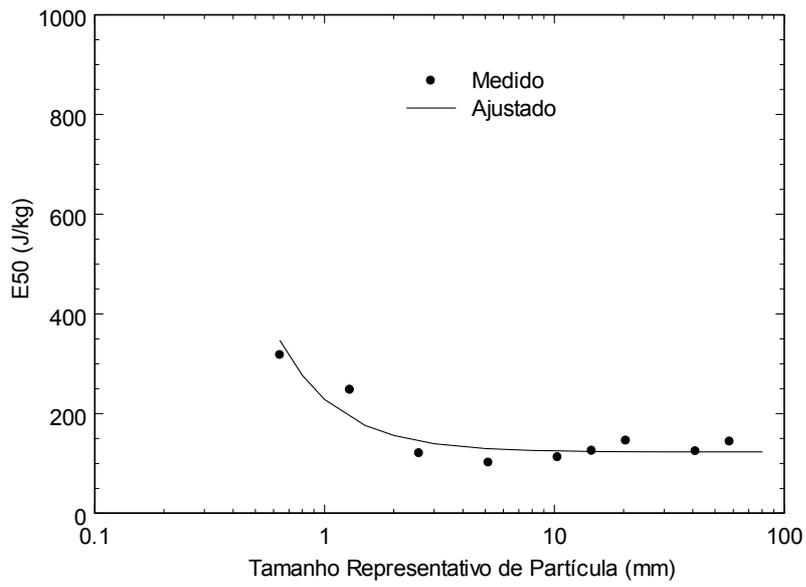


Figura 4.13 – Relação entre energia mediana de fratura e tamanho de partícula para o material da Pedra Sul Mineração.

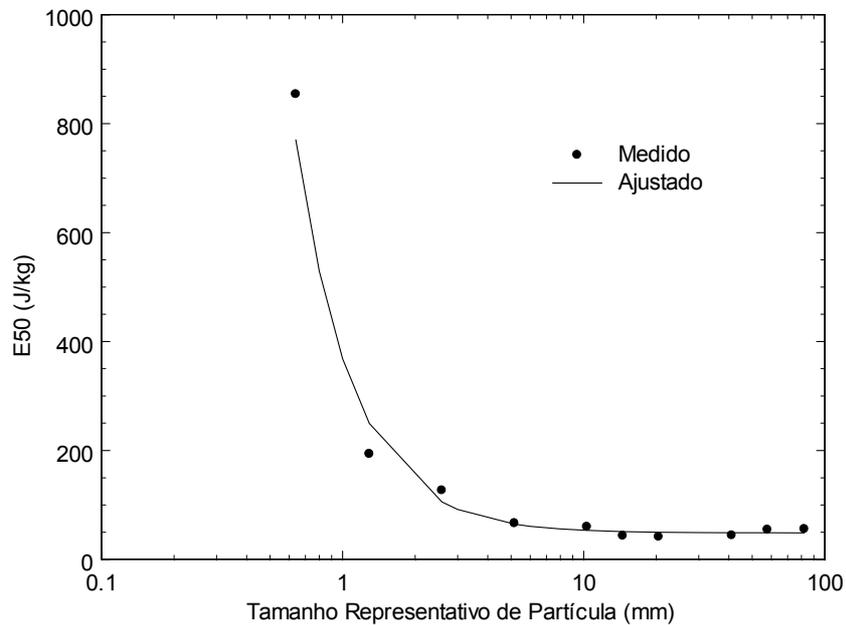


Figura 4.14 – Relação entre energia mediana de fratura e tamanho de partícula para o material da Pedreira Santa Luzia.

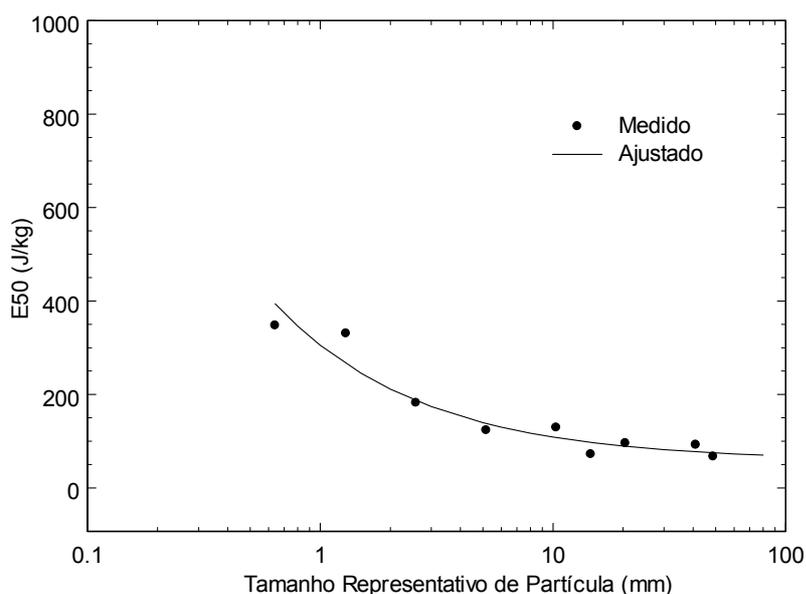


Figura 4.15 – Relação entre energia mediana de fratura e tamanho de partícula para o material da Pedreira Embu.

Tabela 4.9 – Parâmetros da equação 2.21 para os materiais estudados

Parâmetro	Vigné	Pedra Sul	Santa Luzia	Embu
E_{∞} (J/kg)	26,50	122,95	48,62	58,08
d_{p0} (mm)	101,00	0,91	2,81	8,17
ϕ	0,67	1,68	1,82	0,69

Observa-se claramente nestas figuras que, para o material da Pedreira Vigné a energia de fratura é fortemente influenciada pelo tamanho inicial de partícula, enquanto que para os demais materiais essa influência não é muito significativa para tamanhos de partículas maiores que alguns milímetros. Para o material da Pedra Sul Mineração nota-se a influência do tamanho da partícula para partículas com tamanho inicial menor que, aproximadamente, 1,3 mm, enquanto que para Santa Luzia essa influência acontece para tamanhos menores que 2,6 mm. O material da Pedreira Embu demonstra alguma influência, embora pouco pronunciada nas partículas de tamanho inicial maiores, mas essa influência se torna clara para aquelas partículas com tamanho inicial menor que 2,6 mm.

Como para a produção de agregados graúdos o tamanho de partículas alimentadas nos britadores é maior que 2 mm, o fato da energia de fratura ser influenciada apenas para tamanhos menores que esse para os materiais das Pedreiras

Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu significa que, na prática, efeitos de escala na britagem industrial podem ser desconsiderados. O mesmo não ocorre com a produção de agregados miúdos (como é o caso da areia manufaturada), pois neste caso partículas da ordem de tamanho 2 mm podem ser cominuídas nos britadores.

Os resultados de distribuição de resistência à fratura das partículas para as amostras da Pedreira Vigné, Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu podem ser observados nas Figuras 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19. A tensão necessária para a ruptura de partículas é uma característica importante de materiais na britagem, pois irá determinar quão robustos os britadores e seus componentes deverão ser para cominuir a rocha.

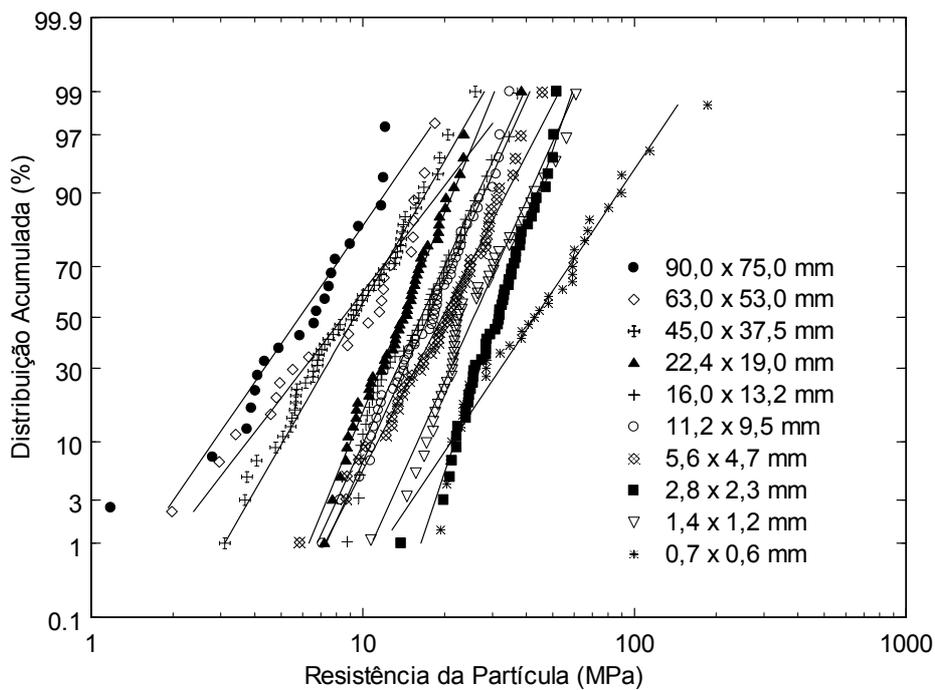


Figura 4.16 – Distribuição de resistência à fratura de partícula para o material da Pedreira Vigné.

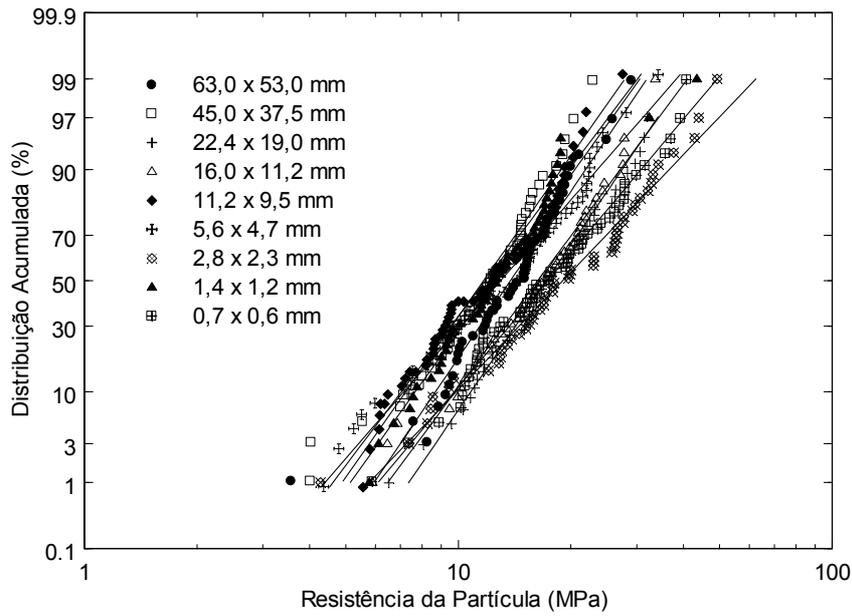


Figura 4.17 – Distribuição de resistência à fratura de partícula para o material da Pedra Sul Mineração.

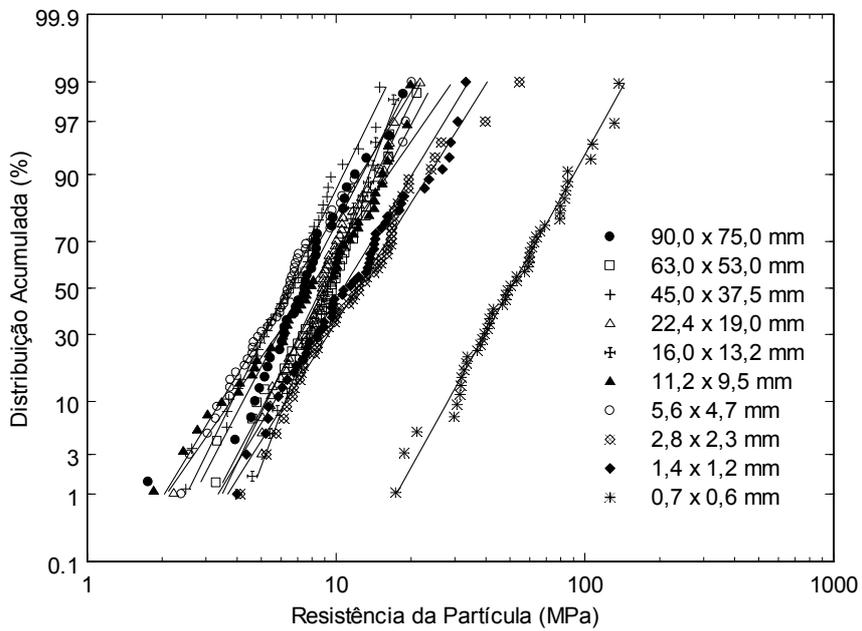


Figura 4.18 – Distribuição de resistência à fratura de partícula para o material da Pedreira Santa Luzia.

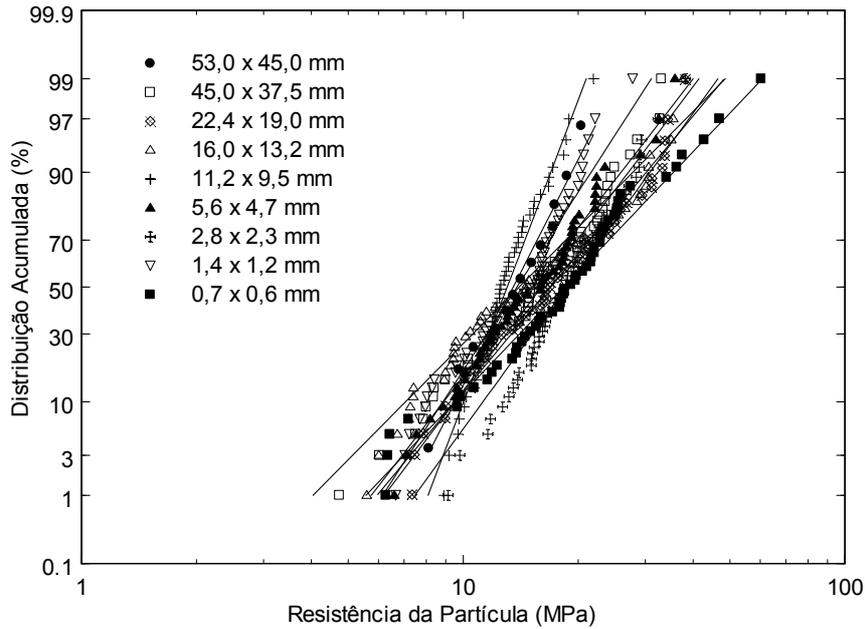


Figura 4.19 – Distribuição de resistência à fratura de partícula para o material da Pedreira Embu.

Na Figura 4.20 é apresentado um resumo comparativo da influência do tamanho inicial de partícula na resistência à fratura de partículas dos materiais estudados. Para o material da Pedreira Vigné observa-se uma forte influência do tamanho de partícula na sua resistência. Por outro lado, para os materiais da Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu, a resistência das partículas permaneceu praticamente constante, não havendo influência do tamanho nesta medida. É importante ressaltar que para o material da Pedreira Santa Luzia, ocorreu um pronunciado aumento da resistência para partículas menores que 1mm.

Os resultados de distribuição de rigidez das partículas para os materiais estudados são mostrados nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24.

Nota-se que para o material da Pedreira Vigné a rigidez não é influenciada pelo tamanho de partícula, permanecendo relativamente constante (Figura 4.21). Para o material da Pedra Sul Mineração, nota-se que a rigidez permanece relativamente constante para tamanhos de partícula maiores que 2,5 mm e que abaixo deste tamanho ocorre uma redução na rigidez das partículas (Figura 4.22). Já o material da Santa Luzia apresentou uma leve influência do tamanho de partícula na rigidez (Figura 4.23), enquanto que o material da Embu demonstrou claramente uma forte redução da rigidez quando o tamanho de partícula diminui (Figura 4.24). Um resumo dos dados mostrados

acima para os materiais das Pedreiras Vigné e Embu pode ser observado na Figura 4.25, nele é clara a influência de tamanho de partícula na rigidez do material da Embu, enquanto que o oposto é observado para o material da Vigné.

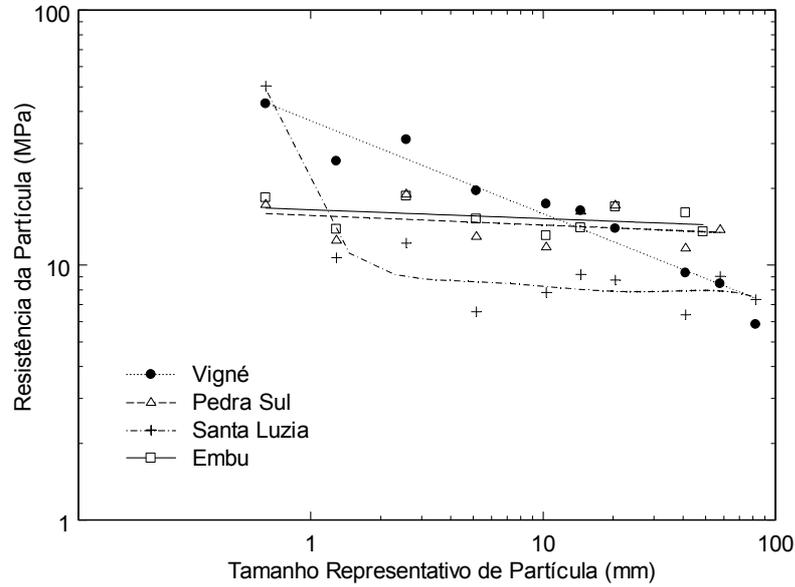


Figura 4.20 – Relação entre tamanho inicial de partícula e resistência à fratura.

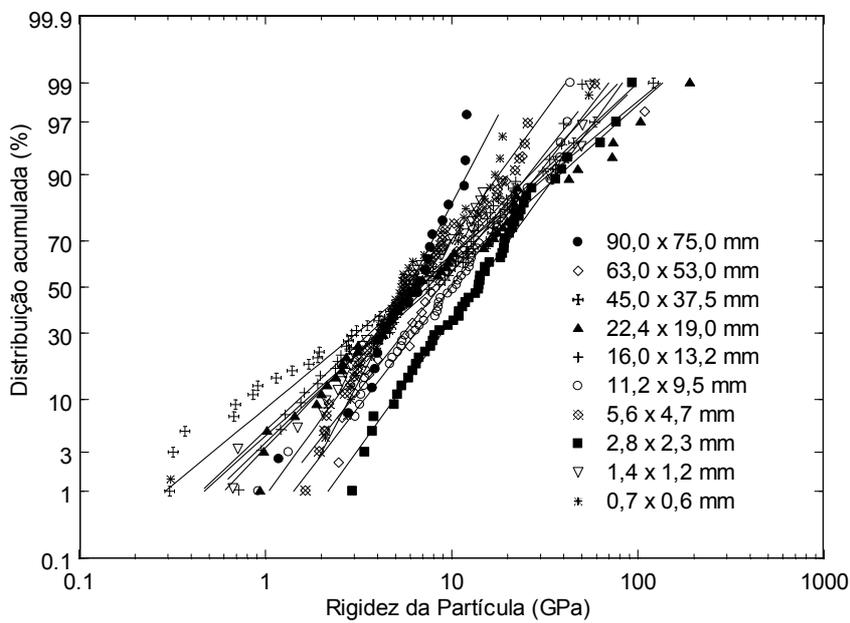


Figura 4.21 – Distribuição de rigidez das partículas para o material da Pedreira Vigné.

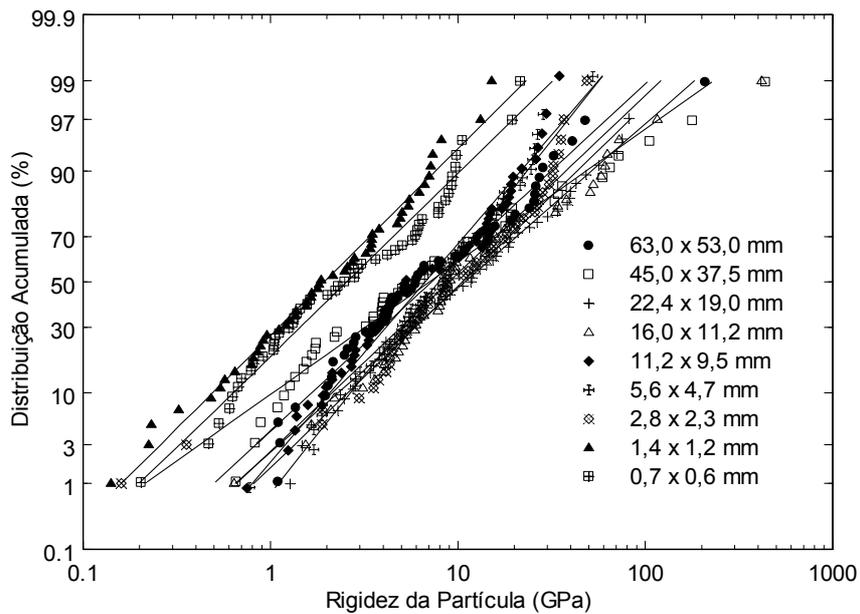


Figura 4.22 – Distribuição de rigidez das partículas para o material da Pedra Sul Mineração.

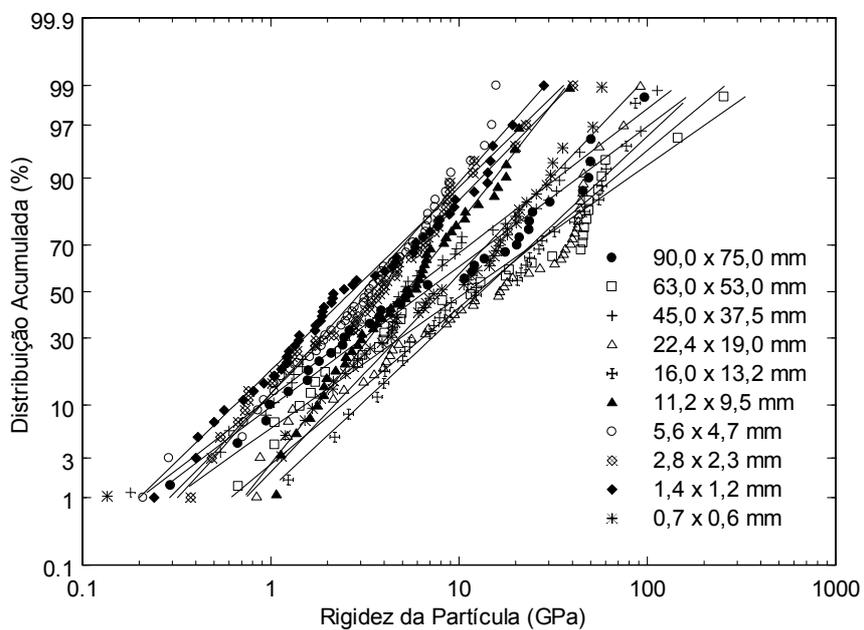


Figura 4.23 – Distribuição de rigidez das partículas para o material da Pedreira Santa Luzia.

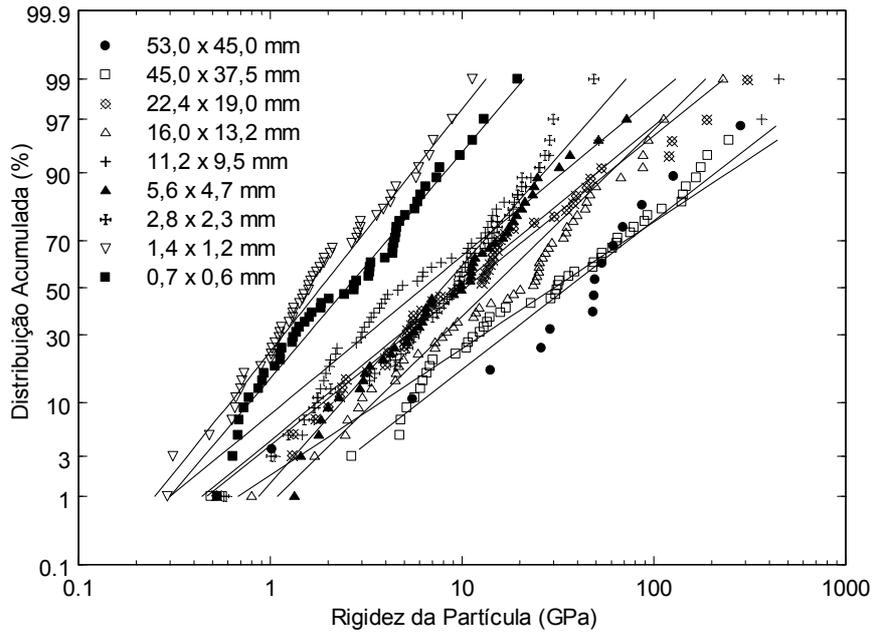


Figura 4.24 – Distribuição de rigidez das partículas para o material da Pedreira Embu.

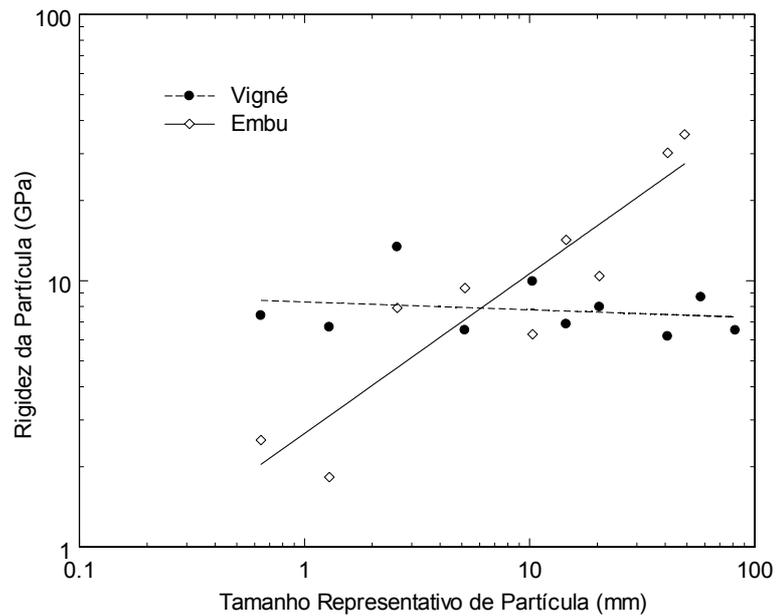


Figura 4.25 – Relação entre tamanho e rigidez de partícula para os materiais das Pedreiras Vigné e Embu.

4.3.2 – Fragmentação de Partículas

Os ensaios para determinar as características de fragmentação dos materiais foram realizados com o objetivo estabelecer a relação entre a proporção de partículas

menores que 0,1 do tamanho original da partícula (t_{10}), energia específica de impacto e tamanho de partícula. Além disso, por meio desses ensaios foi possível obter o índice de quebra que nos fornece a resistência à fragmentação por impacto dos materiais.

Os resultados de análise granulométrica dos fragmentos resultantes dos ensaios na CCI são apresentados nas Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29, para as Pedreiras Vigné, Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu, respectivamente. Os gráficos à esquerda (a) mostram a influência da energia específica de impacto para partículas de tamanho 16,0 x 13,2 mm, enquanto que os gráficos à direita (b), mostram a influência do tamanho de partícula considerando uma energia específica de impacto de 0,25 kWh/t (900 J/kg). Conforme já ilustrado na Figura 2.18, o parâmetro t_{10} é obtido a partir dos resultados dessas curvas de análise granulométrica.

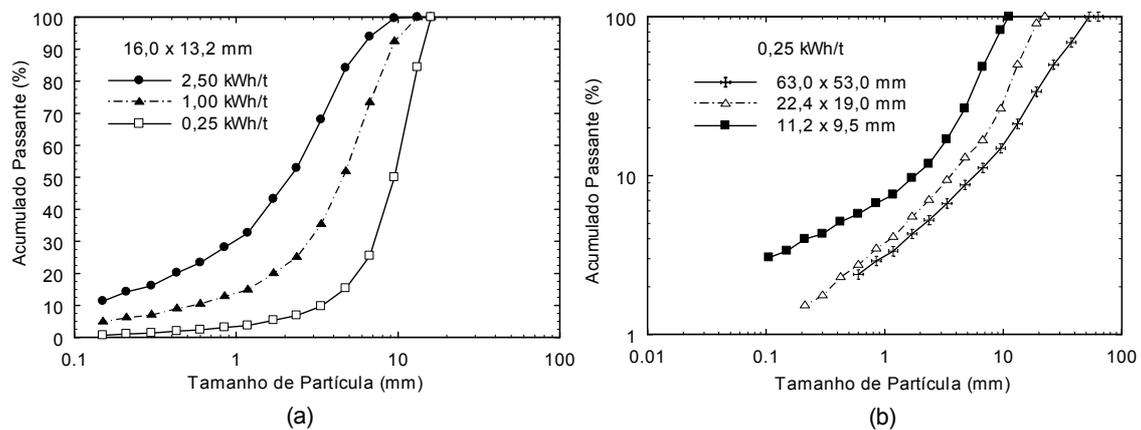


Figura 4.26 – Análise granulométrica após ensaios na CCI para o material da Pedreira Vigné.

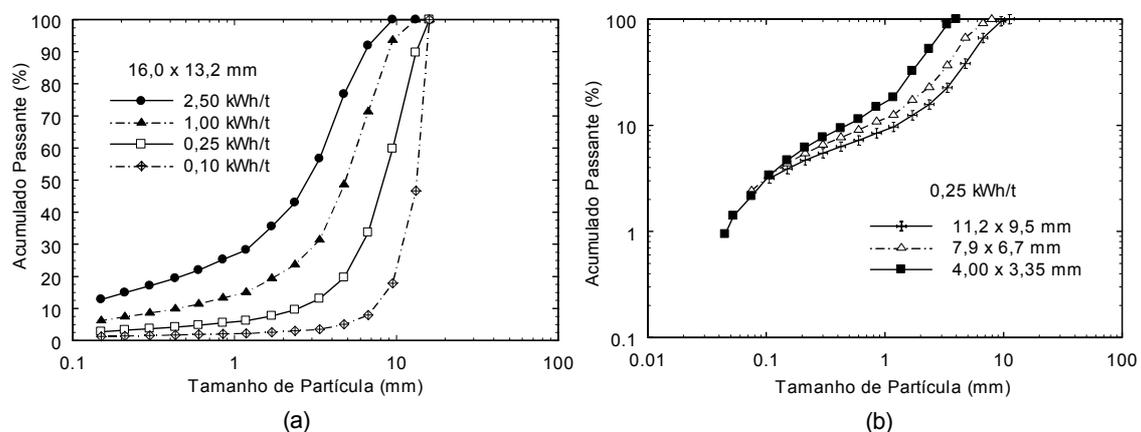


Figura 4.27 – Análise granulométrica após ensaios na CCI para o material da Pedra Sul Mineração.

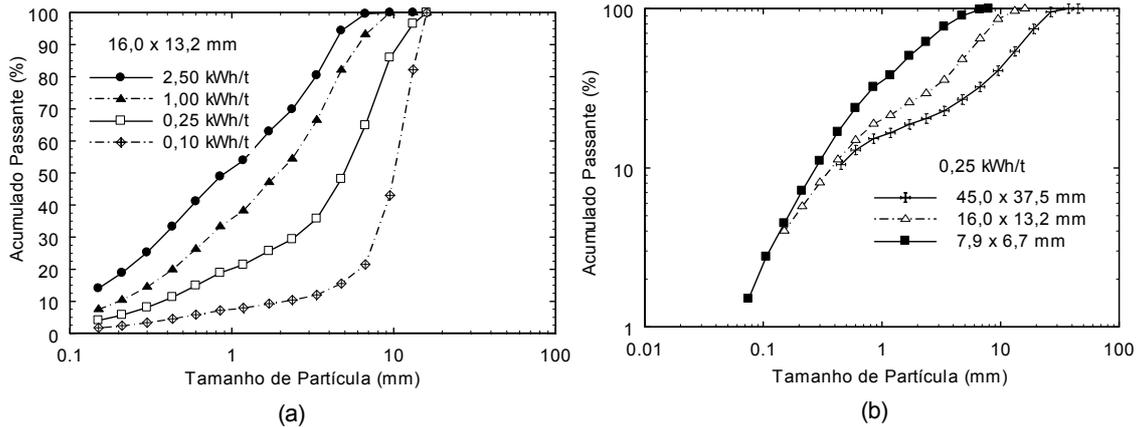


Figura 4.28 – Análise granulométrica após ensaios na CCI para o material da Pedreira Santa Luzia.

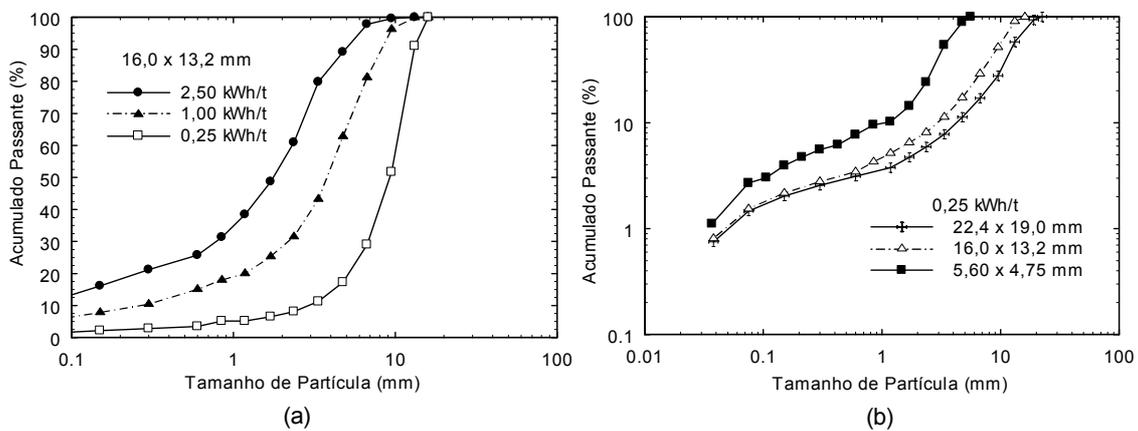


Figura 4.29 – Análise granulométrica após ensaios na CCI para o material da Pedreira Embu.

Além disso, por meio da análise granulométrica dos fragmentos resultantes dos ensaios de fragmentação de partículas individuais observa-se a ocorrência de um ponto de inflexão na parte final da curva para as amostras da Pedra Sul Mineração, da Santa Luzia e da Embu, aproximadamente a partir de 0,210 mm, 0,850 mm e 0,075 mm, respectivamente, à semelhança daqueles mostrados na Figura 2.22. Por outro lado, para o material da Pedreira Vigné este ponto de inflexão parece não existir. Esses resultados são mostrados na Figura 4.26 (b), 4.27 (b), 4.28 (b) e 4.29 (b). Esse fato é um indício de que a função quebra para os materiais da Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu, provavelmente não é normalizável abaixo desses tamanhos. Tavares (2000) mostrou que os tamanhos para os quais ocorria este ponto de inflexão estavam diretamente

relacionados ao tamanho de grão do material. Entretanto, para os materiais analisados no presente trabalho observou-se por meio das análises microestruturais uma significativa variação do tamanho de grão (seção 4.1). Portanto, o ponto de inflexão de alguns dos materiais estudados possivelmente está relacionado ao tamanho de regiões não fraturadas, visto que tais materiais apresentam a estrutura bastante fraturada.

Os resultados dos ensaios de fragmentação de partículas individuais são mostrados nas Figura 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33 para as Pedreiras Vigné, Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu, respectivamente. Observa-se que para um dado tamanho inicial de partícula, os valores de t_{10} aumentam com a energia para todas as amostras. Além disso, para uma dada energia específica de impacto, no caso das amostras da Pedreira Vigné os valores de t_{10} aumentam com o aumento de tamanho de partícula, enquanto que para as amostras das Pedreiras Pedra Sul, Santa Luzia e Embu nota-se claramente que não existe influência do tamanho original da partícula no valor de t_{10} , ou seja, nas características de fragmentação desses materiais.

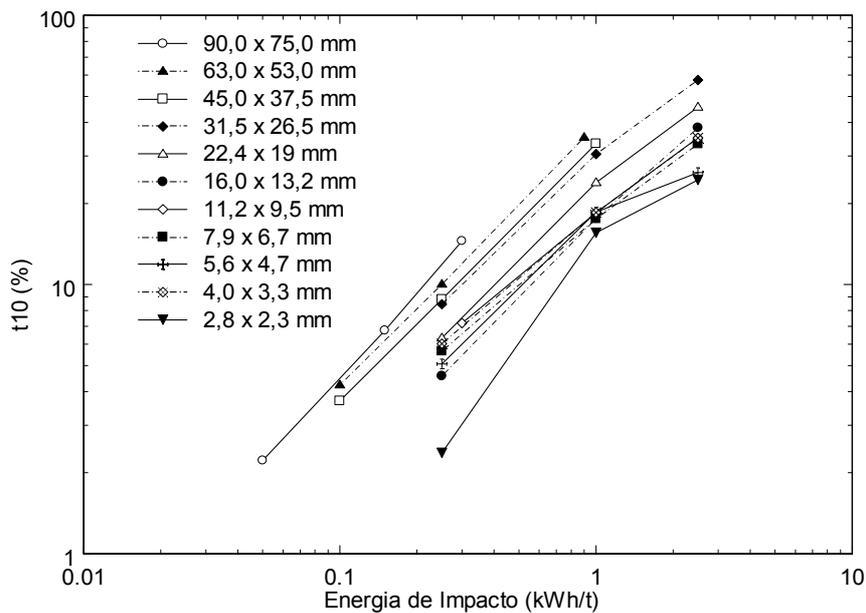


Figura 4.30 – Relação entre tamanho de partícula, energia específica de impacto e t_{10} para a amostra da Pedreira Vigné.

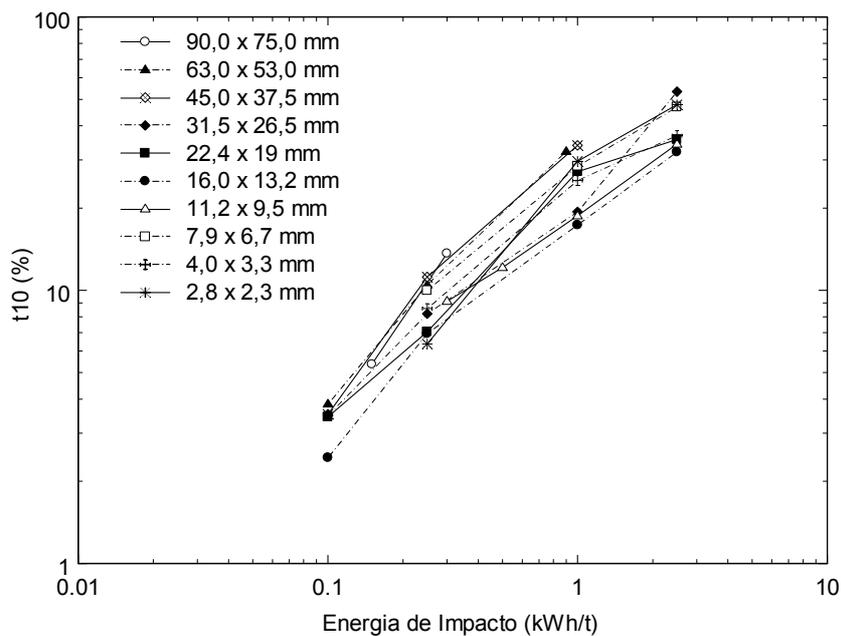


Figura 4.31 – Relação entre tamanho de partícula, energia específica de impacto e t_{10} para a amostra da Pedra Sul Mineração.

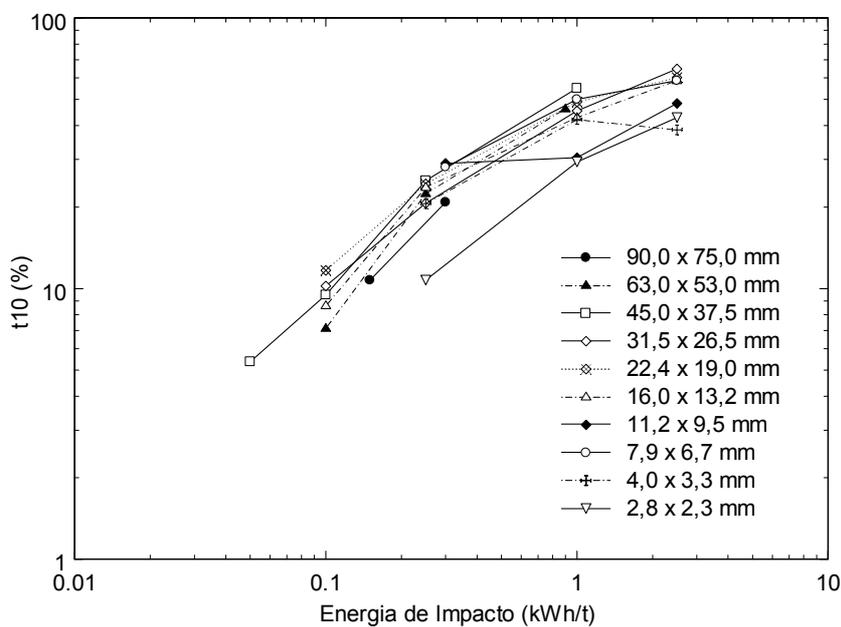


Figura 4.32 – Relação entre tamanho de partícula, energia específica de impacto e t_{10} para a amostra da Pedreira Santa Luzia.

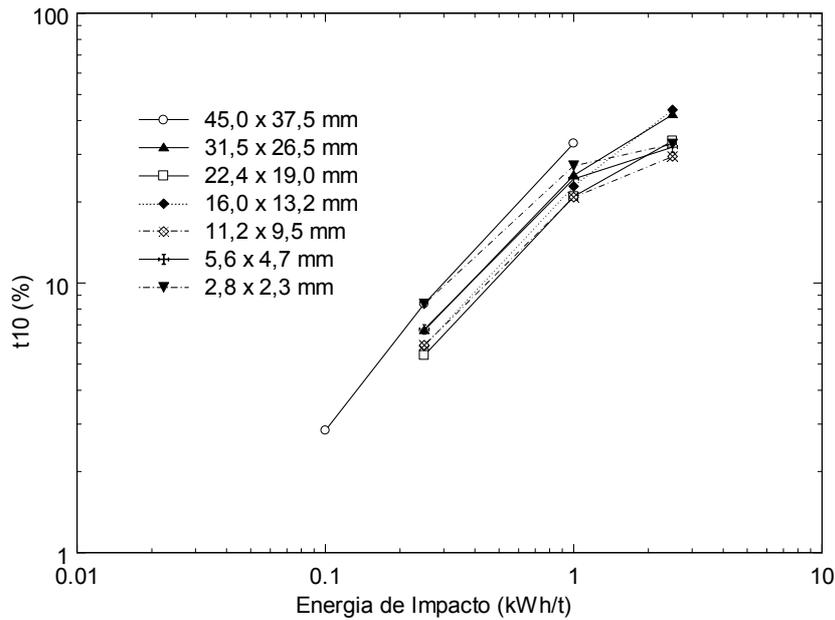


Figura 4.33 – Relação entre tamanho de partícula, energia específica de impacto e t_{10} para a amostra da Pedreira Embu.

Com base nos ensaios de fragmentação de partículas individuais para as faixas contidas no intervalo de 13,2 e 63 mm, foi possível obter os valores dos parâmetros A e b (Equação 2.7) segundo o padrão adotado no JKMRC (Napier-Munn et al., 1996). Os parâmetros foram calculados considerando-se toda a amostra, e também para cada tamanho ensaiado de cada amostra. Com esses valores dos parâmetros A e b foi possível obter o índice de quebra (IQ), o qual é representado pelo seu produto.

Na Tabela 4.10 são mostrados os valores dos parâmetros A e b e do IQ representativos de toda a amostra para os materiais estudados. O índice de quebra indica a resistência do material à fragmentação por impacto. Pode-se observar que os materiais apresentam características bastante distintas, sendo o material da Vigné e da Embu os mais resistentes, o material da Pedra Sul com uma resistência média a alta e o da Santa Luzia com a mais baixa resistência à fragmentação.

Tabela 4.10 – Parâmetros de quebra por fragmentação

Material	A	b	$IQ (A*b)$
Vigné	60	0,48	28,80
Pedra Sul	47	0,77	36,19
Santa Luzia	60	1,62	97,20
Embu	45	0,68	30,60

Considerando-se o cálculo dos parâmetros A e b para cada tamanho ensaiado, observou-se que havia uma grande variação do IQ com o tamanho conforme mostra a Figura 4.34. Então, nota-se que a fragmentação não é controlada apenas pela energia específica de impacto, mas também pelo tamanho de partícula. A partir disto, deve ser tomado cuidado com o uso de ensaios simplificados e baseados em uma única faixa de tamanho de partículas na caracterização de materiais quanto à fragmentação (Chieregati, 2001; Morrell, 2004). Para materiais que apresentam um efeito significativo do tamanho de partícula (como é o caso da Pedreira Vigné) isso pode resultar em superestimativa da resistência à fragmentação na britagem grossa e subestimativa na britagem fina e moagem.

Tavares (1997) propôs lançar em gráfico os valores de t_{10} em função da razão entre essa energia de impacto (E_{cs}) e a energia mediana de fratura (E_{50}). Essa relação é mostrada na equação 4.2, onde E^* é chamada de energia normalizada:

$$E^* = \frac{E_{cs}}{E_{50}} \quad [4.2]$$

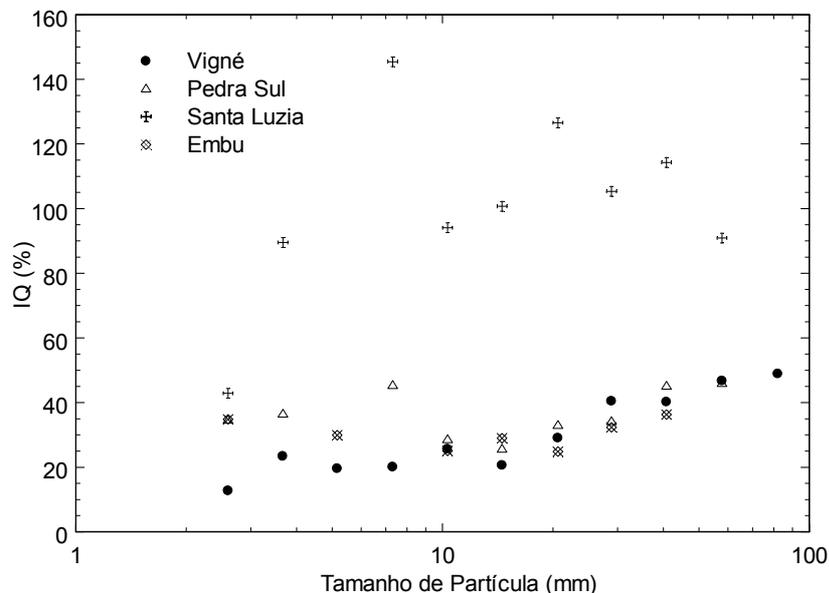


Figura 4.34 – Comparação do IQ para cada tamanho calculado com base na energia de impacto.

Com base no fato de que a fragmentação é dependente da energia normalizada e não somente da energia específica de impacto, foram obtidas as relações entre o parâmetro t_{10} e a energia normalizada, E^* , as quais são mostradas nas Figuras 4.35, 4.36, 4.37 e 4.38 para os materiais da Vigné, Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu, respectivamente. Nestas figuras é mostrado o ajuste da equação 2.20, observando-se uma excelente correspondência entre os valores medidos e calculados, o que não seria possível considerando-se apenas a energia de impacto devido à variabilidade dos dados, como pode ser observado nas Figuras 4.30 a 4.33. Os valores dos parâmetros da equação 2.20 são listados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Ajuste dos parâmetros das equação 2.20 e 2.24

Material	Equação 2.20		Equação 2.24
	$t_{10,máx}$	η	α
Vigné	62,2	0,016	0,85
Pedra Sul	47,5	0,027	0,82
Santa Luzia	54,8	0,030	0,71
Embu	45,2	0,020	0,72

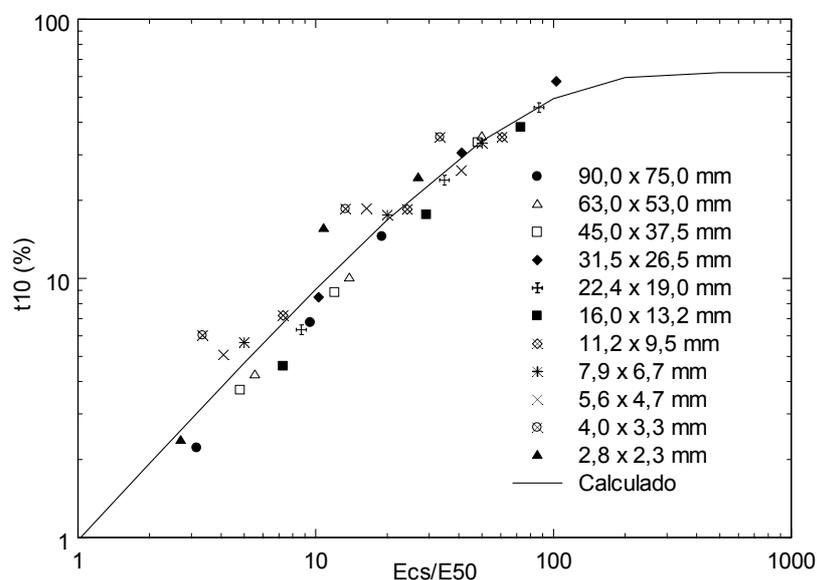


Figura 4.35 – Relação entre t_{10} e energia normalizada para a Pedreira Vigné.

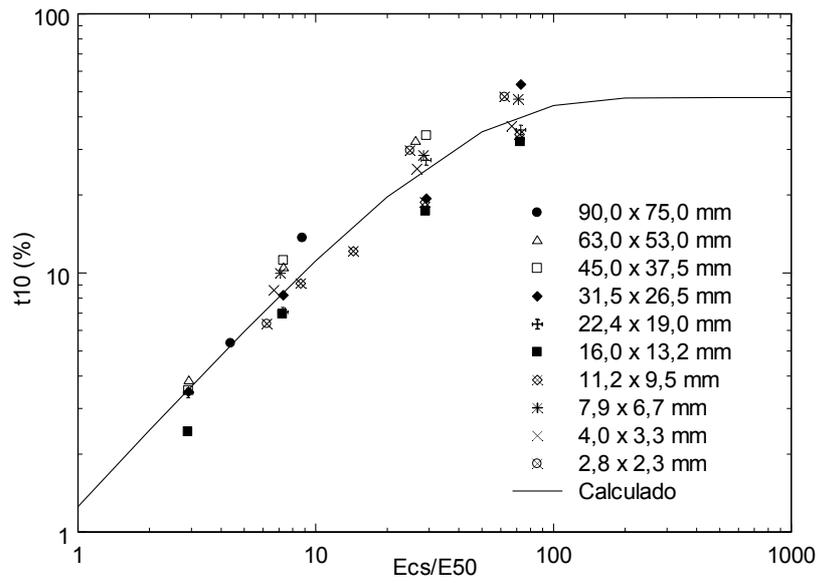


Figura 4.36 – Relação entre t_{10} e energia normalizada para a Pedra Sul Mineração.

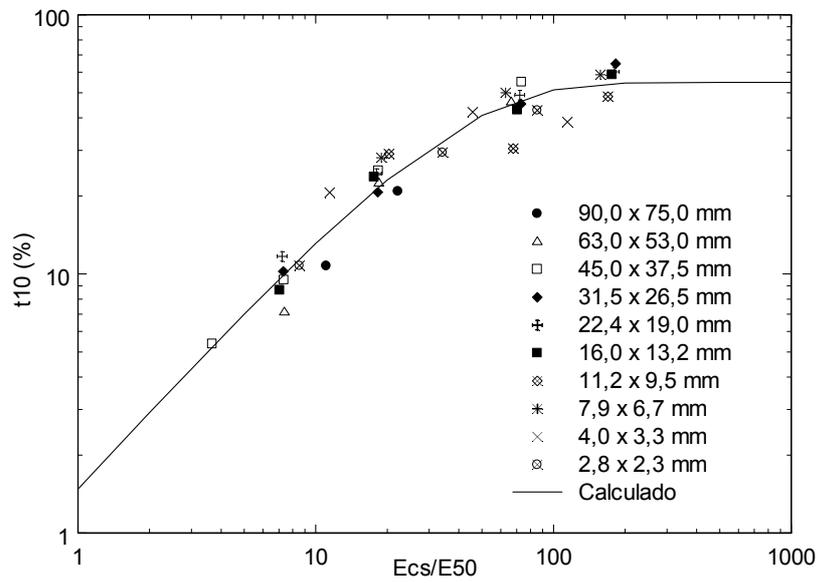


Figura 4.37 – Relação entre t_{10} e energia normalizada para a Pedreira Santa Luzia.

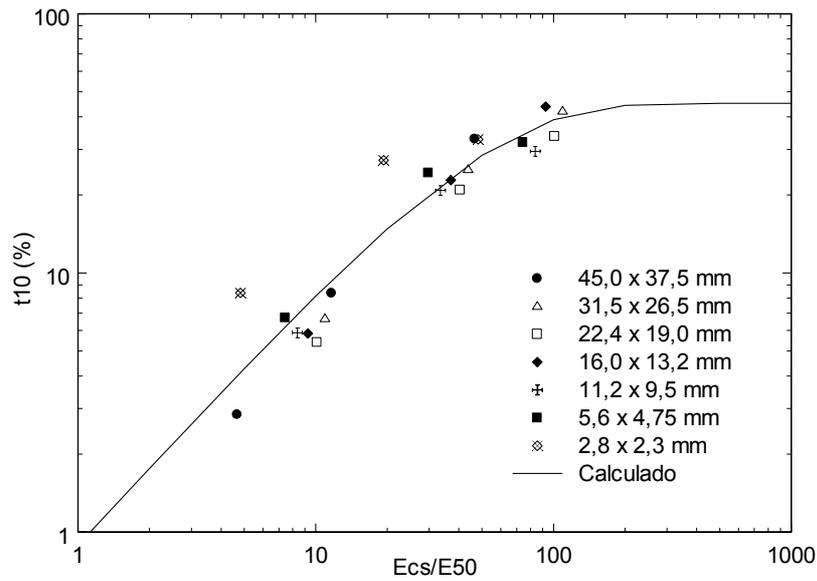


Figura 4.38 – Relação entre t_{10} e energia normalizada para a Pedreira Embu.

A partir dos dados experimentais dos ensaios de fragmentação por impacto foi possível ajustar o parâmetro α da função quebra (eq. 2.24). Os valores deste parâmetro são mostrados na Tabela 4.11 e as Figuras 4.39, 4.40, 4.41 e 4.42 mostram os ajustes obtidos para partículas com tamanhos 45,0 x 37,5 mm (a) e 2,83 x 2,36 mm. Em geral, observou-se uma boa correspondência entre os dados experimentais e os calculados com o modelo para todos os tamanhos. Para energias de impacto altas, da ordem de 2,5 kWh/t, o ajuste nem sempre se mostrou suficientemente preciso. Entretanto, na britagem de materiais por compressão não é comum a utilização de níveis de energia dessa magnitude.

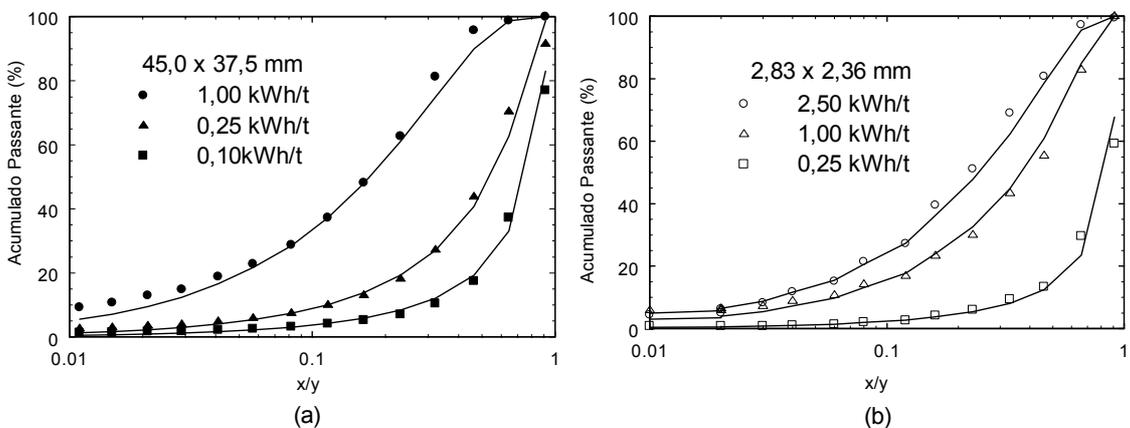


Figura 4.39 – Ajuste da função quebra (eq. 2.24) para o material da Pedreira Vigné.

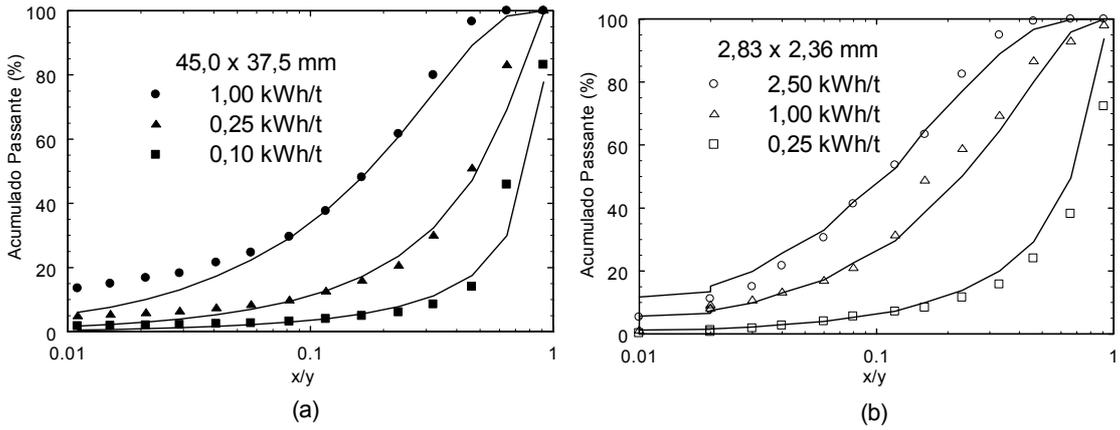


Figura 4.40 – Ajuste da função quebra (eq. 2.24) para o material da Pedra Sul Mineração.

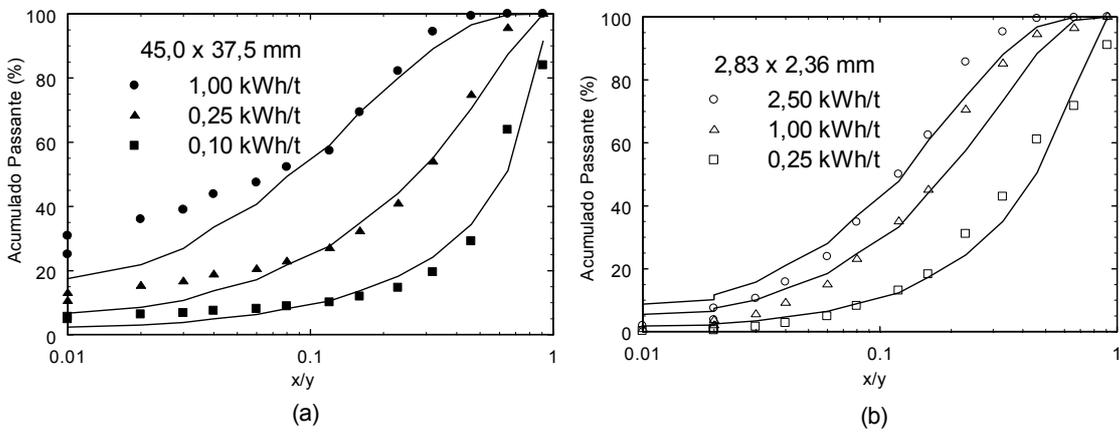


Figura 4.41 – Ajuste da função quebra (eq. 2.24) para o material da Pedreira Santa Luzia.

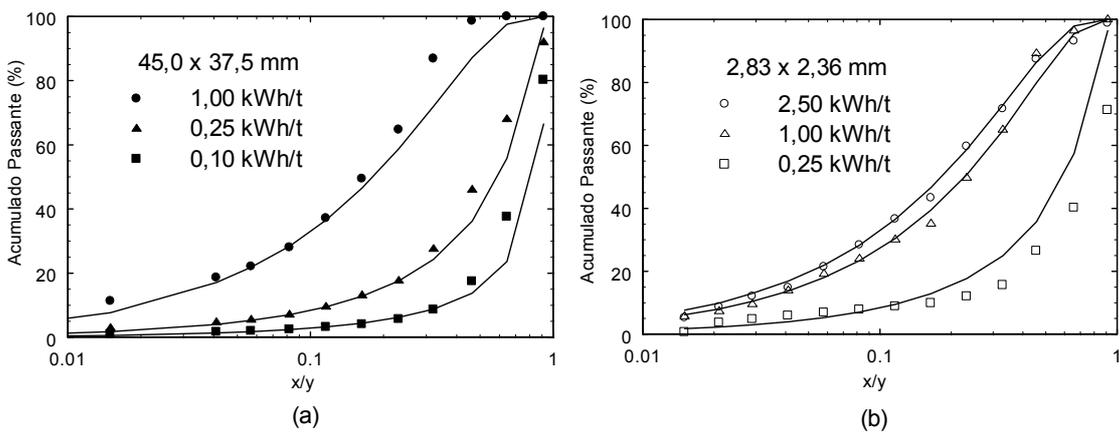


Figura 4.42 – Ajuste da função quebra (eq. 2.24) para o material da Pedreira Embu.

4.3.3 – Suscetibilidade a Quebra por Impactos Repetidos

Com base no modelo matemático proposto por Tavares e King (2002), eq. 2.18 e 2.19, foi possível simular os resultados dos dados experimentais para os materiais estudados. Uma comparação entre os resultados experimentais e o modelo matemático é mostrada nas Figuras 4.43, 4.44, 4.45 e 4.46 observa-se uma boa correspondência entre esses resultados.

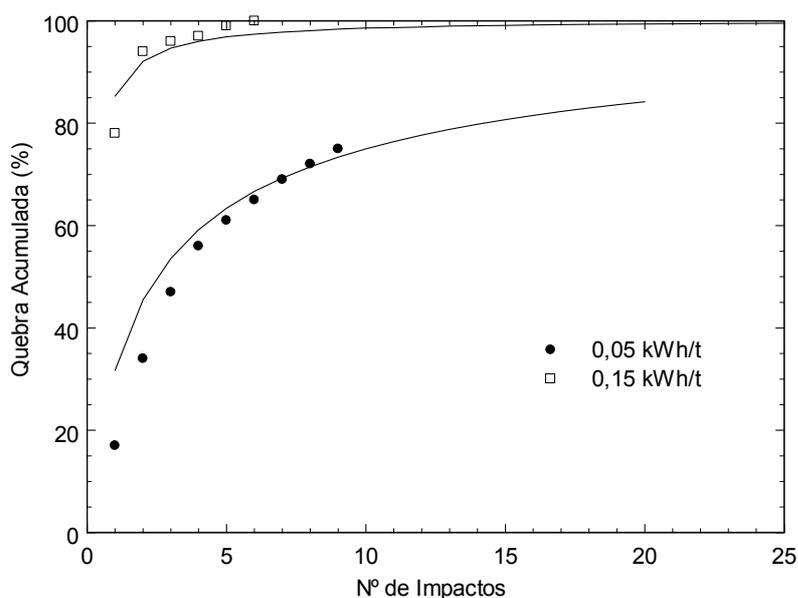


Figura 4.43 – Comparação entre dados experimentais e simulados dos ensaios de impacto repetido para a Pedreira Vigné.

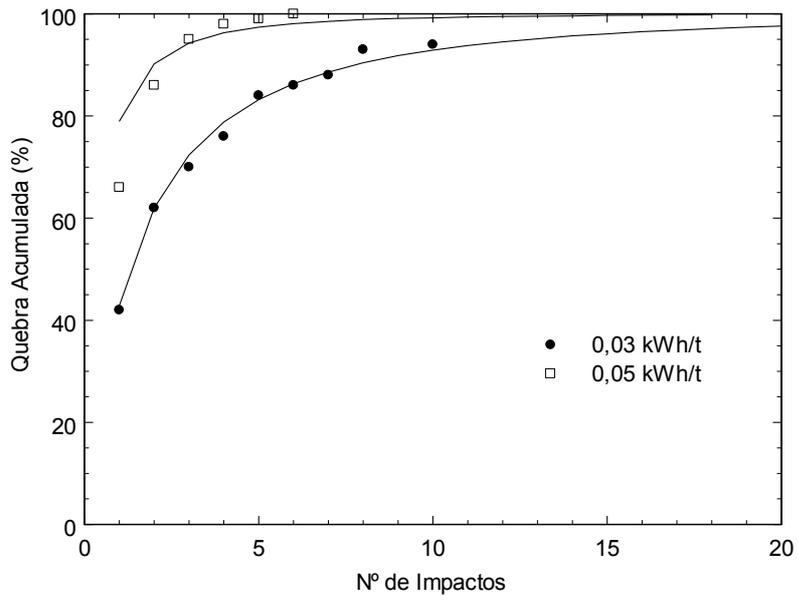


Figura 4.44 – Comparação entre dados experimentais e simulados dos ensaios de impacto repetido para a Pedra Sul Mineração.

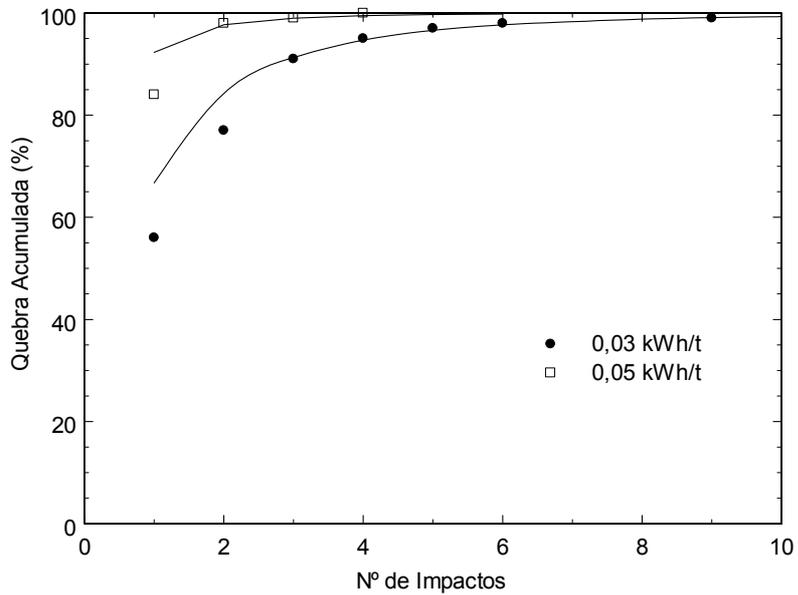


Figura 4.45 – Comparação entre dados experimentais e simulados dos ensaios de impacto repetido para a Pedreira Santa Luzia.

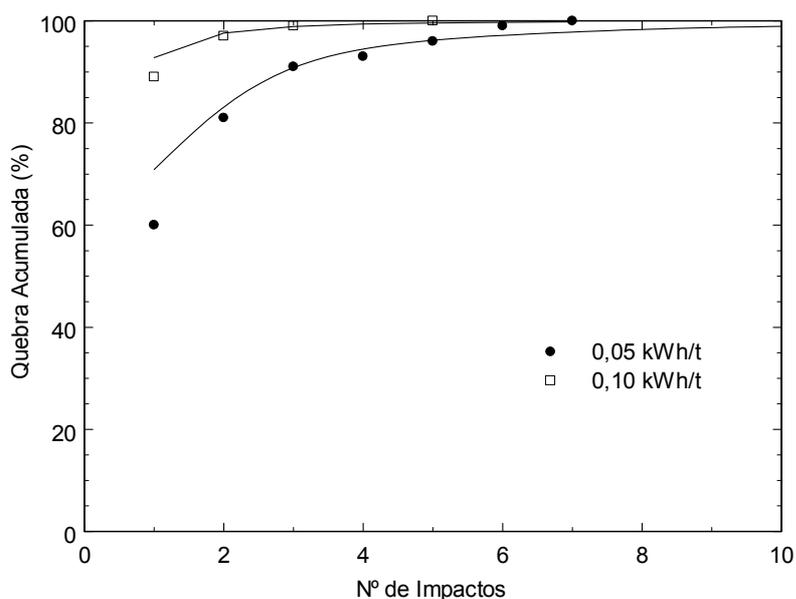


Figura 4.46 – Comparação entre dados experimentais e simulados dos ensaios de impacto repetido para a Pedreira Embu.

Os valores obtidos para o parâmetro γ são mostrados na Tabela 4.12. Esses valores mostram que os materiais da Pedra Sul Mineração, Santa Luzia e Embu, apresentam maior suscetibilidade à fratura por impactos repetidos, sendo que o material da Pedreira Santa Luzia é o mais suscetível deles. Já o material da Vigné, apresentou menor suscetibilidade a quebra por impactos repetidos. Na seção 4.6 será discutida a aplicação desse modelo para o cálculo da energia mínima necessária para a quebra de partículas.

Tabela 4.12 – Valores do parâmetro de suscetibilidade de quebra por impactos repetidos dos materiais estudados (γ)

Material	Vigné	Pedra Sul	Santa Luzia	Embu
γ	7,55	4,69	3,48	3,88

4.3.4 – Relações entre Quebra de Partículas e Microestrutura

Com base nas análises microestruturais do material da Pedreira Vigné observou-se que o mesmo apresenta uma estrutura isotrópica, com poucas superfícies de fraturas, e é constituído por cristais e materiais devitrificados. Essas características mostram que esse material apresenta a tendência de responder elasticamente aos esforços aplicados,

ou seja, não acumulam danos, e sua fratura é controlada pela iniciação de trincas. Isso explica o fato de esse material apresentar uma forte dependência do tamanho inicial de partícula nas medidas de energia de fratura (Figura 4.12), resistência (Figura 4.20) e fragmentação (Figura 4.30). O material da Pedreira Vigné também apresentou a menor suscetibilidade a quebra por impactos repetidos (Tabela 4.12), o que se explica pelo fato desse material responder elasticamente aos esforços e não acumular danos em sua estrutura.

Os materiais da Pedra Sul Mineração e da Santa Luzia apresentaram uma estrutura altamente fraturada e constituída apenas por cristais. Estas características mostram que estes materiais não respondem elasticamente aos esforços aplicados, ou seja, têm a tendência de acumular danos e sua fratura é controlada pela propagação de trincas. Assim a fratura do material ocorre apenas quando as trincas atingem um dado tamanho crítico. Isso explica o fato das medidas de energia de fratura (Figura 4.13 e 4.14), resistência (Figura 4.20) e fragmentação (4.31 e 4.32) não demonstrarem dependência com o tamanho inicial de partícula para partículas maiores que alguns milímetros. Os materiais dessas pedreiras também apresentaram moderada suscetibilidade à quebra por impactos repetidos (Tabela 4.12), que se explica pelo fato desse material acumular danos em sua estrutura.

Conforme discutido previamente o material da Pedreira Embu não apresenta uma clara dependência de tamanho nas medidas de energia de fratura e resistência de partículas (4.15), resistência (Figura 4.20) e fragmentação (Figura 4.33). Apesar da análise microestrutural ter mostrado que este material não se apresenta fraturado, ele possui certa foliação e muitos contornos de grão, que podem ser responsáveis por essas características de quebra e fragmentação. Além disso, essas foliações e contornos conferem ao material a tendência de acumular danos em sua estrutura, o que explica a moderada suscetibilidade a quebra por impactos repetidos.

Com relação aos resultados de rigidez da partícula, conforme discutido por Tavares e King (1998), esta é uma característica que não é influenciada pela estrutura do material, mas pelo efeito cumulativo de deformações em porções individuais da partícula, ou seja, esta medida depende da estrutura molecular e atômica, e é uma propriedade intrínseca do material (Dieter, 1961).

A alta resistência à fragmentação por impacto dos materiais da Vigné e da Embu (Tabela 4.10) pode ser explicada, em parte, pelo fato desses materiais terem apresentado maior quantidade de álcalis-feldspatos, os quais são muito resistentes. O material da

Vigné, assim, seria mais resistente por apresentar quantidade mais elevada desse mineral. A resistência média do material da Pedra Sul Mineração pode ser explicada pela presença desses álcalis-feldspatos, mas em menores quantidades. Já a baixa resistência do material da Santa Luzia é explicada pela presença de uma quantidade relativamente alta de biotita, a qual torna o material mais frágil, além de intenso fraturamento intergranular.

O caráter normalizável da função quebra demonstrado pelo material da Pedreira Vigné (Figura 4.26b) pode ser explicado pela estrutura bastante isotrópica deste material. Por outro lado, o caráter não normalizável da função quebra para dos material da Pedra Sul Mineração para tamanhos de partícula menores que 0,21 mm, apesar deste material ter granulometria média-grossa (maior que 1mm), pode ser explicado pela dimensão das regiões não fraturadas do material, visto que este material apresenta a estrutura bastante fraturada (Figura 4.3). Para o caso das Pedreiras Santa Luzia e Embu o caráter não normalizável da função quebra para tamanhos menores que 0,85 mm e 0,075 mm, respectivamente, pode ser explicado pela granulometria desses materiais, média (1-3 mm) para o caso da Santa Luzia e fina (menor que 1 mm) para o caso da Embu. No caso, da Pedreira Santa Luzia pode haver ainda influência do tamanho de regiões não fraturadas na estrutura.

Apesar da discussão acima, existem materiais que possuem a estrutura fraturada, mas ainda assim apresentam influência do tamanho inicial de partícula na fragmentação. Este é o caso do xisto estudado por Neves (2004). Neste caso específico a dependência do tamanho inicial é explicada pelo fato da sua estrutura ser formada por regiões de quartzo-feldspato de maior tamanho e muito fraturadas, e regiões micáceas de menor tamanho. Assim, a fragmentação de partículas de tamanho mais grosso é influenciada pelas regiões de quartzo-feldspato, que por serem muito fraturadas causam uma intensa fragmentação. Por outro lado, a fragmentação das partículas de menor tamanho é influenciada pelas regiões micáceas (mica verde) a qual tende a fraturar sem gerar muito finos.

4.4 – Fragmentação de Partículas por Abrasão

A Figura 4.47 mostra os resultados de análise granulométrica após o ensaio de abrasão, e a Tabela 4.13 os valores de t_a para cada uma das amostras. Por meio desses

valores de t_a pode-se observar que os materiais das Pedreiras Vigné, Pedra Sul Mineração e Embu possuem elevada resistência a abrasão com valores de t_a igual a 0,32, 0,30 e 0,21, respectivamente. Já o material da Pedreira Santa Luzia apresenta uma resistência à abrasão média, com valor de t_a igual a 0,61.

Tabela 4.13 – Valores de t_a do ensaio de abrasão

Material	Vigné	Pedra Sul	Santa Luzia	Embu
t_a	0,32	0,30	0,61	0,21

Os resultados de resistência à abrasão demonstraram ter boa correlação com a resistência à fragmentação das partículas. De fato, Chierigatti (2001) propôs que t_a pode ser estimado pela relação $A*b/100$ (Tabela 4.10), o que oferece uma correspondência razoável no presente trabalho.

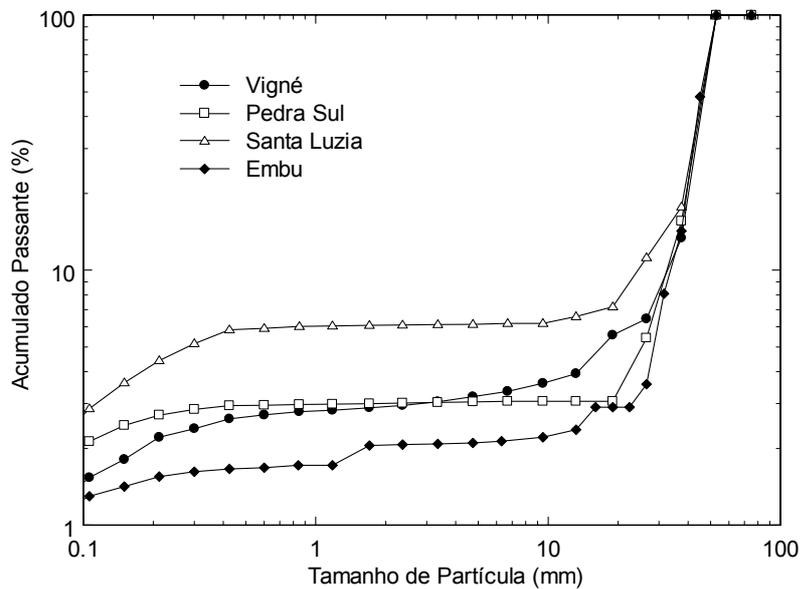


Figura 4.47 – Análise granulométrica após ensaios de abrasão para os materiais estudados.

4.5 – Britagem Industrial

Tendo sido feita uma análise das características de fragmentação associada às características microestruturais dos materiais estudados, nesta seção será analisado o comportamento desses materiais na britagem industrial.

4.5.1 – Circuitos de Britagem Estudados

Os dados de britagem industrial foram obtidos por meio de amostragem dos circuitos de produção de brita de cada pedreira. As Figuras 4.48, 4.49, 4.50 mostram os fluxogramas da rebitagem (britagem secundária em diante) das Pedreiras Vigné, Pedra Sul Mineração e Santa Luzia, respectivamente. Nestas pedreiras a britagem primária é realizada por britadores de mandíbulas. Na Figura 4.51 observa-se o fluxograma de todo o processo produtivo da Pedreira Embu.

Na Pedreira Vigné (Figura 4.48) a rebitagem é feita por meio de quatro estágios de britagem. No segundo estágio de britagem é utilizado um britador giratório S3000, nos estágios seguintes são utilizados britadores cônicos, sendo o terceiro estágio representado pelo britador H4000, o quarto estágio pelo britador 4-36 e o quinto estágio pelo britador H3000 (britadores de fabricação da Svedala Faço).

O processo produtivo da rebitagem (Figura 4.49) da Pedra Sul Mineração é representado por três estágios de britagem. No estágio secundário é utilizado um britador giratório S3000, no estágio terciário um britador cônico H4000 e no estágio quaternário um britador cônico H3000 (britadores de fabricação da Svedala Faço).

Na Pedreira Santa Luzia a rebitagem é feita por meio de três estágios de britagem (4.50). No segundo estágio tem-se um britador giratório S4000 (Svedala Faço), nos terceiro e quarto estágios tem-se os britadores TS-120 (Tellsmith) e 4-36 (Svedala Faço), respectivamente, ambos britadores cônicos.

O processo produtivo da rebitagem da Pedreira Embu com três estágios de britagem é mostrado na Figura 4.51. A britagem secundária é feita por dois britadores de mandíbulas Svedala Faço 120x40 operando em paralelo. A britagem terciária é realizada por dois britadores giratórios 48S (Tellsmith), também operando em paralelo. Nesta pedreira o quarto estágio de britagem é feito por um britador VSI, REMCO (Tavares, 2005b).

Os estágios de britagem primária das pedreiras não foram amostrados, pois a representatividade do fluxo de alimentação das usinas não era adequado. Além disso, não foi possível amostrar a alimentação de alguns britadores, pelo fato desses serem alimentados diretamente com o material retido no primeiro deque de peneiras. Este é o caso dos britadores S3000 e H4000 da Pedreira Vigné e 120-40 da Pedreira Embu. Nestes casos foi feita uma reconstituição a partir dos produtos das peneiras para se obter a alimentação dos britadores.

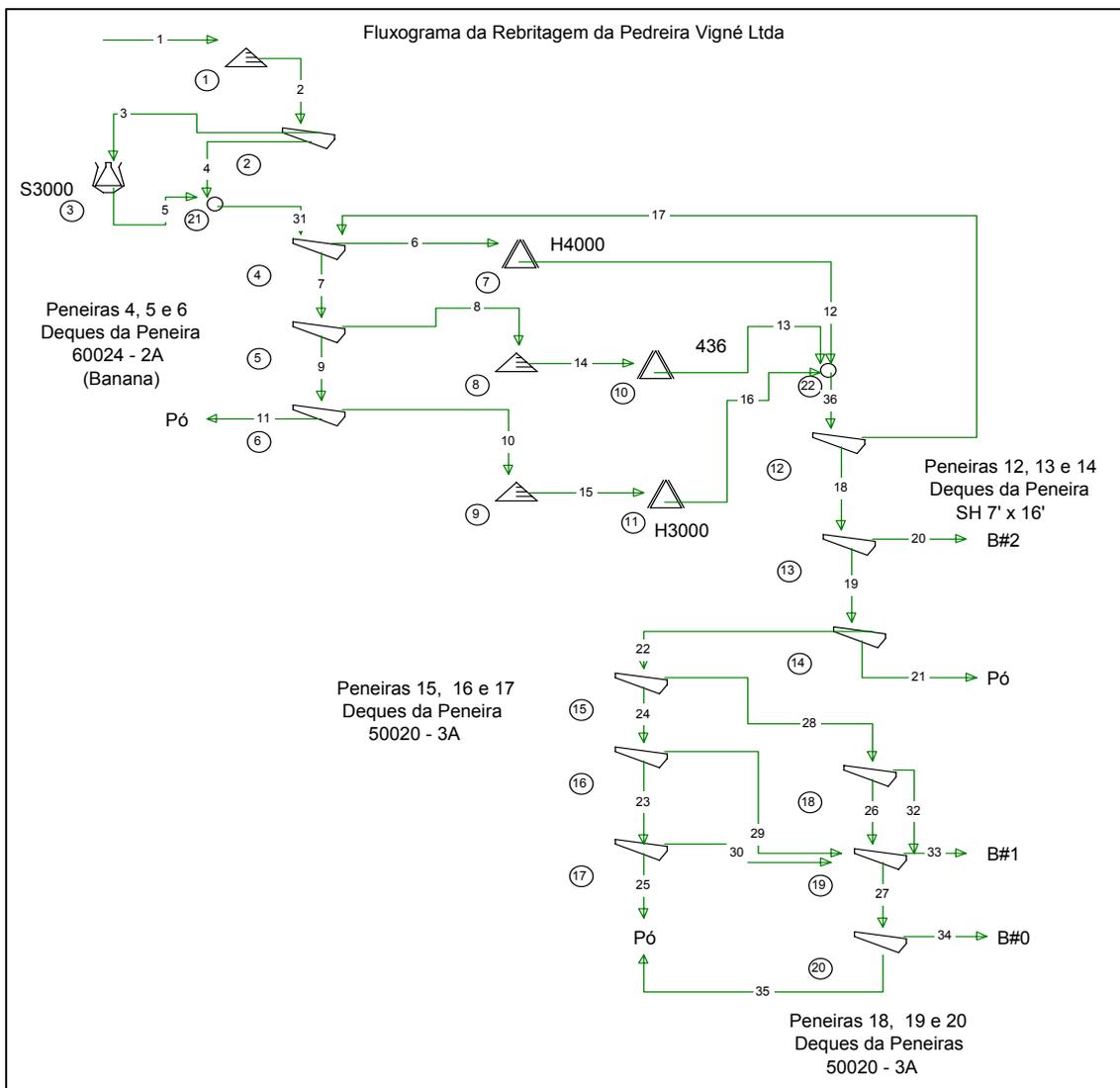


Figura 4.48 – Fluxograma da rebritagem da Pedreira Vigné (Neves, 2002).

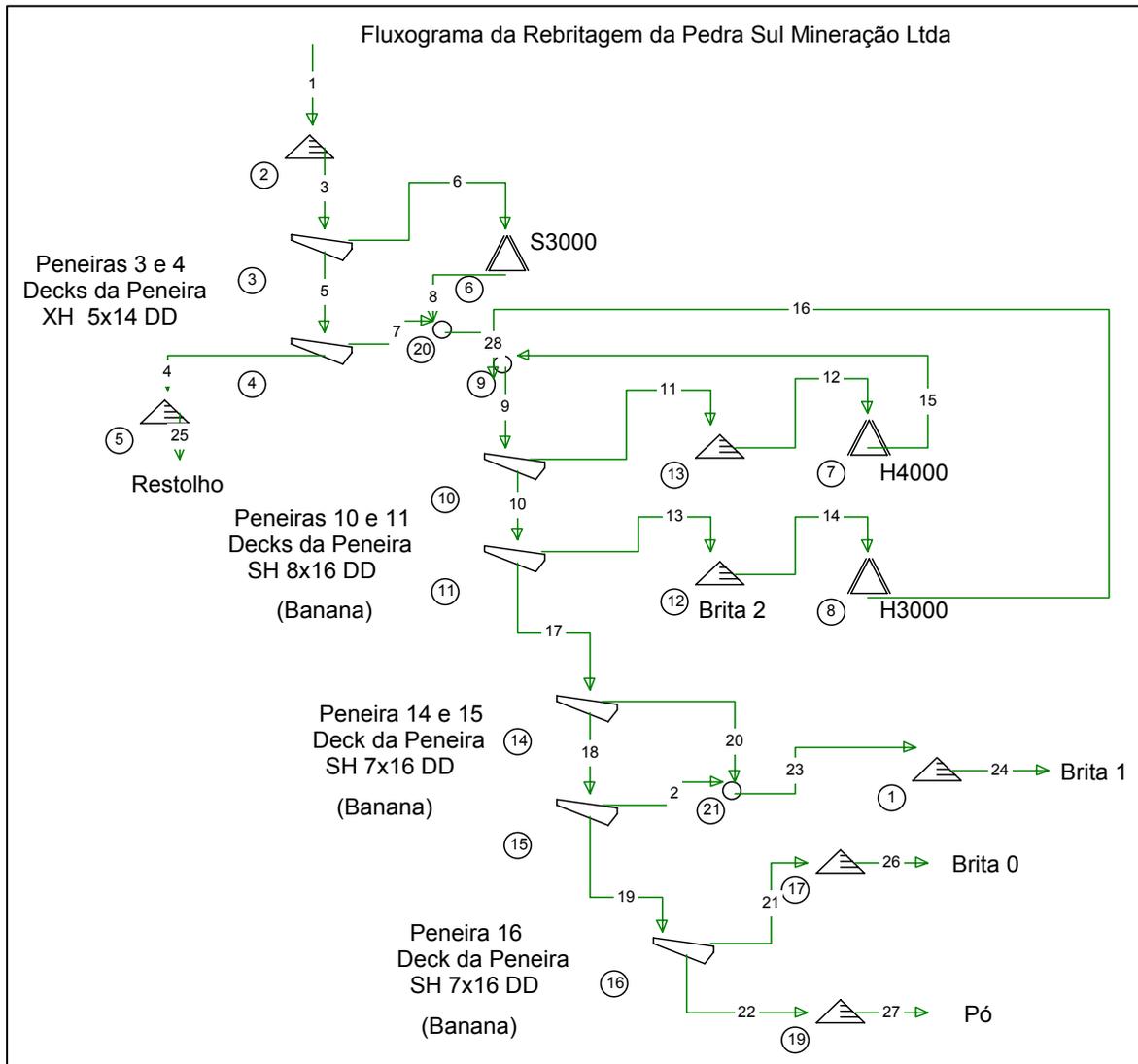


Figura 4.49 – Fluxograma da rebritagem da Pedra Sul Mineração (Neves, 2002).

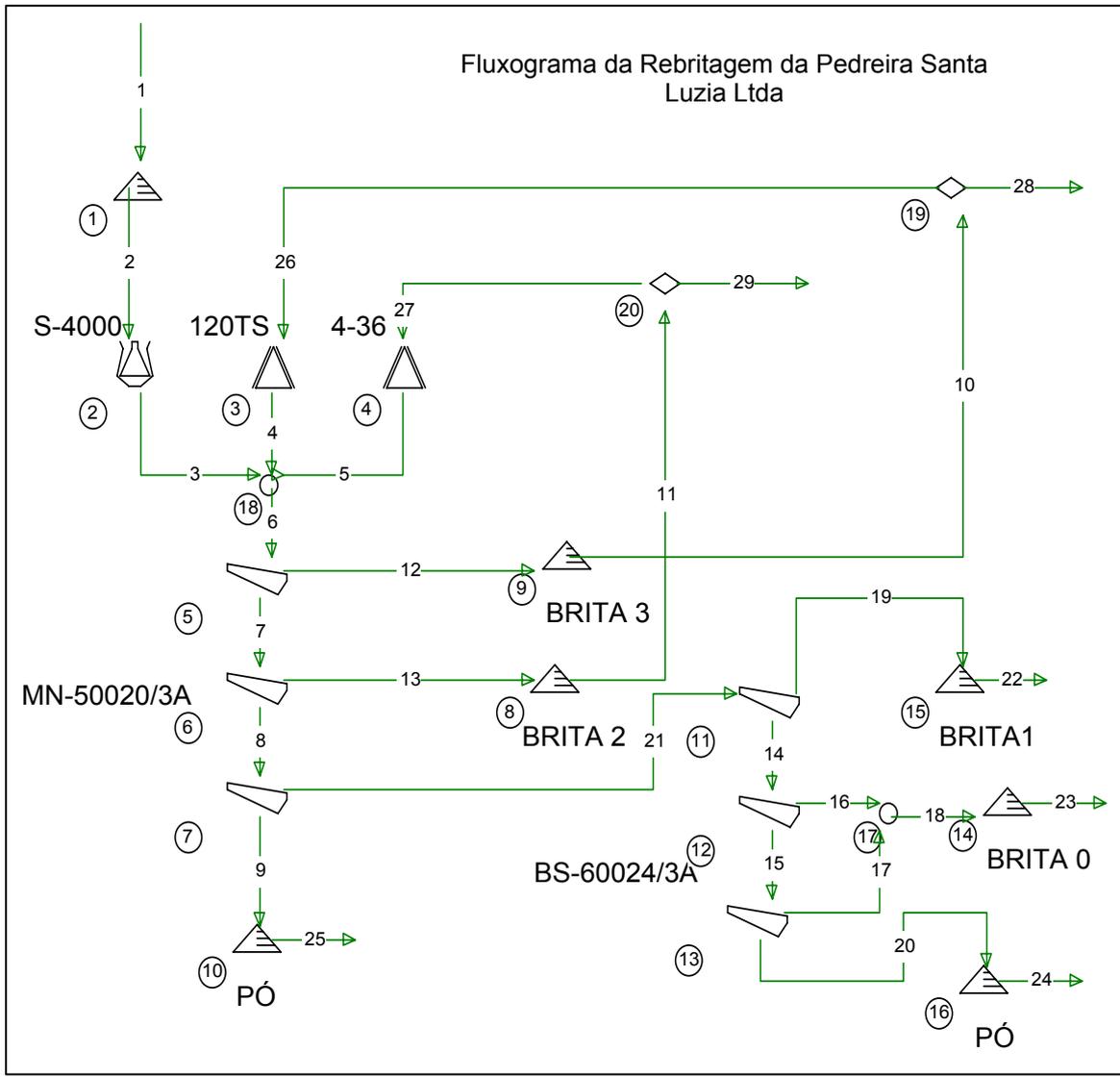


Figura 4.50 – Fluxograma da rebritagem da Pedreira Santa Luzia.

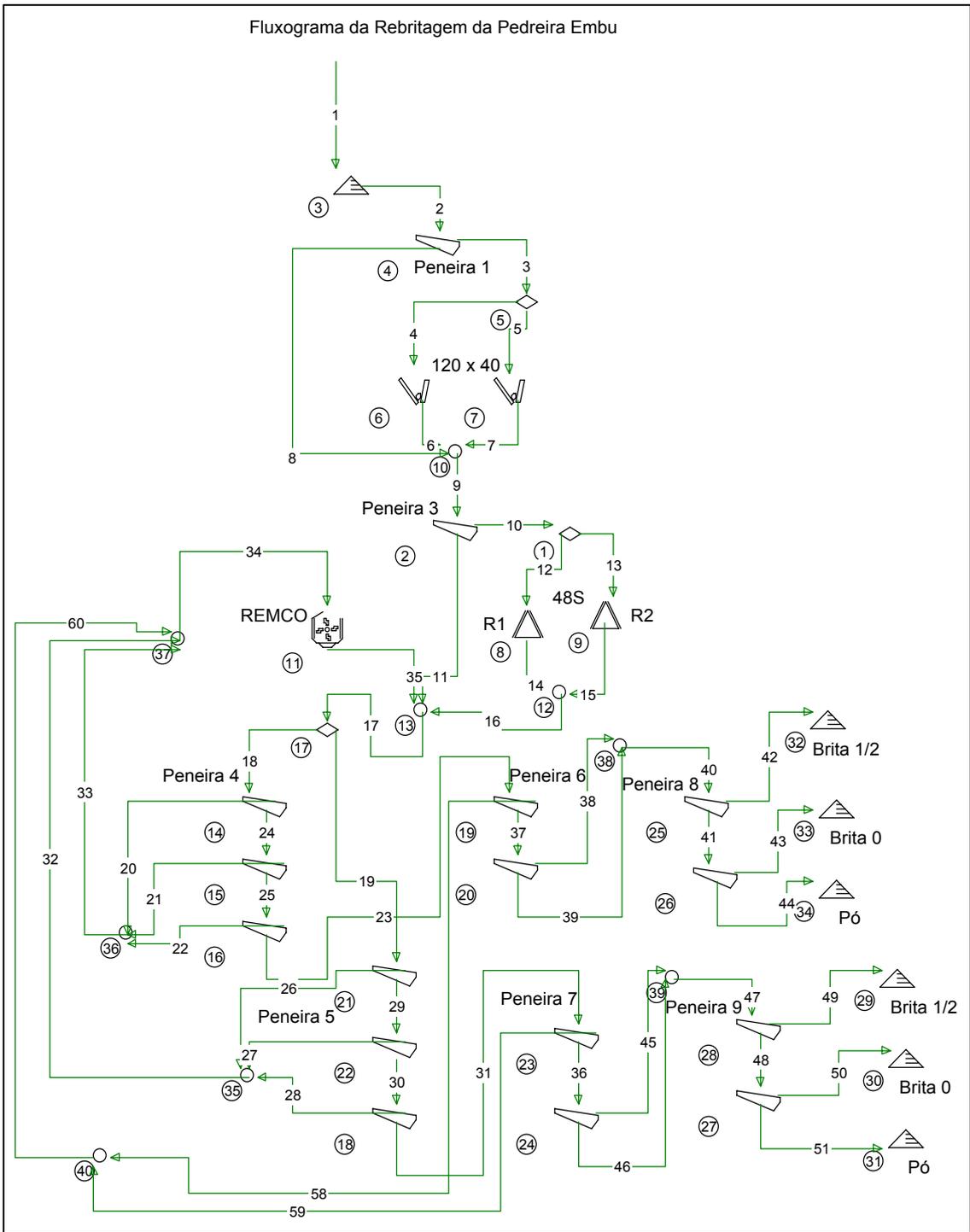


Figura 4.51 – Fluxograma da rebitagem da Pedreira Embu.

A Figura 4.52 mostra uma comparação entre as alimentações da rebitagem dos circuitos de cada pedreira. Para a Pedreira Embu foi considerada a alimentação a partir do terceiro estágio de britagem. A produção média de cada pedreira é mostrada na Tabela 4.14.

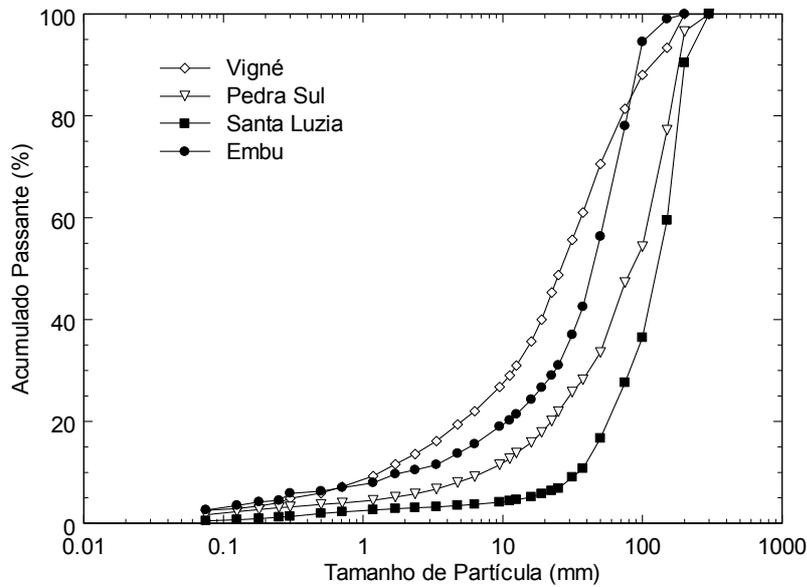


Figura 4.52 – Distribuição granulométrica da alimentação da rebitagem das pedreiras.

Tabela 4.14 – Produção média das pedreiras

Pedreira	Brita 1		Brita 0		Pó	
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
Vigné	22,0 x 11,0	57	11,0 x 4,8	9	< 4,8	34
Pedra Sul	25,0 x 11,0	44	11,0 x 4,5	29	< 4,5	27
Santa Luzia	21,0 x 11,0	36	11,0 x 5,0	19	< 5,0	45
Embu	25,0 x 12,5	48	12,5 x 4,8	33	< 4,8	39

A Tabela 4.15 mostra um resumo com os principais dados operacionais dos britadores amostrados, em cada pedreira.

Tabela 4.15 – Síntese das características operacionais dos britadores amostrados

Material	Britador	APF (mm)	Consumo Energético (kW)		Taxa de Alimentação (t/h)	Razão de Redução	Consumo Energético Específico (kWh/t)
			Vazio	Cheio			
Vigné	H4000	16	55,9	218,2	124,3	4,03	1,76
	436	16	69,9	139,8	137,8	1,95	1,01
	H3000*	14	55,9	148,2	84,3	1,57	1,81
	H3000	12		117,5	81,7	1,83	1,39
Pedra Sul	S3000	61	49,73	89,5	207,4	2,68	0,43
	H4000	32		154,3	315,1	1,95	0,49
	H4000*	35	69,1	181,1	348,5	1,73	0,52
	H4000	40		134,1	348,7	1,29	0,38
	H4000	42		134,1	332,6	1,85	0,40
	H3000 MF*	16		79,6	93,5	1,56	0,85
	H3000 MF	18	39,8	71,6	100,6	1,32	0,71
	H3000 MF	20		72,9	121,4	1,18	0,60
	H3000 MF	21		71,6	137,5	1,13	0,52
	H3000 MC	28		89,5	194,9	1,09	0,46
	H3000 MC	30	50,4	72,9	211,5	1,10	0,34
	H3000 MC	35		107,7	219,5	1,12	0,49
	H3000 MC	40		77,91	254,4	1,07	0,31
Santa Luzia	S3000	48	24,5	183,9	530,4	2,95	0,35
	S3000*	61		147,1	585,8	2,76	0,25
	TS-120	29	22,9	48,1	195,5	2,29	0,25
	436	10		56,2	117,3	2,38	0,48
	436*	15	24,1	50,4	122,8	1,94	0,41
Embu	436	23		33,2	174,1	1,22	0,23
	48S – R1	20	46,0	99,0	212,8	3,40	0,47
	48S – R2	20	61,0	126,0	233,6	3,40	0,54

* Condição normal de operação do britador.

Uma comparação entre o consumo energético específico e a razão de redução dos britadores das pedreiras operando com as APFs típicas de operação das pedreiras é mostrada na Figura 4.53. Observa-se que para os primeiros estágios de britagem em geral há um menor consumo energético e maiores razões de redução, enquanto que para os últimos estágios há um maior consumo energético e menores razões de redução. Entretanto, para a Pedreira Santa Luzia não há um contraste muito pronunciado de consumo de energia entre os primeiros e último estágio de britagem. Para a Pedra Sul Mineração o contraste é um pouco mais pronunciado, mas ainda é pequeno. Isso se deve ao fato da fragmentação desses materiais ser independente do tamanho de partícula. Já para a Pedreira Vigné há um contraste grande entre a energia consumida no quarto e quinto estágios de britagem, o que ocorre devido a esse material apresentar forte

dependência das suas características de quebra com o tamanho de partícula. O alto consumo energético do britador H4000 da Pedreira Vigné provavelmente é devido ao fato deste britador operar com APF muito pequena em relação à granulometria da sua alimentação.

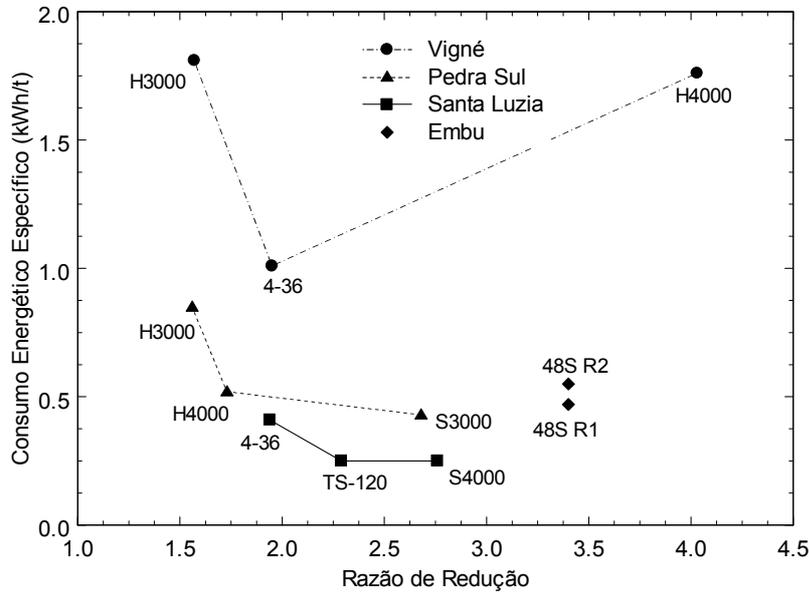


Figura 4.53 – Comparação entre razão de redução e consumo específico de britadores.

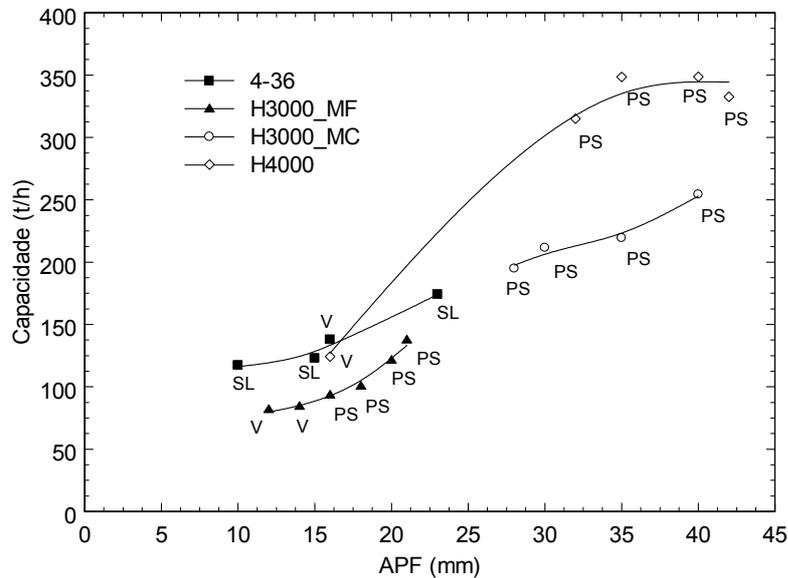


Figura 4.54 – Relação entre capacidade e APF dos britadores.

A Figura 4.54 mostra a variação da capacidade dos britadores amostrados com diferentes APFs. Nota-se que a capacidade aumenta com o aumento da APF. Além

disso os mesmos britadores operando em pedreiras diferentes demonstraram seguir a mesma relação entre APF e capacidade. Para o britador H3000 foram feitas amostragens com dois tipos de revestimentos, médio-grosso (MC) e médio-fino (MF). Observa-se que a capacidade do britador aumenta consideravelmente quando este opera com revestimento médio-grosso.

4.5.2 – Ajuste dos Parâmetros das Funções Quebra e Classificação

A fim de reproduzir o comportamento dos diferentes materiais estudados em britadores industriais foram utilizados os modelos matemáticos já explicitados anteriormente no capítulo 2, os quais se baseiam nas funções quebra (Eq. 2.24) e classificação (Eq. 2.26 e 2.27) dos materiais. Os valores de α , os quais foram calculados com base nos ensaios de fragmentação de partículas, são mostrados na Tabela 4.11. O valor de $n = 2,3$ da equação 2.26 foi mantido para os quatro materiais e os demais parâmetros ajustados por meio do método da tentativa-e-erro, com o objetivo de ajustar dados experimentais aos calculados, são mostrados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Síntese do ajuste dos parâmetros das equações 2.24, 2.26 e 2.27.

Material	Britador	Eq.2.28	Eq. 2.24	Eq. 2.27	
		Q	$t_{10}(\%)$	λ	δ
Vigné	H4000	2,82	15,0	1,95	0,95
	436	1,50	8,50	1,90	0,98
	H3000	1,77	22,0	1,95	0,95
Pedra Sul	S3000	0,87	2,10	1,68	0,68
	H4000	1,43	4,00	1,80	0,50
	H3000	1,23	11,0	1,69	0,91
	MF				
	H3000 MC	1,33	6,00	1,35	0,35
Santa Luzia	S4000	1,63	10,0	1,90	0,90
	TS-120	1,12	5,0	1,60	0,90
	436	1,30	10,0	1,68	0,70
Embu	48S – R1	1,06	20,0	1,98	0,98
	48S – R2	0,69			

Com base no ajuste do modelo matemático dos britadores foi possível calcular os produtos dos diferentes britadores das pedreiras.

As Figuras 4.55 e 4.56 mostram o ajuste dos britadores da Pedreira Vigné, sendo eles H4000 (segundo estágio de britagem), 436 (terceiro estágio de britagem) e H3000

(quarto estágio de britagem). Observa-se na Figura 4.55 que os britadores H4000 e 436 apresentam distribuições granulométricas dos produtos muito semelhantes, como era esperado visto que esses britadores operam com a mesma APF. Isso explica também o alto consumo energético do britador H4000 nesta pedreira, uma vez que a sua alimentação é relativamente grossa e ele opera com APF muito pequena, o que resulta em um alto consumo de energia para redução de tamanho. A Figura 4.56 mostra o ajuste do britador H3000 operando com diferentes APFs.

Em geral, observou-se uma excelente correspondência entre os dados medidos e os calculados para os quatro materiais. É importante destacar que este modelo foi capaz de reproduzir o comportamento de um mesmo britador operando com diferentes APFs.

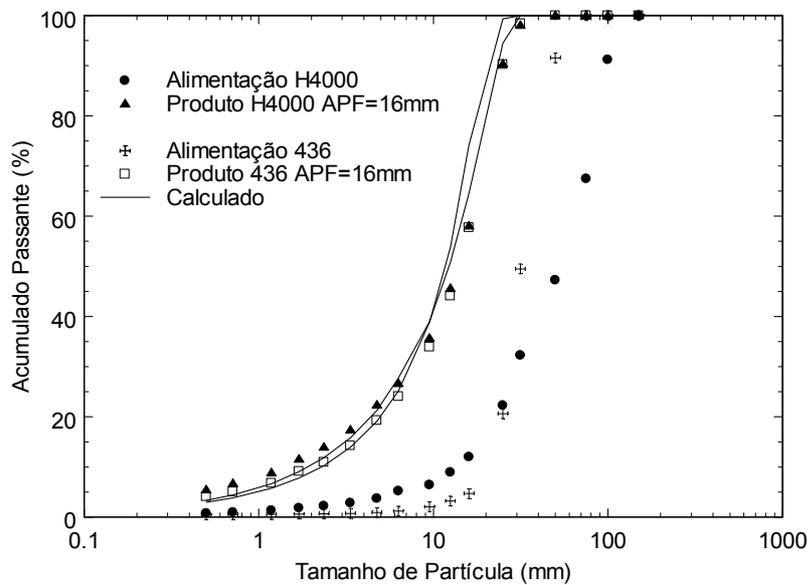


Figura 4.55 – Comparação entre os dados medidos e simulados para os britadores H4000 e 436 da Pedreira Vigné.

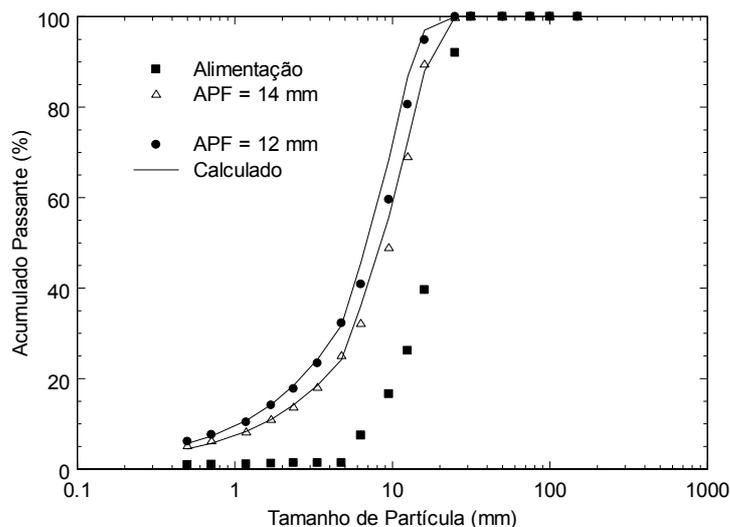


Figura 4.56 – Comparação entre os dados medidos e simulados para o britador H3000 da Pedreira Vigné.

As Figuras 4.57 e 4.58 mostram o bom ajuste alcançado entre os valores medidos e calculados para os britadores S3000, H4000 e H3000 da Pedra Sul Mineração operando com diferentes APFs. Além disso, para o caso britador H3000 o modelo foi capaz de descrever sua operação com diferentes APFs e diferentes tipos de revestimento, estando estes últimos com longo e curto tempo de vida útil, ou seja, novos ou desgastados.

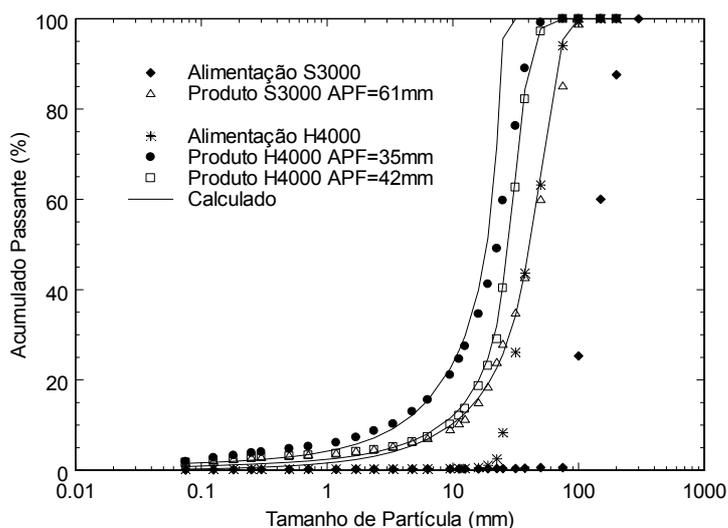


Figura 4.57 – Comparação entre os dados medidos e simulados para os britadores S3000 e H4000 da Pedra Sul Mineração.

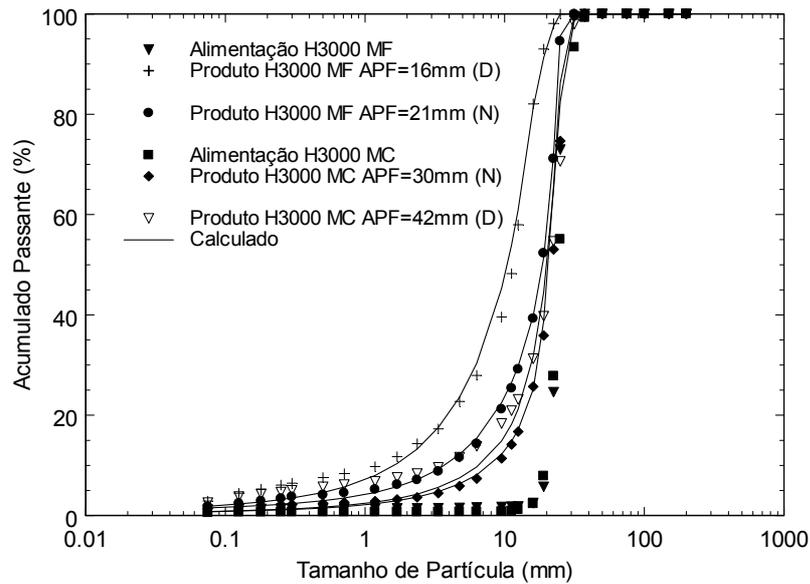


Figura 4.58 – Comparação entre os dados medidos e simulados para o britador H3000 da Pedra Sul Mineração (D – revestimento desgastado, N – revestimento novo, MC – revestimento para britagem média-grossa e MF – revestimento para britagem média-fina).

As Figuras 4.59 e 4.60 mostram os ajustes alcançados para os britadores da Pedreira Santa Luzia. Observa-se que os produtos medidos para o britador S4000 (Figura 4.59) operando na posição aberta e fechada são praticamente idênticos, o mesmo ocorrido para o britador 4-36 operando na posição fechada e média. Isso pode ter ocorrido devido a alguma dificuldade durante a amostragem, como alguma variação na alimentação do britador, ou pelo circuito não ter funcionado durante tempo suficiente para entrar em regime estacionário. O modelo também não foi capaz de reproduzir o ajuste da parte final das curvas, ou seja, a quantidade gerada de material com granulometria fina. Apesar disso o ajuste é considerado satisfatório para todos os britadores.

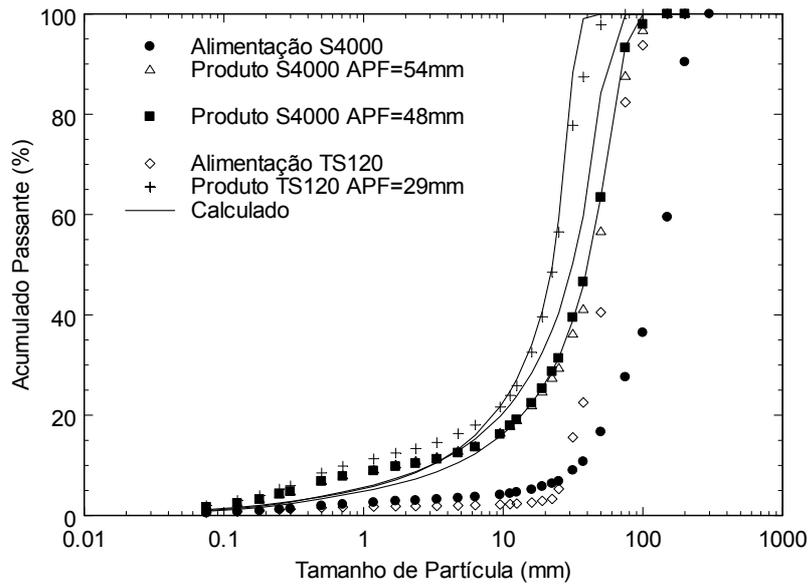


Figura 4.59 – Comparação entre os dados medidos e simulados para os britadores S4000 e TS-120 da Pedreira Santa Luzia.

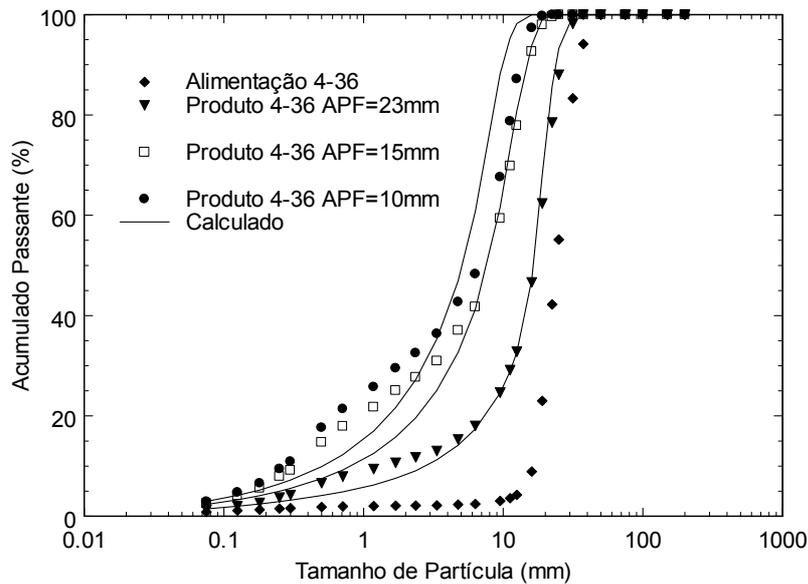


Figura 4.60 – Comparação entre os dados medidos e simulados para o britador 4-36 da Pedreira Santa Luzia.

A Figura 4.61 mostra o ajuste dos produtos medidos e simulados para os britadores giratórios 48-S da Pedreira Embu. Observou-se um bom ajuste, mesmo não tendo sido possível reproduzir a parte final das curvas (material de granulometria fina).

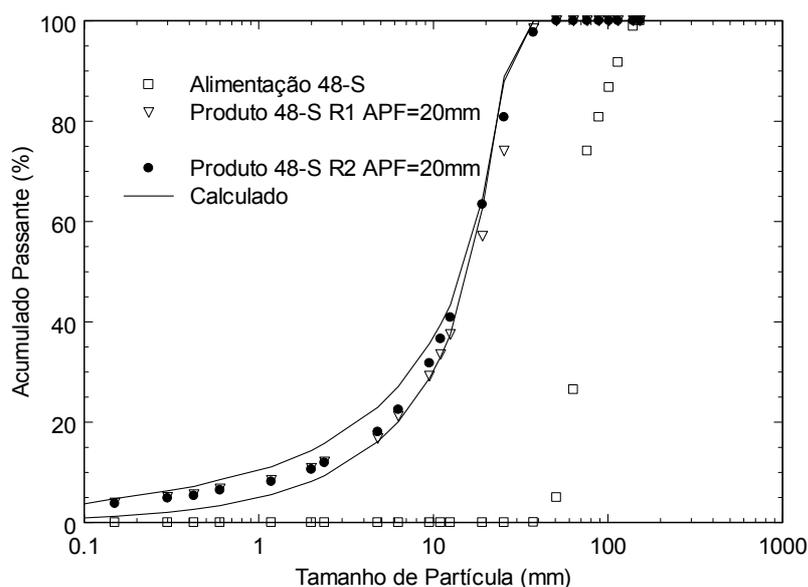


Figura 4.61 – Comparação entre os dados medidos e simulados para os britadores da Pedreira Embu.

4.5.3 – Cálculo do Consumo Energético de Britadores

Por meio das características de quebra dos materiais foi possível ajustar os parâmetros das equações 2.20 (Tabela 4.11) e 2.21 (Tabela 4.9), o que permitiu a utilização do modelo matemático para cálculo de consumo energético de britadores (eq. 2.28 e 2.29). Os valores de Q , os quais foram obtidos por meio de regressão linear, são mostrados na Tabela 4.16. Pode-se observar que os valores variaram em um intervalo mais amplo que aqueles reportados por Napier-Munn et al. (1996). A Figura 4.62 mostra um resumo comparativo do consumo energético específico medido e calculado dos britadores utilizados para cominuição dos materiais analisados das quatro pedreiras, que demonstra a capacidade descritiva dos modelos.

Observa-se que em geral há uma boa correspondência entre os valores medidos e simulados. Além disso, comparando-se o consumo energético específico dos britadores cônicos e giratórios das pedreiras, os britadores da Pedreira Vigné apresentaram maior consumo específico, enquanto que os britadores da Pedreira Santa Luzia demonstraram os menores valores de consumo energético específico na cominuição (Tabela 4.15). Os britadores das Pedreiras Pedra Sul Mineração e Embu apresentaram valores intermediários.

Fazendo-se uma análise comparativa entre os britadores H4000 e H3000 operando nas Pedreiras Vigné e Pedra Sul Mineração, observa-se que na primeira pedreira esses britadores apresentam um consumo energético específico maior que na segunda. Para o caso do H4000 isso pode estar relacionado à APF desse britador ser muito menor na Pedreira Vigné que na Pedra Sul Mineração. Entretanto, considerando-se o britador H3000, observa-se que mesmo para APFs da mesma ordem de magnitude o consumo energético específico é maior na Pedreira Vigné. Dessa forma, observa-se que este fato está relacionado à resistência do material na faixa granulométrica de alimentação dos britadores. No caso da Pedreira Vigné a granulometria de alimentação do britador se encontra na faixa de 32 x 4,8 mm, já no caso da Pedra Sul Mineração o britador é alimentado com material na faixa de 32 x 25 mm. Nestas faixas de granulometria o material da Pedreira Vigné apresenta maior resistência que o material da Pedra Sul (Figura 4.20). Além disso, conforme mostrado por Svensson e Steer (1990), quando a granulometria da alimentação apresenta uma ampla faixa de tamanhos, a britagem é responsável por um consumo energético maior do que quando são usadas faixas granulométricas de alimentação mais estreitas.

Uma análise semelhante pode ser feita para o britador 4-36 operando nas Pedreiras Vigné e Santa Luzia. Observa-se que na primeira pedreira esse britador apresenta um consumo energético específico muito maior que na segunda pedreira. Neste caso a granulometria da alimentação dos britadores é bastante semelhante (32 x 21 mm na Santa Luzia e 32 x 22 na Vigné). No entanto, conforme mostra a Figura 4.20 para essa faixa granulométrica a resistência do material da Pedreira Vigné é maior que aquela do material da Santa Luzia, o que explica o maior consumo energético do material da Pedreira Vigné.

Com o objetivo de estimar a eficiência energética dos circuitos de britagem foi utilizado um algoritmo para o cálculo da energia específica mínima necessária para a britagem dos materiais. Essa é a energia mínima necessária para que, partindo da análise granulométrica da rebritagem das pedreiras (Figura 4.52), seja obtida a granulometria do produto da rebritagem de cada pedreira considerando-se uma seqüência hipotética de impactos. Esses cálculos foram feitos com base na metodologia proposta por Tavares (2004). Nesse método a etapa de fragmentação consiste do impacto de partículas individuais dentro de um intervalo estreito de tamanhos, e é descrita usando-se os dados experimentais de quebra de partículas individuais, enquanto que a classificação é considerada como um peneiramento ideal.

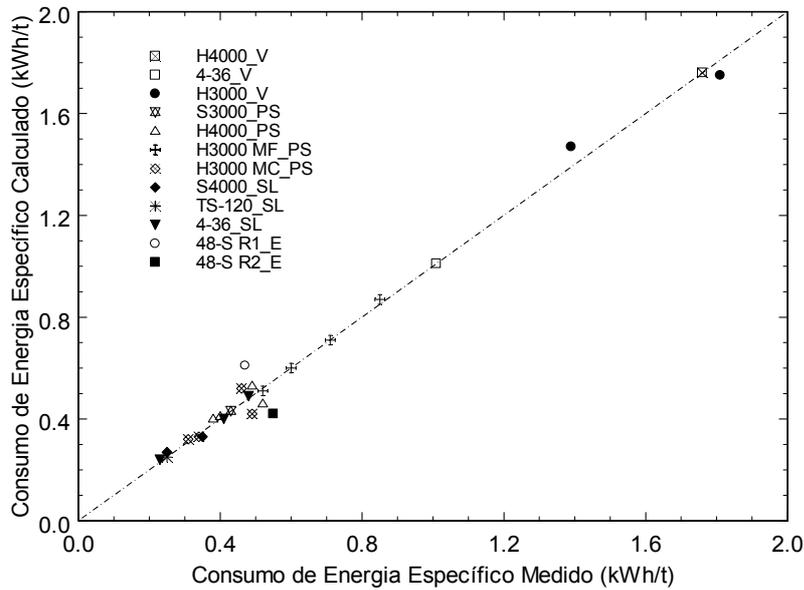


Figura 4.62 – Comparação entre consumo energético específico medido e calculado.

Uma tentativa inicial do uso da equação 2.24 na descrição da função quebra de partículas individuais foi realizada. Entretanto, o ajuste desta função aos dados experimentais a baixos valores de t_{10} , valores estes usados no cálculo da energia ótima (Tavares, 2004a), não se mostrou satisfatório. Dessa forma, a função quebra para cálculo da energia ótima de britagem foi descrita pela equação 2.23, com K dado por:

$$K = 10^{(n_1+n_2)} \frac{\left(\frac{t_{10}}{100} - 10^{-n_2} \right)}{10^{n_1} + 10^{n_2}} \quad [4.3]$$

A Figura 4.63 ilustra a influência do E^* no consumo energético considerando-se um produto com 100% passante em 5 mm para o material da Pedra Sul Mineração.

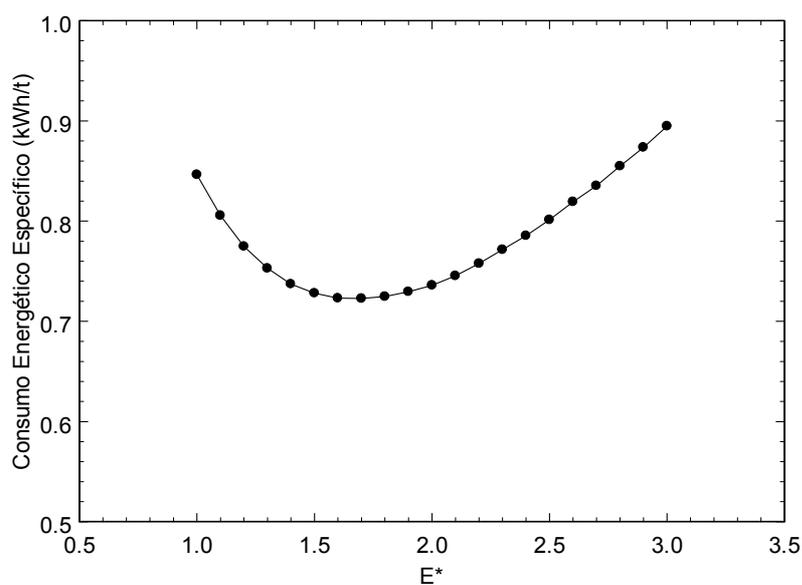


Figura 4.63 – Efeito da energia relativa (E^*) usada em cada estágio no consumo energético total para gerar um produto com 100% passante em 5 mm para o material da Pedra Sul Mineração.

A Tabela 4.17 mostra os parâmetros da função quebra utilizada na simulação da energia ótima de britagem e os valores de E^* para os quatro materiais analisados.

Tabela 4.17 – Parâmetros da simulação da energia ótima

Pedreira	E^*	n_1	n_2
Vigné	2,4	0,58	2,6
Pedra Sul	1,7	0,36	2,9
Santa Luzia	1,3	0,22	2,5
Embu	1,5	0,42	2,6

A Figura 4.64 ilustra a variação da distribuição granulométrica dos produtos simulada com a seqüência hipotética de impactos para o material da Pedreira Vigné, considerando-se os parâmetros ajustados de cada material.

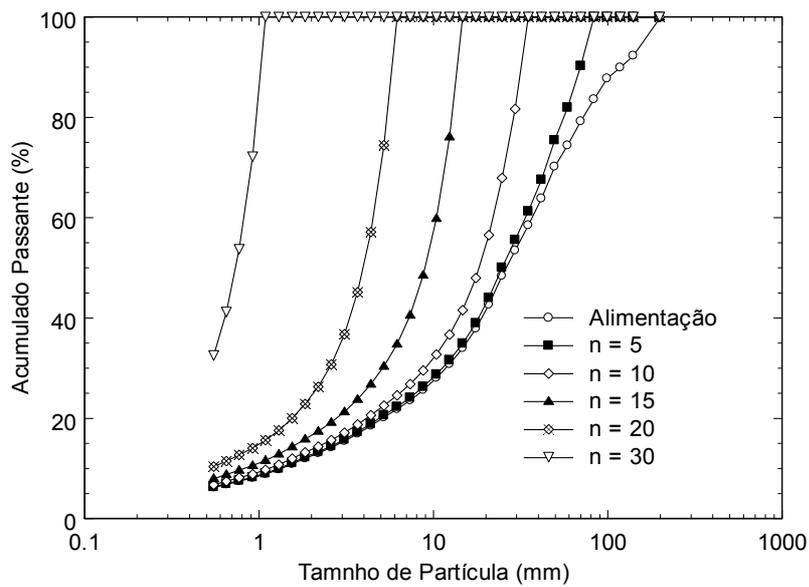


Figura 4.64 – Variação da granulometria do produto com os estágios hipotéticos de britagem para a Pedreira Vigné.

A Figura 4.65 mostra uma relação entre a energia total consumida e o tamanho de produto com 80% passante. Nota-se que quanto maior é a energia total consumida menor é a granulometria do produto.

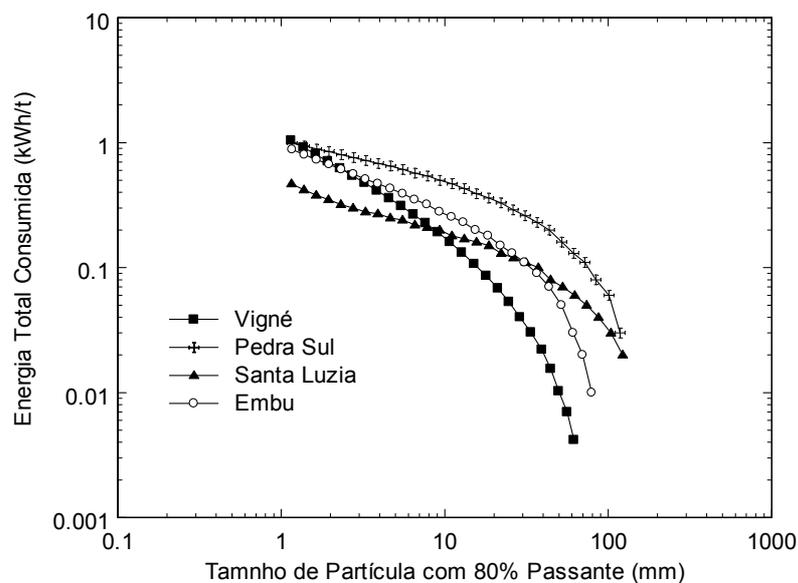


Figura 4.65 – Relação entre energia total consumida e tamanho de partícula do produto com 80% passante.

As Figuras 4.66, 4.67, 4.68 e 4.69 mostram uma comparação entre os produtos medido e simulado com algoritmo para o cálculo da energia específica mínima necessária para britagem de materiais. Considerando-se que o interesse era ajustar o tamanho para 80% passante do produto, observa-se uma boa correspondência.

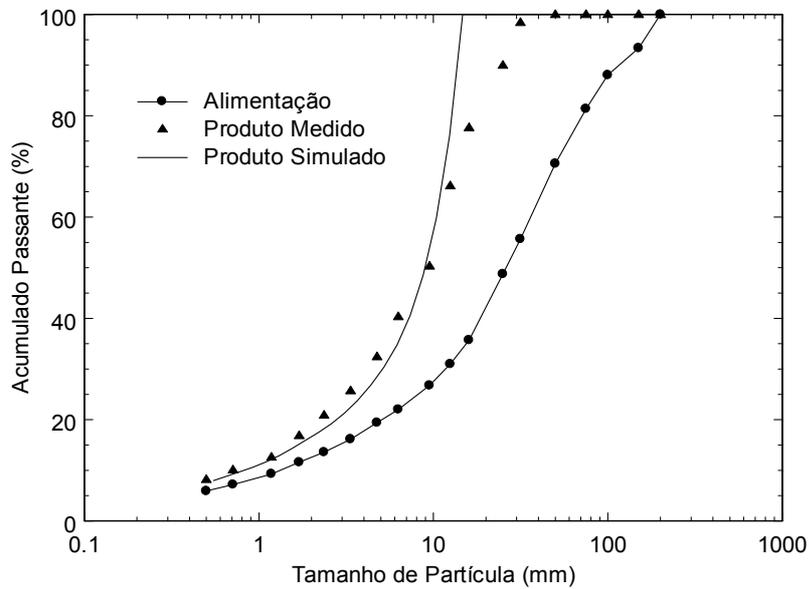


Figura 4.66 – Comparação entre produto medido e simulado considerando a energia ótima de britagem para a Pedreira Vigné.

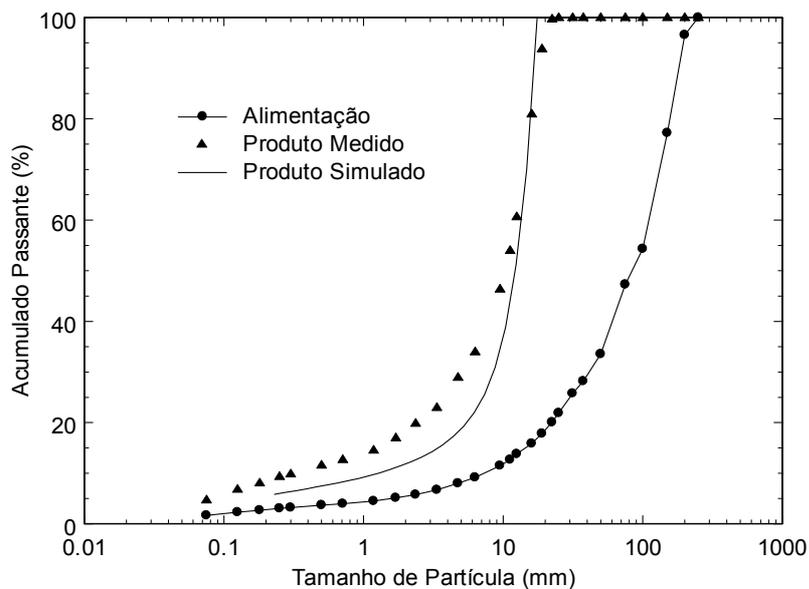


Figura 4.67 – Comparação entre produto medido e simulado considerando a energia ótima de britagem para a Pedra Sul Mineração.

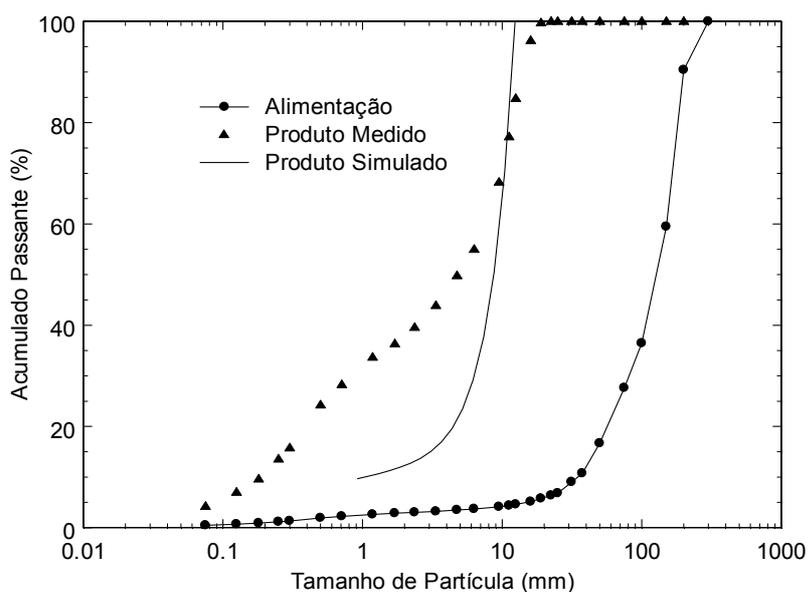


Figura 4.68 – Comparação entre produto medido e simulado considerando a energia ótima de britagem para a Pedreira Santa Luzia.

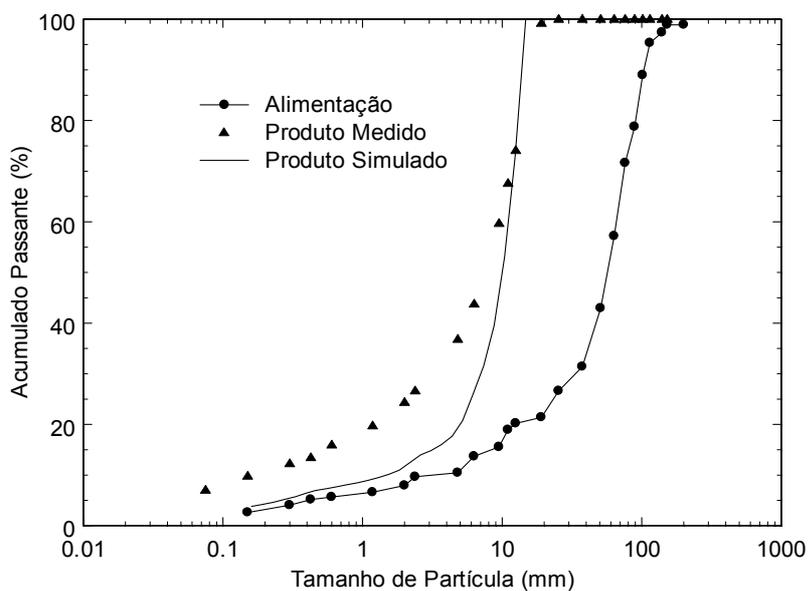


Figura 4.69 – Comparação entre produto medido e simulado considerando a energia ótima de britagem para a Pedreira Embu.

Um resumo do consumo energético específico calculado e o ótimo dos britadores de cada pedreira é mostrado na Tabela 4.17. O cálculo do consumo energético de cada britador, considerando-se as condições típicas de operação de cada pedreira, foi feito utilizando-se as equações 2.28 e 2.29. O consumo energético

específico dos britadores é composto por aquele relativo ao tempo normal de operação (turno de 8h) acrescido ao tempo extra de operação necessário para a cominuição do acúmulo gerado nas pilhas de alimentação dos britadores durante o turno de trabalho. Para as Pedreiras Vigné e Embu não foi considerado este tempo extra após o turno normal de operação, pois durante a amostragem do circuito não observou-se acúmulos consideráveis.

Tabela 4.18 – Comparação entre consumo energético calculado e ótimo das pedreiras

Pedreira	Energia Ótima (kWh/t)	Consumo Energético Específico Calculado* (kWh/t)	Eficiência (%)	Tempo Extra de Operação (%)
Vigné	0,15	0,92	15,7	-
Pedra Sul	0,39	0,82	47,6	44
Santa Luzia	0,18	0,50	35,8	34
Embu	0,21	1,20	18,6	-

*Calculado considerando-se a condição normal de operação dos britadores (Tabela 4.15), conforme proposto por Tavares e Neves (2004b).

Na Tabela 4.18 o alto consumo energético específico da Pedreira Embu é atribuído ao britador VSI (REMCO) do último estágio de britagem, que é responsável por um consumo energético muito alto. No entanto, comparando-se o consumo energético específico das Pedreiras Vigné, Pedra Sul Mineração e Santa Luzia que não possuem esse tipo de equipamento, observa-se que a Pedreira Vigné apresenta o maior consumo energético específico, seguida da Pedra Sul Mineração. A Pedreira Santa Luzia tem o menor consumo. Estes resultados eram de se esperar devido às características de quebra desses materiais já discutidas nas seções anteriores. Com relação à eficiência na utilização de energia na cominuição, calculada com a equação 4.4, nota-se que as Pedreiras Pedra Sul Mineração e Santa Luzia apresentaram maior eficiência energética, já as Pedreiras Vigné e Embu demonstraram baixa eficiência energética. No primeiro caso isso se deve ao fato dos britadores terciário e quaternário operarem com a mesma APF, o que faz com que o britador terciário tenha um consumo muito alto de energia. No caso da pedreira Embu a baixa eficiência ocorre pelo fato do último estágio de britagem ser realizado por um britador do tipo VSI (REMCO).

$$Eficiência = \frac{Energia\ Mínima}{Consumo\ Energético} 100 \quad [4.4]$$

4.6 – Simulação em Circuito Padrão de Britagem

Com o objetivo de estabelecer uma análise comparativa do comportamento dos diferentes materiais na britagem foram feitas simulações considerando cada material sendo processado no mesmo circuito de britagem, denominado circuito padrão. Foi considerado como circuito padrão aquele da Pedra Sul Mineração (Figura 4.49), com os britadores S3000, H4000 e H3000 operando com APFs, 61 mm, 35 mm e 16 mm, respectivamente.

Nas simulações os diferentes materiais foram caracterizados pela análise granulométrica da alimentação (Figura 4.52) e pelos parâmetros médios da função quebra (eq. 2.24) e função classificação (eq.2.27), conforme mostra a Tabela 4.19, foi utilizado o valor de $n = 2,3$ e os valores de α são apresentados na Tabela 4.15. Além disso, foi considerada a capacidade da Pedra Sul Mineração para todos os materiais. Essa consideração não parece representar uma limitação na simulação, tendo em vista as capacidades semelhantes encontradas nas diferentes pedreiras (Figura 4.54).

Tabela 4.19 – Valores dos parâmetros médios das funções quebra e classificação usados nas simulações

Material	Eq. 2.24	Eq. 2.27	
	t_{10}	λ	δ
Vigné	15,0	1,93	0,96
Pedra Sul	5,0	1,72	0,70
Santa Luzia	8,5	1,73	0,83
Embu	20,0	1,98	0,98

A Tabela 4.20 mostra um resumo da produção alcançada considerando-se os diferentes materiais sendo alimentados no circuito padrão. Os cálculos foram feitos considerando o tempo extra de operação. Observa-se que com relação a produção de brita 1, que é o produto nobre de uma pedreira, com o material das Pedreiras Vigné e Embu obteve-se maior quantidade desse material. O fato do material da Embu ter gerado uma quantidade substancial desse material está relacionado à grande quantidade de tempo extra que teria que operar para consumir o acúmulo das pilhas de alimentação de britadores. Com o material da Pedreira Santa Luzia observa-se uma menor quantidade de brita 1 e uma maior quantidade de pó sendo produzidos.

Comparando-se os resultados de produção do circuito de cada pedreira (Tabela 4.14) com os obtidos usando o circuito padrão (Tabela 4.20) observa-se que a produção

de brita 1 não sofre grandes alterações. Há um aumento na produção de brita 0 e redução na produção de pó de pedra. Entretanto, observou-se uma discrepância no balanço de massas para a produção da Pedra Sul Mineração, o que está relacionado à utilização de parâmetros médios para as funções quebra e classificação dos britadores (Tabela 4.18), visto que Neves e Tavares (2004a) mostraram que com os parâmetros ajustados para cada britador é possível obter excelente representatividade entre os balanços de massa medido e calculado.

Tabela 4.20 – Produção média considerando materiais no circuito padrão

Material	Brita 1 25 x 11 mm (%)	Brita 0 11 x 4,5 mm (%)	Pó < 4,5 mm (%)	Tempo Extra (%)
Vigné	53	32	15	48
Pedra Sul	49	35	15	60
Santa Luzia	43	39	18	60
Embu	55	31	14	76

A Figura 4.70 mostra a granulometria do produto da rebitagem do circuito padrão para cada um dos materiais. Observa-se que as análises granulométricas são bastante semelhantes devido a estes serem produtos de peneiramento.

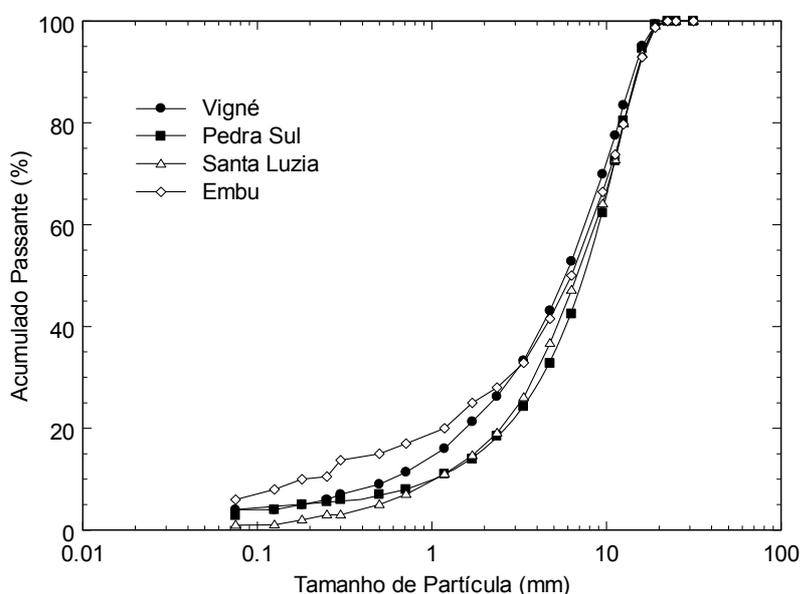


Figura 4.70 – Produto simulado da rebitagem do circuito padrão para os materiais estudados.

Após as simulações foram feitos cálculos do consumo energético de cada britador (eq. 2.20 e 2.21). Nestes cálculos foi considerado o tempo extra de operação para consumir acúmulos nas pilhas de alimentação dos britadores. Assim como para os circuitos de cada pedreira, foi estabelecida a energia mínima necessária para obter a granulometria do produto do circuito padrão partindo da granulometria da alimentação (Figura 4.52).

A Tabela 4.21 mostra o resumo do cálculo do consumo energético do circuito padrão com os diferentes materiais processados, considerando o consumo energético específico dos britadores e o global do circuito. Para o cálculo do consumo global foi utilizada a estimativa de que os demais equipamentos (alimentadores, transportadores de correia e peneiras) operam a 50% de sua potência nominal. A eficiência foi calculada por meio da equação 4.4, considerando-se apenas o consumo energético dos britadores, assim como a energia ótima.

Tabela 4.21 – Comparação entre consumo energético calculado e o ótimo dos britadores do circuito padrão

Pedreira	Energia Ótima* (kWh/t)	Consumo Energético Específico Calculado (kWh/t)		Eficiência (%)	Tempo Extra de Operação (%)
		Britadores	Global		
Vigné	0,23	0,98	1,33	23,4	48
Pedra Sul	0,47	0,87	1,30	53,8	60
Santa Luzia	0,26	0,67	1,17	26,7	60
Embu	0,27	0,86	1,36	27,1	76

* Energia ótima considerando-se 100% em 5mm.

Observa-se que o maior consumo energético específico é obtido quando o material da Pedreira Vigné é processado, seguido pelos materiais das Pedreiras Pedra Sul Mineração e Embu. O material da Pedreira Santa Luzia apresentou o menor consumo energético específico quando processado no circuito padrão. Estes resultados estão de acordo com as discussões feitas nas seções anteriores com respeito às características de quebra dos materiais.

Com relação à eficiência na utilização de energia, considerando a cominuição dos materiais no circuito padrão, observa-se que para os materiais das Pedreiras Vigné, Pedra Sul e Embu ocorreu um aumento na eficiência energética com relação à eficiência dos circuitos de cada pedreira. Já para a cominuição do material da Pedreira Santa Luzia há uma redução na eficiência energética.

O aumento do consumo energético do material da Pedreira Pedra Sul pode estar relacionado a erros em utilizar parâmetros médios para as funções quebra e classificação. No entanto, como o erro foi menor que 20%, os resultados obtidos foram considerados válidos.

O aumento da eficiência energética para cominuição do material da Pedreira Vigné se deve ao melhor dimensionamento dos britadores utilizados no circuito padrão. Já para a cominuição do material da Pedreira Embu esse aumento se deve ao fato de que no circuito original de cominuição da usina o último estágio é representado por um britador VSI, o que não acontece no circuito padrão. Por outro lado, a redução na eficiência energética para cominuição do material da Pedreira Santa Luzia está relacionada com o alto consumo energético do britador H4000 utilizado no terceiro estágio de britagem do circuito padrão quando comparado ao britador TS-120 utilizado nesse mesmo estágio no circuito original de cominuição deste material.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Os ensaios realizados na célula de carga de impacto para determinar as características de quebra dos materiais mostraram que o material da pedreira Vigné apresenta grande influência do tamanho inicial de partículas na sua fratura, visto que medidas de energia de fratura e resistência de partículas diminuem quando o tamanho inicial de partícula aumenta. Por outro lado, para os materiais das pedreiras Pedra Sul, Santa Luzia e Embu observou-se que para partículas maiores que aproximadamente 2 mm, as medidas de energia de fratura e resistência de partículas, assim como a fragmentação, permanecem aproximadamente constantes com o aumento do tamanho de partículas. Isso mostra que a fratura destes materiais é independente do tamanho inicial de partícula.

Análises microestruturais foram capazes de explicar as distintas características de quebra desses materiais. Notou-se que os materiais que possuem uma estrutura com grande quantidade de trincas e foliações, caso das pedreiras Pedra Sul, Santa Luzia e Embu, não demonstraram influência do tamanho inicial de partícula nas características de quebra na faixa de tamanhos de interesse da britagem, enquanto que aqueles materiais que possuem uma estrutura isotrópica, ou seja, destituída de trincas e foliações, caso da pedreira Vigné, há influência de tamanho nas características de quebra ao longo de todo o intervalo estudado.

Os ensaios de fragmentação mostraram que os materiais possuem características bastante distintas. O material da pedreira Vigné é o que apresenta, em média, maior resistência à fragmentação por impacto (IQ = 28), seguido pelo material da Embu (IQ = 30). O material da Pedra Sul pode ser considerado como tendo média a alta resistência à

fragmentação por impacto ($IQ = 36$), enquanto que o material da pedra Santa Luzia apresentou resistência a fragmentação por impacto muito baixa ($IQ = 97$).

Análises de forma das partículas após ensaios de fragmentação na CCI mostraram que todos os materiais tendem a gerar partículas alongadas. Entretanto, o material da Pedra Sul apresentou tendência a gerar partículas mais lamelares e o da Santa Luzia demonstrou a menor lamelaridade. Além disso, observou-se que quanto maior o nível de energia utilizado no ensaio maior é a tendência de gerar partículas alongadas e lamelares para todos os materiais.

Ensaio de impactos repetidos mostraram que o material da Santa Luzia é o mais suscetível à quebra por impactos repetidos, seguido pelos materiais das pedreiras Embu e Pedra Sul. Isso pode ser explicado pelo fato desses materiais terem a capacidade de acumular danos em sua estrutura devido a presença de trincas e foliações. Já o material da pedra Vigné apresentou baixa suscetibilidade a quebra por impactos repetidos, o que se deve ao fato desse material possuir uma estrutura isotrópica e por isso não ser capaz de acumular danos.

Com relação à resistência à abrasão os materiais das pedreiras Vigné, Pedra Sul e Embu apresentam elevada resistência à abrasão, enquanto que o material da Santa Luzia apresentou baixa resistência à abrasão. Além disso, os resultados de resistência à abrasão demonstraram ter boa correlação com a resistência à fragmentação das partículas por impacto.

Os modelos matemáticos (função quebra de Rosin-Rammler truncada e função classificação de Whiten) utilizados para descrever o comportamento dos materiais na britagem industrial mostraram boa representatividade, visto que boa correspondência entre os dados medidos e aqueles obtidos com o ajuste dos parâmetros dessas equações foi observada. Da mesma forma o modelo de Andersen modificado descreveu com precisão os resultados de consumo energético para britagem dos materiais.

Análises do comportamento dos materiais na britagem, considerando o circuito de origem e o circuito padrão de britagem, demonstraram que, devido à alta resistência do material da pedra Vigné considerando-se as faixas granulométricas de alimentação dos britadores, este material apresentou altos valores de consumo energético específico na britagem, seguido pelos materiais das pedreiras Pedra Sul e Embu. O material da Santa

Luzia apresentou os valores mais baixos de consumo energético específico, visto que o mesmo apresentou resistência à fragmentação muito baixa, considerando-se o intervalo de tamanho de partícula utilizado na alimentação dos britadores.

Com relação à eficiência na utilização de energia para cominuição dos materiais, tanto no circuito usado em cada pedreira como no circuito padrão, foram observadas baixas eficiências, com valores variando entre 15% e 53%. Entretanto, em geral, foi possível obter maiores eficiências para cominuição dos materiais utilizando o circuito padrão de britagem.

Por fim, nota-se que para os materiais das pedreiras Pedra Sul, Santa Luzia, e Embu é possível a previsão do seu comportamento na britagem grossa (partículas maiores que 50 mm) a partir de informações obtidas por meio de ensaios com partículas com granulometrias mais finas (partículas entre 20 mm e 25 mm, por exemplo), uma vez que não existe influência significativa do tamanho original de partículas nas suas características de quebra. Por outro lado, para o material da pedreira Vigné existe um efeito do tamanho original das partículas na sua fragmentação, de maneira que o uso de informações obtidas a partir de granulometrias mais finas resultaria em subestimação da capacidade do circuito de moagem ou superestimação do consumo energético da britagem. Nestes casos a caracterização da quebra de partículas deve ser realizada no maior intervalo de tamanhos de partícula possível.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- _____, 1980. Determinação do Índice de Alongamento e de Lamelação. Norma da Junta Autónoma das Estradas, Lisboa.
- _____, 1996. USIM PAC for Windows – The Multipurpose Tool for Process Engineers, BRGM Geology and Mining International, vol. 1 e 2.
- ANDERSEN, J.S. 1988. Development of a cone crusher model. Dissertação de Mestrado. University of Queensland.
- AWACHIE, S.E.A. 1983. Development of crusher models using laboratory breakage data. Tese de Doutorado. University of Queensland.
- AUSTIN, L.G.; KLIMPEL, R.R.; LUCKIE, P.T. 1984. Theory of grinding operations. Industrial and Engineering Chemistry. v. 56, 18-29.
- AUSTIN, L.G. 2002. A treatment of impact breakage of particles. Powder Technology. v. 126, 85-90.
- BEARMAN, R. A.; BRIGGS, C.A.; KOJOVIC, T. 1997. The application of rock mechanics parameters to the prediction of comminution behaviour. Minerals Engineering. v. 10, n.3, 255-264.
- BRIGGS, C.A.; BEARMAN, R.A. 1996. An investigation of rock breakage and damage in comminution equipment. Minerals Engineering. v. 9, n. 5, 489-497.
- BRIGGS, C.A.; EVERTSSON, C.M., 1998. Shape potencial of rock, Mineral Engeneering. v.11, 125-132.
- BOND, F.C. 1952. The third theory of comminution. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers. v. 193, 484-494.
- CARVALHO, E.A. 2003. Modelagem do britador cônico a partir de estudos de quebra de partículas individuais e em leitos. Tese de doutorado. Universidade Federal

do Rio de Janeiro. Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Rio de Janeiro.

- CHIEREGATI A.C. 2001.** Novo Método de caracterização tecnológica para cominuição de minérios. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. São Paulo.
- DIETER, G.E. 1961.** Metalurgia Mecânica. Editora Guanabara Koogan S.A. 2ª edição. Rio de Janeiro.
- DINIZ, R.R.; TAVARES, L.M. 2001.** Analysis of self-breakage for modeling media competence in autogenous mills. In: VI Southern Hemisphere Meeting on Mineral Technology, Rio de Janeiro, v. 1, pp. 47-51.
- GOLDSMITH, W.; LYMAN, P.T. 1960.** The penetration of hard-steel spheres into plane metal surfaces. J. Appl. Mech., v. 27, 717-724.
- GRADY, D.E.; KIPP, M.E. 1987.** Dynamic rock fragmentation. In.: Fracture Mechanics of Rock. London. B.K. Atkinson Academic Ed. Cap. 10, pp. 429-475.
- HIRAMATSU, Y.; OKA, Y. 1966.** Determination of the tensile strength of rock by compression test of an irregular test piece. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. v. 3, 89-99.
- JAEGER, J.C.; COOK, N.G.W. 1969.** Fundamentals of Rock Mechanics, 1st end. Methuen, London.
- KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D.J. 1982.** Crushing and grinding. In.: Introduction to Mineral Processing. New York. John Wiley & Sons., cap. 8, pp. 127-165.
- KING, R.P. 1990.** Simulation – the modern cost-effective way to solve crusher circuit processing problems. International Journal of Mineral Processing. v. 29, 249-265.
- KING, R.P. 2001.** Modeling and simulation of mineral processing systems. Butterworth-Heinemann.
- KING, R.P.; BOURGEOIS, F. 1993.** A new conceptual model for ball milling. Proc. 18th Int. Miner. Process. Congress. Sidney. vol. 1, pp.81-86.
- KROGH, S.R. 1979.** Determination of crushing and grinding characteristics based on testing of single particles. Trans. SME-AIME. v. 266, 1957-1962.
- LIMA, A.S. 2005.** Calibração da célula de carga de impacto e aplicação na investigação da fratura de materiais particulados. Projeto Final de Curso. Universidade

Federal do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Rio de Janeiro.

- LIN, C.L.; MILLER, J.D. 1986.** The size distribution of fragments from particle breakage as described by percolation theory. Presented at the 17th Annual Meeting of the Fine Particle Society. São Francisco.
- LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; MONTE, M.B.M.; ALMEIDA, S.L.M. 2002.** Tratamento de Minérios. CETEM/MCT. 3^a edição. Rio de Janeiro.
- MAINENTI, V.L.L. 2002.** Projeto, construção e calibração de célula de carga de impacto para estudos de fragmentação de materiais particulados. Projeto Final de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro.
- MANDELBROT, B.B. 1983.** The fractal geometry of nature. Freeman. São Francisco.
- MIDDLEMISS, S.; KING, R.P. 1996.** Microscale fracture measurements with application to comminution. *Internacional Journal of Mineral Processing*. v. 44-45, 43-58.
- MISHRA, B.K.; RAJAMANI, R.K. 1992.** The discrete element method for the simulation of ball mills. *Appl. Math. Model.* v. 16, 598-604.
- MORRELL, S.; NAPIER-MUNN, T.J.; ANDERSEN, J. 1992** The prediction of power draw in comminution machines. *Comminution: Theory and Practice*, S. K. Kawatra, ed., SME, pp.233-247.
- MORRELL, S. 2004.** Prediction the specific energy of autogenous and semi-autogenous mills from small diameter drill core samples. *Minerals Engineering*. v. 17, 447-451.
- NAPIER-MUNN, T.J.; LYNCH, A.J., 1992.** The Modeling and Computer Simulation of Mineral Treatment Processes – Current Status and Future Trends, *Mineral Engeneering*, v. 5, pp-143-167.
- NAPIER-MUNN, T.J.; MORREL, S.; MORRISON, R.D.; KOJOVIC, T. 1996.** *Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization*, JKMRRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing, n.2.
- NARAYANAN, S.S.; WHITEN, W.J. 1988.** 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, C115-124.

- NEVES, P.B. 2002.** Otimização do Processo de produção de brita utilizando a técnica de simulação computacional. Projeto Final de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Rio de Janeiro.
- NEVES, P.B. 2004.** Análise de forma de partículas resultantes de ensaios de fragmentação associada às características petrográficas dos materiais. Relatório Técnico de Bolsa BSP – CNPq. Rio de Janeiro.
- NEVES, P.B.; TAVARES, L.M. 2003.** Racionalização do Uso da Energia na Britagem com Auxílio da Simulação Computacional. Anais, 58º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, pp. 209-219.
- NEVES, P.B.; TAVARES, L.M. 2004a.** Racionalização do uso de energia na britagem com auxílio de simulação computacional. Tecnologia em Metalurgia e Materiais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo. v.1, n.2, 53-58.
- NEVES, P.B.; TAVARES, L.M. 2004b.** Previsão do consumo energético de britadores. In.: XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Florianópolis. V.1, pp. 145-152.
- PEREIRA, V.F. 2004.** Projeto e construção de equipamento de fragmentação de partículas de grande diâmetro por impacto. Projeto Final de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro.
- PEREIRA V.F.; VASQUES, C.M.; NEVES, P.B.; TAVARES, L.M. 2004.** Fragmentação de partículas de grande diâmetro por impacto. In.: XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Florianópolis. V.1, pp. 33-40.
- POTAPOV, A.V.; CAMPBELL, C.S. 1994.** Computer simulation of impact-induced particle breakage. Powder Technology. v. 81, 207-216
- PRASHER, C.L. 1987.** Crushing and Grinding Process Handbook. Chichester. John Wiley & Sons.
- SCHÖNERT, K.; 1988.** Fundamentals of particle breakage. Course notes, University of the Witwatersrand, Division of Continuing Engineering Education, Johannesburg, Section F6.
- SVENSSON, A.; STEER, J.F. 1990.** New cone crusher technology and developments in comminution circuits. Mineral Engineering. v.3, 83-103.

- TANG, C.A.; XU, X.H.; KOU, S.Q.; LINDQVIST, P.A.; LIU, H.Y. 2001.** Numerical investigation of particle breakage as applied to mechanical crushing – part I: single-particle breakage. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. v. 38, 1147-1162.
- TAVARES, L.M. 1997.** Microscale investigation of particle breakage applied to the study of thermal and mechanical predamage. Doctor of Philosophy thesis. University of Utah. Salt Lake City.
- TAVARES, L.M. 1998.** Energy absorbed in breakage of single particles in drop weight testing. *Minerals Engineering*. v. 12, n.1, 43-50.
- TAVARES, L.M. 2000.** Role of particle microstructure in comminution. In.: XX Internacional Mineral Processing Congress. Roma. v. 1, pp. C-9-10.
- TAVARES, L.M. 2004a.** Optimum routes for particle breakage by impact. *Powder Technology*. v. 142, 81-91.
- TAVARES, L.M. 2004b.** Uma Introdução a Teoria e Prática do Beneficiamento Físico de Matérias primas Mineraias, DMT/UFRJ.
- TAVARES, L.M. 2005a.** Particle weakening in high-pressure roll grinding. *Minerals Engineering*. v. 18, 651-657.
- TAVARES, L.M. 2005b.** Viabilidade da produção de areia manufaturada em unidade via seca a ser instalada na Pedreira Embu – SP. Relatório Final de Atividades. Fundação COPPETEC.
- TAVARES, L.M.; KING, R.P. 1998a.** Single-particle fracture under impact loading. *Internacional Journal of Mineral Processing*. v. 54, 12-28.
- TAVARES, L.M.; KING, R.P. 1998b.** Estudo de Quebra de partículas na célula de carga ultra-rápida aplicados a cominuição industrial. XVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. São Paulo. v. 1, pp. 115-134.
- TAVARES, L.M.; KING, R.P. 2002.** Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics. *Powder Technology*. v. 123, 138-146.
- TAVARES, L.M.; LIMA, A.S. 2005a.** Célula de carga de impacto na caracterização de materiais para cominuição. Parte 1: calibração, *Revista da Escola de Minas* (submetido para publicação)
- TAVARES, L.M.; LIMA, A.S. 2005b.** Célula de carga de impacto na caracterização de materiais para cominuição. Parte 2: fratura de partículas, *Revista da Escola de Minas* (submetido para publicação)

- VALENTE, S.C. 2005a.** Petrografia de amostras de rochas das pedreiras Vigné, Santa Luzia e Pedra Sul. Relatório Final do Projeto de Cooperação Técnica e Científica COPPE-FAPUR.
- VALENTE, S.C. 2005b.** Comunicação pessoal.
- VERVOORN, P.M.M.; AUSTIN, L.G. 1990.** The analysis of repeated breakage events as an equivalent rate process. Powder Technology. v. 63, 141-147.
- WHITEN, W.J. 1972.** The simulation of crushing plants with models developed using multiple splines regression. In: 10th Int. Symp. on the Application of Comp. Met. Min. Ind., Johannesburg, p. 317-323.
- YASHIMA, S.; SAITO, F.; MIKUNI, T. 1976.** Effect of environmental water on single-particle crushing. Kagaku Kogaku Ronbunshu. v. 2, 150-153.