

Eduardo Nozawa Caetano de Araujo

**CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS PARA MOAGEM AUTÓGENA E
SEMI-AUTÓGENA: INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE PARTÍCULAS
NA RESISTÊNCIA AO IMPACTO**

**São Paulo
2005**

Eduardo Nozawa Caetano de Araujo

**CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS PARA MOAGEM AUTÓGENA E
SEMI-AUTÓGENA: INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE PARTÍCULAS
NA RESISTÊNCIA AO IMPACTO**

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

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Jr.

**São Paulo
2005**

TF-2005

A 15c

Supro 1542609

M2005G

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005745

FICHA CATALOGRÁFICA

Araujo, Eduardo Nozawa Caetano de
Caracterização de minérios quanto à resistência ao impacto:
influência do tamanho de partículas / E.N.C. Araujo. -- São
Paulo, 2005.
20 p.

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

1.Caracterização tecnológica de minérios 2.Mineração de
minerais metálicos 3.Cominuição 4.Modelagem matemática
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo.

Ao meu irmão, pela vida a ser vivida.

À Mariana, pelos últimos três anos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Homero Delboni Júnior, pelo conhecimento, pelas palavras precisas e pela amizade.

À Professora Ana Carolina Chierigati pela sugestão do tema e pelo incentivo.

Ao Professor Henrique Kahn, pelo apoio durante toda a jornada da graduação.

Ao corpo docente do PMI, pela minha formação.

À mestranda Carina, pela parceria e amizade.

À Camila por ser uma grande amiga e compartilhar momentos difíceis.

Ao Altair, pela disposição e empenho.

Aos amigos do PET, pelo companheirismo sem igual.

A todos os funcionários do departamento, por sempre terem me ajudado quando precisei.

RESUMO

A caracterização de minérios é uma etapa fundamental à modelagem de moinhos autógenos (AG) e semi-autógenos (SAG). Em conjunto com as dimensões do equipamento, e com as condições de operação do circuito, constitui-se como base para modelos que visam reproduzir, com fidelidade, a distribuição granulométrica do produto, potência consumida entre outros aspectos.

Os parâmetros do minério são obtidos através de ensaios de fragmentação, conduzidos em partículas individuais, sob condições controladas e padronizadas. O presente trabalho objetivou analisar as características de fragmentação de três minérios distintos, resultantes de ensaios realizados em equipamento *drop weight*, sob aspectos de resistência em função do tamanho da partícula. Os resultados dos ensaios são utilizados em simulações para comparações de desempenho.

PALAVRAS-CHAVE: Cominuição; Moagem; Caracterização; Simulação.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	Cominuição	2
2.1.1	Mecanismos de quebra.....	2
2.1.2	Moinhos Autógenos e Semi-Autógenos	3
2.1.3	Modelos Energéticos de Cominuição	4
2.1.4	Classes de Modelos para Cominuição	5
2.2	Simulação.....	5
2.3	Ensaio de fragmentação.....	6
2.3.1	Ensaio de Bond	6
2.3.2	Ensaio de Impacto sobre Partículas Individuais.....	6
2.3.3	Drop Weight Tester – DWT – e conceitos associados.....	7
3	MATERIAIS E MÉTODOS	11
4	RESULTADOS.....	14
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	17
6	CONCLUSÕES	18
7	BIBLIOGRAFIA	19

FIGURAS

Figura 2.1 - Relação entre energia e tamanho de partículas.	4
Figura 2.2 - O equipamento <i>Drop Weight Tester</i> e suas principais partes.....	7
Figura 2.3 – O DWT do Laboratório de Simulação e Controle de Processos	8
Figura 2.4 – Pesos utilizados nos impactos.....	9
Figura 2.5 - Curvas para obtenção de distribuição granulométrica a partir do parâmetro t_{10} ..	11
Figura 3.1 - Circuito empregado nas simulações dos três tipos de minérios.....	14
Figura 4.1 - Curvas $t_{10} \times E_{CS}$ da amostra de minério de ouro.....	14
Figura 4.2 - Curvas $t_{10} \times E_{CS}$ da amostra de bauxita.....	15
Figura 4.3 - Curvas $t_{10} \times E_{CS}$ da amostra de minério de cobre.....	15

TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação de resistência ao impacto de amostras segundo o produto $A \times b$	10
Tabela 3.1 - Configurações de energia específica dos lotes.	12
Tabela 4.1 - Parâmetros A e b para todos os lotes e para a fração grossa de cada amostra.....	16
Tabela 4.2 – Vazões de alimentação no circuito simulado.....	17

ANEXOS

Anexo A – Planilha para distribuição Rosin Rammler
Anexo B – Código fonte para cálculo de A e b
Anexo C – Código fonte da função para cálculo de área entre curvas

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

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

A simulação de circuitos, entretanto, depende da qualidade do modelamento matemático, recurso que também auxilia a seleção de equipamentos, a previsão de desempenhos e da potência requerida por uma instalação, ou ainda a elaboração de um controle simplificado para a dinâmica da operação.

Modelos matemáticos utilizados em programas comerciais de simulação são baseados em dois grupos de variáveis. O primeiro se refere às características do equipamento que executa a operação, cujos ajustes são obtidos mediante retro-cálculo ou ainda com base em dados de equipamentos semelhantes. O segundo grupo inclui as características do minério processado, que são assim submetidos a ensaios de fragmentação, sob condições controladas e padronizadas.

Como a alimentação de moinhos AG/SAG inclui fragmentos com tamanhos grandes, de até 10", os resultados dos ensaios deverão, de forma ideal, representar as características de tais fragmentos.

O presente trabalho visa caracterizar o comportamento de partículas de frações mais grossas em comparação às demais, no que diz respeito a sua resistência à fragmentação por impacto, sob variados níveis de energia. Para isto, o ensaio padrão do equipamento DWT – *Drop Weight Tester*, desenvolvido pelo JKMRC (Julius Kruttschmitt Mineral Research Center, Austrália), foi aplicado para um minério de ouro, um de bauxita e outro de cobre.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O assunto deste trabalho está no âmbito do Tratamento de Minérios, área afim da Engenharia de Minas.

2.1 Cominuição

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

As operações de cominuição incluem diversos estágios, cada qual mais apropriado ao tipo de minério e ao tamanho dos blocos ou partículas a serem processados. Embora a fragmentação seja iniciada no desmonte, a etapa inicial da cominuição é a britagem, responsável pela fragmentação dos blocos obtidos na lavra. A etapa posterior é a moagem, a qual cabe a fragmentação fina, cujo produto alimenta outros processos industriais como a concentração, a flotação, entre outros.

A cominuição é um processo pouco eficiente, pois antecedendo a fratura, a partícula necessita sofrer esforços substanciais que se armazenam sob a forma de energia elástica que, posteriormente, se perde com a ruptura.

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

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

2.1.1 Mecanismos de quebra

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

Abrasão – Ocorre quando a força é insuficiente para provocar uma fratura em toda a partícula. Há concentração local de esforços, que provoca o aparecimento de pequenas fraturas, com surgimento de uma distribuição granulométrica de partículas finas ao lado da partícula original, cujo tamanho é pouco diminuído. Esse tipo de fratura pode ser provocado por atrito entre as partículas e/ou em moinhos de bolas com as partículas.

Compressão – Ocorre quando a força é aplicada de forma lenta e permite que, com o aparecimento da fratura, o esforço seja aliviado. Assim, a intensidade força total aplicada é

pouco superior à resistência da partícula. Desse tipo de fratura resultam poucos fragmentos de grande tamanho. Ocorre em britadores de mandíbulas, giratórios, cônicos e em moinhos quando as partículas são comprimidas entre dois ou mais corpos moedores, ou partículas maiores.

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

2.1.2 Moinhos Autógenos e Semi-Autógenos

Beraldo (1987) define moinhos autógenos e semi autógenos conforme a seguinte descrição:

Moinhos autógenos têm grandes valores na relação diâmetro/comprimento. São utilizados moinhos com até 12 m de diâmetro, que empregam fragmentos do próprio minério como corpos moedores. São aplicáveis a minérios que produzem blocos competentes, isto é, que não degradam facilmente. Alguns materiais apresentam em moagem autógena consumo energético pouco superior ao consumo em moagem convencional, enquanto que para outros materiais essa diferença é muito grande, o que torna, neste caso, inconveniente este processo de moagem. Os moinhos autógenos são aplicados, em alguns casos, em moagem de um único estágio, sendo, entretanto, mais comum seu uso como moinhos primários, que preparam o material para a alimentação de moinhos de bolas ou de seixos.

Caso o material não apresente blocos suficientemente competentes, ou haja a concentração de partículas intermediárias na moagem totalmente autógena, pode-se usar nos moinhos uma pequena carga de bolas grandes (até 10% do volume), que transforma os moinhos autógenos em semi-autógenos. No caso de moagem semi-autógena, a diferença de consumo energético em relação a moagem convencional é muito menor que no caso da moagem autógena e a variação dessa diferença com o tipo de material também é bem menor. Os moinhos semi-autógenos têm aplicações semelhantes às dos moinhos autógenos sendo atualmente preferidos àqueles dada a sua menor sensibilidade ante a variações das características do minério. Tanto os moinhos autógenos como os semi-autógenos são especialmente indicados no caso de material que apresente dificuldade na britagem ou no perneiramento (úmido, argiloso).

Delboni (1999) alude às razões pelas quais esses tipos de moinhos têm sido preferidos: (1) pela redução global dos custos operacionais da planta de cominuição e (2) pelo capital relativamente menor a ser investido nas instalações físicas. A primeira razão gera discussões, pois consumo energético de uma instalação AG/SAG é maior que de uma tradicional instalação de britadores e moinhos barras/bolas, entretanto quando os custos de manutenção, revestimentos, corpos moedores e todos os outros são considerados, os circuitos AG/SAG se mostram em vantagem. A segunda razão é devida à simplificação das instalações, conferindo uma estrutura compacta, necessitando de menos equipamentos de apoio, menor área ocupada, menos obras civis, menos bombas, equipamentos de manuseio, etc.

2.1.3 Modelos Energéticos de Cominuição

Muitos autores já propuseram modelos para processos de cominuição.

Kick em 1883 estabeleceu uma relação de energia constante por unidade de massa para uma relação de redução equivalente.

Rittinger em 1867 considerou a energia constante por unidade de área superficial gerada.

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

Em 1957, Charles reuniu as três teorias anteriores em um único equacionamento diferencial.

Hukki em 1961 avaliou as regiões de aplicabilidade dos modelos já existentes e obteve o diagrama da Figura 2.1 (A.C Chieregati, 2001).

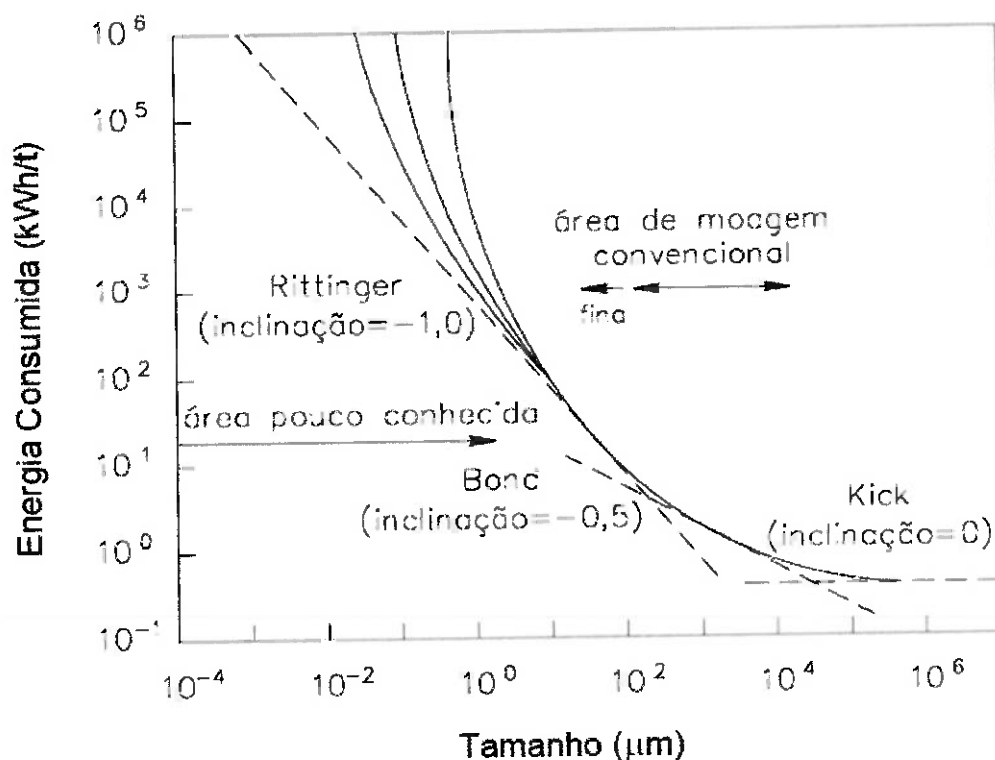


Figura 2.1 - Relação entre energia e tamanho de partículas.

Hukki concluiu, sob o ponto de vista da ciência dos materiais, que as fraturas se iniciam nos pontos de fraqueza ou falhas da estrutura atômica.

Uma das consequências da constatação de Hukki foi que as partículas maiores possuem geralmente mais fraturas, ao contrário das partículas de menor tamanho em que as fraturas tendem a se tornar as superfícies externas (Klimpel e Austin 1968). Portanto, a

energia necessária para atingir uma determinada relação de redução aumenta com a diminuição do tamanho da partícula inicial, conforme previsto também pelas relações de Bond e Rittinger.

2.1.4 Classes de Modelos para Cominuição

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

Os modelos atuais podem ser classificados em aqueles que consideram apenas a distribuição de tamanhos da alimentação e do produto e outros que consideram as interações de cada elemento dentro do processo. Obviamente estes últimos requerem capacidade computacional muito mais elevada. Os modelos da primeira classe são chamados de “caixa-preta”.

Os modelos caixa-preta devem ser capazes de prever as distribuições granulométricas de entrada e saída e as características da quebra. São modelos baseados na representação dos resultados dos fenômenos, pouco enfatizando os princípios físicos envolvidos. Como exemplo podem ser citados os modelos do tipo balanço populacional (Napier-Munn *et al.*, 1996).

2.2 Simulação

Simulação é a previsão do comportamento do circuito, com relação aos fluxos de massa, de água, à concentração de sólidos e à distribuição de tamanhos de partículas, da potência consumida, sendo tais previsões funções das propriedades dos minérios, das especificações dos equipamentos e das condições de operação.

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

Os modelos mecanísticos utilizados em simulação isolam as características do minério e do equipamento. Evidentemente, a fidelidade das simulações é função da qualidade das informações de entrada dos modelos.

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

2.3 Ensaios de fragmentação

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

2.3.1 Ensaio de Bond

Bond relacionou a quantidade de energia necessária para reduzir o tamanho de uma população de partículas pela seguinte relação:

$$W = 10 \cdot WI \left(\frac{1}{P_{80}} - \frac{1}{F_{80}} \right) \quad \text{onde:}$$

W - energia específica (kWh/t),
 WI - *Work Index*, característica associada ao material (kWh/t),
 P₈₀ - abertura pela qual 80% do produto é passante (μm) e
 F₈₀ - abertura pela qual 80% da alimentação é passante (μm).

O valor do WI, característica de cada amostra de minério, é obtido através da execução de um ensaio padrão em moinhos de bolas, com velocidade e carga definidas. O ensaio compreende moagens estagiadas e, após cada ciclo, o material é peneirado para remover o passante na malha selecionada. O número de rotações do moinho é reajustado para que a massa retida na malha de teste se estabilize em 2,5 vezes a massa do passante.

O consumo energético resultante da fórmula de Bond, com base no WI, é utilizado para dimensionar moinhos. É um método também útil para comparar características de minérios.

Experimentalmente é verificado que o ensaio de Bond é ineficiente para prever o comportamento da moagem de frações grossas, particularmente daquelas que compõem a alimentação de moinhos AG/SAG, apesar de haver adaptações empíricas desenvolvidas por MacPherson, caracterizando um procedimento bastante diferenciado (Knight *et al.* 1989).

2.3.2 Ensaios de Impacto sobre Partículas Individuais

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

Um equipamento duplo pêndulo foi utilizado inicialmente por Faherwald em 1938 para avaliar a influência da velocidade de impacto na geração de finos. Bond em 1946 utilizou um mesmo tipo de dispositivo para avaliar as forças de impacto e elaborou o “ensaio de britabilidade”. No mesmo ano Gaudin e Hukki avaliaram a distribuição granulométrica e a

relação com a energia específica de quebra. Em 1985 Narayanan fez observações acerca da energia específica de cominuição associada à fragmentação e obteve parâmetros aplicáveis a modelos de cominuição. (Napier Munn *et al.* 1996)

O uso de equipamentos *drop weight* para estudo de quebra de partículas data da mesma época dos equipamentos duplo pêndulo, entretanto nos estudos para caracterização de quebra por impacto ele mostra vantagens ao pêndulo. Uma dessas vantagens é poder empregar energias maiores, ou seja, é a capacidade de ensaiar partículas maiores, mais próximas, portanto de corpos moedores de moinhos AG/SAG.

Existem também equipamentos denominados *Ultra Fast Load Cells* – UFLC – que são utilizados para gerar impactos do tipo bola-bola, bola-plano, plano-plano. A vantagem desse tipo de equipamento é a instrumentação inserida e a capacidade de monitoramento do ensaio. O evento de quebra pode ser avaliado em diagrama força-tempo.

2.3.3 Drop Weight Tester – DWT – e conceitos associados

O DWT é um equipamento para ensaios de fragmentação que permite que fragmentos de rocha sejam submetidos, individualmente, ao impacto de um peso. O peso é elevado até uma dada altura, o que lhe confere uma determinada energia potencial que, após liberação, converte – se em energia de movimento, aplicando um impacto sobre a partícula. É um equipamento robusto, disposto sobre uma base de concreto, conforme o desenho esquemático da Figura 2.2 - O equipamento *Drop Weight Tester* e suas principais partes de Chierigati (2001).

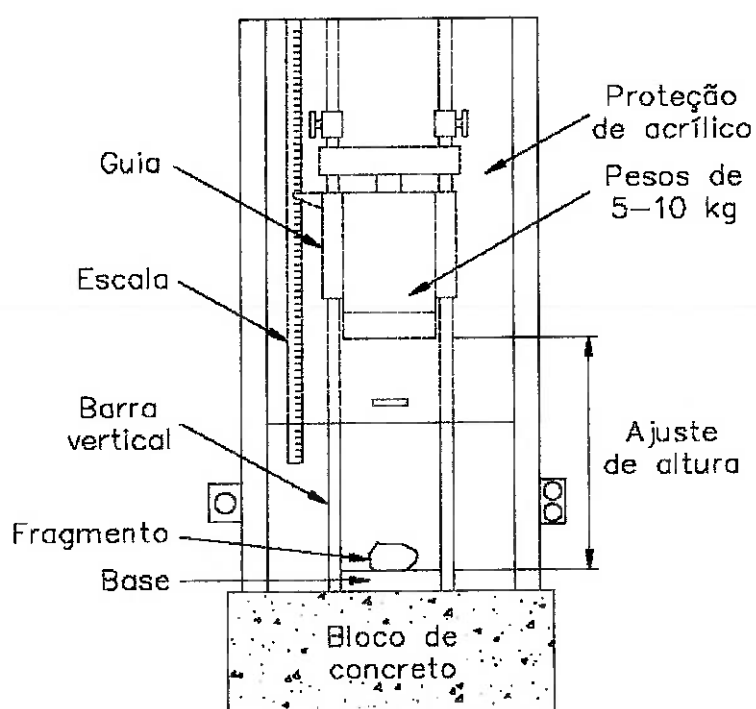


Figura 2.2 - O equipamento *Drop Weight Tester* e suas principais partes

As Figuras 2.3 e 2.4 mostram fotografias do equipamento DWT do Laboratório de Simulação e Controle de Processos e dos pesos utilizados nos impactos.



Figura 2.3 – O DWT do Laboratório de Simulação e Controle de Processos



Figura 2.4 – Pesos utilizados nos impactos

O DWT permite a avaliação de grupos de partículas de mesma fração granulométrica, denominados lotes, sob variados níveis de energia específica (E_{cs} ou *specific comminution energy*). O equipamento pode ser configurado para fornecer a energia de impacto desejada, conforme a equação descrita por Napier-Munn *et al.* (1996).

E_{cs} - a energia específica de cominuição (kWh/t) -
razão entre a energia aplicada e a massa da partícula,

0,0272 - constante para conversão de unidades,

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

onde:

M - massa do peso cilíndrico (kg),

h_i - altura inicial (cm)

h_f - altura remanescente após o impacto (cm) e

\bar{m} - a massa média de cada lote de partículas (g).

Do peneiramento dos produtos dos lotes ensaiados ao impacto, é calculado o parâmetro t_{10} , que representa a porcentagem passante na malha de tamanho igual a 1/10 do tamanho da partícula inicial. Este parâmetro é, portanto, uma forma de quantificar a

magnitude da fragmentação. A relação entre t_{10} e a E_{CS} é parametrizada pela seguinte equação, desenvolvida por Whiten (*apud* Delboni, 1999):

$$t_{10} = A(1 - e^{-b \cdot ECS}) \quad \text{onde:}$$

A - valor de t_{10} quando a curva assume valor assintótico
b - coeficiente associado ao crescimento inicial

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

Tabela 2.1 - Classificação de resistência ao impacto de amostras segundo o produto $A \times b$.

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

O parâmetro t_{10} também está relacionado à distribuição granulométrica do produto de fragmentação, através das relações entre o próprio t_{10} e os demais t_n . Estas relações foram desenvolvidas por Narayanan e Whiten (1983 e 1988), ao comparar as distribuições granulométricas de diversos ensaios e submetê-las a regressões, conforme a Figura 2.5:

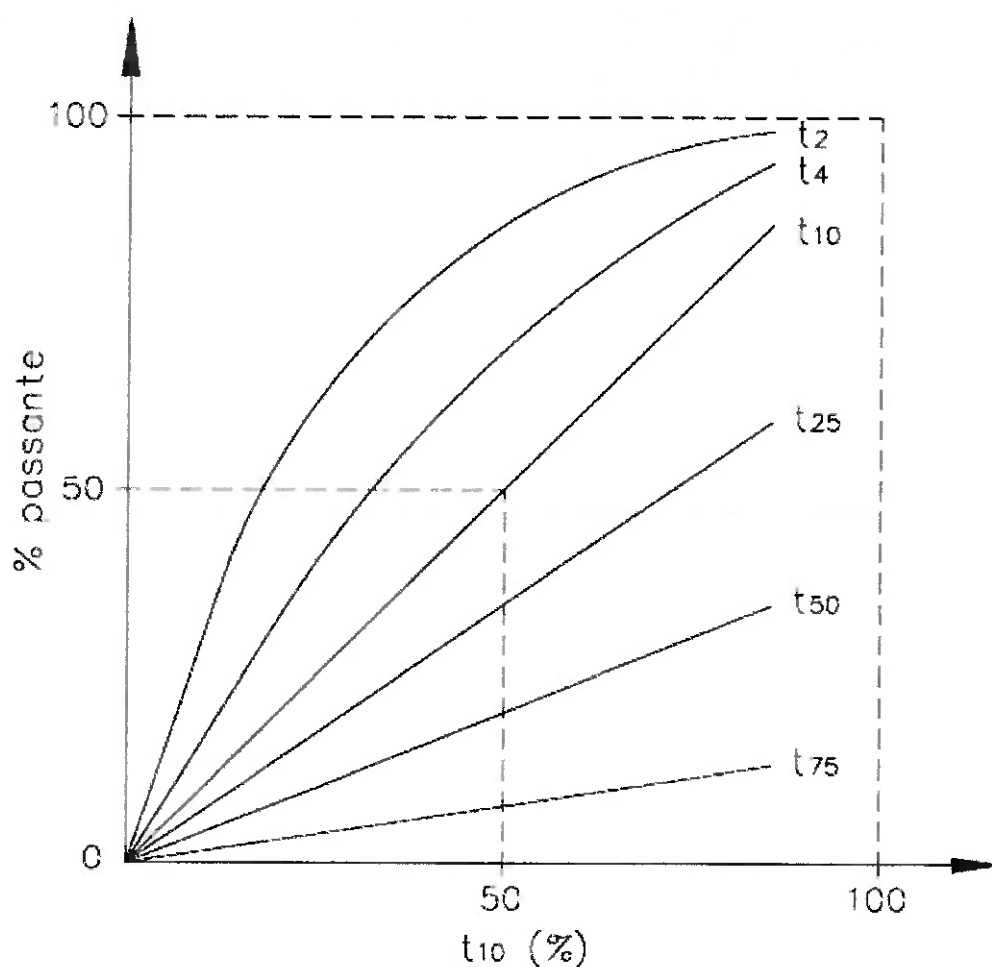


Figura 2.5 - Curvas para obtenção de distribuição granulométrica a partir do parâmetro t_{10} .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método de ensaio sobre partículas individuais em DWT, desenvolvido pelo JKMRC, foi escolhido por permitir a obtenção de parâmetros que permitam quantificar diferenças de resistência à fragmentação por impacto sob aspectos de granulometria e de simulação de processo. A resistência à quebra para diferentes tamanhos de partículas não poderia ser estimada no teste de WI de Bond, onde o minério é britado até que todo ele seja passante numa determinada malha, ou ainda em testes de resistência à compressão simples, ensaio que se aplica a corpos de prova com dimensões padronizadas.

O ensaio DWT padrão consiste na aplicação de impacto para cinco frações granulométricas de cada amostra sob três níveis de energias específicas por fração, constituindo, portanto, 15 lotes com até 30 fragmentos por amostra, conforme descrito na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Configurações de energia específica dos lotes.

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

Os ensaios realizados com os três tipos de minérios envolveram um total de 1035 partículas. Entretanto, antes de realizar os ensaios, o DWT precisou ser configurado para fornecer a ECS aos respectivos lotes. Para cada um dos 45 lotes ensaiados foi necessário configurar o equipamento de forma a aplicar a cada partícula a energia pré-estabelecida.

Como a massa do peso cilíndrico e a massa média das partículas são conhecidas, a altura inicial é definida através de uma estimativa da altura remanescente que provém de experiências anteriores. A energia específica efetivamente aplicada nos ensaios é calculada posteriormente, depois de obtida a altura média remanescente de cada lote.

O material referente a cada lote foi reunido e enviado para peneiramento, de modo a serem calculados os valores experimentais de t_{10} , através de interpolações lineares em escala di-log.

Para efeito de comparações, foi também desenvolvida uma planilha para cálculo matemático do valor de t_{10} em escala Rosin-Rammler, conforme exemplo apresentado no Anexo A.

Visando analisar as diferenças de características entre frações granulométricas, os coeficientes A e b foram determinados para o lote -63+53 mm e também para todos os lotes, de cada uma das amostras ensaiadas. Apesar de já existirem rotinas que calculam os coeficientes A e b, foi elaborado um programa em linguagem VBA para Microsoft Excel que se baseou em método de mínimos quadrados e na ferramenta *Solver* com iterações para duas variáveis. Um exemplo da planilha e o código fonte do programa constam do Anexo B.

De posse dos valores de A e b, foram traçadas as curvas de regressão de t_{10} e estas puderam ser comparadas com base em um critério gráfico, através da magnitude da área definida pelas curvas de regressão para partículas grossas e todos os lotes, limitadas pela vertical de abscissa igual a 1,0 kWh/t. A razão da área entre as curvas e o comprimento do intervalo resulta na variação média do t_{10} neste intervalo, é o **índice de fragmentação específico para t_{10}** . Os gráficos apresentados nas Figura 4.1, 4.2 e 4.3, capítulo de resultados, contêm a representação das áreas assim obtidas.

O cálculo das áreas foi realizado por método de integração numérica, através do somatório de áreas de retângulos infinitesimais com base no ponto médio. Um programa em linguagem VBA para Microsoft Excel foi desenvolvido para tais fins, cujo código fonte encontra-se no Anexo C.

Os coeficientes A e b foram empregados em simulações de um circuito de moagem utilizando – se para tanto o *software* JKSimMet 5.1. O objetivo das simulações foi avaliar o efeito na operação do circuito selecionado com características correspondentes a (a) fração grossa e (b) todas as frações de cada amostra ensaiada. Assim, para cada uma das três amostras de minérios foram realizadas duas simulações de um circuito industrial de moagem com moinho SAG. O modelo de Leung foi escolhido para simulação do moinho SAG. Mais informações acerca de tal modelo podem ser obtidas em Leung, 1987.

O circuito simulado segue o fluxograma representado na Figura 3.1, constituído de um moinho SAG e de um rebritador cônico. Como medida de controle, foi mantida constante a porcentagem de enchimento do moinho, variando-se apenas a vazão de alimentação.

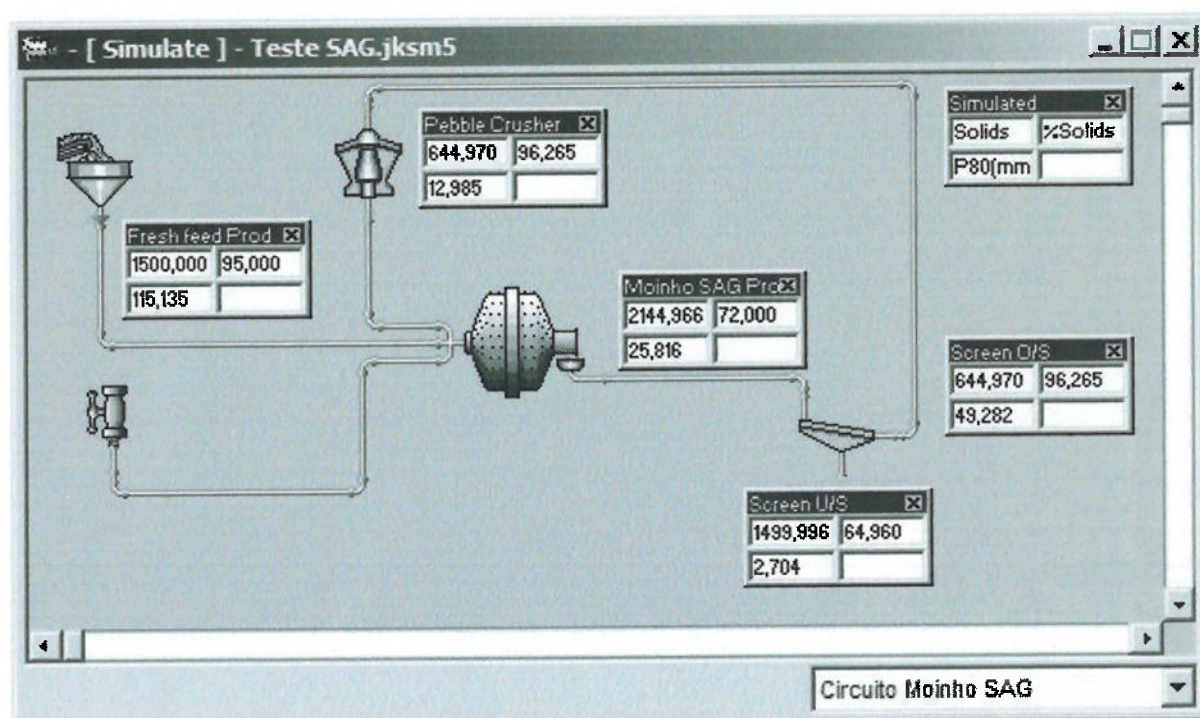


Figura 3.1 - Circuito empregado nas simulações dos três tipos de minérios

4 RESULTADOS

Os gráficos apresentados nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram as curvas parametrizadas dos valores de t_{10} associados às respectivas energias específicas de cominuição.

Minério de Ouro

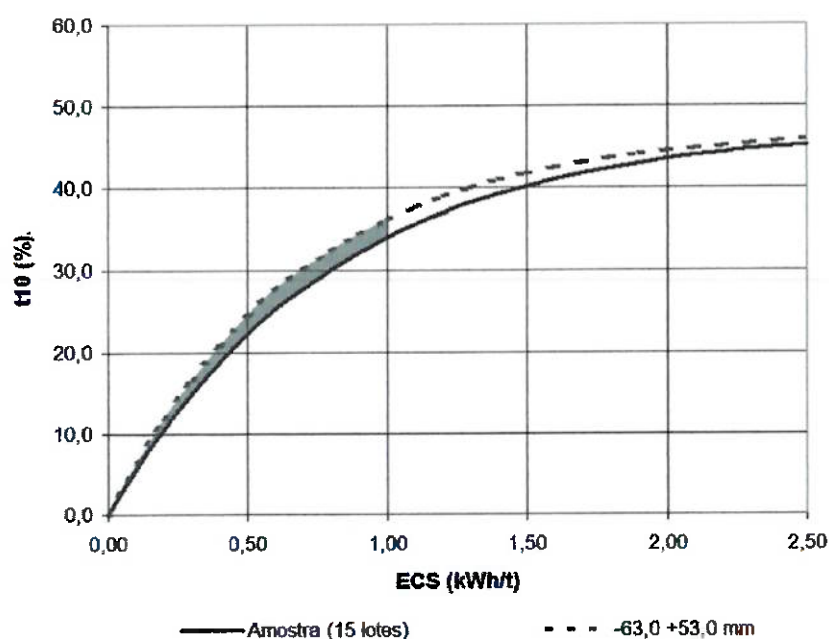


Figura 4.1 - Curvas $t_{10} \times E_{CS}$ da amostra de minério de ouro

Bauxita

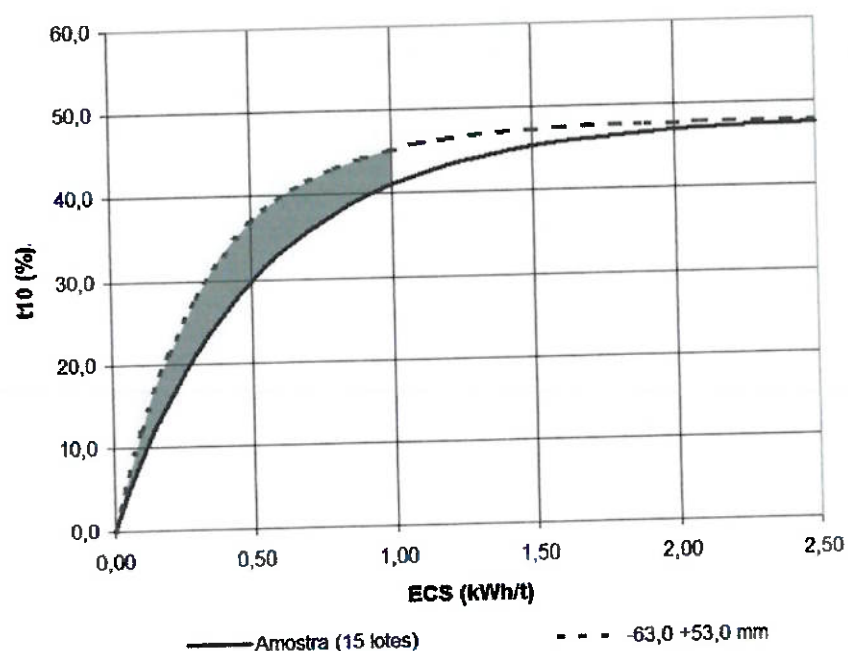


Figura 4.2 - Curvas $t_{10} \times ECS$ da amostra de bauxita

Minério de Cobre

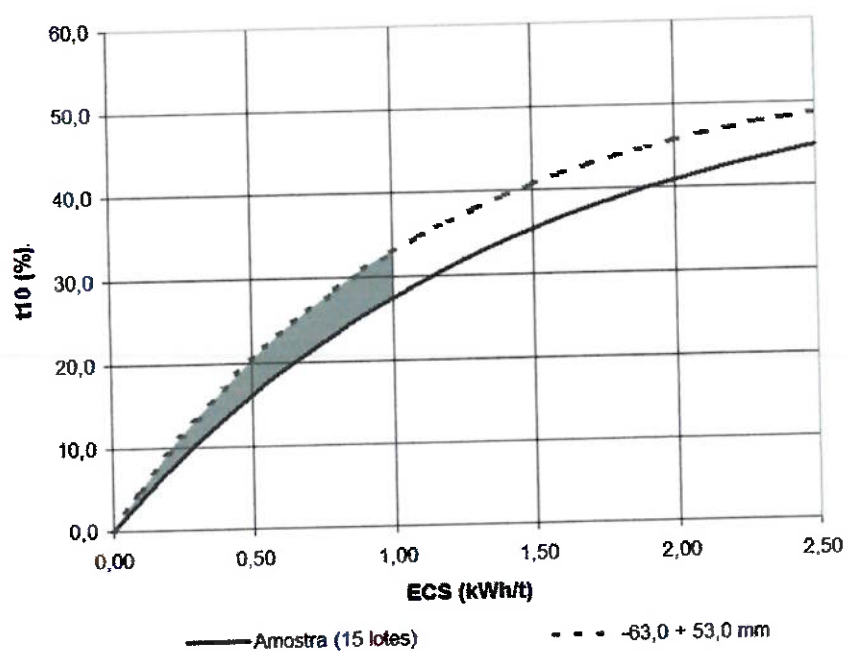


Figura 4.3 - Curvas $t_{10} \times ECS$ da amostra de minério de cobre

Tabela 4.2 – Vazões de alimentação no circuito simulado.

Simulação	Alimentação (t/h)		
	Minério de Ouro	Bauxita	Minério de Cobre
15 lotes	978	1153	788
-63,0 +53,0 mm	1030	1310	910
Diferença	52	157	122
Variação da Alimentação (%)	5,32	13,6	15,3

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em todos os minérios, as curvas t_{10} em função da E_{CS} mostraram perfis distintos para as frações mais grossas, indicando diminuição de resistência para estas frações. Os argumentos de Rittinger e Bond justificam este comportamento, visto que a ruptura se inicia em pontos de fraqueza do material, as partículas maiores tendem a ser menos resistentes, pois possuem um maior número de fraturas disponíveis para iniciar a ruptura.

No minério de ouro a diferença entre as curvas não é tão acentuada como nos demais minérios, o que pôde ser quantificado, para fins de comparação, pelo índice de fragmentação específico. O minério de ouro apresentou a menor variação, cerca de 1,8 %; a bauxita apresentou a maior variação, de 5,5 % e o minério de cobre de 3,6 %.

O índice de quebra também se elevou em todas as frações. Segundo a classificação de Delboni, o minério de ouro ainda se manteve classificado com resistência *moderadamente baixa*, mas migrou entre os extremos da classificação no sentido de perder resistência; a bauxita, analogamente, variou do início da faixa de resistência *muito baixa* até o limite oposto; com o minério de cobre a resistência caiu de *alta* para *média*, apesar de o produto A×b partir do limite inferior da classificação *alta* para o limite superior da classificação *média*.

Com relação às simulações, os coeficientes A e b são interpretados pelo modelo de Leung como representativos de todo o minério alimentado no moinho, ou seja, não há distinção entre as características individuais de faixas de tamanho da alimentação do moinho, quer representem corpos moedores ou não. Dessa forma, simulações do moinho com minérios que apresentem menor resistência resultam em elevação na vazão de alimentação do equipamento. Para os minérios submetidos a ensaios os resultados das simulações indicaram

aumentos na vazão de sólidos do circuito de 5,3% para o minério de ouro, 13,6% para a bauxita e 15,3% para o minério de cobre.

Embora o modelo de Leung de moinhos AG/SAG reproduza com boa precisão variações de vazão de alimentação em função das características de resistência do minério, o modelo não prevê as modificações de granulometria de alimentação do circuito em função das características do minério. Assim, minérios com maiores resistências apresentam, geralmente, distribuições mais grossas de produto de britadores primários, cujo resultado é, na prática, a queda ainda mais acentuada da taxa de alimentação do moinho. No presente trabalho esse aspecto não foi investigado.

Assim, em moinhos autógenos a menor resistência em frações mais grossas do minério alimentado pode resultar em aumento da taxa de alimentação até o ponto em que a baixa resistência implique em falta dessas frações na câmara de moagem, causando a redução de fragmentação e, consequentemente, a diminuição na vazão de alimentação do moinho. Já em moinhos SAG essa dependência é atenuada pois parte da fragmentação é proporcionada por bolas de aço.

Esse aspecto modula a operação de moinhos industriais conforme a dependência do processo da fragmentação proporcionada por corpos moedores formados pelo próprio minério.

6 CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida e aplicada a amostras de minério permitem analisar a resistência em função da granulação. Os resultados indicam que, para as três amostras ensaiadas a resistência de frações mais grossas é menor com relação à resistência do minério. As diminuições de resistência foram quantificadas através dos parâmetros selecionados para cada amostra.

Fica portanto demonstrado que a variação média do índice de fragmentação específico para t_{10} é uma forma adequada de quantificar a diferença de resistência ao impacto entre as frações granulométricas de amostras de minérios.

Como a resistência ao impacto modula a operação de moinhos AG/SAG, a incorporação de relações entre tamanho e resistência em modelos matemáticos de tais equipamentos contribuiria para aumentar a fidelidade de reprodução de processos industriais em exercícios de simulação. Trata-se de uma linha de pesquisa que deverá ser adotada em trabalho de mestrado.

7 BIBLIOGRAFIA

- BERALDO, J.L. Objetivos da Cominuição & Teoria sobre Processos de Cominuição. In: **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**. São Paulo: Edgar Blücher, 1987. p.1-19.
- CHAVES A.P. Britagem. In: **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios**. São Paulo: Signus Editora, 1999. p. 425.
- CHIEREGATI A.C. **Novo Método de Caracterização Tecnológica para Cominuição de Minérios**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, 2001.
- DELBONI Jr., H. **A Load-Interactive Model of Autogenous and Semi-Autogenous Mills**. PhD. Thesis, University of Queensland, Australia, 1999.
- FIGUEIRA H.V.O.; ALMEIDA S.L.M de. Cominuição. In: LUZ, A.B. da. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. p. 113-130.
- KLIMPEL R.R.; AUSTIN L.G. Statistics of Random Fracture. In **Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers**, 1968. p. 219-224. v.4.
- KNIGHT D.A.; McPHERSON A.R.; MEDINA, V.G; SPILLER, D.E. Case Histories of Using Small-scale to Design SG Mills Circuits. In: **Advances in Autogenous and Semi Autogenous Grinding Technology**. Vancouver, Department of Mining and Mineral Processing Engineering, University of British Columbia, 1989. p.105-117,
- LEUNG K. **An Energy Based Ore Specific Model for Autogenous and Semi-Autogenous Grinding**. Ph.D. Thesis, University of Queensland, Australia. 1987
- NAPIER-MUNN T.J.; MORREL, S.; MORRISON, R.D.; KOJOVIC, T. **Mineral Comminution Circuits – Their Operation and Optimisation**. Brisbane-AU: Napier-Munn, T.J. Ed., JKMRC, 1996.
- NARAYANAN S.S.; WHITEN W.J. **Breakage characteristics for ores for ball mill modeling**. Australian Institute of Mining and Metallurgy. n. 286, 1983
- NARAYANAN S.S.; WHITEN W.J. **Determination of comminution characteristics from single-particle breakage tests and its application to ball-mill scale-up**. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section C, v.97, 1988. p.C115-124.
- WHITEN, W.J. **Simulation and Model Building for Mineral Processing**. PhD. Thesis, University of Queensland, Australia, 1972.

Anexo A – Planilha para distribuição Rosin Rammler

Planilha para obtenção da distribuição granulométrica em escala Rosin-Rammler

Análise granulométrica - Rosin-Rammler									
Cliente:		Projeto:		Responsável:		Local:		Data:	
Material:		Tipo de penetrante:		Massa inicial (g):		Massa final (g):		Perdas:	
		1019,0		1000,00		1000,00		1,90 %	
# (TYLER)	ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO	% ACM ACIMA	% ACM ABAIXO				
4	4,760	24,90	2,49	2,49	97,51				
6	3,360	41,70	4,17	6,66	93,34				
10	1,680	165,60	16,56	23,22	76,78				
14	1,190	103,40	10,34	34,16	65,84				
20	0,841	108,00	10,80	44,96	55,04				
28	0,595	98,10	9,81	54,87	45,13				
36	0,420	84,20	8,42	63,29	36,71				
48	0,297	71,20	7,12	70,41	29,59				
65	0,210	61,00	6,10	76,51	23,49				
100	0,149	52,30	5,23	81,74	18,26				
150	0,105	43,80	4,38	86,12	13,88				
200	0,074	38,60	3,86	89,97	10,03				
270	0,053	29,1	2,91	92,88	7,12				
400	0,037	21,4	2,14	95,02	4,98				
-400		49,8							

Adicione #	Abertura (mm)
3	6,73
4	4,76
5	4,00
6	3,36
7	2,83
8	2,38
9	2,00
10	1,88
12	1,41
14	1,19
16	1,00
20	0,841
24	0,707
28	0,595
32	0,500
36	0,420
42	0,354
48	0,297
60	0,250
65	0,210
80	0,177
100	0,149
115	0,125
150	0,105
170	0,088
200	0,074
250	0,063
270	0,063
325	0,044
400	0,037
635	0,020

Gráfico de distribuição Rosin-Rammler. O eixo horizontal representa o diâmetro das partículas em mm (escala logarítmica), variando de 0,01 a 10. O eixo vertical representa a frequência acumulada, variando de 5 a 98. A curva mostra a distribuição granulométrica obtida a partir dos dados da tabela.

Interpolação para obtenção de valores acumulados críticos

Interpolador Rosin-Rammler (by Duda)			
1,6800	0,1644	$\log(\ln(1/(1-\gamma)))$	
3,3600	0,4328	$\log(\ln(1/(1-\gamma)))$	
interpolação	0,2067	$\log(\ln(1/(1-\gamma)))$	
	5,0000	$1/(1-\gamma)$	
	0,2000	$(1-\gamma)$	
malha (mm)	%ACM ABAIXO	%ACM ACIMA	
1,945	80,00	20,00	
Interpolador Rosin-Rammler (by Duda)			
1,6800	0,1644	$\log(\ln(1/(1-\gamma)))$	
3,3600	0,4328	$\log(\ln(1/(1-\gamma)))$	
interpolação	0,2155	$\log(\ln(1/(1-\gamma)))$	
	5,1685	$1/(1-\gamma)$	
	0,1935	$(1-\gamma)$	
malha (mm)	2,0000		
malha (#)	%ACM ABAIXO	%ACM ACIMA	
9	80,65	19,35	

# (TYLERS)	ABERTUR A (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO	% ACM ACIMA	% ACM ABAIXO	Y	1-Y	$\log(\ln(1/(1-\gamma)))$
400	0,037	21,4	2,14	95,02	4,98	0,05	0,95	-1,29
270	0,053	29,1	2,91	92,86	7,12	0,07	0,93	-1,13
200	0,074	38,5	3,85	89,97	10,03	0,10	0,90	-0,98
150	0,105	43,8	4,38	86,12	13,88	0,14	0,86	-0,83
100	0,149	52,3	5,23	81,74	18,26	0,18	0,82	-0,70
65	0,21	61,0	6,10	76,51	23,49	0,23	0,77	-0,57
48	0,297	71,2	7,12	70,41	29,59	0,30	0,70	-0,45
35	0,42	84,2	8,42	63,29	36,71	0,37	0,63	-0,34
28	0,555	99,1	9,91	54,87	45,13	0,45	0,55	-0,22
20	0,841	108,0	10,80	44,96	55,04	0,55	0,45	-0,10
14	1,19	109,4	10,94	34,16	65,84	0,66	0,34	0,03
10	1,68	165,6	16,56	23,22	76,78	0,77	0,23	0,16
6	3,36	41,7	4,17	6,66	93,34	0,93	0,07	0,43
4	4,76	24,9	2,49	2,49	97,51	0,98	0,02	0,57

Para determinar o P80, ou o d50, utilize a ferramenta "atingir meta"	
Definir célula: ACM	
Para valor: 80 ou 50 ou outro	
Variando célula: malha	

válido apenas para o interpolador de malha em milímetros

Anexo B – Código fonte para cálculo de A e b

Código fonte em linguagem VBA para Microsoft Excel do programa que calcula os valores dos parâmetros A e b.

Sub Ab()

```
Dim saidaDQ, saidaA, saidab As Range
Dim Ainicio, Afim, binicial As Double
Dim bestA, bestb, MinDQ
Dim intervalo, question, extremo, Aconfere, velo
Dim precisatxt As String
```

As variáveis de entrada são: o intervalo de busca para valor do parâmetro A e a célula correspondente ao somatório do quadrado das diferenças entre os valores t_{10} parametrizados e os medidos e também a precisão do cálculo.

```
Aconfere = 0
velo = 10
```

```
D1:
On Error GoTo fim
Set saidaA = Application.InputBox( _
    prompt:="Selecione célula correspondente ao parâmetro A", _
    Type:=8, Default:=Selection.Address)
If saidaA.Rows.Count > 1 Or saidaA.Columns.Count > 1 Then
    MsgBox ("Selecione apenas uma célula.")
    GoTo D1
End If
```

```
D2:
On Error GoTo fim
Set saidab = Application.InputBox( _
    prompt:="Selecione a célula correspondente ao parâmetro b", _
    Type:=8, Default:=Selection.Address)
If saidab.Rows.Count > 1 Or saidab.Columns.Count > 1 Then
    MsgBox ("Selecione apenas uma célula.")
    GoTo D2
End If
If saidab = saidaA Then
    MsgBox ("Selecione uma célula diferente do parâmetro A.")
    GoTo D2
End If
```

```
D3:
Set saidaDQ = Application.InputBox( _
    prompt:="Selecione a célula correspondente ao somatório dos quadrados das diferenças", _
    Type:=8, Default:=Selection.Address)
If saidaDQ.Rows.Count > 1 Or saidaDQ.Columns.Count > 1 Then
    MsgBox ("Selecione apenas uma célula!")
    GoTo D3
End If
If saidaDQ = saidaA Then
    MsgBox ("Selecione uma célula diferente do parâmetro A.")
    GoTo D3
End If
If saidaDQ = saidab Then
    MsgBox ("Selecione uma célula diferente do parâmetro b.")
    GoTo D3
End If
```

```
D4:
casas = InputBox("Insira a quantidade de casas decimais de precisao para o parametro A")
If casas = "" Then Exit Sub
```

```

If casas < 0 Then
    MsgBox ("Valor inválido")
    GoTo D4
End If
If casas > 7 Then
    MsgBox ("Valor muito elevado")
    GoTo D4
End If
precisao = 1 / 10 ^ casas
leftlight = 2 + casas
If casas > 0 Then
    precisaotxt = Left("0.00000000", leftlight)
Else
    precisaotxt = Left("0.00000000", leftlight - 1)
End If
saidaA.NumberFormat = precisaotxt
saidab.NumberFormat = precisaotxt

```

```

D5:
Ainicio = InputBox("Insira o valor da MENOR estimativa do parâmetro A")
If Ainicio = "" Then Exit Sub
Ainicio = Val(Ainicio)
If Ainicio < 0 Or Ainicio >= 100 Then
    MsgBox ("Valor inválido")
    GoTo D5
End If
If extremo = 1 And Ainicio >= Aconfere Then
    MsgBox ("O valor inserido é maior ou igual ao anterior")
    GoTo D5
End If
If extremo = 1 And Ainicio < Afim Then
    GoTo D5
End If

```

```

D6:
Afim = InputBox("Insira o valor da MAIOR estimativa do parametro A")
If Afim = "" Then Exit Sub
Afim = Val(Afim)
If Afim <= Ainicio Or Afim > 100 Then
    MsgBox ("Valor inválido")
    GoTo D6
End If
If extremo = velo And Afim <= Aconfere Then
    MsgBox ("O valor inserido é menor ou igual ao anterior")
    GoTo D6
End If

```

```

binicial = 2
D7:
intervalo = (Afim - Ainicio) / velo
saidaA.Value = Ainicio
saidab.Value = binicial
MinDQ = saidaDQ.Value + 1
extremo = 0
Set DQsolver = saidaDQ
Set bsolver = saidab

```

O intervalo de busca é dividido em vários segmentos. As soluções para os parâmetros A e b são obtidas através da ferramenta SOLVER. Depois de encontrado um resultado de melhor ajuste, o programa refina a solução gerando um intervalo de busca ainda mais próximo do resultado obtido até então

```

For i = 1 To velo
    SolverOk SetCell:=DQsolver, MaxMinVal:=2, ValueOf:="0", ByChange:=bsolver
    SolverSolve (userfinish = False)

```

```

If saidaDQ.Value < MinDQ Then
    MinDQ = saidaDQ.Value
    bestA = saidaA.Value
    bestb = saidab.Value
    extremo = i
End If
saidaA.Value = saidaA.Value + intervalo
Next
saidaA.Value = bestA
saidab.Value = bestb

If extremo = 1 Then
    MsgBox ("A menor estimativa do parâmetro A está acima do melhor resultado. Insira novamente.")
    Aconfere = Ainicio
    Afim = Ainicio
    GoTo D5
End If
If extremo = 2 Then
    MsgBox ("A maior estimativa do parâmetro A está abaixo do melhor resultado. Insira novamente.")
    Aconfere = Afim
    Ainicio = Afim
    GoTo D6
End If

If Abs(bestA - Ainicio) > precisao Then
    Ainicio = bestA - intervalo
    Afim = bestA + intervalo
    binicial = bestb
    GoTo D7
End If

fim:
End Sub

```

No código fonte ainda estão incluídas verificações que evitam a extrapolação do cálculo para valores incorretos, detectando falhas na inserção dos dados iniciais ou ainda a avisando sobre eventuais divergências nos cálculos

Anexo C – Código fonte da função para cálculo de área entre curvas

Código fonte da função que calcula a área entre as curvas de regressão em um intervalo, utilizando método de integração por somatório de área de retângulos de área infinitesimal

```
Public Function areaECS(inicio, fim, incrementoECS, Ap, bp, Al, bl)
    fimnorm = (fim - inicio) / incrementoECS
    ECS = inicio
    area = 0
```

As variáveis de entrada são: o valor inicial e final do intervalo, os parâmetros A e b das duas curvas a serem comparadas e também o tamanho da base do retângulo de área infinitesimal, responsável pela precisão do cálculo

```
For i = 0 To fimnorm
    tdezp = tdez(Ap, bp, ECS)
    tdezl = tdez(Al, bl, ECS)
    diferenca = tdezp - tdezl
    retangulo = diferenca * incrementoECS
    area = area + retangulo
    ECS = ECS + incrementoECS
    If i = 0 Or i = fimnorm Then
        area = area - retangulo / 2
    End If
Next
areaECS = area

End Function
```

A função retorna o valor da área encontrada depois de somar as áreas dos retângulos que possuem altura de valor igual a diferença de valores das funções em cada ponto. Cada metade dos extremos é subtraída para evitar excedente.

```
Public Function tdez(A, b, ECS)
    tdez = A * (1 - Exp(-b * ECS))

End Function
```

Função auxiliar que calcula o valor da equação parametrizada de t_{10} em cada ponto.