



INVESTIGAÇÃO DA MOAGEM DE MISTURAS BINÁRIAS EM MOINHOS DE BOLAS

Raquel Domingues Costa Kallemback

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Rio de Janeiro
Março de 2012

INVESTIGAÇÃO DA MOAGEM DE MISTURAS BINÁRIAS EM MOINHOS DE BOLAS

Raquel Domingues Costa Kallemback

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) 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 MATERIAIS.

Examinada por:

Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.

Prof. José Farias de Oliveira, D.Sc.

Prof. Maurício Leonardo Torem, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2012

Kallemback, Raquel Domingues Costa

Investigação da moagem de misturas binárias em moinho de bolas/ Raquel Domingues Costa Kallemback. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XXI, 139 p.: I.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 136-139.

1. Cominuição 2. Moagem de mistura binária 3. Modelagem. I. Tavares, Luís Marcelo Marques. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título

**Ao meu lindo marido,
pelo amor e total apoio nesta etapa de nossas vidas.**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me amparar nos momentos mais difíceis.

Este período em que cursei o mestrado foi marcado por intensas transformações em minha vida, dentre elas a mudança para outro Estado e o meu lindo casamento, o qual consumiu um pouco do meu tempo, mas posso afirmar que valeu a pena! Um agradecimento super especial ao meu marido Guilherme pelo seu apoio irrestrito, pela sua paciência, dedicação e compreensão que foram imprescindíveis para a conclusão desta dissertação.

Ao Professor e orientador Luís Marcelo Marques Tavares, dono de uma competência profissional incrível, agradeço o conhecimento transmitido ao longo deste trabalho, sempre contribuindo com suas análises críticas e opiniões valiosas.

Aos meus familiares que sempre me apoiaram. Aos meus pais, Antônio e Zuleimar, que me deram não somente a vida, mas principalmente a minha educação e condições para estudar. Aos meus irmãos Raphael e Gabriel por sempre torcerem por mim. E aos novos integrantes da minha família: Terezinha, Renata, Inácio, Felicidade, Roberto, Adriana e João.

Finalizada uma etapa particularmente importante da minha vida, não poderia deixar de expressar o agradecimento a todos aqueles que contribuíram para o término desta longa caminhada. Rangler e demais funcionários do Laboratório de Tecnologia Mineral, obrigada pela ajuda prestada durante as atividades experimentais, e também aos Engenheiros Rodrigo Carvalho e Maloba Tshela.

Gostaria de agradecer ainda o auxílio financeiro do CNPq, na forma da bolsa de mestrado, e à AMIRA e à Vale pelo apoio através do projeto P9O, realizado em parceria com o Laboratório de Tecnologia Mineral.

De maneira geral gostaria de agradecer a todas as pessoas que de alguma forma participaram deste trabalho. Acredito que qualquer trabalho só se realiza com a dedicação de um grupo de pessoas, e este não foi diferente!

*“Sabemos que todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus,
daqueles que são chamados segundo o seu propósito” Romanos 8:28*

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

INVESTIGAÇÃO DA MOAGEM DE MISTURAS BINÁRIAS EM MOINHOS DE BOLAS

Raquel Domingues Costa Kallemback

Março/2012

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

A moagem conjunta de materiais de diferentes resistências, que é um assunto de grande interesse tanto na indústria cimenteira quanto na indústria mineral, foi investigada no presente trabalho por meio de ensaios de moabilidade de Bond, moagem descontínua e contínua. Um modelo empírico foi desenvolvido para descrever o acúmulo do material mais resistente no interior do moinho, tendo mostrado boa aderência aos resultados experimentais. Verificou-se ainda que nem o índice de trabalho de Bond nem as taxas de quebra na moagem obedecem à regra das misturas, bem como que a distribuição granulométrica de cada componente no produto de ensaios de moabilidade de Bond se mantém normalmente inalterada se o material é moído separadamente ou como parte de uma mistura.

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

INVESTIGATION OF GRINDING BINARY MIXTURES IN BALL MILLS

Raquel Domingues Costa Kallemback

March/2012

Advisor: Luís Marcelo Marques Tavares

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The combined grinding of materials with different strengths, which is a subject of great interest both in the cement industry and the mining industry, was investigated in this work using Bond grindability, batch grinding and continuous grinding tests. An empirical model was developed to describe the accumulation of tough material inside the mill, having shown good fit to experimental data. It was observed that neither the Bond work index nor the breakage rate in batch grinding obeys the rule of mixtures. It was also observed that the particle size distribution of each component in the product of Bond grindability test remains reasonably unchanged if the material is ground separately or in a mixture.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Cominuição	4
2.1.1 Principais estágios da cominuição	6
2.2 Britagem	8
2.3 Moagem	9
2.4 Moinhos de bolas	10
2.4.1 Aspectos construtivos dos moinhos de bolas	11
2.4.2 Mecanismos de fragmentação que ocorrem no moinho de bolas	16
2.5 Modelagem Matemática	19
2.5.1 Modelo Empírico de Bond	19
2.5.2 Modelo do Balanço Populacional	20
2.5.2.1 Função Seleção ou Taxa Específica de quebra	21
2.5.2.2 Função Distribuição de Quebra	23
2.5.2.3 Função taxa de quebra reduzida	24
2.5.3 Modelagem mecânica do moinho de bolas	25
2.6 Moagem de materiais multicomponentes	26
2.6.1 Estudos da moagem de misturas da indústria cimenteira	26
2.6.2 Estudo da moagem de misturas em minérios	41
2.6.3 Consumo de energia na moagem de misturas	54
2.6.4 Análise crítica da literatura	60

3 MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1 Materiais.....	62
3.2 Metodologia	63
3.2.1 Separação dos componentes	63
3.2.1.1 Desenvolvimento da metodologia de análise de componentes por dissolução ácida	63
3.2.1.2 Procedimento adotado nas análises dos componentes por dissolução ácida	66
3.2.1.3 Separação dos componentes manualmente por inspeção visual	71
3.2.1.4 Verificação do método de separação dos componentes	72
3.2.2 Determinação da massa específica de sólidos por picnometria.....	73
3.2.3 Ensaio para determinação do Índice de Trabalho de Bond.....	74
3.2.4 Ensaio de moagem descontínua	76
3.3 Ensaio de moagem contínua.....	80
3.3.1 Moagem em circuito aberto	80
3.3.2 Moagem em circuito fechado	83
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
4.1 Caracterização dos materiais individuais.....	87
4.2 Moabilidade de Bond de misturas.....	91
4.2.1 Modelagem do acúmulo de material resistente no moinho	106
4.3 Moagem descontínua de misturas	109
4.3.1 Moagem individual do basalto e do calcário Ribeirão Branco.....	109
4.3.2 Taxa de quebra da moagem de misturas no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm.....	112
4.3.3 Taxa de quebra da moagem de misturas no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm.....	116

4.3.4 Distribuição granulométrica do produto da moagem de misturas no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm.....	120
4.3.5 Distribuição granulométrica do produto da moagem de misturas no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm.....	123
4.4 Moagem contínua	125
4.4.1 Moagem em circuito aberto.....	125
4.4.2 Moagem em circuito fechado	129
5 CONCLUSÕES.....	134
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mecanismos de aplicação de esforços empregados nos equipamentos de cominuição (modificado de Rumpf, 1990).....	5
Figura 2.2 – Moinho tubular rotativo	9
Figura 2.3 – Trajetórias dos corpos moedores em um moinho de bolas (Modificado de Wills, 2006).....	13
Figura 2.4 – Diferentes movimentos dos corpos moedores a) Cascata b) Catarata c) Centrífugo.....	14
Figura 2.5 – Abrasão ou lascamento produzindo fragmentos com uma distribuição de tamanho muito estreita (modificado de King, 2001).....	17
Figura 2.6 – Fratura por clivagem quando a taxa de carregamento é baixa (modificado de King, 2001)	17
Figura 2.7 - Mecanismo de estilhaçamento produzindo uma ampla faixa de fragmentos (modificado de King, 2001)	18
Figura 2.8 – Proporção de partículas remanescentes ao longo do tempo e cinética de primeira ordem (Tavares, 2005)	22
Figura 2.9 – Função seleção em função do tamanho de partícula (Silva, 2007)	23
Figura 2.10 – Análise granulométrica dos componentes clínquer e calcário envolvidos na mistura 10% calcário com tempo de moagem por 35 minutos.....	28
Figura 2.11 – Análise granulométrica dos componentes clínquer e calcário envolvidos na mistura 20% calcário com tempo de moagem por 65 minutos.....	28
Figura 2.12 -Comparação da distribuição granulométrica do calcário quando moído em misturas de diferentes proporções e tempo de moagem igual a 65 minutos ..	29
Figura 2.13 – Comparação da distribuição granulométrica do clínquer quando moído em misturas de diferentes proporções e tempo de moagem igual a 65 minutos ..	30
Figura 2.14 – Comparação da distribuição granulométrica da mistura calcário e clínquer nas proporções de 30% e 40% calcário no tempo de moagem igual a 35 minutos	30
Figura 2.15 – Comparação da distribuição granulométrica da mistura calcário e clínquer nas proporções de 30% e 40% calcário no tempo de moagem igual a 65 minutos	31

Figura 2.16 – Percentagem passante de clínquer e calcário em 4 μ m nos diferentes tempos de moagem	32
Figura 2.17 – Variação na moabilidade do clínquer, escória e suas misturas (Öner, 2000 – Reproduzida com autorização da editora)	34
Figura 2.18 – Variação da taxa específica de quebra versus tamanho de partícula (Öner, 2000 - Reproduzida com autorização da editora)	35
Figura 2.19 – Comparação da porcentagem de material passante em 90 μ m para a mistura clínquer e pozolana natural (25%) intermoída e moída separadamente	36
Figura 2.20 – Comparação da mistura clínquer e BFS (25%) intermoída e moída separadamente para a menor (12 kWh/t) e a maior energia (52 kWh/t) em estudo, respectivamente	37
Figura 2.21 – Comparação dos resultados de W_i medido e calculado pela média ponderada para a mistura clínquer e trass (dados de Hosten e Avsar, 1998) .	38
Figura 2.22 – Proporção remanescente do tamanho inicial (1,18 x 0,85 mm) na moagem de clínquer e Tufo (T) quando são moídos sozinhos ou em mistura (M1: 80% C + 20% T; M2: 65% C + 35% T) (Hosten e Avsar, 1998 - Reproduzida com autorização da editora)	39
Figura 2.23 – Índices de trabalho de Bond para as amostras de clínquer, gesso e suas misturas	41
Figura 2.24 – Proporção remanescente do tamanho inicial (1,68 x 1,19 mm) em função do tempo de moagem para diferentes materiais e misturas (Venkataraman e Fuerstenau, 1984 - Reproduzida com autorização da editora)	43
Figura 2.25 – Desaparecimento de primeira ordem para hematita e calcita em termos de energia específica em diversas misturas (Venkataraman e Fuerstenau, 1984 - Reproduzida com autorização da editora)	44
Figura 2.26 – Composição do material reciclado e do produto do circuito em função do número de ciclos em experimentos de ciclo fechado (Fuerstenau e Venkataraman, 1988 - Reproduzida com autorização da editora)	46
Figura 2.27 – Valores da taxa de quebra para calcita e quartzo em experimentos de ciclo fechado (Fuerstenau e Venkataraman, 1988 - Reproduzida com autorização da editora)	47
Figura 2.28 - Comparação entre as distribuições granulométricas do mineral dolomita de moagens em misturas e moagem isolada para o tempo de 5 minutos	48
Figura 2.29 – Comparação entre as distribuições granulométricas do mineral dolomita de moagens em misturas e moagem isolada para o tempo de 15 minutos	48

Figura 2.30 – Comparação entre as as distribuições granulométricas do mineral dolomita de moagens em misturas e moagem isolada para o tempo de 50 minutos.	49
Figura 2.31 – Comparação entre as as distribuições granulométricas do mineral quartzo de moagens em misturas e moagem isolada para o tempo de 15 minutos.	50
Figura 2.32 – Comparação entre as as distribuições granulométricas do mineral quartzo de moagens em misturas e moagem isolada para o tempo de 5 minutos.	50
Figura 2.33 – Distribuição de tamanho multicomponente do teste em escala industrial (Bueno et al., 2011)	52
Figura 2.34 – Comparação dos resultados dos testes em escala industrial, piloto e laboratório (Bueno et al., 2011).....	53
Figura 2.35 – Energias de moagem dos constituintes da mistura simuladas e calculadas e energia da mistura medida e calculada (Fuerstenau e Kapur, 1988 - Reproduzida com autorização da editora)	57
Figura 2.36 – Fatores de repartição de energia da hematita e quartzo calculados a partir de funções da taxa de quebra de diferentes tamanhos (Fuerstenau et al., 1992 - Reproduzida com autorização da editora)	58
Figura 2.37 – Variação dos fatores de repartição de energia da dolomita e hematita como função do tempo na moagem a úmido de três composições de mistura (Fuerstenau et al., 1992 - Reproduzida com autorização da editora)	59
Figura 3.1 – Comparação da porcentagem de material não dissolvido entre calcário e basalto quando em contato com soluções de HCl a diferentes concentrações	65
Figura 3.2 – Comparação da porcentagem de material não dissolvido entre calcário Ribeirão Branco e basalto em diferentes tempos de contato com a solução de HCl a 5M	66
Figura 3.3 – Etapas da dissolução ácida, da esquerda para a direita: Moagem manual, contato da mistura com a solução de ácido clorídrico e filtração.....	67
Figura 3.4 – Dissolução ácida do basalto, calcário Ribeirão Branco e suas misturas após moagem manual e em moinho planetário.....	68
Figura 3.5 – Dissolução ácida do basalto, calcário Ribeirão Branco e suas misturas no tamanho menor do que 38 μm	69
Figura 3.6 – Dissolução ácida do basalto, calcário Cantagalo e suas misturas após moagem manual.....	70
Figura 3.7 – Dissolução ácida do basalto e Catalão após moagem manual	71

Figura 3.8 – Amostra da mistura basalto e calcário Ribeirão Branco seca e úmida para posterior separação manual dos componentes.....	72
Figura 3.9 - Picnômetro de 25 ml, já com a amostra seca para ensaio.....	73
Figura 3.10 – Moinho de bolas de Bond do LTM.....	75
Figura 3.11 – Moinho de bolas utilizado na moagem descontínua	77
Figura 3.12 – Sequência de etapas no carregamento do moinho para ensaio de moagem descontínua.....	78
Figura 3.13 – Diagrama esquemático em CAD do moinho utilizado nos ensaios de moagem contínua (Kallembach, 2009).....	81
Figura 3.14 – Vista interna e perfil da câmara do moinho utilizado nos ensaios de moagem contínua (Tavares e Carvalho, 2010).....	81
Figura 3.15 – Circuito fechado de moagem utilizado nos ensaios de moagem da mistura 50% basalto e 50% calcário Ribeirão Branco. 1- Classificador, 2- Sistema supervisor, 3- Alimentador vibratório, 4- Transportador de sólidos, 5- Moinho contínuo, 6- Painéis de operação	84
Figura 3.16 – Esquema da configuração do circuito fechado mostrando os pontos de amostragem (círculos)	85
Figura 4.1 – Análise granulométrica da alimentação do ensaio de moabilidade de Bond para cada material.....	88
Figura 4.2 – Análises granulométricas da amostra de basalto na alimentação e no produto do ensaio de moabilidade de Bond	89
Figura 4.3 – Análises granulométricas da amostra de calcário Ribeirão Branco na alimentação e no produto do ensaio de moabilidade de Bond	89
Figura 4.4 – Análises granulométricas da amostra de calcário Cantagalo na alimentação e no produto do ensaio de moabilidade de Bond.....	90
Figura 4.5 – Análises granulométricas da amostra de minério de Catalão na alimentação e no produto do ensaio de moabilidade de Bond.....	90
Figura 4.6 – Índice de trabalho de Bond (W_i) para as diversas misturas utilizadas no estudo.....	92
Figura 4.7 – Comparação dos resultados de W_i medido e calculado para a mistura basalto e calcário Ribeirão Branco	93
Figura 4.8 – Comparação dos resultados de W_i medido e calculado para a mistura basalto e calcário Cantagalo	93

Figura 4.9 – Comparação dos resultados de W_i medido e calculado para a mistura calcário Ribeirão Branco e Catalão	94
Figura 4.10 – Comparação dos resultados de W_i medido e calculado para a mistura basalto e Catalão	95
Figura 4.11 – Comparação das análises granulométricas do material retido no último ciclo para o basalto individual e em diferentes misturas com o calcário Ribeirão Branco	96
Figura 4.12 – Comparação das análises granulométricas do material retido no último ciclo para o calcário Ribeirão Branco individual e em diferentes misturas com o basalto	97
Figura 4.13 – Comparação das análises granulométricas do produto final do material basalto individual e nas diferentes misturas com o calcário Ribeirão Branco	98
Figura 4.14 – Comparação das análises granulométricas do produto final do material calcário Ribeirão Branco individual e nas diferentes misturas com o basalto	98
Figura 4.15 – Porcentagem passante em 75 μ m do produto final da moagem de basalto e calcário Ribeirão Branco individuais e nas suas misturas	99
Figura 4.16 – Análise do teor de basalto no produto de cada ciclo para as misturas compostas por basalto e calcário Ribeirão Branco	100
Figura 4.17 – Análise do teor de basalto no produto de cada ciclo para as misturas compostas por basalto e calcário Cantagalo	101
Figura 4.18 – Análise do teor de basalto no reciclo de cada ciclo para as misturas compostas por basalto e calcário Cantagalo	102
Figura 4.19 – Análise do teor de basalto no <i>hold up</i> de cada ciclo para as misturas compostas por basalto e calcário Ribeirão Branco	103
Figura 4.20 – Análise do teor de basalto no <i>hold up</i> de cada ciclo para as misturas compostas por basalto e calcário Cantagalo	103
Figura 4.21 – Porcentagem de basalto no <i>hold up</i> do moinho em relação à porcentagem de basalto na alimentação em sua mistura com calcário Ribeirão Branco e Cantagalo	105
Figura 4.22 - Comparação da porcentagem de basalto no Hold up do moinho em relação a porcentagem de basalto na alimentação para misturas de diferentes proporções com calcário Ribeirão Branco e Cantagalo	105
Figura 4.23 - Modelagem do comportamento das misturas	107
Figura 4.24 - Ajuste da função que descreve o parâmetro α	107

Figura 4.25 - Comparação entre valores medidos e simulados do comportamento da mistura basalto e Catalão ($\alpha = 2,59$)	108
Figura 4.26 - Comportamento da porcentagem do componente resistente no <i>hold up</i> do moinho com a variação do valor do parâmetro α	109
Figura 4.27 - Fração mássica remanescente da alimentação de basalto e calcário Ribeirão Branco no tamanho 9,5 x 6,3 mm e 4,75 x 3,35 mm, respectivamente.	110
Figura 4.28 - Comparação entre as análises granulométricas do basalto e calcário Ribeirão Branco cominuídos individualmente no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm nos diversos tempos de moagem	111
Figura 4.29 - Comparação entre as análises granulométricas do basalto e calcário Ribeirão Branco cominuídos individualmente no tamanho inicial de 4,75 x 3,35 mm em diferentes tempos de moagem	112
Figura 4.30 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 75% basalto no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm	113
Figura 4.31 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 50% basalto no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm	114
Figura 4.32 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 25% basalto no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm	114
Figura 4.33 - Comparação da fração mássica remanescente da alimentação do basalto na moagem de diferentes misturas e do componente puro no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm	115
Figura 4.34 - Comparação da fração mássica remanescente da alimentação do calcário Ribeirão Branco na moagem de diferentes misturas e do componente puro no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm	116
Figura 4.35 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 75% basalto no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm	117
Figura 4.36 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 50% basalto no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm	117
Figura 4.37 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 25% basalto no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm	118
Figura 4.38 - Comparação da fração mássica remanescente da alimentação do basalto na moagem de diferentes misturas e do componente puro no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm	119

Figura 4.39 - Comparação da fração mássica remanescente da alimentação do calcário Ribeirão Branco na moagem de diferentes misturas e do componente puro no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm	119
Figura 4.40 - Distribuição granulométrica do basalto na moagem individual e em misturas no tempo de moagem de 2 minutos no tamanho inicial de 9,5 x 6,3 mm.....	121
Figura 4.41 – Porcentagem passante em 600 µm do basalto moído individualmente e em diversas misturas no tamanho inicial de 9,5 x 6,3 mm.....	121
Figura 4.42 - Distribuição granulométrica do calcário na moagem individual e em misturas no tempo de moagem de 2 minutos no tamanho inicial de 9,5 x 6,3 mm.....	122
Figura 4.43 - Porcentagem passante em 600 µm do calcário Ribeirão Branco moído individualmente e em diversas misturas com o Basalto no tamanho inicial de 9,5 x 6,3 mm.....	122
Figura 4.44 - Distribuição granulométrica do basalto na moagem individual e em misturas no tempo de moagem de 1 minuto no tamanho inicial de 4,75 x 3,35 mm.....	123
Figura 4.45 - Porcentagem passante em 600 µm do basalto moído individualmente e em diversas misturas no tamanho inicial de 4,75 x 3,35 mm.....	124
Figura 4.46 - Distribuição granulométrica do calcário Ribeirão Branco na moagem individual e em misturas no tempo de moagem de 1 minuto no tamanho inicial de 4,75 x 3,35 mm	124
Figura 4.47 - Porcentagem passante em 600 µm do calcário Ribeirão Branco moído individualmente e em diversas misturas no tamanho inicial de 4,75 x 3,35 mm	125
Figura 4.48 - Distribuição granulométrica do material alimentado no moinho no ensaio em circuito aberto	126
Figura 4.49 - Distribuições granulométricas das amostras da alimentação, <i>hold up</i> e produto da moagem em circuito aberto	127
Figura 4.50 - Variação da porcentagem de basalto em relação à classe de tamanho na alimentação, <i>hold up</i> e produto do moinho quando operado em circuito aberto	127
Figura 4.51 - Análise granulométrica do material do <i>hold up</i> e produto do moinho após moagem em circuito aberto	128
Figura 4.52 - Distribuições granulométricas dos componentes alimentados ao moinho no ensaio em circuito fechado	129

Figura 4.53 - Análise granulométrica das amostras coletadas durante o ensaio de moagem contínua em circuito fechado	130
Figura 4.54 - Variação da porcentagem de basalto em relação à classe de tamanho na alimentação, <i>hold up</i> e produto do moinho quando operado em circuito fechado	131
Figura 4.55 - Distribuição granulométrica por componente do produto da moagem em circuito fechado	132
Figura 4.56 - Comparação do acúmulo de basalto nos diferentes ensaios realizados com a mistura basalto e calcário Ribeirão Branco	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Distribuição de tamanhos de partículas (%) do produto do ensaio de moabilidade de Bond (modificado de Hosten e Avsar, 1998).....	38
Tabela 2.2 – Consumo de energia da mistura calculado pela equação e experimental (Fuerstenau e Venkataraman, 1984).....	55
Tabela 3.1 – Comparação entre a dissolução dos dois tipos de calcário com ácido clorídrico e sulfúrico concentrados	64
Tabela 3.2 – Resultados dos testes de dissolução com diferentes concentrações de ácido clorídrico.....	64
Tabela 3.3 – Resultados dos testes de dissolução com diferentes tempos de contato da amostra com o ácido a 5M.....	65
Tabela 3.4 – Comparação da porcentagem de basalto nas análises obtidas a partir das amostras de cabeça e reconstituídas	73
Tabela 3.5 – Distribuição dos diâmetros das bolas da carga moedora	75
Tabela 3.6 – Condições experimentais empregadas nos ensaios de moagem descontínua na condição padrão LTM/COPPE	77
Tabela 3.7 – Condições operacionais utilizadas nos ensaios de moagem contínua	82
Tabela 3.8 – Distribuição dos diâmetros das bolas da carga moedora dos ensaios de moagem contínua.....	82
Tabela 4.1 – Características dos materiais utilizados no estudo de moagem de misturas binárias	87
Tabela 4.2 - Resultados de W_i (kWh/t) para os componentes individuais e suas misturas	91
Tabela 4.3 – Porcentagem de recirculação ocorrida no ensaio de moabilidade de Bond da mistura basalto e calcário.....	104
Tabela 4.4 - Valores do parâmetro α otimizados para as misturas de basalto com calcário Ribeirão Branco e Cantagalo	106
Tabela 4.5 - Porcentagem mássica de cada material alimentado no moinho no ensaio em circuito aberto	126
Tabela 4.6 - Porcentagem mássica de cada material no hold up e no produto do moinho em circuito aberto no estado estacionário	128

Tabela 4.7 - Porcentagem de basalto e calcário nos diferentes pontos de amostragem no ensaio de moagem contínua em circuito fechado	131
Tabela 4.8 - Porcentagem de carga circulante de basalto e calcário no ensaio em circuito fechado	132

1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento de matérias-primas minerais requer invariavelmente alguma forma de processamento ou tratamento. A intensidade do processamento necessário depende do teor do minério da jazida, assim como da especificação do produto. A preparação é uma das etapas do tratamento de minérios que diz respeito às operações de cominuição e separação por tamanhos, que visam a extração dos componentes de interesse (Tavares, 2005). Esta etapa engloba as seguintes operações: britagem, peneiramento, moagem e classificação, as quais são frequentemente utilizadas em conjunto.

A cominuição é um processo pelo qual partículas são reduzidas de tamanhos por britagem e moagem. Este processo tem o objetivo de propiciar a obtenção de partículas com uma determinada granulometria, seja para a utilização direta, como é o caso de agregados para construção civil (areia e brita) ou para utilização das partículas como produto intermediário para estágios subsequentes de concentração do mineral de interesse e remoção de impurezas. Um exemplo de estágio subsequente é o processo de lixiviação, o qual se insere em uma área da metalurgia extrativa na qual é necessário atingir uma granulometria que promova a exposição do mineral que será dissolvido seletivamente através do contato do minério com uma fase aquosa.

Na fabricação de cimento, a cominuição é necessária para promover uma maior área de contato entre os reagentes e, conseqüentemente, aumentar a velocidade de reação, a qual é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas. Em outros ramos da indústria, como, por exemplo, a indústria mineral, metalúrgica, química, cerâmica, farmacêutica e alimentícia, a cominuição é responsável por atingir a especificação granulométrica do material sólido para utilização como insumo.

Em todos os casos, a cominuição é uma operação que envolve elevado consumo energético e baixa eficiência energética. Os custos associados à fragmentação de minérios são função, entre outros aspectos, da granulometria requerida. Seguindo uma classificação da cominuição entre as operações de desmonte, britagem e moagem, a energia específica aumenta em uma ordem de grandeza nessa sequência. Assim,

enquanto operações de desmonte de rocha por explosivo consomem cerca de 0,1 kWh/t, em britadores o índice eleva-se para magnitudes de 1 kWh/t, atingindo valores da ordem de 10 kWh/t em circuitos de moagem. No caso da moagem fina e ultrafina, o consumo específico pode atingir até 100 kWh/t. Assim, os processos de cominuição respondem por uma parcela significativa do consumo de energia na mineração. Estima-se que aproximadamente 80% da energia elétrica consumida no processamento mineral esteja associada às operações de britagem e moagem (Wills, 2006).

A moagem normalmente representa a última etapa dos processos de cominuição. Nesta fase as partículas são reduzidas de tamanho por uma combinação de impacto e abrasão. A moagem é geralmente realizada em recipientes de aço cilíndricos e rotativos, conhecidos como moinhos tubulares, os quais possuem corpos moedores que se movimentam no interior do moinho juntamente com a carga, e assim realizam a cominuição do material. Os moinhos de bolas, que se caracterizam pelo uso de esferas de aço como corpos moedores, são o tipo mais importante de moinhos tubulares, pois são os responsáveis pela maior parcela da redução de tamanhos. A moagem em moinhos de bolas pode ser realizada a úmido ou a seco.

Geralmente, o material a ser alimentado no moinho é um sólido heterogêneo, ou seja, que apresenta mais de uma fase. Cada constituinte do minério da alimentação representa uma destas fases, que variam em suas propriedades físicas como dureza, tenacidade e até ductilidade, em sua composição química e mineralógica, podendo até apresentar modos de fraturas distintos. Assim, se torna necessária a análise do comportamento do material heterogêneo no interior do moinho de bolas, tendo em vista que além dos componentes da mistura apresentarem diferenças em suas características individuais e consequente diferenças na moabilidade, eles também interferem na moagem de outros componentes da mistura.

Ao longo de anos, um grande número de pesquisadores direcionaram seus esforços de pesquisa com o objetivo de compreender os mecanismos de cominuição, estimação de consumo energético e formulação de modelos matemáticos voltados apenas para sistemas de um único componente. Entretanto, a moagem de misturas é um fenômeno que apresenta comportamento distinto da moagem de minerais puros, de maneira que a

cominuição de materiais heterogêneos torna-se mais complexa de ser analisada e modelada. A compreensão de como os diferentes constituintes comportam-se individualmente e em misturas, e de como eles interagem uns com os outros, é de grande relevância na modelagem, otimização e controle das operações de cominuição.

A presente dissertação tem a finalidade de contribuir para uma melhor compreensão do efeito da composição de misturas binárias sobre a operação de moinhos de bolas, incluindo a repartição de energia entre os componentes da mistura, a distribuição de tamanho do produto e o acúmulo de diferentes componentes da mistura no moinho. Esse maior entendimento permitirá a melhor descrição quantitativa da moagem de materiais multicomponentes no futuro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cominuição

A cominuição representa o primeiro estágio do processamento mineral e tem como objetivo principal a liberação dos minerais valiosos dos minerais sem valor, conhecidos como ganga, para sua posterior separação. A cominuição deve ser realizada até o maior tamanho de partícula possível, desde que seja atingida a granulometria desejada ou o grau de liberação adequado às especificações do estágio posterior. Isso se deve ao fato que, à medida que as partículas se tornam mais finas, aumenta a demanda de energia, bem como a produção de partículas excessivamente finas para recuperação econômica, denominadas lamas. Assim, o grau de cominuição do minério deve ser estabelecido tendo em vista a otimização econômica.

Na década de 1980, um relatório do *U.S. National Materials Advisory Board*, o qual analisava oportunidades para melhoria do desempenho energético de circuitos de cominuição, estimou que, aproximadamente, 1,5% de toda a energia elétrica gerada naquele país era utilizada em circuitos industriais de britagem e moagem, incluindo a energia consumida indiretamente na produção de corpos moedores. A cominuição desses materiais – sejam eles minérios, produtos ou insumos para a indústria química, cerâmica, alimentícia ou farmacêutica – é normalmente realizada em britadores e moinhos, que apresentam eficiência energética notavelmente baixa. Essas constatações foram algumas das principais motivações para a pesquisa em cominuição ao longo do século 20, que resultou no desenvolvimento de algumas tecnologias inovadoras (Austin et al., 1984).

Dentre as indústrias citadas acima, a indústria mineral é a maior usuária das operações de cominuição e se caracteriza por processar uma grande quantidade de matérias primas, com taxas que podem ser superiores a 160.000 t/dia de minério *run-of-mine* (ROM) alimentado ao circuito de cominuição em usinas de grande porte (Carvalho, 2009).

Diversos equipamentos podem ser utilizados na cominuição de sólidos. No entanto para diminuir o tamanho de partícula do material é necessária a aplicação de esforços mecânicos para produzir a fratura das partículas. Para tal evento ocorrer, estas forças atuantes sobre a partícula devem ser superiores à sua resistência à ruptura. As principais diferenças entre os vários equipamentos existentes estão relacionadas aos mecanismos de aplicação de esforços em partículas de diversos tamanhos. Estes mecanismos empregados tanto nos processos de britagem quanto nos de moagem são bastante variados, conforme é mostrado na Figura 2.1.

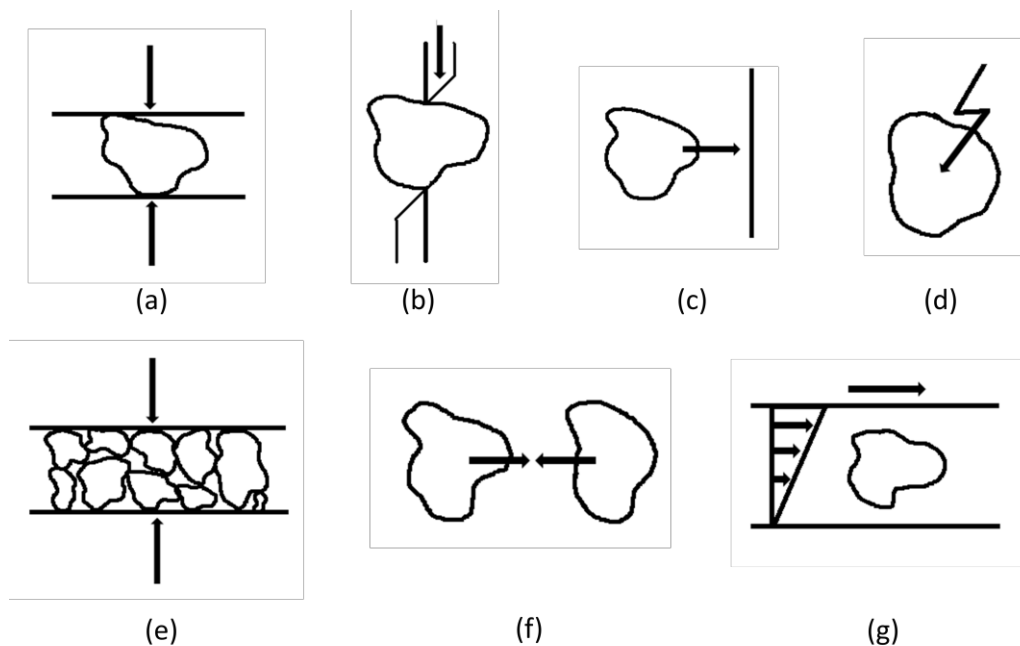


Figura 2.1 - Mecanismos de aplicação de esforços empregados nos equipamentos de cominuição (modificado de Rumpf, 1990)

Cada um desses mecanismos apresenta particularidades, como, por exemplo, em (a) ocorre aplicação de cargas diretamente entre duas superfícies sólidas a partículas individuais, (b) utilização de ferramentas de corte, (c) projeção de partículas contra uma superfície sólida, (d) aplicação de energia não mecânica – como micro-ondas, choques elétricos, calor e plasma, (e) leito de partículas, (f) projeção de partículas umas contra as outras e (g) aplicação de cisalhamento (Tavares, 2005).

Quando uma partícula grossa é fraturada, a energia necessária para que isso ocorra para cada partícula individual é alta, embora a energia por unidade de massa seja baixa. Nesses casos em equipamentos de cominuição, os esforços são aplicados quase individualmente às partículas. Porém, conforme o tamanho de partícula diminui, a energia necessária para a sua fragmentação diminui, mas a energia por unidade de massa aumenta rapidamente. Neste caso, a energia é, normalmente, aplicada de forma distribuída.

Por não ser possível alcançar redução de tamanho muito elevada em cada equipamento individual, a cominuição na indústria é frequentemente dividida em múltiplos estágios. Nestes diversos estágios é possível identificar, pelo menos, duas etapas distintas: uma é a redução de partículas com tamanhos que vão de um metro ou centímetros até a ordem de decímetros ou milímetros, normalmente realizada em equipamentos chamados britadores, e a outra é a redução de tamanhos de partículas de milímetros até dezenas a centenas de micrometros, realizada nos moinhos, os quais têm como característica a dispersão da energia mecânica em um volume relativamente grande.

A razão de redução nos processos de cominuição é definida como a relação entre o diâmetro das partículas na entrada e na saída do processo. Como os produtos apresentam uma distribuição granulométrica contínua, é possível definir a granulometria por meio de um parâmetro referente à curva granulométrica. É geralmente usado como este parâmetro a abertura de peneira na qual se situa 80% da massa passante. Como os equipamentos de cominuição são muito pouco eficientes para elevadas razões de redução, para cada estágio de cominuição a razão de redução empregada é, normalmente, limitada, demandando a realização da operação em múltiplos estágios.

2.1.1 Principais estágios da cominuição

Na indústria, a cominuição é normalmente dividida 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, aproximadamente, 25 milímetros, enquanto a moagem era empregada na cominuição abaixo desse tamanho (Kelly e

Spottiswood, 1982). Entretanto, atualmente 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, semi-autógenos e moinhos de ROM, têm se mostrado eficazes na cominuição de material ROM ou, mais frequentemente, o produto da britagem primária. 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, 2005).

Os processos de cominuição podem ser operados a seco ou a úmido. As operações de britagem são efetuadas principalmente a seco, enquanto as de moagem são, em sua maioria, conduzidas a úmido. A cominuição pode ser realizada em circuito fechado, onde normalmente o produto da operação de cominuição é submetido a um separador e a corrente que contém o material mais grosseiro é adicionada à alimentação fresca para reprocessamento; ou em circuito aberto, no qual não há retorno de material. Geralmente os processos em circuito fechado são mais eficientes, devido ao reciclo. Entretanto, suas instalações são muito mais dispendiosas do que aquelas que operam em circuito aberto. Assim, a decisão em optar pelo circuito fechado ou aberto deve levar em conta tanto os critérios técnicos quanto econômicos. Como regra geral, entretanto, é comum a utilização de, no mínimo, o último estágio da britagem em circuito fechado, podendo os demais estágios serem operados em circuito aberto. Para as instalações de moagem, os circuitos fechados têm sido cada vez mais empregados, sobretudo devido à menor tendência à sobremoagem do minério.

Para o fechamento dos circuitos são utilizados equipamentos de classificação, dentre os quais os mais importantes são:

- Peneiras, hidrociclones, separadores de cone e classificadores helicoidais, os quais são utilizados em circuitos de moagem a úmido.
- Classificadores pneumáticos estáticos e dinâmicos, também conhecidos como separadores mecânicos a ar, no caso de circuitos de moagem a seco.

2.2 Britagem

A britagem representa o primeiro estágio do processo de cominuição e se desenvolve em etapas subsequentes denominadas britagem primária, secundária, terciária e eventualmente quaternária. Em cada etapa obtém-se uma determinada razão de redução. A britagem pode apresentar vários objetivos, como o de preparar o minério até a faixa de operação utilizada nos moinhos, maximizar a produção de partículas com um tamanho específico e formato característico na produção de agregados para construção civil, calcário agrícola e minério de ferro para uso em alto forno, por exemplo, e até mesmo reduzir o *top size* (tamanho máximo de partícula) do material. Após o desmonte mecânico ou com explosivos dentro da mina, as rochas são alimentadas a estes equipamentos, que têm por objetivo também reduzir o tamanho das partículas até uma faixa viável para a realização do transporte.

Na indústria, a britagem consiste da quebra de material 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 (Tavares, 2005). Esse é o caso dos britadores de mandíbulas, britadores giratórios, britadores cônicos, britadores de rolos e britadores de rolos de alta pressão (*high pressure grinding rolls* – HPGR). 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.

A aplicação de um determinado tipo de britador está vinculada ao tipo de material, à capacidade e à razão de redução desejada.

2.3 Moagem

A moagem normalmente representa o último estágio dos processos de cominuição. Ela é realizada em recipientes cilíndricos chamados de moinhos tubulares (Figura 2.2) os quais contêm corpos moedores. O trabalho de cominuição é realizado pelo movimento dos corpos moedores, os quais se deslocam livremente dentro do equipamento. Os mecanismos envolvidos na quebra das partículas do minério compreendem principalmente abrasão e impacto aplicado às partículas pelos corpos moedores ou pelas outras partículas. A forma predominante de fratura depende das condições operacionais.

A denominação do tipo de moinho tubular irá depender do tipo de corpos moedores nele usado: moinho de barras, moinho de bolas, moinho autógeno, onde a quebra ocorre devido ao impacto das próprias partículas de minério contra partículas menores, e moinho semi-autógeno, os quais são semelhantes aos autógenos, porém nestes a carga moedora é composta por uma combinação de partículas do próprio minério e esferas de aço.



Figura 2.2 – Moinho tubular rotativo

A granulometria ótima do produto de um circuito de moagem dependerá de muitos fatores, incluindo a proporção em que os minerais valiosos estão dispersos na ganga e o

processo de concentração posteriormente usado. É objetivo da etapa de moagem exercer um controle próximo a este tamanho do produto e, por essa razão, uma moagem adequada é frequentemente reconhecida como a “chave” para o bom processamento mineral. Uma moagem insuficiente do minério irá, com certeza, resultar em um produto grosso, com um grau de liberação baixo para a separação econômica e, conseqüentemente, uma baixa recuperação será alcançada na etapa de concentração. Uma moagem excessiva (sobremoagem) reduzirá o tamanho das partículas do componente mais liberado, normalmente a ganga, e pode reduzir o tamanho das partículas do componente em menor proporção, geralmente o mineral valioso, abaixo do tamanho demandado para a separação mais eficiente, resultando em um desperdício de energia no processo.

De um modo geral, o processo de moagem possui diversos tipos de variáveis que podem alterar seu desempenho. Algumas delas são:

- Características do minério: distribuição granulométrica da alimentação, forma inicial das partículas, moabilidade e composição mineralógica;
- Heterogeneidade da alimentação;
- Taxa de alimentação;
- Condições operacionais dos equipamentos, tais como grau de enchimento, velocidade de rotação do moinho e distribuição de tamanhos dos corpos moedores.

2.4 Moinhos de bolas

Uma das máquinas industriais de moagem mais utilizada na indústria de processamento mineral é o moinho de bolas. O moinho de bolas é utilizado na cominuição de vários tipos de minérios, na fabricação de cimento e materiais da indústria química, podendo atingir elevadas razões de redução. Existem dois métodos de utilizar este tipo de equipamento: a moagem a úmido e a moagem a seco. Dentre estes dois métodos, a moagem a úmido é amplamente utilizada, mas a moagem a seco também é uma variante importante da moagem em moinhos de bolas. Exemplos de aplicação da moagem a seco

são a cominuição de clínquer e escória na fabricação de cimento e de vários minerais industriais.

Os moinhos de bolas existem em diversos tamanhos, desde unidades de laboratório, como, por exemplo, medindo 20 centímetros de diâmetro, até moinhos industriais de alta capacidade, com diâmetros que podem atualmente chegar a 8 metros. Os moinhos de bolas são fabricados em uma ampla faixa de razões comprimento/diâmetro, que pode ser escolhida em função da granulometria desejada do produto.

2.4.1 Aspectos construtivos dos moinhos de bolas

Estruturalmente, os moinhos de bolas são constituídos por uma carcaça cilíndrica orientada com seu eixo na horizontal, revestimentos que protegem a parte interna do moinho, alimentador, tampas chamadas *trunnions* com dispositivos de descarga, motor para seu acionamento e corpos moedores no formato de bolas.

A carcaça é feita usualmente de chapa de aço-carbono e furada para o encaixe de parafusos com a finalidade de fixar o revestimento, sendo projetada para suportar impacto e carga pesada. A espessura da chapa varia de 1/100 a 1/75 do diâmetro do moinho, dependendo do comprimento (Beraldo, 1987). É normalmente fabricada em uma só peça, existindo a possibilidade de ser fabricada em duas peças unidas por meio de um flange.

Os revestimentos consistem em um material fixado no interior da carcaça do moinho, o qual deve ser substituído após desgastado. Os objetivos da sua utilização são: proteger as paredes internas do moinho contra o desgaste, suportar os impactos principalmente das bolas e reduzir o escorregamento da carga e corpos moedores em relação à carcaça do moinho e, assim, promover movimentos favoráveis à cominuição. Este último é realizado por frisos existentes nas extremidades do moinho de bolas, denominados *lifters*, os quais têm como finalidade levantar a carga com a rotação do moinho. Estes atuam em conjunto com o revestimento, aumentando sua vida útil e evitando o deslizamento excessivo, o qual irá consumir energia desnecessariamente. Eles podem

ser manufaturados em ferro fundido ligado com níquel, outros materiais resistentes ao desgaste e borracha. A forma e as dimensões dos *lifters* controlam a ação de queda dos corpos moedores (Durman, 1988).

Dois tipos diferentes de descarga são empregados em moinho de bolas: descarga por grelha (diafragma) ou descarga por transbordamento (*overflow*). Aqueles com descarga de diafragma possuem uma grelha entre o corpo cilíndrico do moinho e o *trunnion*, que permite a passagem da carga de minério e prevenindo a descarga das bolas. Esta descarga é composta de um dispositivo de elevação da polpa no compartimento posterior à grelha que permite a saída de polpa em um nível baixo. Assim, esse tipo de moinho é recomendado quando a alimentação é grosseira. A descarga por *overflow* consiste em um orifício de saída que é mais largo do que sua entrada. Isto gera um gradiente hidráulico que conduz a polpa através do moinho. O tempo de permanência do material é maior do que no caso de moinho com descarga por grelha.

O moinho de *overflow* é mais simples de operar e é utilizado na maioria dos moinhos de bolas em operação na indústria, especialmente aqueles usados na moagem fina e remoagem. Por outro lado, o moinho de diafragma tem sua utilização mais limitada pela ocorrência de entupimentos que provocam muitas paralisações. O consumo de energia é dito por volta de 15% menor do que um moinho com descarga de diafragma do mesmo tamanho, embora a eficiência de moagem dos dois moinhos seja, aproximadamente, a mesma (Lewis et al., 1976).

Os corpos moedores usados nos moinhos de bolas correspondem a esferas fabricadas em aço forjado ou laminado, ligas de aço ou liga de aço fundida (Sailors, 1989). O seu consumo varia tipicamente entre 0,1 até 1 kg/t de minério, dependendo da dureza do minério, grau de moagem e da qualidade do corpo moedor. O consumo médio pode representar uma percentagem muito elevada, às vezes até 40%, do custo total de moagem. Os tamanhos ótimos desses corpos são muitas vezes determinados por método de tentativa e erro, sendo que a moagem primária geralmente exige uma carga classificada de bolas de 5-10 cm de diâmetro, enquanto a moagem secundária requer diâmetros de 2-5 cm (Wills, 2006).

A velocidade com a qual um moinho gira é importante, pois determina a qualidade do produto e a intensidade de desgaste dos revestimentos da carcaça. Por exemplo, um conhecimento prático das trajetórias seguidas pelas bolas de aço em um moinho determina a velocidade que este deve ser movimentado, de forma que as bolas descendentes devem cair sobre a carga, e não sobre o revestimento, o que poderia levar a um desgaste muito acelerado do revestimento. A maior parte da energia cinética da carga é dissipada na forma de calor, ruído e outras perdas e, na verdade, apenas uma pequena fração é efetivamente usada na quebra das partículas.

Os corpos moedores devem atingir certa altura e, para isso, acompanham o movimento de rotação juntamente com a carcaça, seguindo uma trajetória circular. Durante a sua queda, os corpos moedores se desprendem da parede e seguem uma trajetória parabólica, conforme é ilustrado na Figura 2.3.

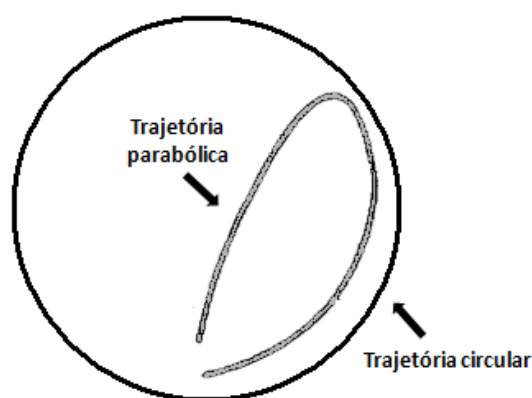


Figura 2.3 – Trajetórias dos corpos moedores em um moinho de bolas (Modificado de Wills, 2006)

Podem ser identificados três regimes de movimento de corpos moedores, dependendo da sua velocidade de rotação (Figura 2.4). Em velocidades relativamente baixas ou com revestimentos lisos, os corpos moedores tendem a rolar uns sobre os outros e permanecer na parte inferior do moinho. Este movimento é chamado de cascata e se caracteriza pela moagem essencialmente através do mecanismo de abrasão e choques de baixa magnitude, gerando partículas mais finas. O movimento de catarata é obtido a

velocidades mais altas, nas quais as bolas caem diretamente sobre a carga e produzem intensa moagem por impacto, ou seja, estilhaçamento das partículas. Nessas condições, um produto final mais grosseiro é obtido. O último movimento ocorre quando a força centrífuga é maior do que a força da gravidade, de maneira que os corpos moedores permaneçam aderidos à carcaça do moinho. O movimento centrífugo ocorre somente quando o moinho opera acima da velocidade crítica. Visto os três regimes de movimento da carga moedora, percebe-se que no movimento de catarata é onde ocorre a grande parte da quebra de partículas. É por esta razão que os moinhos operam preferencialmente a velocidades de 70-80% da velocidade crítica (Wills, 2006). Assim, os moinhos de bolas são movimentados em velocidades mais altas possíveis sem que ocorra a centrifugação. A velocidade mais elevada muitas vezes é usada para aumentar a intensidade do movimento de catarata a fim de quebrar minérios de alimentações contendo partículas tenazes e grosseiras. Por outro lado, se a velocidade é alta o desgaste do revestimento e dos corpos moedores também tende a ser mais elevado.

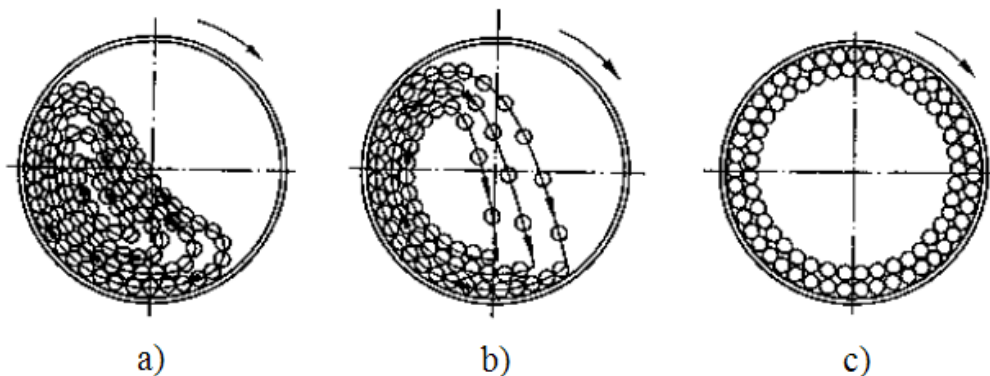


Figura 2.4 – Diferentes movimentos dos corpos moedores a) Cascata b) Catarata c) Centrífugo

A condição de velocidade crítica do moinho ocorre quando o corpo moedor abandona a sua trajetória circular no ponto mais alto vertical. Ela pode ser expressa pela equação (Austin e Concha, 1993):

$$N_c = \frac{42,2}{\sqrt{D-d}} \quad (Eq. 1)$$

sendo N_c a velocidade crítica em RPM, D o diâmetro do moinho em metros e d o diâmetro máximo das bolas.

O volume da carga de bolas ocupa por volta de 30-40% do volume interno do moinho, e aproximadamente 40% desse espaço permanece vazio, sendo posteriormente preenchido com minério. O enchimento parcial do moinho pelos corpos moedores é um importante parâmetro de operação, o qual é usualmente conhecido como grau de enchimento. O grau de enchimento do moinho (J) é a fração do volume interno ocupado pelos corpos moedores, incluindo os espaços vazios entre os mesmos, sendo dado por:

$$J = \frac{V_{cm}}{V_m \times (1 - f_p)} \quad (Eq. 2)$$

na qual J é o grau de enchimento, V_{cm} é o volume dos corpos moedores, V_m é o volume do moinho e f_p é a porosidade do leito formado pelos corpos moedores.

Similarmente, a carga do material de um moinho (f_c) é expressa como a fração do volume do moinho ocupado pelo material.

$$f_c = \frac{V_{mat}}{V_m \times (1 - f_p)} \quad (Eq. 3)$$

sendo V_{mat} o volume do material a ser cominuído no moinho.

Outro parâmetro muito importante é o preenchimento de vazios (U), o qual expressa a fração de espaços vazios entre as bolas ocupada pelas partículas (Austin e Concha, 1993):

$$U = \frac{f_c}{f_p \times J} \quad (Eq. 4)$$

2.4.2 Mecanismos de fragmentação que ocorrem no moinho de bolas

Para que uma partícula seja fraturada é necessário que seja submetida a uma força que exceda sua resistência. A forma pela qual a partícula fratura depende de suas características intrínsecas, bem como do modo como a força é aplicada. O processo de fragmentação pode ser entendido como o resultado da propagação de trincas quando partículas são submetidas a esforços mecânicos. Esses podem ser classificados como normais (compressão e tração) ou tangenciais (cisalhamento).

Os diferentes fenômenos de fragmentação e diferentes distribuições de tamanhos dos fragmentos são gerados a partir da aplicação de esforços de diferentes magnitudes e tipos. Há três tipos principais de mecanismos de fragmentação que podem ocorrer no interior de um moinho de bolas, sendo eles (King, 2001):

- Abrasão ou lascamento

A abrasão ocorre normalmente quando o esforço normal não é grande o suficiente para provocar ruptura em toda a partícula ou quando o esforço incidente é de cisalhamento na superfície da partícula. Isso geralmente ocorre em moinhos autógenos onde partículas de grandes dimensões estão presentes para atuar como corpos moedores.

Neste tipo de mecanismo, há concentração local de esforços, que provoca o aparecimento de pequenas fraturas, com o surgimento de um grande número de partículas finas junto à partícula original, como pode ser observado na Figura 2.5. O resultado é uma redução de tamanhos muito limitada, na qual a partícula mãe dificilmente muda de tamanho. Neste caso a partícula mãe não é destruída, sofrendo, no máximo, passagem para a classe de tamanho seguinte. A abrasão é efetuada principalmente pelo atrito entre as partículas ou de bolas com as partículas. A distribuição de tamanho de partículas resultante aparece como um pico distinto em tamanhos pequenos. Este pico é bem separado do pico gerado pelas partículas mãe residuais que se distribuem em uma estreita faixa de tamanhos logo abaixo do tamanho da partícula mãe.

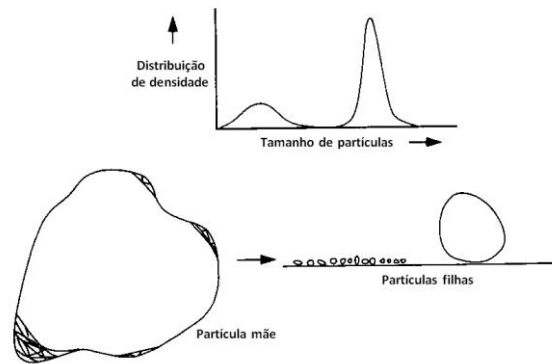


Figura 2.5 – Abrasão ou lascamento produzindo fragmentos com uma distribuição de tamanho muito estreita (modificado de King, 2001)

- Clivagem

O mecanismo de clivagem ocorre quando a intensidade de aplicação de energia é baixa, de maneira que são formados diversos fragmentos relativamente grossos, bem como partículas finas originadas da região próxima aos pontos de aplicação dos esforços. Quando o sólido que recebe um carregamento baixo apresenta algumas superfícies preferenciais ao longo das quais a fratura pode ocorrer, tem-se a clivagem. A distribuição dos tamanhos das partículas do produto é relativamente estreita, e frequentemente bimodal, conforme ilustrado na Figura 2.6.

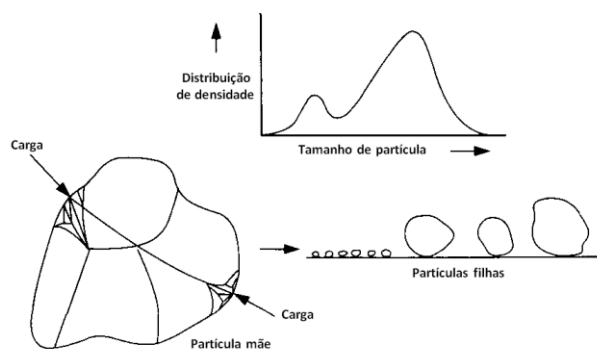


Figura 2.6 – Fratura por clivagem quando a taxa de carregamento é baixa (modificado de King, 2001)

- Estilhaçamento

Este mecanismo de fratura é induzido pela aplicação rápida de esforços de compressão e caracterizado por elevadas taxas de aplicação de energia. Nesse caso tem-se intensa fragmentação da partícula original, a que resulta em um amplo espectro de tamanhos de fragmentos, como é ilustrado na Figura 2.7. Na realidade o processo de estilhaçamento consiste de uma série de etapas em que a partícula mãe é fraturada e este é imediatamente seguido por uma sequencia de fraturas de gerações sucessivas das partículas filhas, até que toda a energia disponível para a fratura seja dissipada (Tavares, 2005). Essas fraturas sucessivas ocorrem tão rapidamente (na ordem de alguns milésimos de segundos), que na escala macroscópica de tempo elas parecem representar um único evento. Estilhaçamento é o modo mais comum de fratura que ocorre nos moinhos industriais de barras e de bolas.

Estes dois últimos mecanismos, clivagem e estilhaçamento, dão origem a dois processos, o de desaparecimento, que é a fratura de partículas grandes; e o de aparecimento, que é o surgimento de, pelo menos, duas partículas menores.

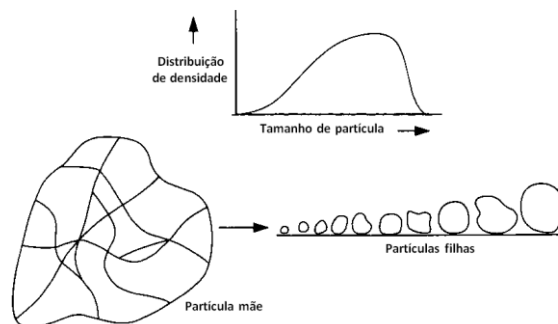


Figura 2.7 - Mecanismo de estilhaçamento produzindo uma ampla faixa de fragmentos (modificado de King, 2001)

2.5 Modelagem Matemática

Muitos esforços têm sido realizados desde o século 19 no sentido de descrever quantitativamente o que ocorre no interior de moinhos tubulares, sendo alguns dos principais métodos usados na atualidade apresentados a seguir.

2.5.1 Modelo Empírico de Bond

Devido ao alto consumo energético dos processos de cominuição, diversos estudos têm sido realizados desde o século 19 com o objetivo de elucidar a relação entre a energia consumida e o grau de redução de tamanho. A equação 5 mostra uma expressão geral que descreve essa relação (King, 2001):

$$\frac{dE}{dx} = -K x^{-n} \quad (Eq. 5)$$

na qual dE é a energia necessária para produzir uma redução de tamanho dx , K é uma constante e x é o tamanho de partícula. A partir desta equação foram postuladas as chamadas “leis da cominuição”, tendo várias soluções sido propostas na literatura, dentre elas aquela proposta por Fred Bond em 1952 (Bond, 1952). Nesta lei foi considerado que o trabalho envolvido na cominuição era inversamente proporcional à raiz quadrada da abertura de peneira pela qual passa 80% do material. A equação diferencial dada pela Equação 5 foi integrada usando a condição inicial $E=0$ para $x_p = x_A$ e $n=1,5$, transformando-se na equação:

$$E = 2K \left(\frac{1}{\sqrt{x_p}} - \frac{1}{\sqrt{x_A}} \right) \quad (Eq. 6)$$

sendo x_p e x_A os tamanhos de partícula representativos do produto e da alimentação, respectivamente. Uma condição de referência é imposta nesta equação, ou seja, que a redução hipotética de uma tonelada de material com uma granulometria muito grossa (teoricamente infinita) até 80% passante do material tenha um tamanho inferior a 100 μm . Esta energia de referência é denominada Índice de Trabalho ou *Work Index* (Wi), que permite reescrever a equação 6 como:

$$E = Wi \left(\frac{10}{\sqrt{x_P}} - \frac{10}{\sqrt{x_A}} \right) \quad (Eq. 7)$$

O índice de trabalho é o parâmetro que depende da resistência do material à cominuição, sendo numericamente expresso em kWh/t. Assim, para determinar este parâmetro é realizado um teste padronizado em moinho de bolas, que visa simular, por meio da operação em batelada, a operação contínua de um moinho em circuito fechado com um classificador. Este teste padronizado é descrito em maior detalhe no capítulo 3.

Além de ser usado para prever o consumo energético, o Wi também é usado no escalonamento de moinhos de dimensões maiores e condições diferentes às do ensaio padrão a partir do ajuste da equação de energia específica com o auxílio de fatores de correção.

2.5.2 Modelo do Balanço Populacional

O modelo do balanço populacional para moinhos leva em conta o processo sobre as populações de partículas, considerando a moagem como um processo cinético semelhante a uma reação química de primeira ordem. O modelo é normalmente baseado na hipótese de que o moinho é um reator perfeitamente misturado, no qual os reagentes são as partículas alimentadas, ou seja, com a granulometria maior, e o produto é o material cominuído.

Para a modelagem de moinhos de bolas em batelada pelo método do balanço populacional, o modelo pode ser descrito como (Austin et al., 1984):

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = -s_i(t)w_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}s_j(t)w_j(t) \quad (Eq. 8)$$

sendo w_i a fração mássica de partículas na classe de tamanho i , s a função seleção e b a função distribuição de quebra.

2.5.2.1 Função Seleção ou Taxa Específica de quebra

Para que o modelo do balanço populacional da moagem possa ser utilizado, é necessária a caracterização das propriedades de quebra dos materiais a partir da determinação das funções quebra e seleção. Foram desenvolvidas algumas técnicas com o propósito de descrever quantitativamente os resultados experimentais da moagem utilizando o modelo do balanço populacional da moagem descontínua (Equação 9). Por convenção, considera-se $i=1$ como a primeira classe de tamanho, ou seja, para o intervalo mais grosso da alimentação. Assim, reescrevendo a equação para esta classe de tamanho tem-se:

$$\frac{dw_1(t)}{dt} = -s_1 w_1(t) \quad (Eq. 9)$$

na qual s_1 é a taxa específica de fratura (t^{-1}) e w_1 é a fração mássica de partículas na classe de tamanho 1. Esta equação resulta em um comportamento cinético de desaparecimento de primeira ordem e sua solução para estimar a taxa específica de quebra foi proposta em Austin et al. (1984), integrando a equação 9 com s_1 constante e condição inicial $w_1=w_1(0)$.

$$w_1(t) = w_1(0)\exp(-s_1 t) \quad (Eq. 10)$$

ou

$$\log \frac{w_1(t)}{w_1(0)} = \frac{s_1 t}{2,3} \quad (Eq. 11)$$

A Figura 2.8 ilustra a quebra de primeira ordem, indicada pela linha reta e com declividade $-s_1$. A razão $w_1(t) / w_1(0)$ representa a fração remanescente de partículas na classe de tamanho 1.

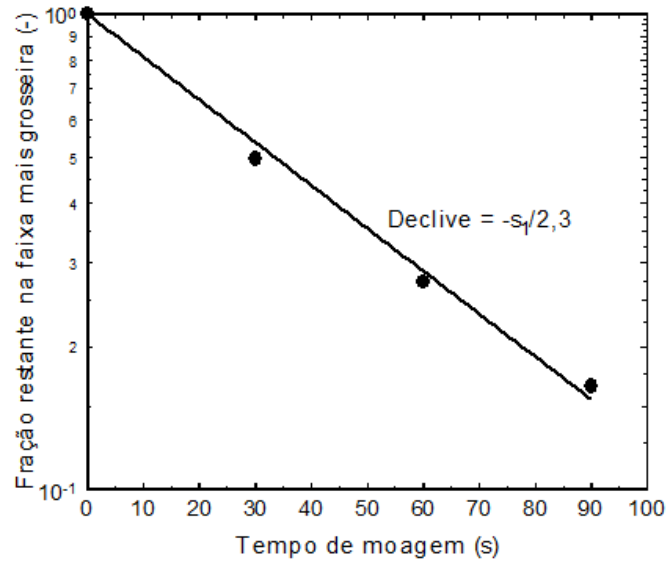


Figura 2.8 – Proporção de partículas remanescentes ao longo do tempo e cinética de primeira ordem (Tavares, 2005)

Portanto, a função seleção quantifica a fração de material na classe de tamanho i que é quebrada por unidade de tempo (taxa específica de quebra). Ela depende do material a ser cominuído e está fortemente ligada às condições de moagem às quais o material é submetido. Alguns dos fatores que influenciam a taxa específica de quebra das partículas em um moinho são o diâmetro, a velocidade de rotação e o grau de enchimento do moinho, assim como o tamanho dos corpos moedores (King, 2001).

A função seleção proposta por Austin et al. (1984) representa a variação da taxa específica de quebra com o tamanho de partícula,

$$S_i = \frac{s_1 x_i^\alpha}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu}\right)^\lambda} \quad (Eq. 12)$$

sendo x_i o tamanho da partícula (mm), S_i a taxa específica de quebra (min⁻¹) e s_1 , α , μ e λ parâmetros do modelo que dependem das condições da moagem e das características do material que está sendo alimentado no moinho. A Figura 2.9 ilustra graficamente o

comportamento da função seleção, mostrando que s_i tem seu valor máximo em um tamanho de partícula ligeiramente menor do que μ , o qual geralmente fixa a posição de máxima taxa de quebra. A taxa se torna máxima neste ponto, pois ele representa a dimensão acima da qual os impactos promovidos pelos corpos moedores não são mais suficientes intensos para a redução de tamanho da partícula, fazendo com que a taxa de quebra decresça com o aumento do tamanho de partícula (Tavares e King, 1998).

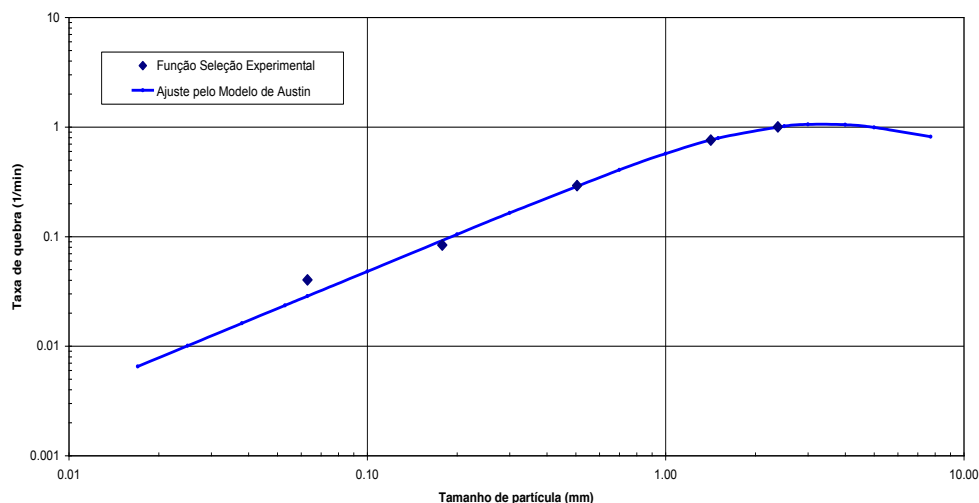


Figura 2.9 – Função seleção em função do tamanho de partícula (Silva, 2007)

2.5.2.2 Função Distribuição de Quebra

O material fragmentado proveniente de um único evento de quebra (quebra primária) a partir da classe de tamanho i se distribui nas classes de tamanho mais finas de acordo com a função quebra. É importante ressaltar que esta função não corresponde à granulometria final do produto, pois as partículas são geradas por eventos sucessivos de quebra dos fragmentos. Dessa forma, uma maneira frequentemente usada na estimação da função quebra é um ensaio de curta duração de moagem. A função quebra é de extrema relevância na descrição quantitativa da cominuição de materiais e é, frequentemente, descrita por (King, 2001):

$$B_{ij} = \Phi \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^\gamma + (1 - \Phi) \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^\beta \quad (Eq. 13)$$

sendo Φ , β e γ parâmetros do modelo, dependentes do material, x_i e x_j os tamanhos de partículas resultantes da fratura e o tamanho original da partícula, respectivamente.

Este é um modelo empírico baseado no pressuposto que os fragmentos são compostos por duas populações de partículas, que podem ser somadas usando uma função de ponderação apropriada que depende exclusivamente da razão entre o tamanho de fragmento e tamanho da partícula original, ou seja, independe do tamanho máximo de partícula (normalizável em relação ao tamanho de partícula inicial). O primeiro termo da equação fornece a contribuição das partículas finas geradas pela aplicação de esforços compressivos, enquanto que o segundo termo é responsável pela contribuição de partículas grosseiras geradas pelo surgimento de esforços de tração (Tavares, 2005).

A função quebra apresentada encontra-se na forma cumulativa, fornecendo a fração em massa de partículas geradas a partir da fragmentação de partículas de tamanho x_j que possuem tamanhos menores ou iguais a x_i . Porém a convenção da função em sua forma distribuída (b_{ij}) vem sendo adotada devido à sua grande utilização no modelo do balanço populacional. A função quebra na forma distribuída é dada por $b_{ij} = B_{i-1,j} - B_{i,j}$ e $b_{jj} = 0$ (King, 2001).

2.5.2.3 Função taxa de quebra reduzida

Em um estudo sobre a cinética da moagem, Herbst e Fuerstenau (1980) observaram que a razão da taxa de quebra pela energia específica, isto é, a energia consumida por unidade de massa de material cominuído, se mantinha constante sob diversas condições de operação, incluindo velocidades do moinho, cargas de bolas e *hold up*, sendo função apenas do material. Esta função, dependente também do tamanho de partícula, foi denominada função taxa de quebra reduzida, sendo descrita pela equação:

$$\frac{s_i}{P/H_P} = S_i^E \quad (Eq. 14)$$

sendo P a potência do moinho em operação, s_i a taxa de quebra, H_P a massa da carga de minério no interior do moinho (*hold up*) e s_i^E a taxa específica de quebra para partículas da classe de tamanho i , normalmente medida em t/kWh. Desta forma, a equação da taxa de desaparecimento de primeira ordem pode ser normalizada em termos de energia:

$$\frac{dw_1(E)}{dE} = -s_1^E w_1(t) \quad (Eq. 15)$$

Este conceito de função da taxa de quebra reduzida simplificou consideravelmente as simulações em moinhos tubulares, visto que este seria um parâmetro único para o mineral, sendo dependente apenas da energia gasta durante a moagem.

2.5.3 Modelagem mecânica do moinho de bolas

O modelo do balanço populacional tem apresentado grande utilidade na modelagem de equipamentos utilizados na cominuição. Este modelo permite a dissociação das contribuições da função seleção, função quebra e transporte para descrever quantitativamente a redução de tamanho, e também o escalonamento, como por exemplo, de moinhos de bolas a partir de informações obtidas em laboratório. Porém, este modelo apresentou diversas limitações, como a aplicação limitada como modelo preditivo, problemas na validação das suposições do modelo e as funções determinadas para um particular tipo de equipamento não pode ser usada para outro equipamento, uma vez que existe dependência do efeito do material a ser cominuído e do processo na função que descreve a quebra. Estas limitações levaram gradativamente ao desenvolvimento de um modelo em microescala da moagem, o qual é baseado na combinação das características do material às características do ambiente de quebra, sendo possível de ser utilizado em diferentes equipamentos, devido à capacidade de desacoplamento das características citadas acima. Maiores detalhes sobre o modelo podem ser encontrados em outras publicações (Carvalho e Tavares, 2009; Carvalho, 2009).

2.6 Moagem de materiais multicomponentes

É amplamente reconhecido que a maioria das rochas, da forma como elas são encontradas na natureza, são altamente heterogêneas em sua composição mineral e em suas propriedades físicas. Minérios são misturas de dois ou mais minerais, cujas características mecânicas podem ser muito distintas. Além disso, o minério pode ser proveniente de diferentes regiões da jazida, apresentando variações em sua composição e estrutura. Essas variações no minério podem resultar em variações significativas na moabilidade da alimentação de um moinho. Na cominuição de materiais heterogêneos, seja com o objetivo de atingir a liberação do mineral de interesse, seja com o objetivo de aumentar a área superficial específica, um entendimento de como diferentes constituintes comportam-se e como eles interagem uns com os outros pode ser útil não apenas para entendimento da ação da moagem, mas também para a modelagem e otimização da operação.

2.6.1 Estudos da moagem de misturas da indústria cimenteira

A cominuição com a finalidade de aumentar a área superficial específica é muito usada na indústria cimenteira, mais especificamente na moagem de clínquer, escória, calcário, gesso e outros, em moinhos de bolas. Estes são os principais componentes que precisam ser cominuídos até uma determinada granulometria para a produção do cimento. Geralmente eles são alimentados no moinho na forma de uma mistura, mas há também casos nos quais a moagem dos componentes é realizada separadamente. Neste caso o processo recebe uma nova etapa, a mistura, havendo a necessidade da inserção de mais um equipamento no processo. Na moagem de uma mistura, além de ser necessária uma única operação, uma mistura excelente é praticamente assegurada. Apesar dessas vantagens, esse tipo de moagem, denominada “intermoagem” é ainda relativamente pouco entendido, especialmente quando a alimentação é composta por materiais de moabilidades muito distintas.

Por exemplo, a intermoagem de clínquer e calcário, os principais constituintes de vários tipos de cimento Portland, é de grande interesse, visto que estes materiais apresentam moabilidades diferentes e que a distribuição granulométrica de cada componente exerce uma influência significativa nas propriedades do cimento. Por isso, faz-se necessário entender o efeito da moagem de mistura na granulometria do produto. Com a finalidade de estudar a interferência do teor de calcário e da distribuição do tamanho de partículas final da mistura, Tsivilis et al. (1999) realizaram ensaios de moagem em batelada de quatro misturas clínquer e calcário em proporções de 10 a 40% de calcário nos tempos de moagem 35, 50, 65 e 85 minutos em um moinho de bolas em escala piloto. Após os ensaios de moagem, as distribuições granulométricas do clínquer, calcário e suas misturas foram determinadas, sendo alguns resultados apresentados na forma de gráficos.

O calcário foi concentrado em frações finas, enquanto o clínquer foi concentrado em frações grosseiras, tendo em vista que o calcário apresenta menor tenacidade. A Figura 2.10 e a Figura 2.11 apresentam os dados das misturas 10% calcário no tempo de moagem 35 minutos e 20% calcário no tempo de 65 minutos, respectivamente. É válido ressaltar que nos ensaios de misturas de outras proporções e outros tempos de moagem foi verificado este mesmo efeito.

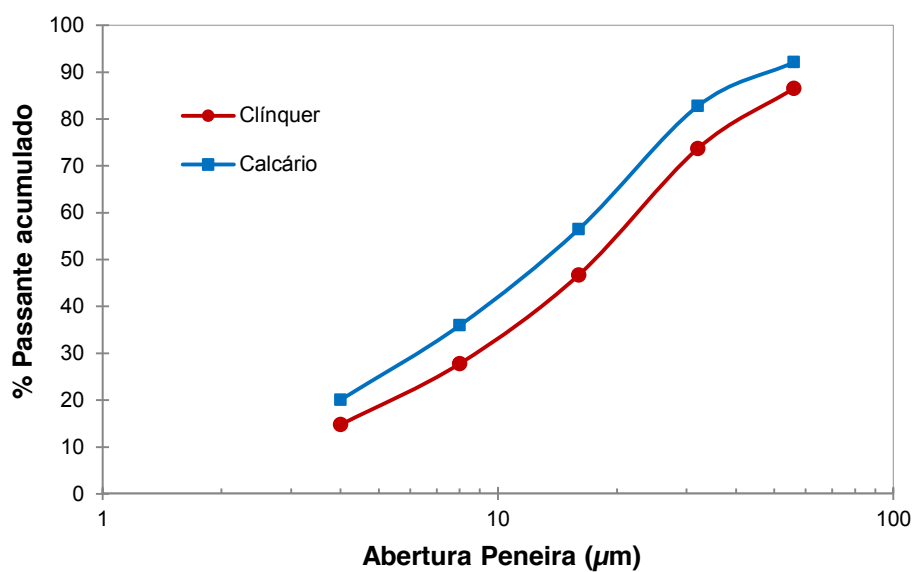


Figura 2.10 – Análise granulométrica dos componentes clínquer e calcário envolvidos na mistura 10% calcário com tempo de moagem por 35 minutos

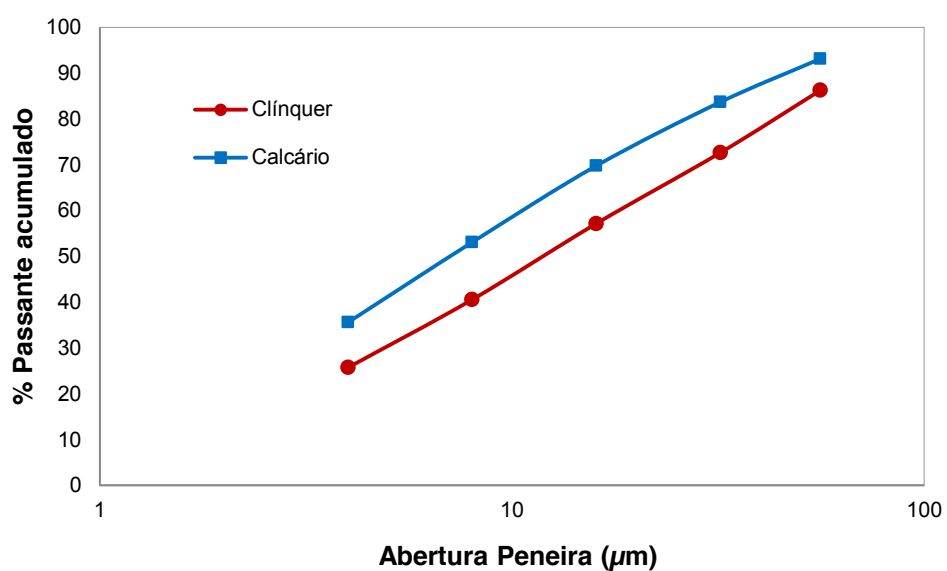


Figura 2.11 – Análise granulométrica dos componentes clínquer e calcário envolvidos na mistura 20% calcário com tempo de moagem por 65 minutos

Para que pudesse ser avaliado o modo de quebra do clínquer e do calcário em misturas de diferentes proporções, foram utilizados os dados da distribuição granulométrica do tempo de moagem igual a 65 minutos. Constatou-se que a distribuição granulométrica do calcário e do clínquer foi mais fina quando a proporção de calcário na mistura foi mais alta (Figura 2.12 e Figura 2.13). Contudo, um fenômeno não esperado ocorreu quando o teor de calcário permaneceu acima de 30%: a moagem de ambos os componentes foi inibida. A distribuição granulométrica da mistura contendo 40% de calcário permaneceu menos concentrada na fração mais fina ou com a distribuição semelhante quando comparado com aquela contendo 30% de calcário, conforme mostra o exemplo do tempo de moagem de 35 minutos e de 65 minutos das Figura 2.14 e Figura 2.15, respectivamente.

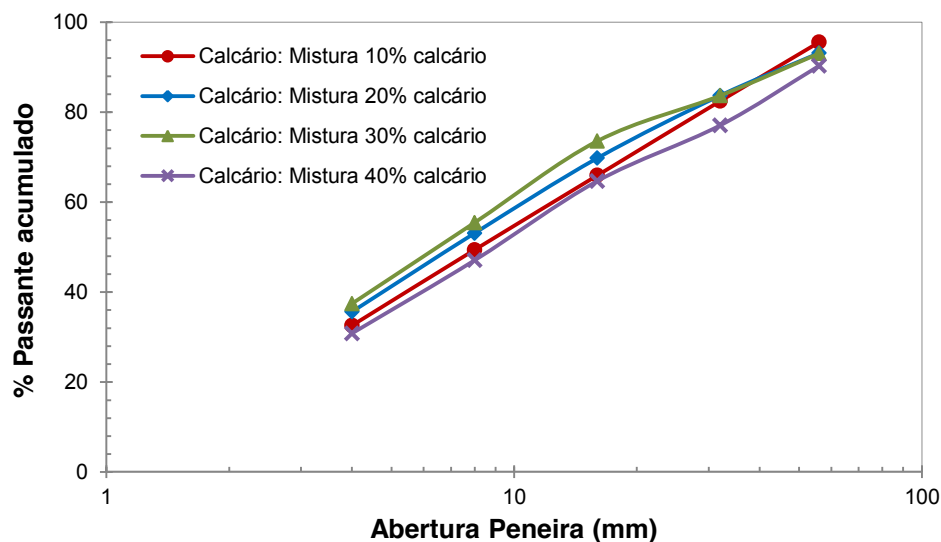


Figura 2.12 - Comparação da distribuição granulométrica do calcário quando moído em misturas de diferentes proporções e tempo de moagem igual a 65 minutos

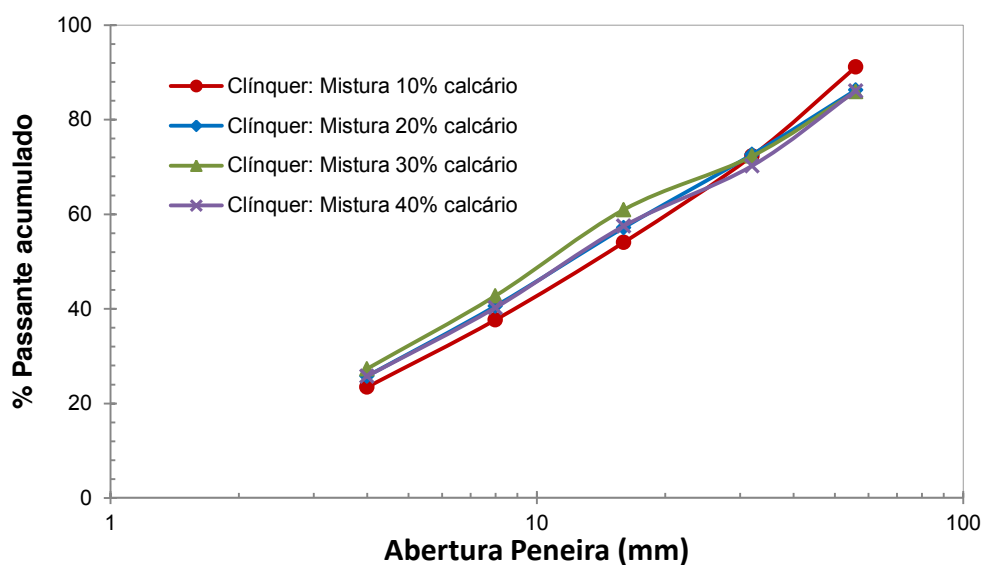


Figura 2.13 – Comparação da distribuição granulométrica do clínquer quando moído em misturas de diferentes proporções e tempo de moagem igual a 65 minutos

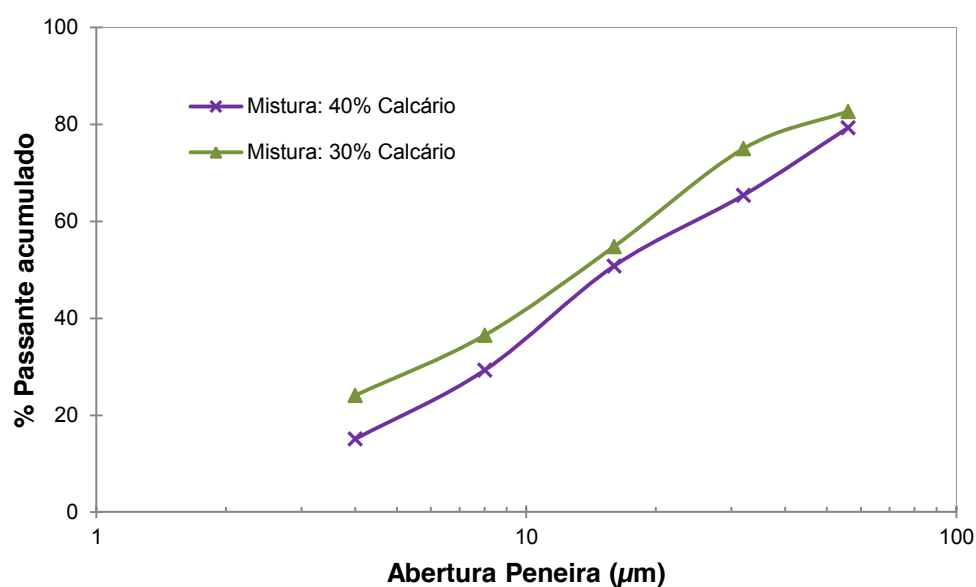


Figura 2.14 – Comparação da distribuição granulométrica da mistura calcário e clínquer nas proporções de 30% e 40% calcário no tempo de moagem igual a 35 minutos

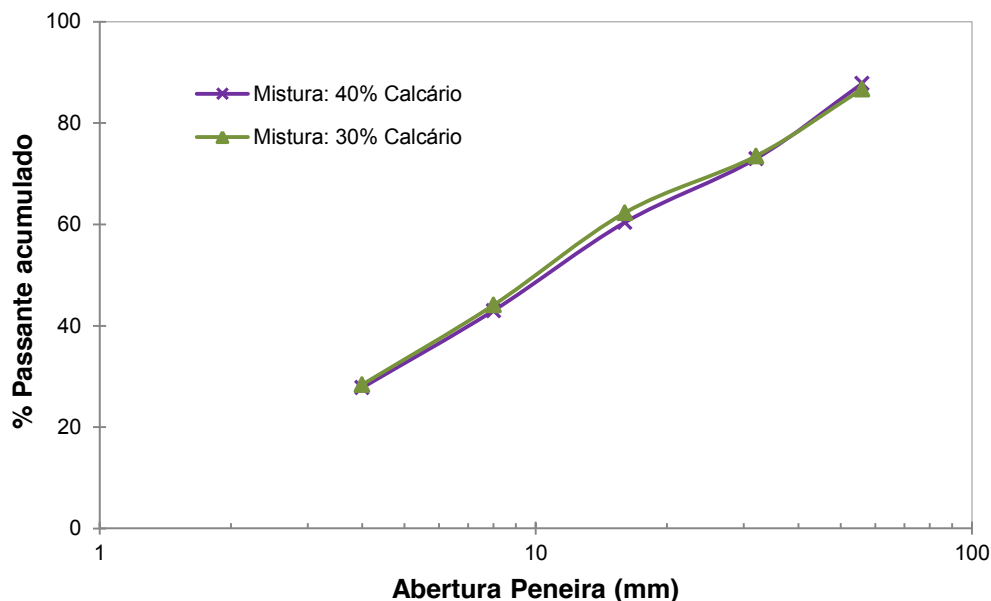


Figura 2.15 – Comparação da distribuição granulométrica da mistura calcário e clínquer nas proporções de 30% e 40% calcário no tempo de moagem igual a 65 minutos

Contudo, os valores da área superficial específica não demonstraram esta inibição de moagem. Uma explicação plausível seria a existência de uma grande quantidade de partículas com tamanho menores que 4 μm nas amostras contendo 40% de calcário, as quais não foram classificadas em tamanhos mais finos. Outra observação realizada foi a da influência do tempo de moagem na granulometria dos componentes, ou seja, o aumento do tempo de moagem e, conseqüentemente, maior redução de tamanho da mistura, interfere na granulometria do clínquer, porém em um grau significativamente menor do que na granulometria do calcário. Este fato pode ser visto ao analisar a fração de tamanho menor do que 4 μm dos ensaios da mistura 20% calcário, conforme representado na Figura 2.16.

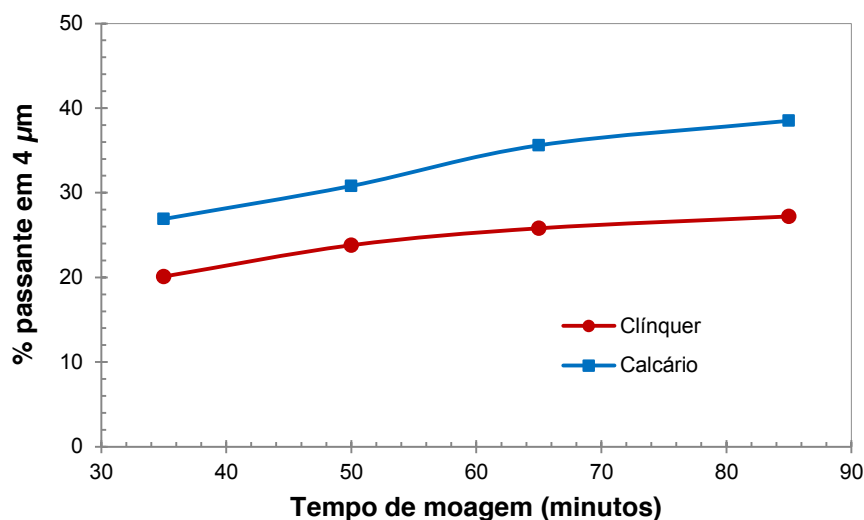


Figura 2.16 – Percentagem passante de clínquer e calcário em 4 µm nos diferentes tempos de moagem

Os resultados de Tsivilis et al. (1999) mostraram que a distribuição de tamanho das partículas do cimento Portland depende tanto do teor de calcário na mistura quanto do tempo de moagem. Porém, nesse trabalho não foi identificada a causa do comportamento de retardo da moagem na mistura contendo 40% de calcário e nem o que ocorre em adições de calcário maiores do que as estudadas, pois não foram realizados experimentos nessas condições. Uma explicação plausível para este fato pode ser a absorção preferencial da energia do moinho pelo calcário quando este surge em maior proporção na mistura, uma vez que ele é o componente mais macio. Infelizmente, a validade dessa hipótese não pode ser verificada, uma vez que os experimentos não foram suficientes para tal análise. Por fim, é ainda importante destacar que os ensaios foram realizados de forma descontínua, enquanto na indústria a moagem é realizada de forma contínua em circuito fechado.

Outra mistura muito importante na indústria cimenteira é aquela de clínquer e escória. A fabricação do cimento do tipo BFC (*Blast Furnace Slag Cement*) tem sido tradicionalmente realizada pela intermoagem do clínquer e escória em moinhos tubulares. Porém, com o surgimento do conceito da moagem em separado, seguida da mistura dos componentes, as pesquisas voltadas para esta área receberam destaque.

Assim, em anos recentes têm sido dado destaque para estudos com a finalidade de comparar estes dois tipos de moagem para a produção de BFC. Em um desses estudos (Öner, 2000) foram analisadas as moabilidades e as cinéticas de moagem do clínquer, escória e algumas de suas misturas. As moabilidades foram obtidas a partir dos testes de moabilidade de Bond, os quais foram conduzidos em um moinho de bolas padrão. Já a caracterização cinética envolveu a estimação das funções taxa de quebra e distribuição de quebra. Os ensaios cinéticos também foram realizados no moinho de bolas padrão de Bond com quatro frações preparadas na forma de monotamanhos compreendendo de 2,8-2 mm até 0,71-0,50 mm. As proporções das misturas utilizadas foram de 20% a 80% de escória.

Os resultados dos testes de moabilidade de Bond são apresentados na Figura 2.17. Conforme esperado, visto que a escória apresenta maior tenacidade, a moabilidade da escória é inferior à moabilidade do clínquer, ou seja, a escória é mais resistente à moagem. Um ponto interessante destacado nos resultados é a alteração da moabilidade com a quantidade de escória adicionada na mistura. A adição de escória dificulta a moagem, ou seja, diminui a moabilidade da mistura. Quando misturas de materiais com moabilidade variada são moídas, a moabilidade da mistura poderia ser presumida como sendo a média ponderada das moabilidades dos componentes. Se esse realmente fosse o caso, as moabilidades das misturas teriam sido representadas pela linha tracejada como é mostrado na Figura 2.17. No entanto, é evidente que as moabilidades das misturas apresentaram valores mais baixos do que as médias ponderadas. Este fato demonstra que a energia específica de moagem necessária para cominuir os componentes juntos é maior que a energia consumida na moagem dos componentes separados, havendo, portanto um benefício energético da sua moagem em separado.

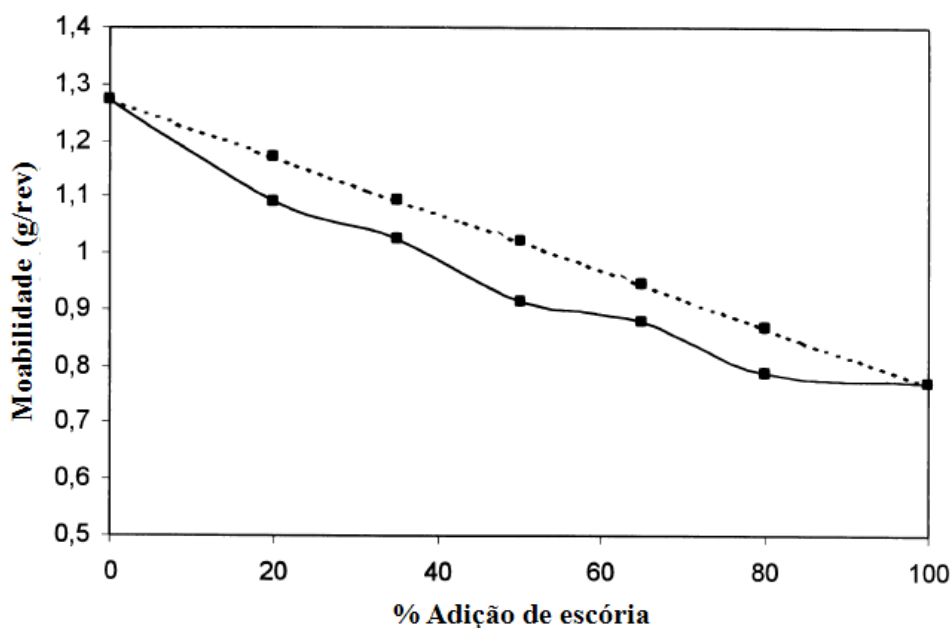


Figura 2.17 – Variação na moabilidade do clínquer, escória e suas misturas (Öner, 2000 – Reproduzida com autorização da editora)

O comportamento cinético da moagem em separado de ambos os materiais é geralmente classificado como quebra de primeira ordem, porém a moagem da mistura não resulta em quebra de primeira ordem na maioria das vezes, conforme Öner (2000) constatou em seu estudo. Este é o comportamento esperado quando dois materiais exibem independência quando intermoídos. Devido a diferentes cinéticas de moagem, a escória tende a se acumular em frações grosseiras, exibindo distribuição de tamanho mais estreita. Já o clínquer acumula-se em frações mais finas, exibindo uma distribuição de tamanhos mais ampla.

Quando os resultados da moabilidade de Bond e ensaios cinéticos são comparados, o ponto relevante é o fato do clínquer, o qual apresenta maior moabilidade de Bond, ter menor taxa específica de quebra dentro da faixa de tamanho estudada. Como não foram realizados experimentos para frações mais finas, houve a necessidade de extrapolar a curva experimental (Figura 2.18). Tal extrapolação foi feita com o uso de parâmetros da função da taxa de quebra, semelhante à descrita na seção 2.5.2.1 proposta por Austin et al. (1984). Dessa maneira, foi inferido que a escória apresentaria mais baixa taxa de quebra em tamanhos inferiores a, aproximadamente, 650 μm . Uma verificação relevante

na Figura 2.18 foi o fato das taxas de quebra das misturas estarem bem próximas da taxa de quebra do clínquer, mesmo aquela que é constituída por 50% de escória. Assim pode-se concluir que o clínquer interfere negativamente na taxa de quebra da escória.

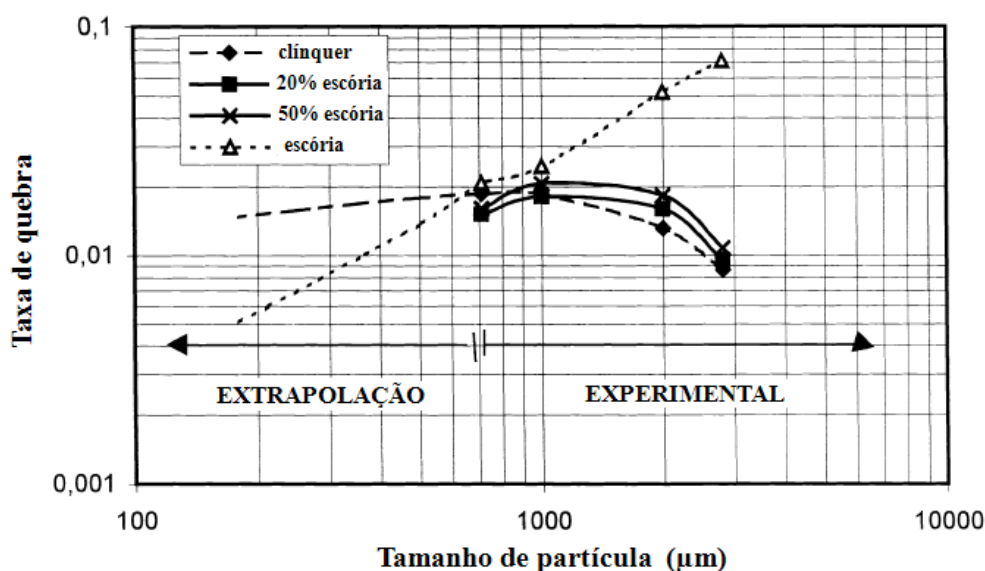


Figura 2.18 – Variação da taxa específica de quebra versus tamanho de partícula (Öner, 2000 - Reproduzida com autorização da editora)

Öner (2000) também observou que a escória no produto da intermoagem é relativamente mais grossa do que a escória na moagem isolada. Isso tem implicações práticas importantes, pois a escória mais grossa não apresentaria velocidade de reação de hidratação tão alta quanto a escória fina, de maneira que a qualidade do cimento ficaria prejudicada. Além disso, testes da moabilidade de Bond revelaram que o consumo de energia específica era menor quando a moagem era realizada separadamente. Assim, tendo em vista as observações acima, a moagem dos componentes separados deveria ter preferência para a produção de BFC.

Alternativamente, Tsivilis (1999) mostrou que a intermoagem de matérias-primas do cimento, tais como calcário e argila, demandou menos energia do que a moagem em separado. Esta afirmação se contrapõe à observação de Öner (2000), embora tenha tratado de materiais diferentes. Esta comparação indica que podem ocorrer diferentes

tipos de interações entre as partículas dependo da natureza dos diferentes componentes da mistura, e, assim, repercutir no consumo de energia.

Erdogdu (1999), ao estudar as moagens separadas e intermoagens das combinações clínquer-pozolana natural e clínquer-escória, também confirmou o que foi mencionado por Tsivilis et al. (1999). Este estudo mostrou que a quantidade de material passante nas peneiras foi maior após a moagem da mistura clínquer-pozolana natural em conjunto, o que pode ser exemplificado a partir da moagem no nível de energia de 22 kWh/t, na qual a mistura intermoída apresentou 78,6% de material menor que 90 μm , enquanto a mistura moída separadamente apresentou somente 73,5%. Isto demonstra que quando a pozolana natural e o clínquer são moídos separadamente em um mesmo nível de energia, a mistura obtida a partir dos dois materiais tem tamanhos de partículas mais grossos do que a mistura intermoída, conforme ilustrado na Figura 2.19.

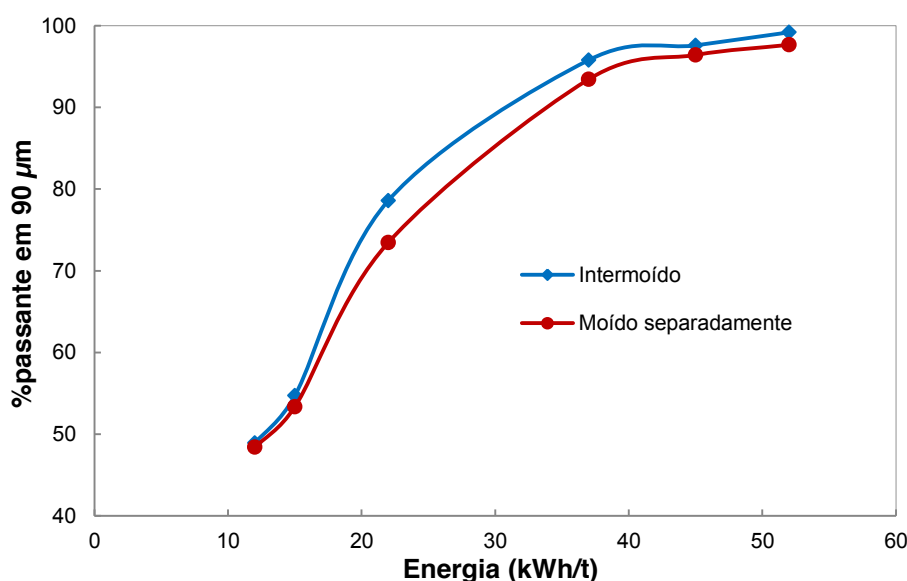


Figura 2.19 – Comparação da porcentagem de material passante em 90 μm para a mistura clínquer e pozolana natural (25%) intermoída e moída separadamente

No caso da mistura clínquer-escória, o cimento moído separadamente apresenta valores da porcentagem passante maior do que o cimento intermoído em níveis baixos de energia. Por outro lado, para níveis altos de energia de moagem, este valor passa a ser menor ou igual, conforme exemplificado na Figura 2.20. No caso da mistura clínquer-

escória, esta associação indica a vantagem da moagem separada em estágios preliminares conduzidos no primeiro compartimento do moinho, onde o produto é mais fino do que o produto da intermoagem e a desvantagem do uso da moagem separada em maiores níveis de energia, quando a granulometria resultante é mais grosseira em comparação com a intermoagem.

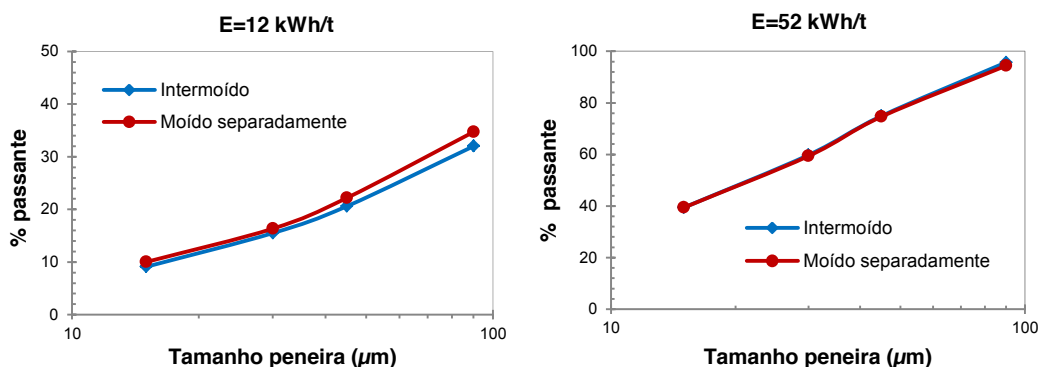


Figura 2.20 – Comparação da mistura clínquer e BFS (25%) intermoída e moída separadamente para a menor (12 kWh/t) e a maior energia (52 kWh/t) em estudo, respectivamente.

Uma análise mais detalhada da aplicação do método da moabilidade de Bond em componentes resistentes, frágeis e suas misturas pode ser encontrada no trabalho de Hosten e Avsar (1998), o qual confirmou que o índice de trabalho (W_i ou *Work index*) de uma mistura não é simplesmente a média ponderada dos índices de trabalho dos componentes, podendo até mesmo ser superior ao índice de trabalho do componente mais resistente. Isso é o que ocorre com materiais pozolânicos, como o tufo vulcânico (*trass*) e clínquer. A Figura 2.21, cujos dados experimentais mostram que o índice de trabalho é maior para as misturas do que para o componente mais resistente (clínquer), indica que a mistura requer mais energia para atingir uma mesma granulometria. É provável que a presença de partículas de tufo vulcânico relativamente macias protejam as partículas de clínquer mais difíceis de serem moídas, levando a um efeito desfavorável para a moabilidade da mistura.

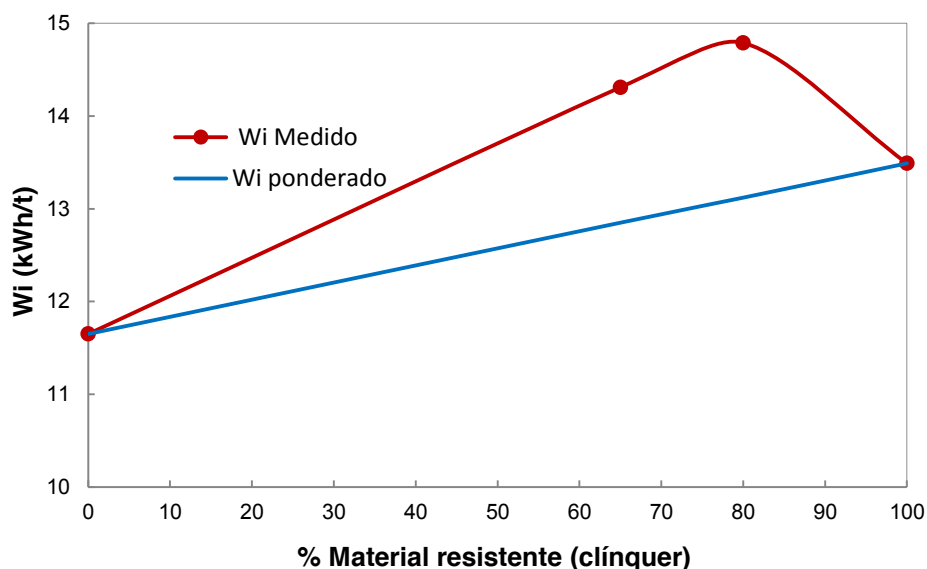


Figura 2.21 – Comparação dos resultados de Wi medido e calculado pela média ponderada para a mistura clínquer e trass (dados de Hosten e Avsar, 1998)

As distribuições de tamanho de partícula dos produtos dos ensaios de Bond são apresentadas na Tabela 2.1. Dentre as amostras estudadas, o tufo vulcânico, quando moído separadamente, produz mais partículas menores que 25 μm .

Tabela 2.1 – Distribuição de tamanhos de partículas (%) do produto do ensaio de moabilidade de Bond (modificado de Hosten e Avsar, 1998)

Abertura da peneira (μm)	Clínquer	Tufo (T)	80% C + 20% T	65% C + 35% T
74 x 45	24,8	20,2	18,2	15,8
45 x 25	59,2	51,8	68,4	64,2
-25	16,0	28,0	13,4	20,0

Para uma análise mais detalhada é necessária a comparação das moabilidades e análise das propriedades de quebra. A abordagem cinética para redução de tamanho proporciona uma compreensão dos mecanismos de moagem e interações dos diferentes componentes no moinho. Na verificação do comportamento cinético do clínquer e tufo vulcânico moídos isoladamente e de sua intermoagem em duas diferentes proporções, o clínquer apresentou taxa de quebra menor em relação ao tufo vulcânico e praticamente

igual quando moído isoladamente ou como fase dominante da mistura binária (Figura 2.22). Isto significa que os valores da taxa de quebra do clínquer foram independentes da composição da mistura. Por outro lado, a taxa de quebra do tufo vulcânico, assim como a distribuição de quebra são dependentes da composição da mistura, pois sua taxa de moagem é desacelerada à medida que a quantidade de tufo na mistura diminui, alterando também a quantidade de material de cada classe. É importante ressaltar que o clínquer não apresentou esta dependência em sua distribuição de quebra e que ambos os materiais apresentaram taxa de quebra independente do tempo. Como o tufo era o componente com a taxa de quebra mais elevada, quando ele se encontra em menor proporção na mistura a probabilidade de partículas de tufo serem capturadas pelos corpos moedores diminui.

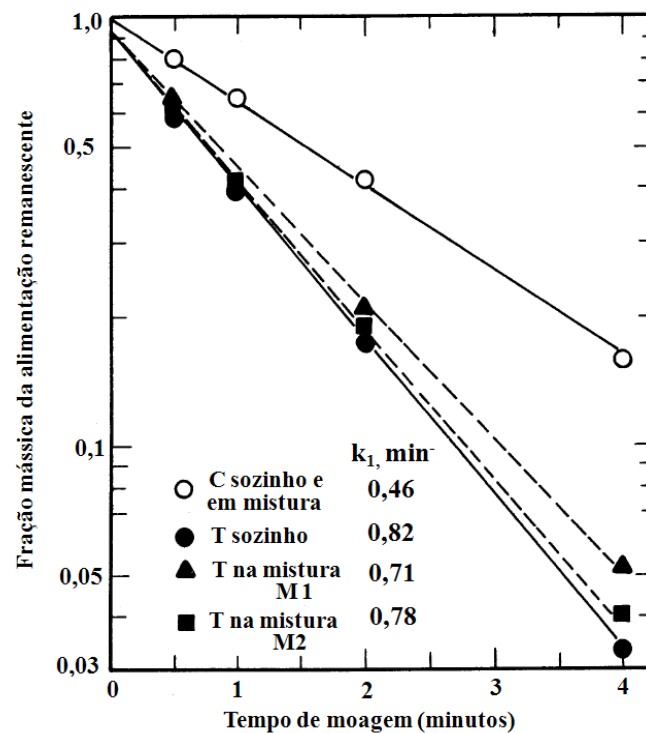


Figura 2.22 – Proporção remanescente do tamanho inicial (1,18 x 0,85 mm) na moagem de clínquer e Tufo (T) quando são moídos sozinhos ou em mistura (M1: 80% C + 20% T; M2: 65% C + 35% T) (Hosten e Avsar, 1998 - Reproduzida com autorização da editora)

A última etapa do processo de fabricação de cimento corresponde à adição de gesso com a finalidade de controlar o enrijecimento do cimento, popularmente chamado de “pega”. Iglesias et al. (1999) estudaram a influência sobre o comportamento na moagem de dois tipos de gesso com composições químicas similares, mas provenientes de diferentes localidades, de maneira que apresentam estruturas e texturas distintas:

- Gesso 1: predominância de estruturas sedimentares, fragmentos com aspecto brechado e grãos de tamanhos muito finos;
- Gesso 2: maciço, cristais de maiores tamanhos e forte clivagem.

De acordo com os resultados do índice de trabalho (W_i) apresentados na Figura 2.23, percebe-se que os valores são surpreendentes, devido ao gesso 2 apresentar um valor muito baixo de índice de trabalho, 4,0 kWh/t, em comparação ao valor de 11,5 kWh/t obtido para o gesso 1. Segundo os autores, o ponto chave para a explicação desses resultados foi o modo de ruptura que seria predominante em cada uma das amostras, se intergranular ou intragranular.

O gesso 2 apresentou maior consumo de energia do que o gesso 1 em escala industrial (Iglesias et al., 1999). O gesso é composto basicamente por sulfato de cálcio hidratado, logo a ruptura intragranular do gesso 2, o que ocorre em escala industrial devido às frações mais finas representarem grande parte da mistura, leva a uma maior carga elétrica superficial das partículas de sulfato, dando origem a um fenômeno de aderência de partículas. Esta aderência ocorre também nos corpos moedores, os quais ficam recobertos de gesso devido à formação de um filme (*coating*). Este recobrimento absorve a energia dos impactos, provocando aumento no consumo de energia.

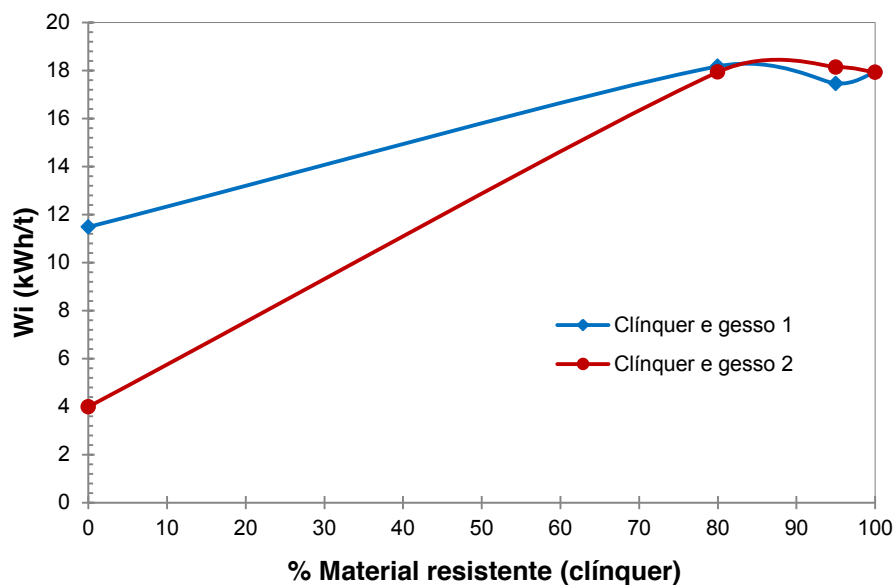


Figura 2.23 – Índices de trabalho de Bond para as amostras de clínquer, gesso e suas misturas

Este trabalho permitiu mostrar que, além da composição química, propriedades dos componentes e proporções de misturas, o que fundamentalmente teve importância nos trabalhos até aqui, diferentes características mineralógicas e textuais também podem afetar a moabilidade de misturas. Portanto, a análise deste problema requer uma relação das características físicas e mineralógicas dos materiais com os seus parâmetros de ruptura.

2.6.2 Estudo da moagem de misturas em minérios

Minérios geralmente são formados por componentes tenazes (“duros”) e macios, os quais apresentam diferentes moabilidades, taxa de quebra, distribuição de quebra e demandando diferentes consumos energéticos na sua moagem. Assim, dependendo das condições operacionais da moagem, um dos minerais que compõem a mistura pode sofrer uma moagem em excesso (*overgrinding*), que além do gasto de energia desnecessário, pode ainda levar à perda de mineral valioso no descarte da lama no processo.

Em muitas operações o Run-of Mine (ROM) é composto por vários tipos de minério que pode ter diferentes características de moagem. Muitos destes minérios multicomponentes podem ser resumidos a uma combinação de componentes resistentes e macios e a variação de sua proporção tem impactos substanciais sobre as operações na moagem, sobretudo na moagem autógena (Stange, 1996).

Venkataraman e Fuerstenau (1984) analisaram a mistura dos seguintes componentes: calcita, hematita e quartzo, e também suas misturas de forma binária. Os testes realizados validaram a cinética de desaparecimento como sendo de primeira ordem e independente do tempo, assim como mostrado anteriormente no trabalho de Hosten e Avsar (1998) (Figura 2.22) para outros componentes e misturas. Porém, neste último trabalho, um dos componentes (clínquer) apresentou independência da composição da mistura, se tratando de taxa de quebra.

Entretanto, para calcita, hematita e quartzo, as taxas de quebra de todos os componentes se mostraram dependentes do ambiente de mistura, como pode ser observado na Figura 2.24. Isto indica que existem componentes que sofrem maior interferência em sua moagem do que outros quando moídos conjuntamente. No entanto, não é claro se isso é uma característica do próprio material ou do outro material usado na mistura.

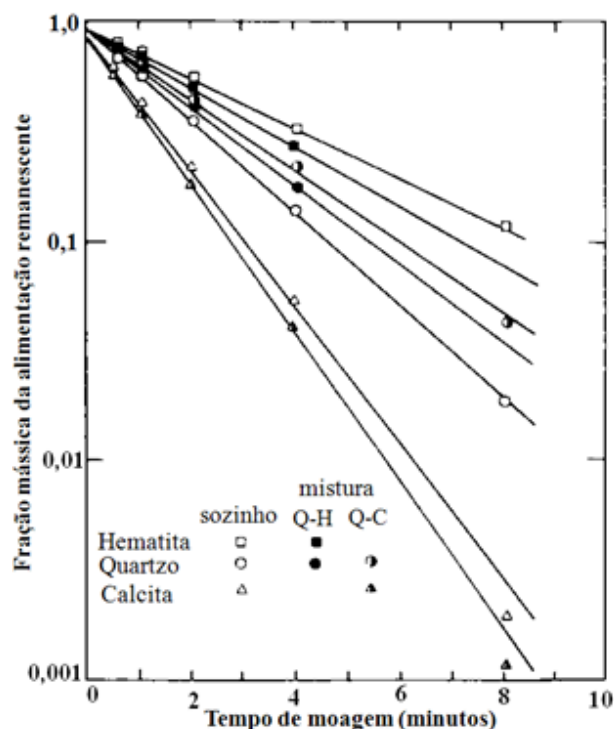


Figura 2.24 – Proporção remanescente do tamanho inicial (1,68 x 1,19 mm) em função do tempo de moagem para diferentes materiais e misturas (Venkataraman e Fuerstenau, 1984 - Reproduzida com autorização da editora)

Conforme observado na Figura 2.24, a taxa de quebra do quartzo é maior quando moído sozinho do que em separado. Segundo Venkataraman e Fuerstenau (1984), isso pode ser explicado pelo fato que, durante os movimentos de catarata e cascatas das bolas no moinho, quando são capturadas duas partículas de minerais diferentes entre os corpos moedores, a partícula do mineral menos resistente será cominuída antes que a tensão de ruptura do mineral mais tenaz seja alcançada. Já no caso da hematita e calcita, o contrário é observado, indicando que estes componentes menos resistentes recebem auxílio do quartzo em sua moagem. Este pode ser um mecanismo semelhante àquele que ocorre na moagem autógena, no qual o quartzo, que é o componente mais resistente, pode atuar como corpo moedor dos componentes menos resistentes.

De acordo com Venkataraman e Fuerstenau (1984), já que os minérios são heterogêneos, é de grande interesse analisar se s_1^E (taxa de quebra específica) permanece

constante para as misturas. A partir da Figura 2.25, pode-se afirmar que a taxa de quebra reduzida é independente do ambiente de quebra e da energia específica. Isto significa que a cinética de quebra é independente da homogeneidade ou heterogeneidade do material.

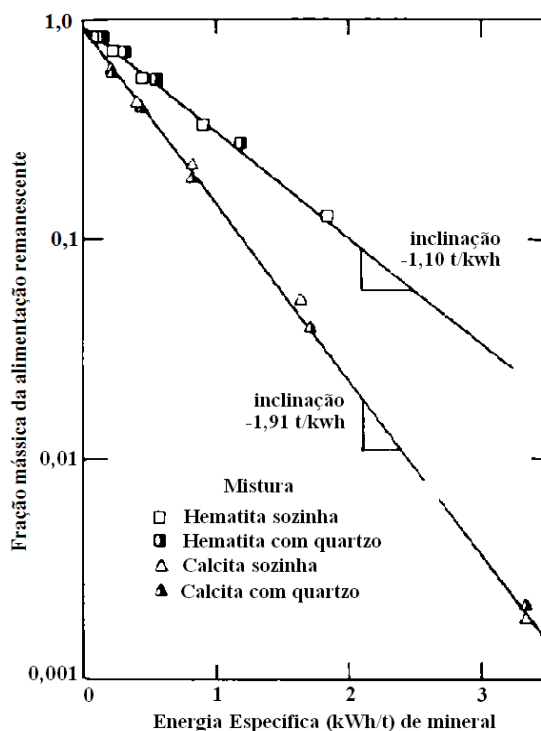


Figura 2.25 – Desaparecimento de primeira ordem para hematita e calcita em termos de energia específica em diversas misturas (Venkataraman e Fuerstenau, 1984 - Reproduzida com autorização da editora)

Um ensaio que permite compreender melhor o comportamento de misturas durante a moagem é aquele realizado em ciclo fechado (*locked-cycle*). Fuerstenau e Venkataraman (1988) verificaram a aplicação dos modelos cinéticos para descrever a cominuição a seco da alimentação multicomponente contendo calcita e quartzo em moinho de bolas em batelada e retratar o comportamento do sistema durante a cominuição em ciclo fechado. O ensaio de ciclo fechado consiste basicamente na moagem durante determinado intervalo de tempo, neste caso correspondendo a ciclos de 2 minutos. Após o término de cada ciclo, o produto era peneirado e o material retido na peneira era retornado ao moinho, juntamente com uma alimentação fresca, a fim de manter o *hold up* constante.

Na moagem em circuito fechado de minérios multicomponentes, devido à diferença de moabilidade dos minerais, o material mais grosso reciclado para o moinho após sua passagem no classificador, tem sua composição alterada em relação ao material da alimentação. Isto poderia acarretar em uma menor eficiência do processo de cominuição, já que o material reciclado tem uma maior quantidade do mineral resistente, e, portanto, tem menor susceptibilidade à quebra. Foi analisada a transitoriedade e oscilações significativas na moabilidade e composição da alimentação durante ensaio em moinho de bolas com ciclo fechado de misturas de calcita e quartzo.

A Figura 2.26 apresenta a composição do material reciclado e do produto no ensaio de diversos ciclos fechados, evidenciando o aumento do teor de quartzo no produto e no reciclo. A determinação da porcentagem mássica dos componentes no produto foi obtida através da dissolução da calcita com ácido, de maneira que o quartzo acumulado no resíduo era pesado, permitindo estimar, por diferença, o peso da calcita.

Apesar do aumento do teor de quartzo no produto, o teor de calcita permaneceu sempre mais alto, antes de atingir a composição igual a da alimentação, o que ocorreu no vigésimo quinto ciclo. O quartzo atingiu uma taxa de moagem mais lenta do que a calcita. A composição do produto tende a ficar igual à da alimentação, ou seja, atingir o estado estacionário, a explicação para este acontecimento é baseada no reciclo do material mais resistente (quartzo), o qual consequentemente torna-se presente em grande proporção no *hold up* do moinho.

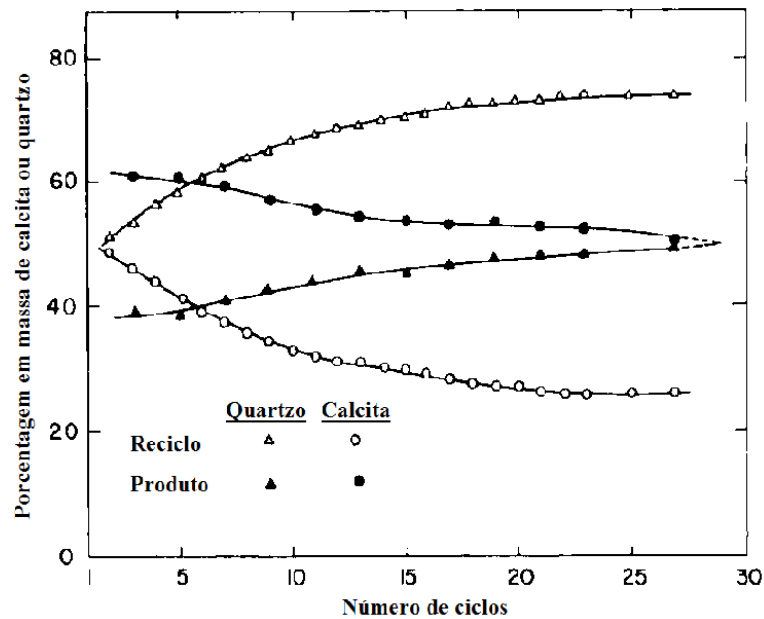


Figura 2.26 – Composição do material reciclado e do produto do circuito em função do número de ciclos em experimentos de ciclo fechado (Fuerstenau e Venkataraman, 1988 - Reproduzida com autorização da editora)

A Figura 2.27 mostra a variação da taxa de quebra com o número de ciclos. A taxa de quebra do mineral menos resistente (calcita) aumenta e aquela do mineral mais resistente (quartzo) diminui conforme a mistura do interior do moinho torna-se mais rica no componente mais resistente. A partir desta observação pode-se afirmar que a taxa de quebra é fortemente dependente da composição.

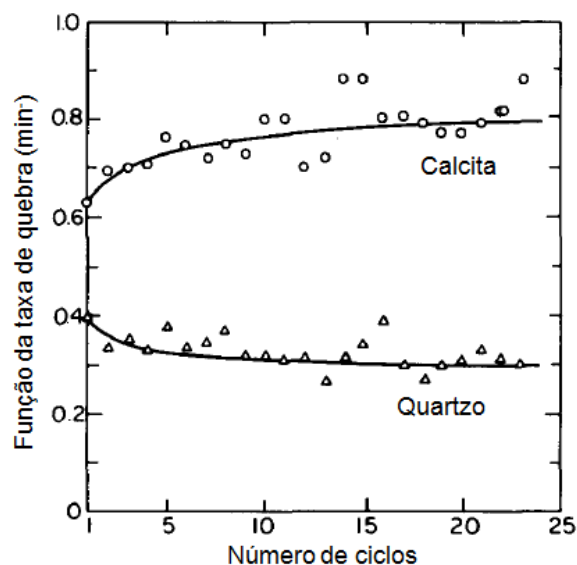


Figura 2.27 – Valores da taxa de quebra para calcita e quartzo em experimentos de ciclo fechado (Fuerstenau e Venkataraman, 1988 - Reproduzida com autorização da editora)

Em uma pesquisa recente (Rosa, 2009) foi estudada a moagem de misturas de dolomita ($W_i = 12,6 \text{ kWh/t}$) e quartzo ($W_i = 14,4 \text{ kWh/t}$). Foram realizadas moagens a seco com alimentações de diferentes composições volumétricas com o objetivo de gerar dados relacionados ao comportamento dos principais parâmetros pertinentes à distribuição granulométrica dos produtos. As moagens foram realizadas em regime de batelada em tempos que variaram de 5 a 75 minutos. A determinação da massa de dolomita e quartzo em cada faixa granulométrica após a moagem foi realizada através da calcinação da amostra até a temperatura de, aproximadamente, 1100°C . O teor de dolomita (CaMgCO_3)₂ é calculado a partir da massa de gás carbônico (CO_2) liberada.

A Figura 2.28 e Figura 2.29 mostram as curvas representativas do percentual passante acumulado do produto da moagem mista e isolada da dolomita nos dois primeiros tempos de moagem (5 e 15 minutos). Observa-se que a moagem isolada da dolomita apresentou-se mais grosseira em comparação às intermoagens. Para os demais tempos de moagem estudados (30, 50 e 75 minutos) não foi verificada diferença significativa com as distribuições granulométricas da moagem isolada para a moagem de misturas, conforme mostra a Figura 2.30.

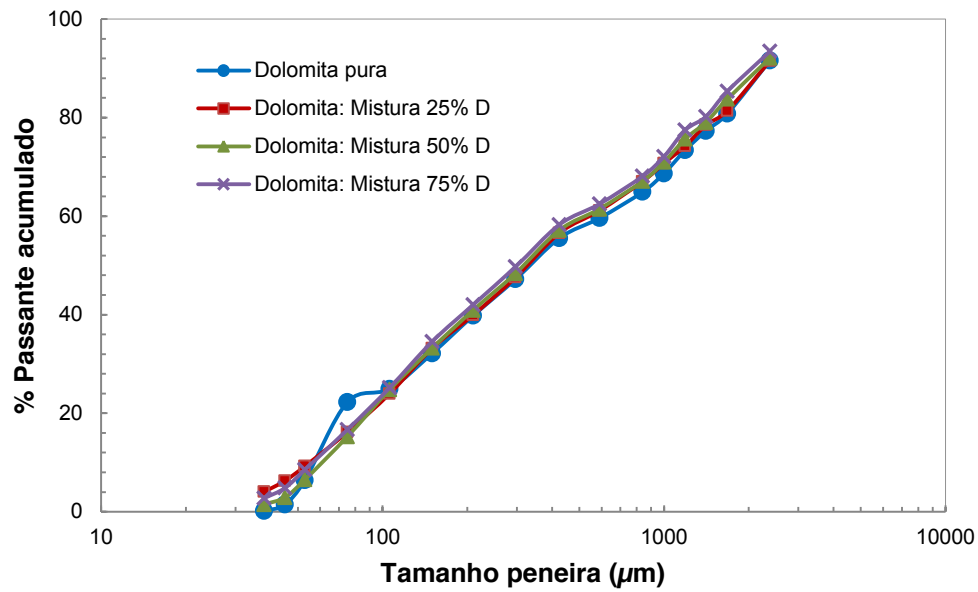


Figura 2.28 - Comparação entre as distribuições granulométricas do mineral dolomita de moagens em misturas e moagem isolada para o tempo de 5 minutos

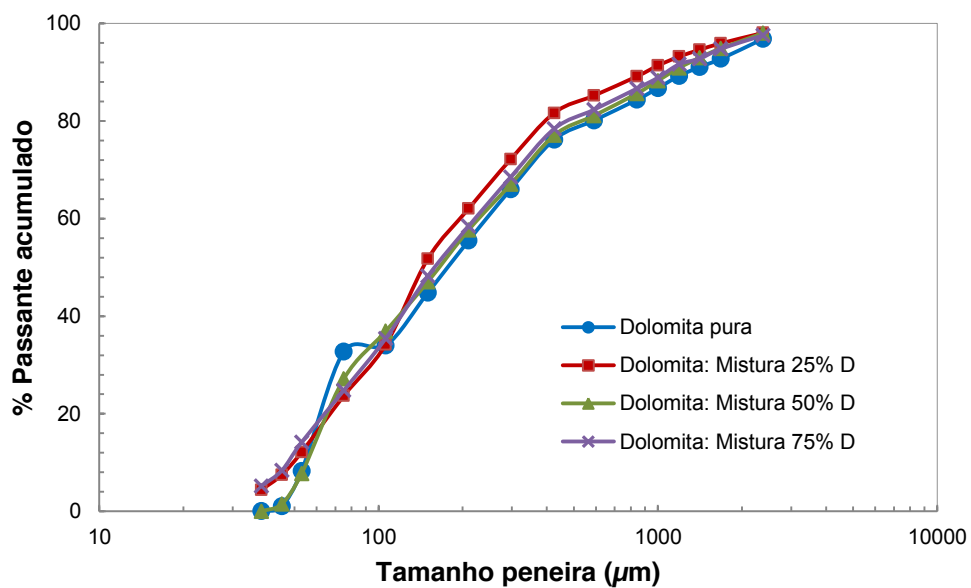


Figura 2.29 – Comparação entre as distribuições granulométricas do mineral dolomita de moagens em misturas e moagem isolada para o tempo de 15 minutos

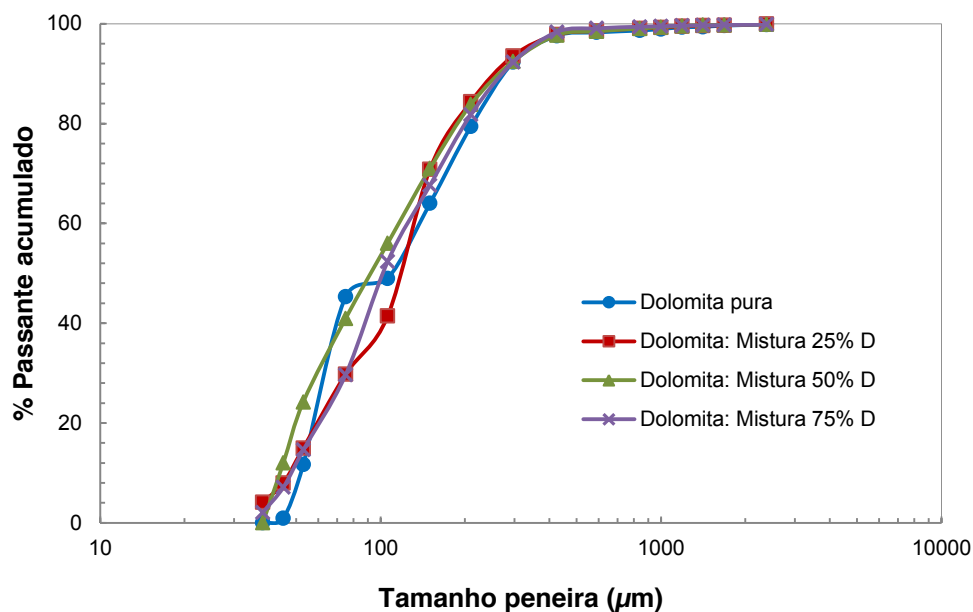


Figura 2.30 – Comparação entre as as distribuições granulométricas do mineral dolomita de moagens em misturas e moagem isolada para o tempo de 50 minutos.

Ao contrário do que se constatou para a dolomita, as moagens mistas do quartzo apresentaram-se mais grosseiras em relação à sua moagem isolada, conforme mostra a distribuição granulométrica do tempo de moagem igual a 15 minutos (Figura 2.31), exceto para o tempo de moagem igual a 5 minutos (Figura 2.32), na qual se verifica um posicionamento intermediário da moagem do quartzo puro.

Pôde-se concluir que a moabilidade do quartzo diminuiu conforme se aumentou a proporção volumétrica do mineral dolomita na mistura. Desta forma o autor (Rosa, 2009) propôs a explicação que a compactação dos finos provenientes da dolomita diminuiria o efeito do impacto da carga de bolas sobre as partículas de quartzo.

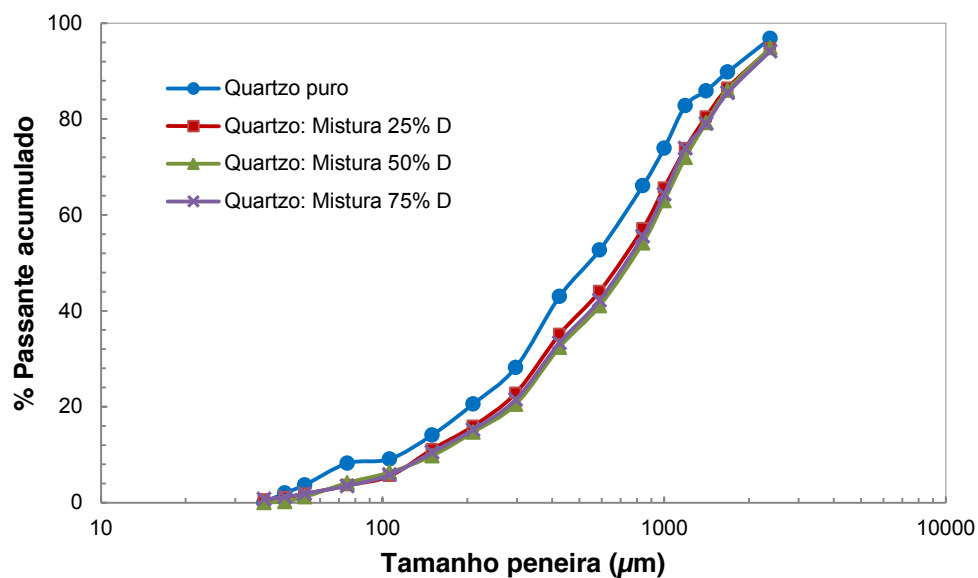


Figura 2.31 – Comparação entre as as distribuições granulométricas do mineral quartzo de moagens em misturas e moagem isolada para o tempo de 15 minutos.

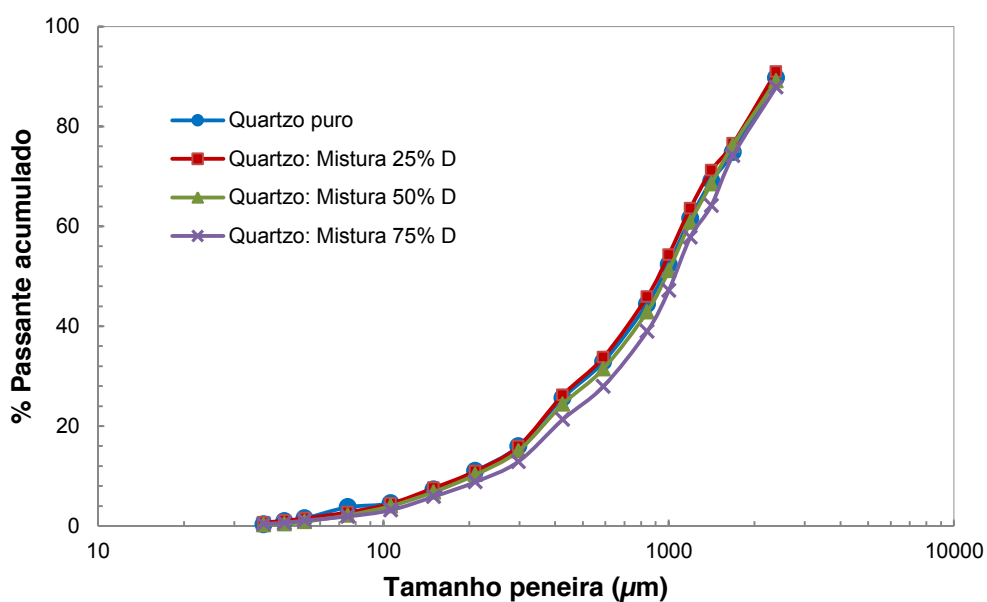


Figura 2.32 – Comparação entre as as distribuições granulométricas do mineral quartzo de moagens em misturas e moagem isolada para o tempo de 5 minutos.

Neste mesmo trabalho foi citado um estudo de moagem mista binária (calcário e quartzo) em moinho de bolas (Ray e Szekeley, 1973) no qual foi observado que a

eficiência da moagem diminuiu, ou seja, a taxa de moagem de cada material decresceu em comparação a moagem dos componentes realizada separadamente. Outros materiais foram utilizados (arenito, dolomita e dicromato de potássio) demonstrando que o fenômeno voltou a ocorrer.

Bozkurt e Ozgür (2007) estimaram a taxa específica de quebra da colemanita em diversas faixas de tamanho em moagem a seco e compararam com a taxa específica de quebra do quartzo, observando que a colemanita é cominuída mais rapidamente e gera maior quantidade de material fino que o quartzo. O estudo da moagem binária sugeriu que uma classificação seria necessária em algum determinado passo do processo a fim de evitar a sobremoagem da colemanita.

Um número ainda mais reduzido de estudos tem sido realizado com materiais multicomponentes usando outros tipos de moinhos. Um trabalho relevante nesta área foi realizado em uma usina de processamento de minério de ferro na Suécia utilizando um moinho autógeno (Bueno et al., 2011). Os minerais processados foram magnetita e ganga (silicatos com baixo teor de magnetita), de maneira que a composição do minério era manipulada antes de sua alimentação no moinho por meio da separação magnética, com a finalidade de diminuir a quantidade de resíduos de silicato.

O ensaio foi realizado em escala industrial e a composição da carga do moinho foi analisada após o esvaziamento do mesmo. As frações mais grosseiras da carga do moinho apresentaram maior quantidade de silicatos do que a alimentação. O acúmulo preferencial de silicatos, que têm maior resistência, nos tamanhos mais grosseiros da carga do moinho foi evidente, pois, enquanto o teor de magnetita na alimentação do moinho foi de 85%, a carga do moinho apresentou um teor de 75%. Esse foi um dos poucos estudos já relatados que demonstraram esse efeito de acúmulo do material mais resistente em um moinho industrial.

O componente silicato aparece principalmente nas faixas de tamanhos mais grosseiras e faixas mais finas na descarga do moinho, porém, não aparece muito em tamanhos intermediários, como pode ser observado na Figura 2.33. As amostras foram analisadas

a partir da técnica de fluorescência de raios-X com a finalidade de identificar as proporções de silicato e magnetita. Este é um comportamento típico de materiais duros em moinhos autógenos, ou seja, as partículas que não quebram pelo impacto são arredondadas, gerando uma enorme quantidade de finos por abrasão.

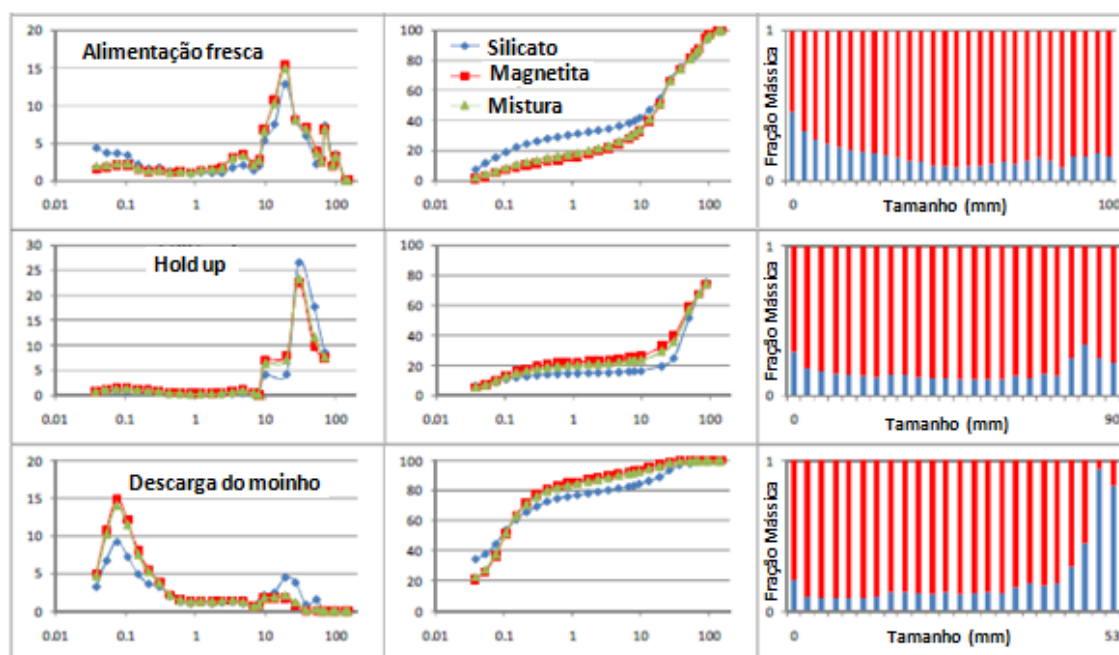


Figura 2.33 – Distribuição de tamanho multicomponente do teste em escala industrial (Bueno et al., 2011)

Adicionalmente, o trabalho relata os resultados de ensaio em escala piloto, realizado em moinho autógeno, porém operando em circuito aberto. A relação entre as frações de tamanho na alimentação do moinho foi mantida a mesma para cada ensaio, a fim de manter uma distribuição de tamanho constante na alimentação e que pudesse reproduzir o tamanho da alimentação do moinho industrial. Os resultados obtidos durante esses ensaios mostraram claramente que a moagem é significativamente afetada pela presença do material rígido na alimentação. A granulometria do produto é alterada com adições de silicato (massa específica mais baixa), tornando-se mais fino devido à grande quantidade de finos gerados pelo desgaste deste componente, bem como a densidade da carga menor, a qual fornece energias de quebra mais baixas, reduzindo a quebra por impacto.

Estes ensaios geraram distribuições de tamanho e composição para os cinco ensaios realizados, dos quais três tiveram a carga de moinho toda analisada. Os dados foram utilizados para avaliar o acúmulo de material mais resistente na carga, bem como para mostrar como a variação do componente mais resistente na alimentação influencia a taxa de quebra.

Foram realizados também testes em laboratório em moinho semi-autógeno operando em ciclo fechado (*locked cycle test – LCT*), onde foram gerados dados para comparar com os resultados piloto e industrial. Este teste padronizado permitiu a investigação da resposta do moinho e da interação entre os componentes, em uma gama de diferentes condições de mistura, usando uma quantidade relativamente pequena de material. O teste, bastante laborioso, foi projetado para gerar resultados que possam fornecer uma melhor compreensão do efeito da mistura na moabilidade, carga do moinho, composição e distribuição de tamanho do produto. A Figura 2.34 mostra o efeito do acúmulo de material resistente na carga em relação à alimentação nesse ensaio de ciclo fechado de laboratório. Acredita-se que a intensidade do acúmulo do material resistente no moinho em uma mistura binária depende da energia disponível e da diferença de tenacidade dos componentes.

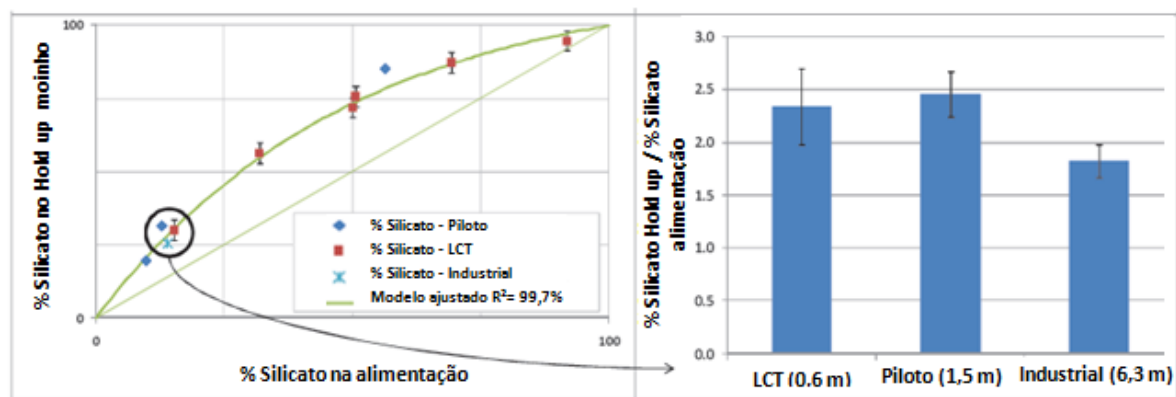


Figura 2.34 – Comparação dos resultados dos testes em escala industrial, piloto e laboratório (Bueno et al., 2011)

Os resultados para o LCT e os ensaios em escala piloto mostram que um moinho de diâmetro maior reduz a capacidade do componente macio para sobreviver no moinho e, consequentemente, diminui a fração do material resistente no interior da carga do moinho. No entanto, o efeito oposto foi observado nos dados do moinho industrial, onde a fração do componente resistente no moinho diminuiu. De acordo com Bueno et al. (2011), as energias de quebra no moinho industrial são mais altas e, portanto acabam reduzindo o efeito da diferença de resistência entre os dois componentes.

2.6.3 Consumo de energia na moagem de misturas

Um dos primeiros estudos em relação ao consumo de energia na moagem de misturas foi realizado por Fuerstenau e Sullivan (1962), os quais propuseram que “a energia total necessária para a moagem de uma unidade de massa da mistura é a soma ponderada das energias utilizadas na moagem de cada um dos componentes individualmente”. Esta hipótese levou às equações, que foram baseadas na lei de Charles:

$$E = CX_m^{-\alpha} \quad (Eq. 16)$$

$$E_m = m_1 C_1 X_{m1}^{-\alpha} + m_2 C_2 X_{m2}^{-\alpha} \quad (Eq. 17)$$

Nas quais os subscritos 1 e 2 referem-se aos componentes da mistura binária, E é a energia consumida por unidade de massa da mistura (kWh/t), m é a fração mássica do componente mineral, α é o módulo da distribuição de Gaudin-Schuhmann do componente na distribuição, X_m é o módulo de tamanho do mineral quando moído como componente na mistura binária e C é o coeficiente de moabilidade obtida na moagem do mineral individual.

A Tabela 2.2 mostra a aplicação da equação 17 para as misturas de calcita, quartzo e hematita, comparando os resultados calculados e experimentais (Fuerstenau e Venkataraman, 1984).

Tabela 2.2 – Consumo de energia da mistura calculado pela equação e experimental (Fuerstenau e Venkataraman, 1984)

Mistura	Tempo de Moagem (min)	Energia consumida (kWh/t) – Equação	Energia consumida (kWh/t) – Medida
Calcita-Quartzo	0,5	0,20	0,20
	1	0,42	0,40
	2	0,79	0,81
	4	1,61	1,62
	8	3,26	3,25
Hematita-Quartzo	0,5	0,12	0,14
	1	0,28	0,29
	2	0,56	0,57
	4	1,23	1,15

A suposição adotada por Fuerstenau e Sullivan (1962), embora simples, necessita de mais análises, visto que não considera os sinergismos da moagem dos componentes. Devido a interações complexas entre os constituintes da carga multicomponente do moinho, a repartição da energia de moagem entre os componentes da mistura não é exatamente proporcional à composição da carga. Para contornar este problema, foi proposto o fator de repartição de energia por Kapur e Fuerstenau (1988). Este fator relaciona a taxa de quebra específica e a energia da moagem, conforme é apresentado a seguir:

$$s_{1a} = s_1^E \bar{P}_{1a} \quad (Eq. 18)$$

na qual s_{1a} é referente à moagem do componente 1 individualmente e $\bar{P}$ a energia específica consumida. Esta correlação se comporta igualmente bem para o mineral em ambiente de mistura, de maneira que:

$$s_{1m} = s_1^E \bar{P}_{1m} \quad (Eq. 19)$$

Considerando que a taxa de moagem não varia com o tempo, a integração seguida da divisão das duas últimas equações fornece o fator de repartição de energia R .

$$\frac{S_{1m}}{S_{1a}} = \frac{E_{1m}}{E_{1a}} = R \quad (Eq. 20)$$

Para a alimentação composta por dois componentes, o balanço de energia para a moagem de mistura é dado por:

$$E_m = m_1 E_{1m} + m_2 E_{m2} \quad (Eq. 21)$$

na qual E_{1m} e E_{2m} são as energias consumidas na moagem dos componentes 1 e 2 no ambiente de mistura e não são valores diretamente mensuráveis. Assim, a equação foi reescrita em termos de E_{1a} e E_{2a} , os quais são valores mensuráveis:

$$E_m = m_1 R_1 E_{1a} + m_2 R_2 E_{2a} \quad (Eq. 22)$$

O fator de repartição pode ser determinado a partir de diversos métodos. Em um deles a estimação do fator é realizada a partir da medida das taxas de quebra do mineral moído individualmente (s_{1a}) e do mineral moído como componente de uma mistura (s_{1m}). O desenvolvimento desta expressão é encontrado com mais detalhes em Fuerstenau e Kapur (1988).

$$R_1^S = \frac{s_{1m}}{s_{1a}} \quad (Eq. 23)$$

Desta forma, a equação para E_m pode ser escrita da forma:

$$E_m = m_1 R_1^S E_{1a} + m_2 R_2^S E_{2a} \quad (Eq. 24)$$

A energia calculada a partir da equação 24 com o fator de repartição de energia em função da taxa de quebra independente do tempo para a moagem da mistura de calcita e quartzo, sendo comparada na Figura 2.35 com a energia medida experimentalmente. A figura também compara a energia consumida por um componente no ambiente de mistura através da seguinte equação com dados simulados:

$$E_{1m} = R_1^s E_{1a} \quad (Eq. 25)$$

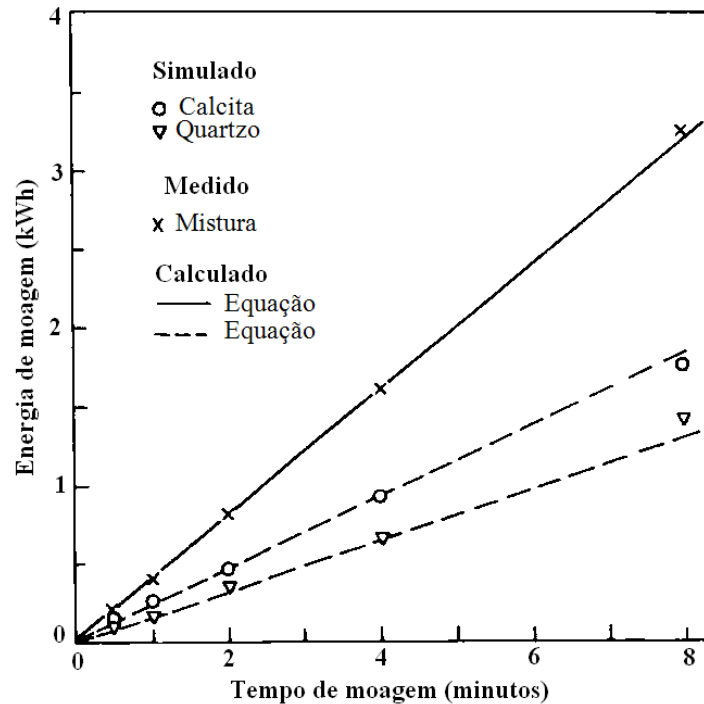


Figura 2.35 – Energias de moagem dos constituintes da mistura simuladas e calculadas e energia da mistura medida e calculada (Fuerstenau e Kapur, 1988 - Reproduzida com autorização da editora)

Algumas misturas podem apresentar variações na taxa de quebra com o tempo de moagem, tal fato foi evidenciado empiricamente na moagem da mistura de hematita e dolomita em diferentes proporções por Fuerstenau et al. (1992), que verificaram que a taxa de quebra da dolomita aumentou quase linearmente à medida que sua fração de volume na mistura diminuiu. Em tempos de moagem mais prolongados, houve uma tendência de aceleração da taxa de quebra e, conseqüentemente, ocorreu um desvio da cinética de primeira ordem, ou seja, devido à interação com a hematita a taxa de quebra da dolomita passou a variar com o tempo. Portanto, é necessário obter o fator de repartição em função do tempo (R^w). O desenvolvimento desta expressão é encontrado com mais detalhes em Fuerstenau e Kapur (1988).

$$R_1^W = \frac{W_{1m}(t)}{W_{1a}(t)} = \frac{\ln[(M_{1m}(0)/M_{1m}(t))]}{\ln[(M_{1a}(0)/M_{1a}(t))]} \quad (Eq. 26)$$

na qual $M_1(0)$ e $M_1(t)$ são as quantidades da alimentação, em massa ou fração mássica, que permanece sem quebrar no tempo zero e no tempo t , respectivamente.

Desta forma, usando a equação 24 E_m pode ser escrita como:

$$E_m = m_1 R_1^W E_{1a} + m_2 R_2^W E_{2a} \quad (Eq. 27)$$

A Figura 2.36 apresenta os fatores de repartição de energia para hematita e quartzo usando a equação 23, a qual considera a taxa de quebra independente do tempo (Fuerstenau et al., 1992). Os fatores permaneceram constantes para diferentes intervalos de tamanho. O valor médio de 1,63 para a hematita significa que este mineral consome 63% a mais de energia, enquanto o valor médio para o quartzo de 0,82 significa que este mineral consome 18% de energia a menos do que ambos quando moídos sozinhos.

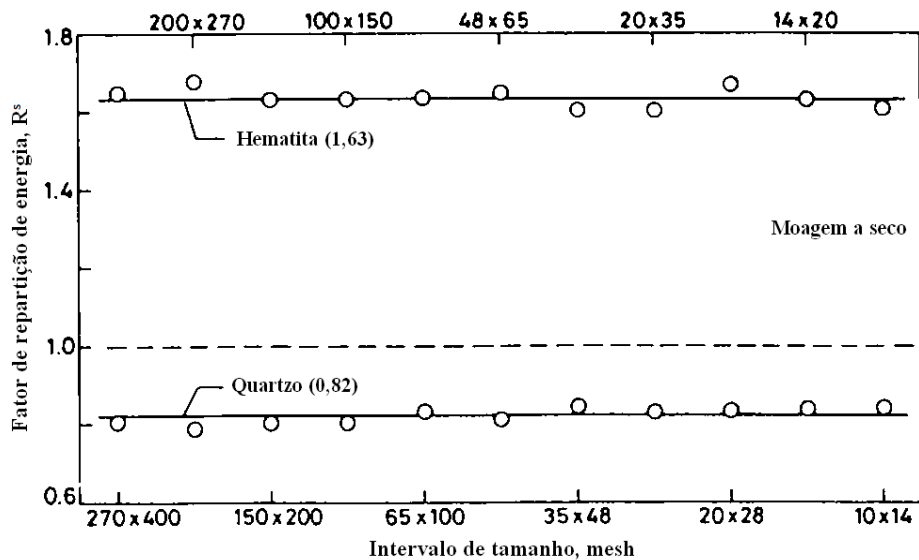


Figura 2.36 – Fatores de repartição de energia da hematita e quartzo calculados a partir de funções da taxa de quebra de diferentes tamanhos (Fuerstenau et al., 1992 - Reproduzida com autorização da editora)

A Figura 2.37 representa os fatores de repartição de energia para hematita e dolomita usando a equação 26, a qual considera a taxa de quebra dependente do tempo. Para este sistema de cominuição, a estimativa do fator de repartição de energia do componente dominante na mistura permanece em torno de uma unidade, indicando que a moagem em mistura não afeta este mineral, porém afeta o outro componente. Quando a hematita aparece na mistura em proporções de 50% e 25%, seus fatores são inicialmente bastante baixos, por volta de 0,6, o que remete ao fato da moagem da hematita ser prejudicada quando é alimentada no moinho na forma de uma mistura. Por outro lado, quando a mistura é constituída de 50% e 25% de dolomita, seus fatores de repartição de energia são maiores do que a unidade, fato este que indica a sua moagem na forma de mistura é favorecida.

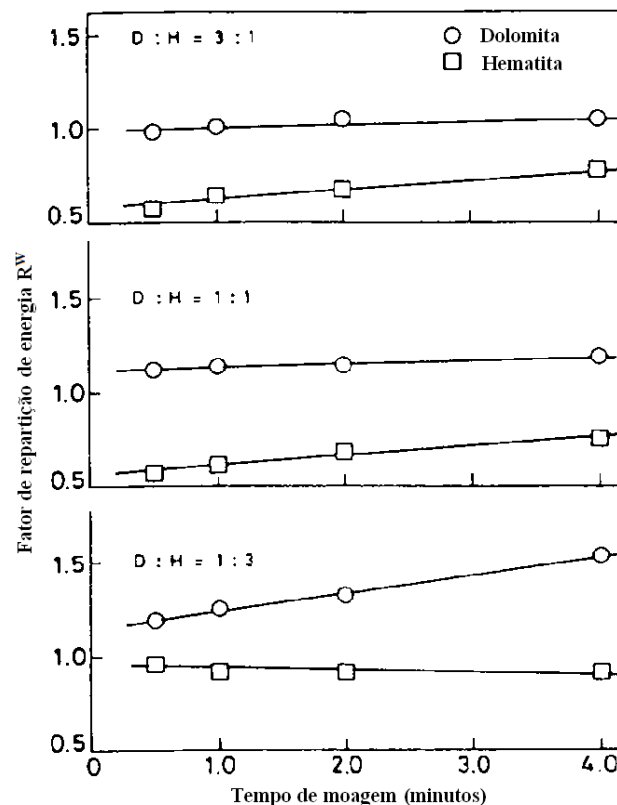


Figura 2.37 – Variação dos fatores de repartição de energia da dolomita e hematita como função do tempo na moagem a úmido de três composições de mistura (Fuerstenau et al., 1992 - Reproduzida com autorização da editora)

Além da aplicação do fator de repartição de energia para estimar a energia consumida por um componente na moagem de mistura, o que não é acessível por meio de medições diretas, este fator também é muito utilizado na modelagem da moagem de mistura baseada no modelo do balanço populacional, uma vez que ele facilita a simulação da cinética por substituição de parâmetros mais acessíveis. A equação é aplicável a um dos componentes da mistura:

$$\frac{dM_i(1m)}{dt} = -s_i(1m)M_i(1m) + \sum_{j=1}^{i-1} s_j(1m)b_{ij}M_j(1m) \quad (Eq. 28)$$

$$\frac{dM_i(1m)}{dt} = -s_i(1a)R(1)M_i(1m) + \sum_{j=1}^{i-1} s_j(1a)R(1)b_{ij}M_j(1m) \quad (Eq. 29)$$

Recentemente, Carvalho e Tavares (2009) demonstraram a aplicação do modelo mecanicista da moagem na previsão da moagem contínua de uma mistura binária, contendo dois materiais com diferentes distribuições de energias de fratura. Nesse estudo, foi mostrado que, com o aumento da proporção da material resistente na alimentação de um moinho operando continuamente em circuito aberto, o produto do circuito se tornava mais grosso. Essa metodologia de moagem tem grande potencial de descrever adequadamente o efeito de misturas na moagem, pois descreve detalhadamente as características de quebra em função do tamanho de partícula, de cada um dos componentes.

2.6.4 Análise crítica da literatura

Conforme revisado, um grande número de estudos tem sido realizado nesta área de moagem multicomponente. Apesar de cada estudo apresentar suas particularidades, diversos tipos de interações foram identificados entre as partículas, dependendo da natureza dos componentes da mistura, e, assim, repercutindo no consumo energético.

Em algumas misturas estudadas, realizar a moagem em conjunto foi considerado mais favorável em termos de granulometria do produto, taxa de quebra e/ou consumo de energia. Já para outras misturas analisadas a moagem isolada apresentou ser um bom negócio, como no caso da mistura clínquer-escória. Existem componentes que sofrem

mais interferência quando em presença de outro componente. No entanto, não é evidente a relação entre as propriedades do material e esse comportamento.

Nesses estudos, entretanto, existem algumas omissões importantes que dificultam compreender os motivos das discrepâncias encontradas. Por exemplo, em muitos estudos não ficaram claras quais as distribuições granulométricas da alimentação de cada material utilizado na moagem, assim como algum tipo de ajuste do método utilizado para separar os componentes após a moagem, partindo do princípio que a separação entre os dois componentes era perfeita. Além disso, em nenhum estudo foi realizada uma análise mais detalhada do erro experimental, o que dificulta discriminar entre os efeitos observados e os erros.

Quanto à modelagem, ainda não existe um modelo simples e direto que permita prever como os materiais se comportariam em uma mistura, utilizando características já conhecidas do material ou de fácil determinação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

A fim de realizar o estudo de moagem de misturas binárias foi necessária a análise de diversos materiais quanto à sua resistência e viabilidade da discriminação dos componentes das misturas após a moagem. Inicialmente foram analisados os valores do Índice de Trabalho de Bond (kWh/t) de alguns materiais, pois havia necessidade da formulação de misturas artificiais, nas quais um componente seria mais resistente que o outro. Além desta característica da mistura, a mesma ainda precisava que seus componentes fossem separáveis após a execução do ensaio por algum método de aplicação conveniente em laboratório.

Com a finalidade de separar os componentes na mistura pretendia-se fazer uso do método da dissolução, através da qual um dos componentes fosse preferencialmente dissolvido por um determinado ácido. Após análise dos valores de W_i , amostras de calcários e uma de basalto se destacaram como os melhores candidatos a serem utilizados neste estudo. Além da característica da resistência favorecer os calcários, a sua composição constituída predominante por carbonatos, permite uma pronta dissolução em solução ácida.

Tendo em vista esses diferentes critérios, os seguintes materiais foram escolhidos para o estudo da moagem de misturas binárias:

- Basalto, proveniente da empresa Basalto Pedreira e Pavimentação Ltda. Localizada em Campinas – São Paulo.
- Calcário Ribeirão Branco, proveniente de jazida mineral localizada no município de Ribeirão Branco – São Paulo.
- Calcário Cantagalo, proveniente de jazida mineral da Votorantim Cimentos Ltda., localizada no município de Cantagalo – Rio de Janeiro.

- Minério de nióbio, proveniente da Mina de Catalão, localizada no município de Catalão – Goiás.

3.2 Metodologia

3.2.1 Separação dos componentes

Esta etapa de separação dos componentes é fundamental para viabilizar o estudo das moagens binárias, pois, desta forma, se torna possível determinar as interferências de um componente no outro e como cada um deles se comportou nas moagens.

3.2.1.1 Desenvolvimento da metodologia de análise de componentes por dissolução ácida

A fim de identificar as condições ótimas para a realização das análises foi investigada a influência da composição do ácido utilizado na dissolução, em seguida da concentração da solução e do tempo de dissolução.

Inicialmente, foram realizados testes de dissolução com ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrados (fornecidos pela Vetec S.A.) em duas amostras de calcários, com tempo de dissolução fixo em 20 minutos. A análise dos resultados do primeiro teste (Tabela 3.1) permitiu concluir que o ácido sulfúrico não se apresentou tão eficaz em dissolver o calcário, pois a sua utilização resultou em uma proporção significativa de resíduo. Por outro lado, o ácido clorídrico, o qual foi selecionado no presente trabalho, se mostrou capaz de produzir intensa dissolução das diferentes amostras de calcário.

Tabela 3.1 – Comparação entre a dissolução dos dois tipos de calcário com ácido clorídrico e sulfúrico concentrados

Amostra de calcário	Calcário não dissolvido (%)	
	HCl concentrado	H ₂ SO ₄ concentrado
Ribeirão Branco	2,32	35,85
Cantagalo	1,97	33,76

Em seguida, foi analisada a influência da concentração de ácido clorídrico, mantendo-se o tempo de dissolução igual a 20 minutos. Os resultados são apresentados na Tabela 3.2. A concentração desejada seria aquela que dissolvesse o máximo de calcário e o mínimo de basalto. A Figura 3.1 mostra que a concentração ótima do ácido seria de 5M, pois permitiu uma melhor discriminação entre os materiais analisados.

Tabela 3.2 – Resultados dos testes de dissolução com diferentes concentrações de ácido clorídrico

Concentração HCl	Ribeirão Branco % Material não dissolvido	Basalto % Material não dissolvido
2M	11,71	93,97
3M	10,23	92,94
5M	5,30	92,60
10M	4,89	89,25
Concentrado	2,32	85,52

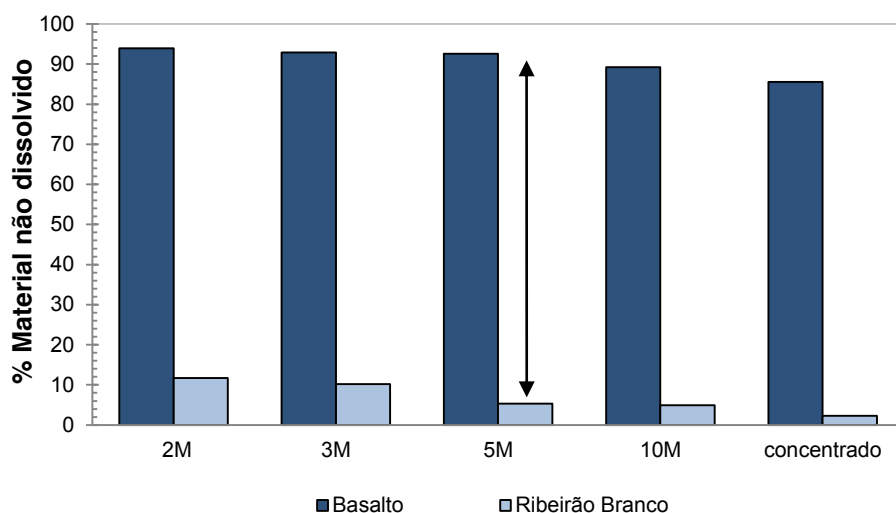


Figura 3.1 – Comparação da porcentagem de material não dissolvido entre calcário e basalto quando em contato com soluções de HCl a diferentes concentrações

Após fixada a concentração do HCl em 5M, passou-se a analisar a influência do tempo de contato da amostra com a solução ácida. Esses resultados são apresentados na Tabela 3.3 e na Figura 3.2. Pode-se observar que após o tempo de 20 minutos, além da diferença entre as porcentagens não dissolvidas dos materiais ser maior, a mesma ainda permaneceu relativamente constante.

Tabela 3.3 – Resultados dos testes de dissolução com diferentes tempos de contato da amostra com o ácido a 5M

Tempo (minutos)	% Material não dissolvido	
	Ribeirão Branco	Basalto
1	9,76	93,19
10	8,05	92,87
20	5,30	92,60
25	5,28	92,64
30	5,32	92,52

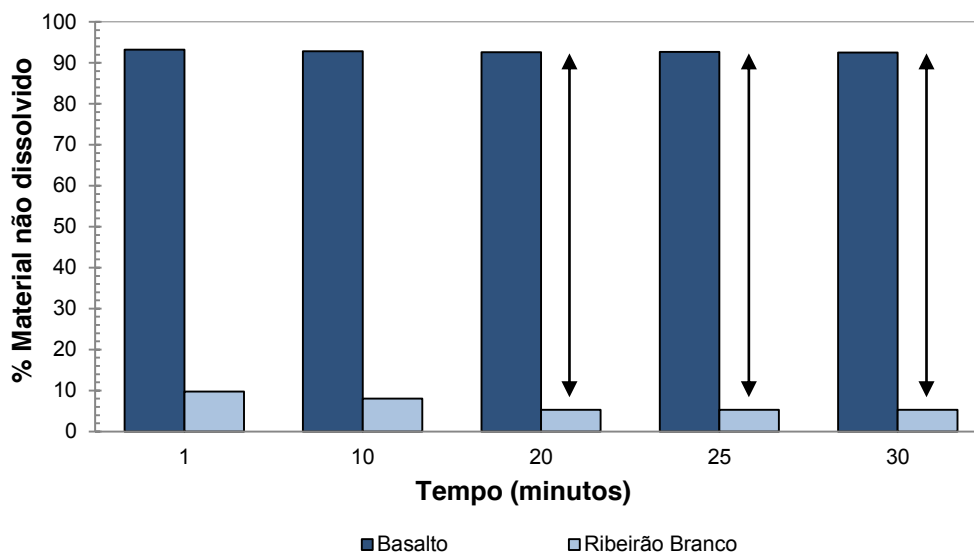


Figura 3.2 – Comparação da porcentagem de material não dissolvido entre calcário Ribeirão Branco e basalto em diferentes tempos de contato com a solução de HCl a 5M

Assim, para as análises de dissolução ácida das amostras provenientes dos ensaios de moagem será utilizado o ácido clorídrico na concentração 5M e tempo de contato da amostra com o ácido de 25 minutos, devido a esta concentração e tempo de contato permitirem obter uma boa estimativa da real proporção de material insolúvel nas amostras analisadas.

3.2.1.2 Procedimento adotado nas análises dos componentes por dissolução ácida

O procedimento de dissolução ácida estabelecido baseia-se em, primeiramente, moer a amostra do material em moinho planetário de bolas ou manualmente utilizando pilão e almofariz, de maneira que o material atingisse uma maior superfície de contato com o ácido. Após a moagem, uma amostra do material, contendo aproximadamente 2 gramas e pesada em balança analítica, era colocada em contato com 150 ml de solução 5M de ácido clorídrico por aproximadamente 25 minutos e agitada em um Erlemayer. Em seguida, a suspensão contendo a amostra era filtrada em filtro a vácuo, sendo o papel de filtro seco em estufa a 60°C. Após a secagem o material era novamente pesado em

balança analítica, com a finalidade de identificar a quantidade de material sólido não dissolvido. O teor de material dissolvido é calculado por:

$$\% \text{ dissolvida} = \frac{\text{Massa de amostra inicial} - \text{Massa de amostra após dissolução}}{\text{Massa de amostra inicial}} * 100$$

(Eq. 30)

A Figura 3.3 ilustra as etapas envolvidas na dissolução ácida. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.



Figura 3.3 – Etapas da dissolução ácida, da esquerda para a direita: Moagem manual, contato da mistura com a solução de ácido clorídrico e filtração.

Conforme mostrado na Tabela 3.3, o teor de material dissolvido não equivale diretamente ao teor de calcário e nem ao complemento do teor de basalto, pois uma pequena parte do basalto dissolveu ao entrar em contato com o ácido e nem todo calcário foi dissolvido pelo ácido. Assim, evidenciou-se a necessidade de obter uma equação de calibração para o cálculo do teor de calcário presente em cada mistura.

A Figura 3.4 mostra os resultados da dissolução do basalto, calcário Ribeirão Branco e suas misturas em diversas proporções mássicas (25%, 50% e 75% de calcário) após moagem do material manualmente e em moinho planetário. Percebeu-se que houve uma pequena, porém significativa, diferença no grau de dissolução, principalmente quando o calcário passou a ser o componente dominante na mistura.

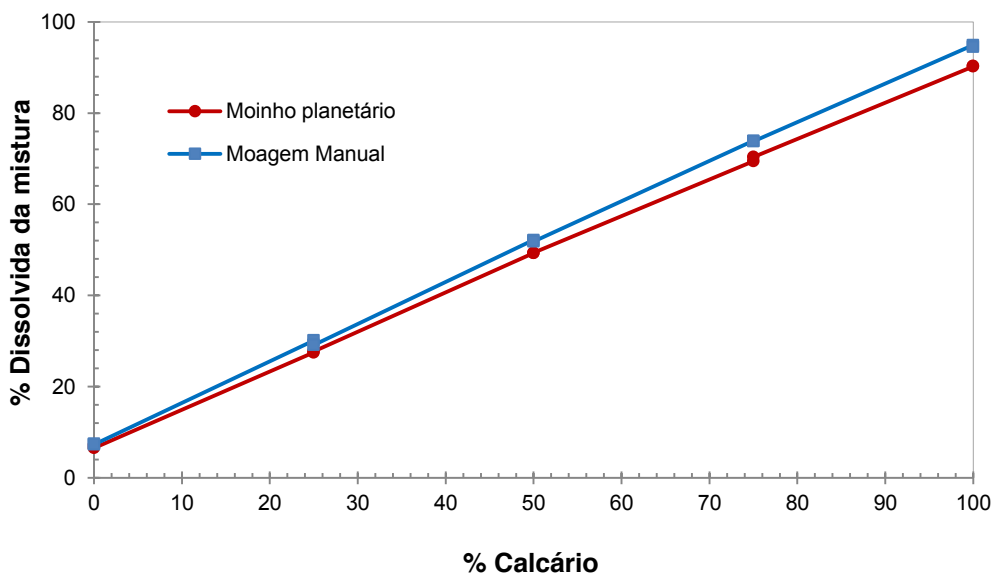


Figura 3.4 – Dissolução ácida do basalto, calcário Ribeirão Branco e suas misturas após moagem manual e em moinho planetário

As equações 31 e 32, obtidas através da regressão linear, foram utilizadas para calcular a porcentagem de calcário contida na amostra a partir da porcentagem de material dissolvido e, conseqüentemente, estimar por diferença a porcentagem de basalto para a moagem manual e em moinho planetário, respectivamente:

$$\% \text{ calcário Ribeirão Branco} = \frac{\% \text{ dissolvida} - 7,766}{0,8751} \quad (\text{Eq. 31})$$

$$\% \text{ calcário Ribeirão Branco} = \frac{\% \text{ dissolvida} - 7,006}{0,8361} \quad (\text{Eq. 32})$$

No caso das análises realizadas com o material com granulometria já fina, como o passante em análises granulométricas usando a peneira de 38 μm , foi identificada uma maior tendência à dissolução dos vários componentes, pois as mesmas apresentavam mais alta superfície de contato com o ácido do que a preparada por moagem. Assim,

experimentos foram realizados com esse material, tendo sido proposta uma nova equação para a calibração do teor de calcário (Figura 3.5), dada por:

$$\% \text{ calcário Ribeirão Branco} = \frac{\% \text{ dissolvida} - 11,059}{0,8632} \quad (\text{Eq. 33})$$

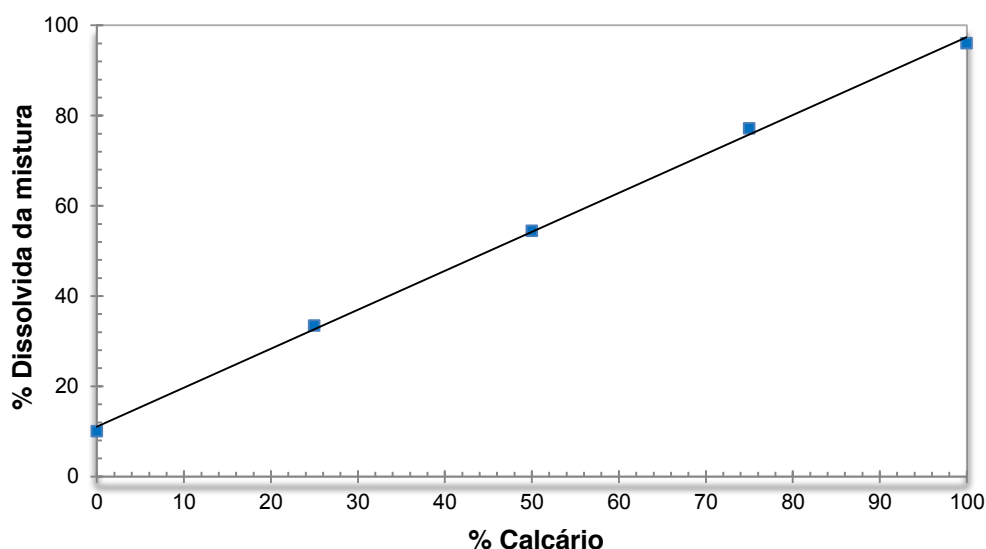


Figura 3.5 – Dissolução ácida do basalto, calcário Ribeirão Branco e suas misturas no tamanho menor do que 38 μm

Como pode ser observado, as amostras de basalto e de calcário Ribeirão Branco apresentaram uma quantidade maior de sólidos dissolvidos ao entrar em contato com a solução ácida quando em tamanho menor do que 38 μm , o que justifica o uso desta equação específica.

As misturas basalto – calcário Cantagalo e basalto – Catalão também foram utilizadas dentro do programa de testes de moagem binária. As condições de dissolução ácida empregadas para estas misturas foram as mesmas daquelas utilizadas na mistura das amostras de basalto e calcário Ribeirão Branco. A Figura 3.6 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios da mistura basalto e calcário Cantagalo, considerando a moagem manual. A equação obtida por regressão linear permite estimar a proporção de calcário Cantagalo na análise da sua mistura com a amostra de basalto, a partir da percentagem dissolvida na mistura:

$$\% \text{ calcário Cantagalo} = \frac{\% \text{ dissolvida} - 7,29}{0,8376} \quad (\text{Eq. 34})$$

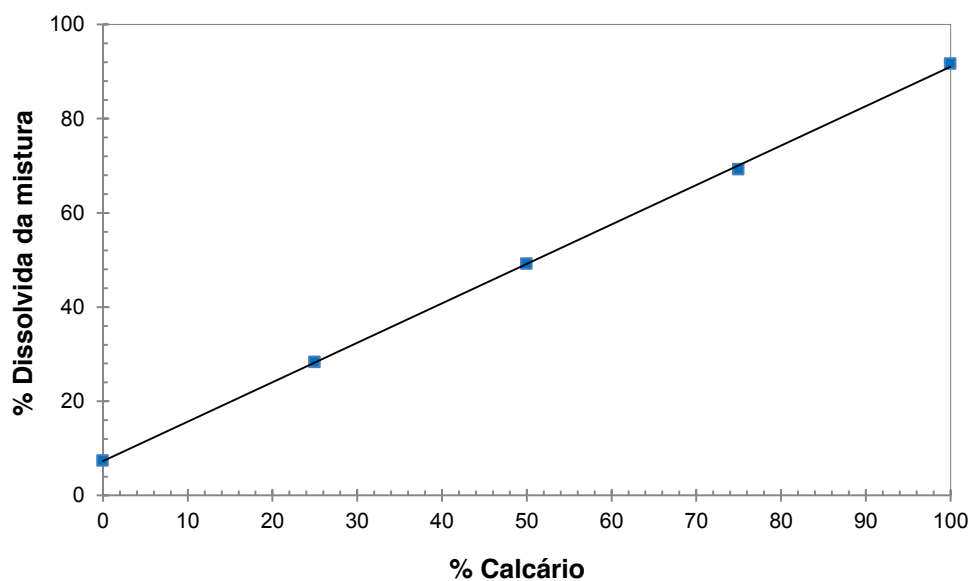


Figura 3.6 – Dissolução ácida do basalto, calcário Cantagalo e suas misturas após moagem manual

A Figura 3.7 apresenta os resultados de dissolução para a mistura basalto e calcário Catalão. A equação de calibração para cálculo da porcentagem de Catalão é dada por:

$$\% \text{ Catalão} = \frac{\% \text{ dissolvida} - 7,405}{0,7628} \quad (\text{Eq. 35})$$

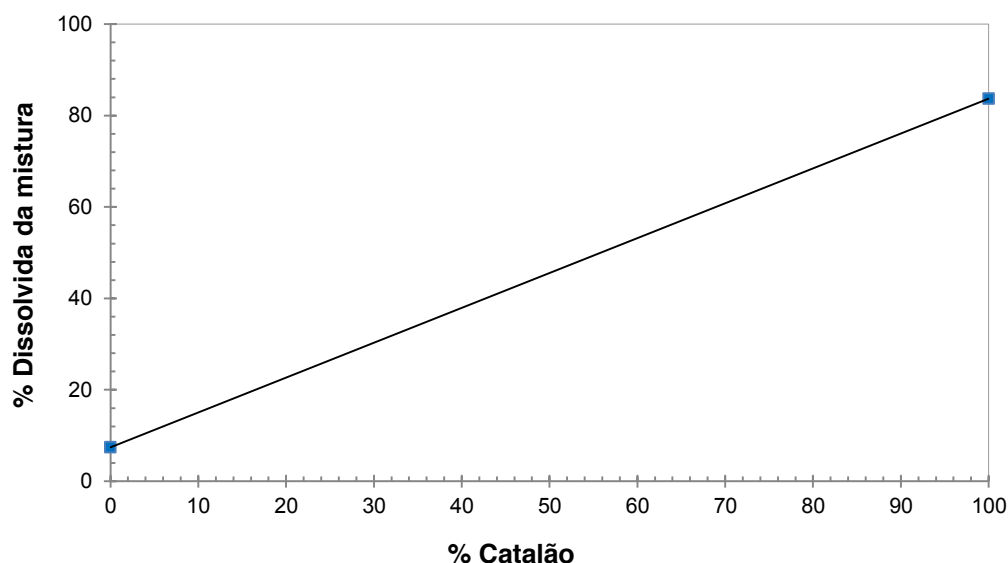


Figura 3.7 – Dissolução ácida do basalto e Catalão após moagem manual

Esta metodologia de separação por dissolução ácida foi aplicada para misturas nas quais suas partículas apresentaram granulometria inferior a, aproximadamente, 0,85 mm. Para tamanhos mais grossos, a inspeção visual, descrita a seguir, se mostrou adequada na discriminação dos componentes.

3.2.1.3 Separação dos componentes manualmente por inspeção visual

Para partículas das amostras de misturas, as quais foram retidas em peneiras de aberturas maiores que 0,85 mm foi utilizada a separação manual a partir da inspeção visual. Esta inspeção visual foi baseada na diferença de coloração das partículas, uma vez que as partículas de basalto apresentam uma cor mais escura do que aquelas da amostra do calcário Ribeirão Branco.

Entretanto, a fim de facilitar esta separação, a amostra da mistura foi colocada em contato com água. Desta forma, as partículas de basalto adquiriram uma tonalidade mais escura do que as outras partículas, proporcionando uma separação mais precisa por evitar que partículas de basalto fossem confundidas com partículas de calcário Ribeirão

Branco (Figura 3.8). Assim, após a separação das partículas, as mesmas eram secas e pesadas, permitindo estimar a proporção de calcário e basalto em cada mistura.

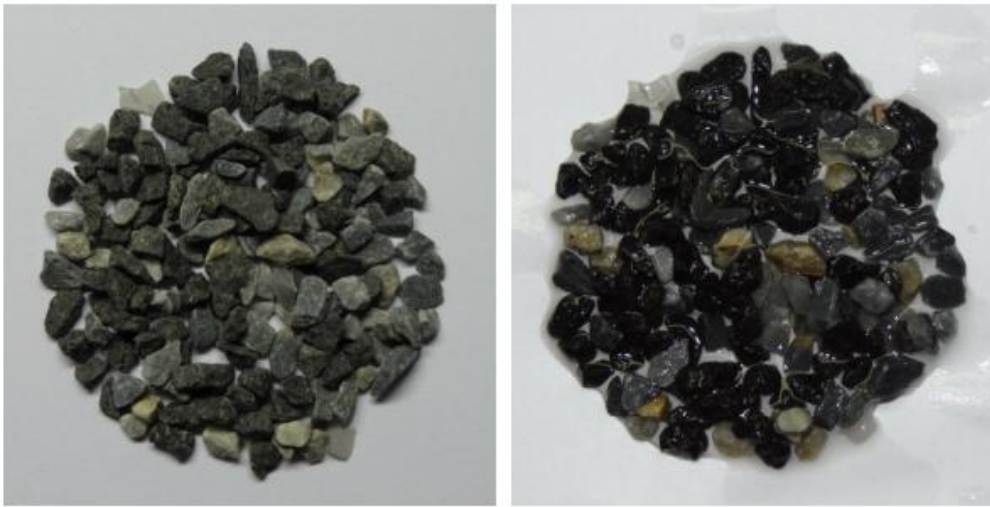


Figura 3.8 – Amostra da mistura basalto e calcário Ribeirão Branco seca e úmida para posterior separação manual dos componentes

3.2.1.4 Verificação do método de separação dos componentes

Com o propósito de identificar se os métodos de separação foram eficientes, foram comparadas as composições das misturas antes do peneiramento, denominada amostra de cabeça, e após o peneiramento, denominada amostra reconstituída. Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados e, assim, verificado que os métodos de análise dos componentes foram satisfatórios, tendo em vista que a maioria dos valores encontrados apresentou pequenos desvios.

Tabela 3.4 – Comparação da porcentagem de basalto nas análises obtidas a partir das amostras de cabeça e reconstituídas

% Basalto			
Ensaio Mistura BRB	Amostra de cabeça	Amostra reconstituída	Desvio (%)
Moabilidade Bond – Produto 25% B	24,00	23,40	2,5
Moabilidade Bond – Produto 50% B	48,15	50,15	-4,2
Moabilidade Bond – Produto 75% B	76,98	79,26	-3,0
Circuito fechado – Produto 50% B	53,32	54,17	-1,6
Circuito fechado – Hold up 50% B	64,00	63,26	1,2

3.2.2 Determinação da massa específica de sólidos por picnometria

A determinação da massa específica de cada uma das amostras foi realizada segundo a técnica da picnometria. Esta técnica se baseia na utilização de um frasco de volume fixo denominado picnômetro (Figura 3.9) e uma balança analítica com precisão 0,0001g. A alta resolução das balanças analíticas faz da picnometria um método bastante preciso, mas que requer algum cuidado por parte do analista para que resultados confiáveis sejam obtidos.

A metodologia da picnometria é baseada no volume deslocado de um líquido padrão ao mergulhar o sólido em estudo no picnômetro. O líquido padrão utilizado foi a água.



Figura 3.9 - Picnômetro de 25 ml, já com a amostra seca para ensaio

A massa específica do material (ρ_s), em g/cm³, é calculada pela seguinte equação:

$$\rho_s = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} * \rho_f \quad (Eq. 36)$$

sendo, M_1 o peso do picnômetro vazio e com tampa, M_2 o peso do picnômetro com a amostra do material, M_3 o peso do picnômetro com a amostra e o líquido padrão, M_4 o peso do picnômetro completamente cheio, apenas com líquido padrão e ρ_f a massa específica do fluido padrão (água). O resultado final é a média de medidas replicadas.

3.2.3 Ensaios para determinação do Índice de Trabalho de Bond

O ensaio de moabilidade de Bond em moinho de bolas permite o cálculo do índice de trabalho de Bond (Wi), que é a energia específica (energia por unidade de massa) necessária para cominuir um material de uma granulometria muito grosseira (teoricamente infinita) até 80% menor do que 100 μ m. Este índice indica a resistência à redução que o material apresenta na faixa granulométrica testada.

O ensaio simula, através da operação em ciclos descontínuos fechados, a operação contínua de um moinho em circuito fechado com um classificador, operando a uma carga circulante de 250%, ou seja, a cada novo ciclo a proporção de material que retorna para o moinho é 2,5 vezes maior do que a alimentação nova introduzida.

A amostra necessária para o ensaio foi classificada em uma peneira de 3,35 mm. O material retido nesta peneira foi britado em um britador cônico de laboratório da marca Denver, modelo No. 12 e classificado utilizando a mesma peneira até que todo o material fosse passante. Após a classificação na peneira de 3,35 mm, foi ainda retirado o material menor que 300 μ m, a qual foi a abertura da malha de classificação de todos ensaios. Essa remoção do material fino foi realizada com o objetivo de buscar uma maior similaridade das análises granulométricas das várias amostras.

A massa de alimentação a ser utilizada em cada batelada foi calculada a partir da média de três determinações da massa específica aparente, obtidas ao se compactar o material por meio de vibração em uma proveta graduada até 700 ml.

O ensaio de moabilidade foi realizado em um moinho com dimensões padronizadas de 305 x 305 mm, revestimento liso e cantos curvados (Figura 3.10), regulado para operar com uma velocidade de 70 +/- 3 rotações por minuto, segundo a NBR 11376. A carga moedora foi de, aproximadamente, 20 kg e composta por bolas de diversos tamanhos, as quais têm sua distribuição apresentada na Tabela 3.5.



Figura 3.10 – Moinho de bolas de Bond do LTM

Tabela 3.5 – Distribuição dos diâmetros das bolas da carga moedora

Classe de tamanhos	Número de bolas	Diâmetro (mm)	
		Nominal	Intervalo
1	36	36,5	35-39
2	62	30,2	29-31
3	12	25,4	25-28
4	61	19,1	19-23
5	114	15,9	15-16

O primeiro ciclo de cada ensaio foi realizado com 100 rotações. Em seguida, a classificação do material foi realizada na malha selecionada para o corte (300 µm), com a separação e identificação do material passante. Uma nova quantidade de material, equivalente ao produto passante, era adicionada ao moinho, simulando o circuito fechado. O procedimento (ciclo) foi repetido até que os valores de moabilidade atingissem o equilíbrio. O índice de trabalho (Wi) é obtido a partir da fórmula empírica:

$$Wi = \frac{11 * 44,5}{Am^{0,23} Mob^{0,82}} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{A}} \right) \quad (Eq. 37)$$

sendo A_m a abertura da malha de classificação do ensaio, em µm, Mob a massa moída com granulometria abaixo desta malha por rotação (moabilidade, dada em gramas por rotação), A a abertura em µm da peneira que permite a passagem de 80% da massa de alimentação e P a abertura em µm da peneira que permite a passagem de 80% da massa do produto.

As análises granulométricas foram realizadas por peneiramento híbrido, correspondendo ao peneiramento a úmido nas peneiras com aberturas de 75 µm até 38 µm, seguindo de peneiramento a seco em peneirador do tipo Ro-Tap[®] para aberturas maiores.

O ensaio de moabilidade de Bond foi realizado para cada componente individual e para algumas misturas binárias com proporções volumétricas de 25%, 50% e 75%. No caso dos ensaios das misturas, pilhas foram formadas de cada um dos materiais, sendo a massa da alimentação em cada ciclo obtida pela recomposição daquela extraída de cada uma das pilhas, nas devidas proporções em volume da mistura.

3.2.4 Ensaios de moagem descontínua

Os ensaios de moagem descontínua, também conhecidos como ensaios cinéticos, foram realizados com o objetivo de determinar a taxa de quebra dos materiais individuais e suas misturas, bem como a distribuição granulométrica dos produtos.

Para a execução do procedimento experimental foi utilizado o moinho existente no LTM (Figura 3.11), o qual apresenta dimensões internas de 300 mm de comprimento e 300 mm de diâmetro, com quatro barras elevadoras medindo 27,5 mm de largura, 6,6 mm de altura e 300 mm de comprimento, tendo sido projetado segundo recomendação de Yang et al. (1967).



Figura 3.11 – Moinho de bolas utilizado na moagem descontínua

As amostras utilizadas nos ensaios foram separadas nos intervalos de tamanhos 9,5 x 6,3 mm e 4,75 x 3,35 mm por peneiramento a seco. Uma síntese das condições experimentais padronizadas empregadas nos ensaios de moagem é apresentada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Condições experimentais empregadas nos ensaios de moagem descontínua na condição padrão LTM/COPPE

Variáveis de Operação	
Velocidade de rotação	54 rpm
Fração da velocidade crítica	0,67
Diâmetro dos corpos moedores	25 mm
Grau de enchimento	30%
Massa carga moedora	29,8 kg
Preenchimento de vazios	100%

O procedimento dos ensaios de moagem descontínua, realizados a seco, consistiu nas seguintes etapas:

1) Cálculo da massa do material monotamanho (M_m) utilizada nos ensaios, a partir da determinação da massa específica do material, com o auxílio da equação:

$$M_m = \frac{\pi D_m^2 L}{2} J U \varepsilon \rho_s \quad (Eq. 38)$$

sendo ε a porosidade nominal da carga, considerada como 40%, ρ_s a massa específica dos sólidos, determinada por picnometria em líquido (conforme descrito na seção 3.2.2), D_m o diâmetro interno do moinho e L comprimento interno do moinho.

2) Separação de uma amostra do monotamanho a ser ensaiado para análise granulométrica do material antes do ensaio de moagem, com a finalidade de determinar precisamente a distribuição granulométrica da alimentação.

3) Carregamento do moinho, o qual foi realizado alternando uma camada de corpos moedores (bolas) e outra camada de material, de modo a garantir uma boa mistura nos estágios iniciais do processo (Figura 3.12).

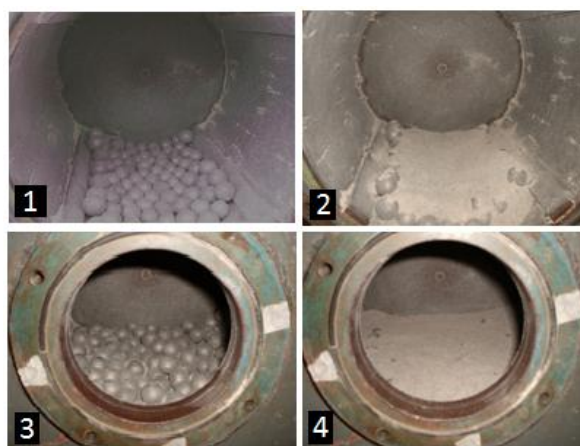


Figura 3.12 – Sequência de etapas no carregamento do moinho para ensaio de moagem descontínua

- 4) Moagem por um período de tempo e com velocidade de rotação pré-estabelecidos, esta última programada no painel de controle do moinho.
- 5) Descarregamento do moinho, tendo o cuidado de evitar perdas de partículas.
- 6) Separação do material dos corpos moedores.
- 7) Quarteamento do material de modo a se obter uma massa para análise granulométrica que fosse representativa do conteúdo do moinho.
- 8) Análise granulométrica da amostra quarteada após o primeiro tempo de moagem. Essa análise granulométrica foi efetuada a seco, usando uma série completa de peneiras com aberturas seguindo uma progressão geométrica com razão $\sqrt{2}$ em um peneirador Ro-Tap[®] com tempo de peneiramento de 15 minutos e em seguida, e a úmido para as peneiras de aberturas menores do que 75 μm .
- 9) Retorno do material ao moinho para continuação do ensaio, ou seja, para realizar o próximo tempo de moagem. A amostra de material quarteada que permaneceu abaixo do *top size* (9,5 x 6,3 mm ou 4,75 x 3,35) não era retornada ao moinho, uma vez que a mesma corresponde a uma massa inferior a 1% do material do moinho. Somente a amostra retida no *top size* era realimentada ao moinho.

A partir desta metodologia foram realizados ensaios de moagem de partículas contidas em monotamanhos, tanto para os componentes individuais (basalto e calcário Ribeirão Branco) quanto para suas misturas, contendo diferentes proporções volumétricas do componente resistente (25%, 50% e 75%). Na análise granulométrica da moagem de misturas, as partículas do componente resistente e do componente frágil, retidas em cada faixa de tamanho, foram separadas. As partículas retidas nas faixas de tamanho entre 9,5 e 0,85 mm foram separadas pelo método manual com inspeção visual enquanto o material contido nas faixas de tamanho entre 0,85 e 0,038 e do fundo foi analisado pelo método da dissolução ácida.

Foram realizados de 4 a 5 tempos de moagem para cada um dos dois tamanhos ensaiados, de maneira a caracterizar adequadamente a taxa de desaparecimento dos monotamanhos, permitindo a estimativa da taxa de quebra até uma fração remanescente do monotamanho inferior a 1%.

3.3 Ensaios de moagem contínua

Adicionalmente aos ensaios de moagem em batelada e em ciclo fechado (Bond) foram ainda realizados dois ensaios de moagem contínua a seco em moinho de bolas, sendo um deles em circuito aberto e o outro em circuito fechado. O ensaio de moagem contínua é caracterizado pela entrada e saída de contínua de material. Em ambos os ensaios foi utilizada uma mistura constituída por 50% de basalto e de 50% calcário Ribeirão Branco, em massa. Esses ensaios foram executados no Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE, contando com a participação direta do Eng. Maloba Tshela e a supervisão técnica do Eng. Rodrigo M. de Carvalho (Tshela, 2011).

Os materiais utilizados na alimentação do moinho foram britados separadamente até um tamanho menor do que 3,35 mm. A fim de atingir esta granulometria as partículas passaram por dois estágios de britagem: um em britador de mandíbulas e outro em britador cônico de laboratório, especificamente nesta ordem. Após a etapa de britagem, estes materiais foram misturados e quarteados em lotes de 4 kg para serem alimentados ao moinho durante a operação.

3.3.1 Moagem em circuito aberto

A moagem em circuito aberto é caracterizada pela alimentação diretamente no moinho e a descarga do produto após a cominuição do material. Assim, neste ensaio de moagem, não houve a etapa de classificação com posterior reciclo, de maneira que as partículas passavam apenas uma vez pelo moinho. A descarga do produto ocorreu através do diafragma, o qual é uma grelha disposta na extremidade do moinho. O circuito de moagem foi composto por um alimentador de sólidos vibratório em rosca (Vibrascrew[®])

acoplado a um moinho de bolas contínuo (Cimaq[®]) medindo 30,5 x 30,5 cm. Um diagrama esquemático do moinho é apresentado na Figura 3.13.

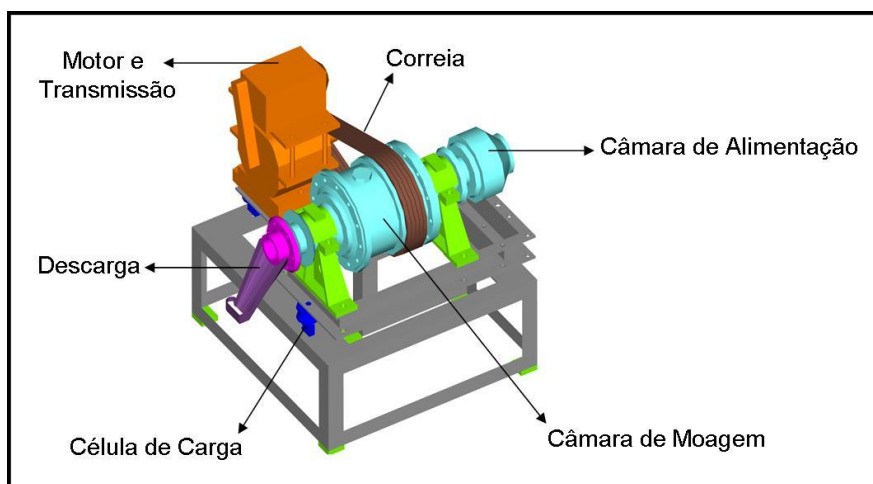


Figura 3.13 – Diagrama esquemático em CAD do moinho utilizado nos ensaios de moagem contínua (Kallembach, 2009)

A vista interna e o perfil da seção transversal do moinho são ilustrados na Figura 3.14.

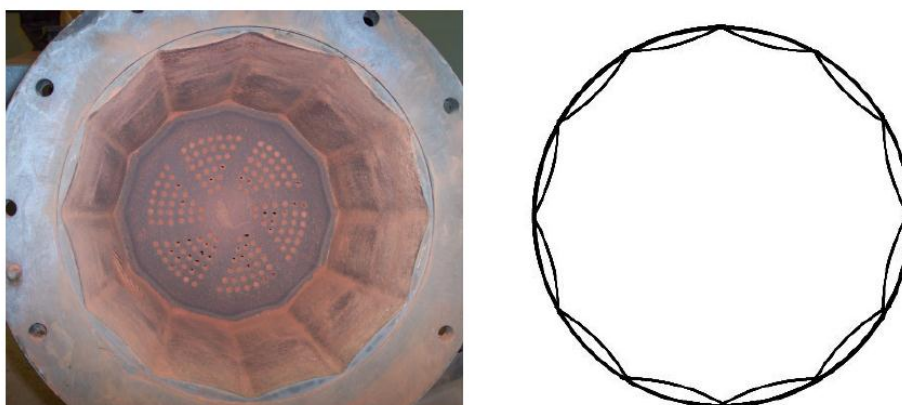


Figura 3.14 – Vista interna e perfil da câmara do moinho utilizado nos ensaios de moagem contínua (Tavares e Carvalho, 2010)

O ensaio foi realizado segundo as condições operacionais apresentadas na Tabela 3.7 e com carga moedora conforme a distribuição de tamanhos descrita na Tabela 3.8.

Tabela 3.7 – Condições operacionais utilizadas nos ensaios de moagem contínua

Condições Operacionais	Circuito aberto	Circuito fechado
Velocidade de rotação	60 rpm	60 rpm
Taxa de alimentação inicial	30 kg/h	30 kg/h
Grau de enchimento	30%	30%
P ₈₀ desejado	425 µm	150 µm
Velocidade do classificador	-	3.000 rpm

Tabela 3.8 – Distribuição dos diâmetros das bolas da carga moedora dos ensaios de moagem contínua

Classe de tamanhos	Número de bolas	Diâmetro (mm)	
		Nominal	Intervalo
1	40	36,5	35-39
2	225	25,4	25-28
3	170	19,1	19-23
4	180	15,9	15-16

Antes de ser iniciada a operação, o circuito foi configurado de modo a oferecer medições confiáveis. Primeiramente o silo de alimentação teve sua leitura de massa zerada no programa controlador. Neste momento, o silo se encontrava completamente vazio. Uma massa conhecida de material foi introduzida cuidadosamente no silo com a finalidade de verificar se a massa medida se encontrava correta. O mesmo foi realizado quando a carga moedora foi inserida no moinho.

Em seguida, foi adicionado o *hold up* inicial (4 kg) no moinho antes que a operação fosse iniciada. Um esquema de coletor e balança foi preparado de modo a obter as

medições da taxa de descarga do produto. Após o silo do alimentador receber o material a ser alimentado ao moinho e o moinho se encontrar em operação, o alimentador era acionado.

Durante este ensaio foram coletadas amostras da mistura nos seguintes pontos, de modo a viabilizar a análise granulométrica e a análise de componentes por dissolução ácida ou inspeção visual:

- Alimentação do moinho
- *Hold up* no estado estacionário
- Produto final da moagem

3.3.2 Moagem em circuito fechado

Neste ensaio foi adicionado ao circuito aberto já existente um classificador dinâmico (Raymond®) equipado com inversor de frequência, permitindo o controle contínuo da frequência de rotações, um transportador helicoidal fabricado pela Imetec Ltda., garantindo o reciclo do produto grosso do classificador (*oversize*) para o moinho, e uma caixa de poeira na saída do produto fino do classificador (*undersize*) para coleta do produto final do circuito. No circuito fechado a partícula pode retornar ao moinho diversas vezes até alcançar a granulometria desejada. Um esquema ilustrativo do circuito fechado de moagem na configuração direta pode ser observado na Figura 3.15.

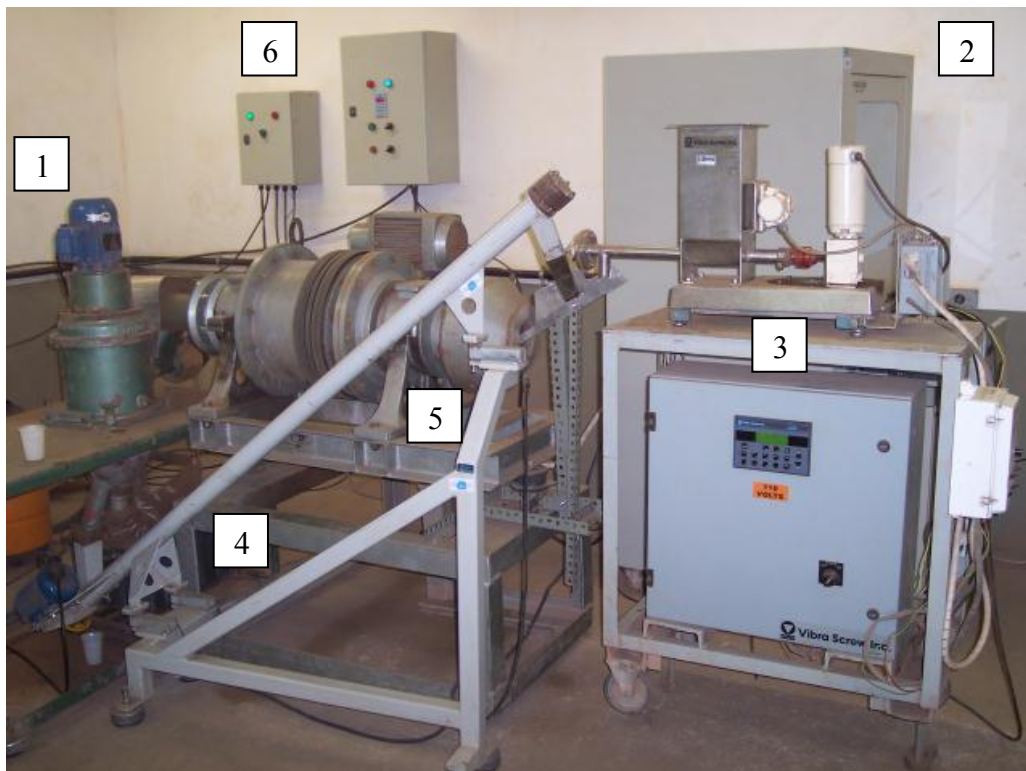


Figura 3.15 – Circuito fechado de moagem utilizado nos ensaios de moagem da mistura 50% basalto e 50% calcário Ribeirão Branco. 1- Classificador, 2- Sistema supervisório, 3- Alimentador vibratório, 4- Transportador de sólidos, 5- Moinho contínuo, 6- Painéis de operação

O sistema de moagem contínua é dotado de sensores e atuadores, de modo a permitir o controle da operação de moagem em circuito fechado por meio de um sistema supervisório desenvolvido em LabVIEW[®] no LTM (Kallembach, 2009). No circuito é possível manipular a taxa de alimentação nova de sólidos e a velocidade do rotor do classificador de modo a regular a granulometria do produto final do circuito.

Um procedimento semelhante àquele usado no ensaio em circuito aberto foi também empregado antes de iniciar a operação de modo a zerar as massas do silo do alimentador e do moinho. As condições operacionais deste ensaio estão apresentadas na Tabela 3.7. A carga de bolas foi mantida a mesma do ensaio em circuito aberto (Tabela 3.8).

A operação foi iniciada pelo acionamento do classificador, transportador, moinho e alimentador, exatamente nesta ordem. Durante o teste, a velocidade do classificador precisou ser ajustada, de uma configuração inicial de 900 rpm para uma velocidade de 3.000 rpm, com o propósito de alcançar o P_{80} desejado no *undersize* do classificador.

No decorrer do ensaio foram coletados materiais em diversos pontos de amostragem. Durante a operação, foram amostrados os pontos do *undersize* do classificador, com a finalidade de verificar a porcentagem passante em 150 μm e a taxa de descaga do moinho para verificar o atingimento do estado estacionário (Tshela, 2011). No estado estacionário, os pontos identificados no esquema da Figura 3.16 foram coletados para posterior análises, sendo:

- 1- Alimentação nova
- 2- Descarga do moinho, ou seja, a alimentação do classificador
- 3- Undersize do classificador
- 4- Oversize do classificador, ou seja, a alimentação do transportador
- 5- Descarga do transportador

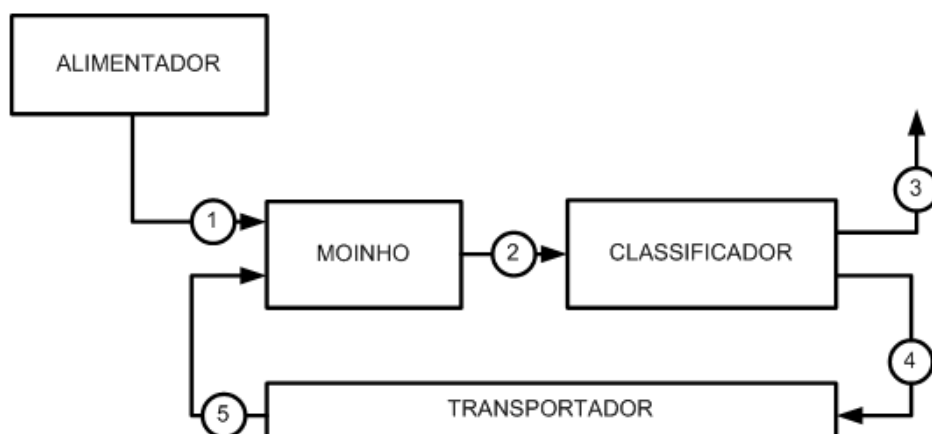


Figura 3.16 – Esquema da configuração do circuito fechado mostrando os pontos de amostragem (círculos)

Estes pontos do estado estacionário foram amostrados duas vezes a fim de compor uma amostra representativa dos resultados. A segunda amostragem foi realizada 10 minutos após a primeira, de modo a garantir que o estado estacionário fosse restabelecido. Após a segunda amostragem o circuito foi paralisado gradativamente. Foram desligados o moinho e o transportador simultaneamente e, em seguida, o alimentador e o classificador (Tshela, 2011).

O moinho foi então esvaziado e o seu *hold up* foi pesado. Uma amostra representativa foi separada para análises granulométricas e de teores por faixa de tamanhos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais do trabalho. Esses resultados são apresentados em quatro partes: a caracterização dos materiais, os ensaios de moabilidade de Bond, os ensaios de moagem descontínua e contínua.

4.1 Caracterização dos materiais individuais

A Tabela 4.1 resume as principais características dos materiais utilizados nos ensaios de misturas binárias, mostrando as diferenças entre eles.

Tabela 4.1 – Características dos materiais utilizados no estudo de moagem de misturas binárias

Material	Massa Específica (g/cm ³)	Ab*	Ensaio de Moabilidade de Bond			% Material Dissolvido ***
			Wi (kWh/t)**	A80 (µm)	P80 (µm)	
Basalto	3,03	37,18	13,78	2607	223	7,40
Calcário Ribeirão Branco	2,65	61,79	9,05	2455	205	94,70
Calcário Cantagalo	2,72	609,8	6,28	2386	233	91,66
Calcário Catalão	2,98	ND	7,38	2501	223	83,68

* Estimado a partir de ensaio com material na faixa de tamanho 22,4 x 19,0 mm aplicando a correção proposta por Tavares e Silveira (2008).

** Determinado usando a malha de 300 µm.

*** Utilizando o procedimento descrito na seção 3.2.1.2 para o material com tamanho acima de 38 µm.

ND = Não Disponível.

Para cada material supracitado foi realizado o ensaio de moabilidade de Bond utilizando os tamanhos de partículas para a alimentação do moinho de bolas conforme mostrado na Figura 4.1, na qual se verifica que as análises granulométricas são razoavelmente similares, o que é desejável no caso desse ensaio.

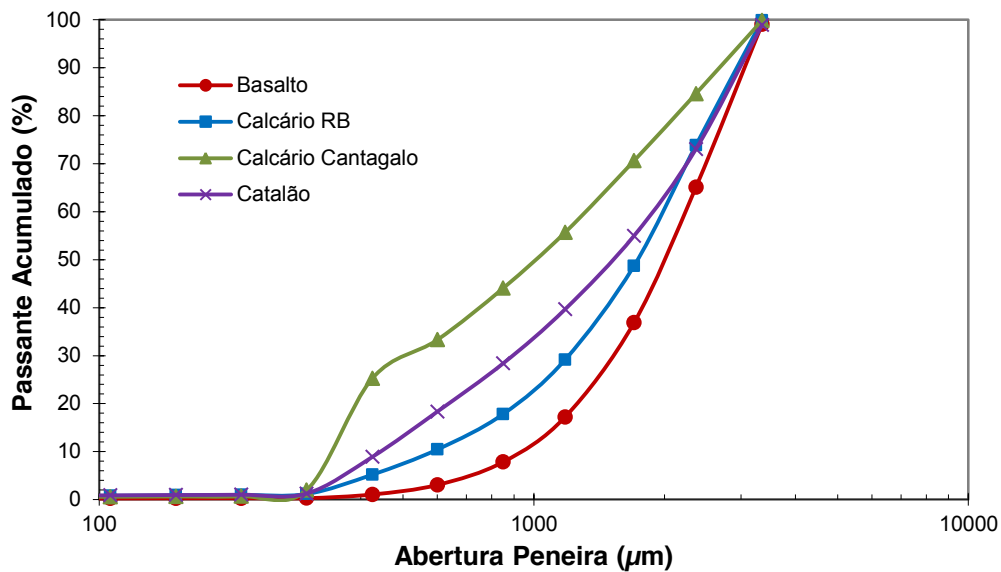


Figura 4.1 – Análise granulométrica da alimentação do ensaio de moabilidade de Bond para cada material

A Figura 4.2 a Figura 4.5 ilustram as análises granulométricas da alimentação e do produto final dos ensaios de moabilidade de Bond de cada material utilizado no estudo de moagem de misturas binárias. Elas mostram um razoável paralelismo entre as distribuições granulométricas da alimentação e do produto, o que é um requisito para a validade do valor de W_i resultante do ensaio.

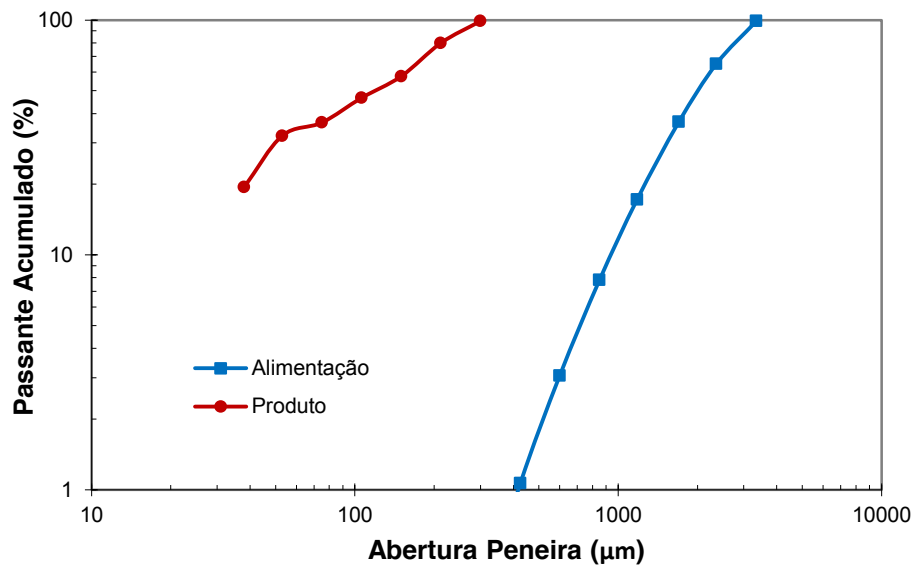


Figura 4.2 – Análises granulométricas da amostra de basalto na alimentação e no produto do ensaio de moabilidade de Bond

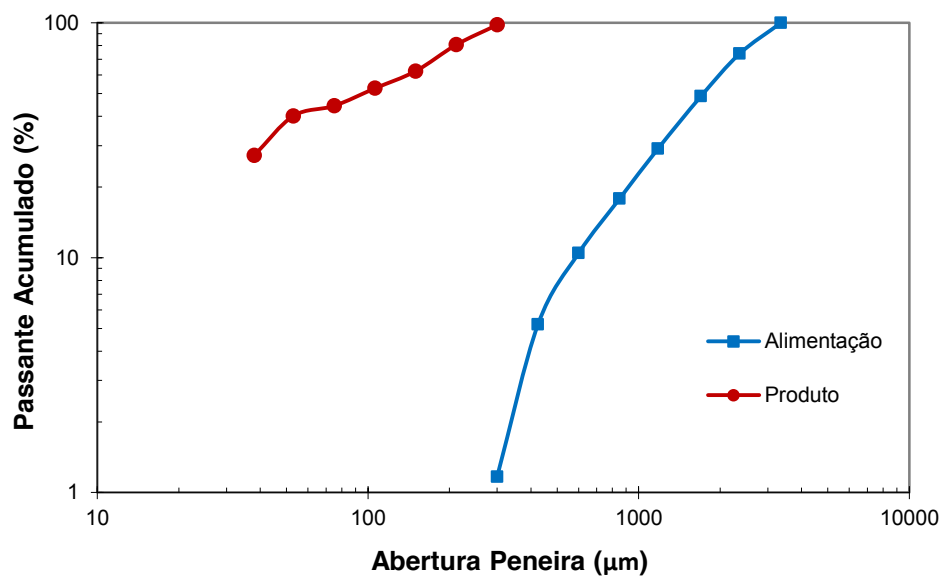


Figura 4.3 – Análises granulométricas da amostra de calcário Ribeirão Branco na alimentação e no produto do ensaio de moabilidade de Bond

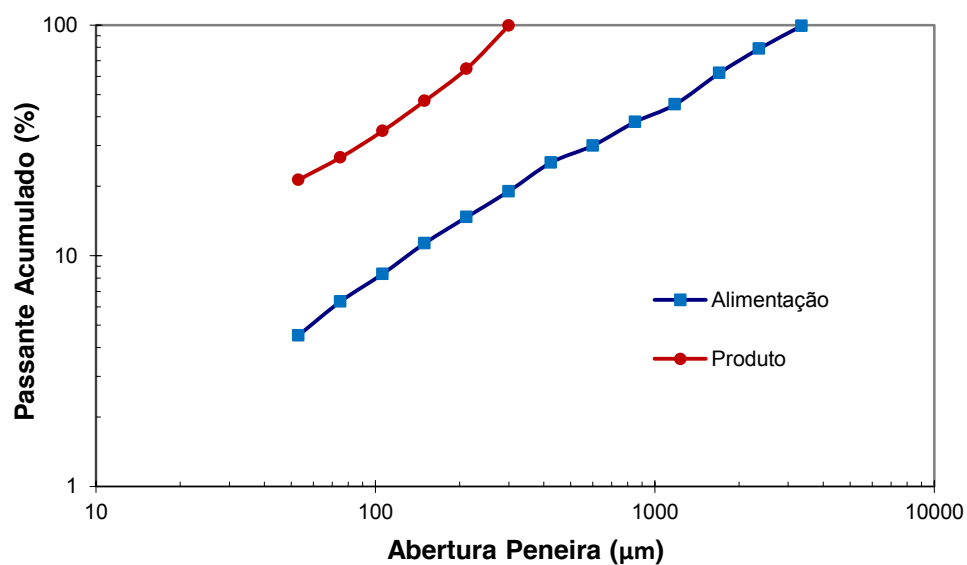


Figura 4.4 – Análises granulométricas da amostra de calcário Cantagalo na alimentação e no produto do ensaio de moabilidade de Bond

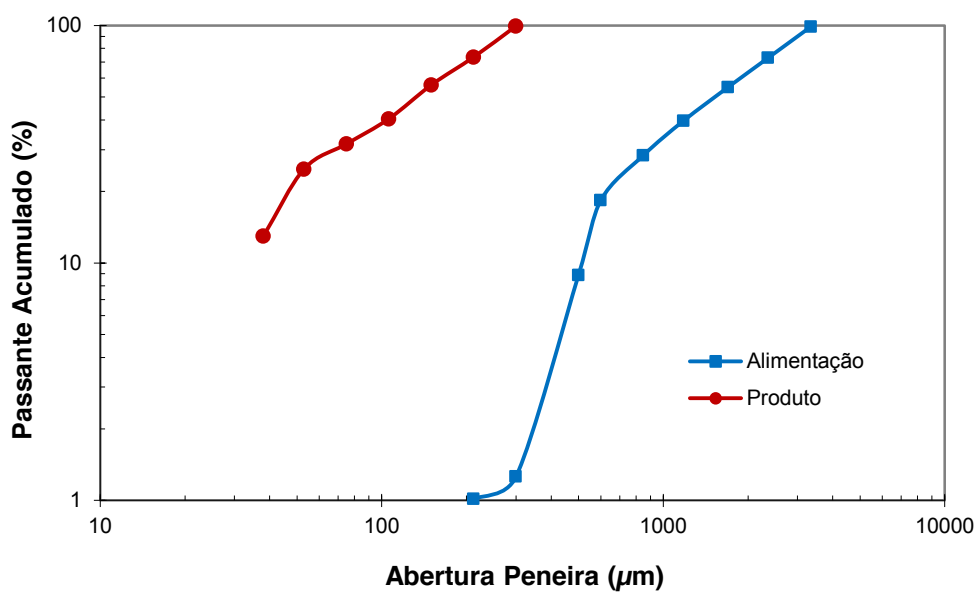


Figura 4.5 – Análises granulométricas da amostra de minério de Catalão na alimentação e no produto do ensaio de moabilidade de Bond

4.2 Moabilidade de Bond de misturas

Além dos ensaios de Moabilidade de Bond realizados para os materiais individuais, foram ainda realizados ensaios com misturas binárias a diferentes proporções volumétricas dos componentes. As misturas realizadas foram as seguintes:

- Basalto e calcário Ribeirão Branco
- Basalto e calcário Cantagalo
- Calcário Ribeirão Branco e calcário Catalão
- Basalto e calcário Catalão

Tendo em vista que as misturas foram binárias, convencionou-se representar a mistura como a proporção do material mais resistente, ou seja, do material com maior valor de W_i na mistura. A Tabela 4.2 e a Figura 4.6 mostram um resumo dos resultados de medida do índice de trabalho de Bond (W_i) para os componentes individuais e suas misturas.

Tabela 4.2 - Resultados de W_i (kWh/t) para os componentes individuais e suas misturas

Proporção volumétrica do componente mais resistente (%) [*]	Basalto e Calcário RB	Basalto e Calcário C	Calcário RB e Catalão	Basalto e Catalão
	W_i (kWh/t)			
0	9,05	6,28	7,38	7,38
25	9,47/10,66 ^{**}	8,66	7,66	10,81
50	11,60	10,76	7,98	13,54
75	14,24/14,03 ^{**}	12,59	8,03/8,92 ^{**}	15,69
100	13,78	13,78	9,05	13,78

^{*} Para a mistura de basalto e calcário Ribeirão Branco o teor é dado em massa.

^{**} Ensaios realizados em duplicata.

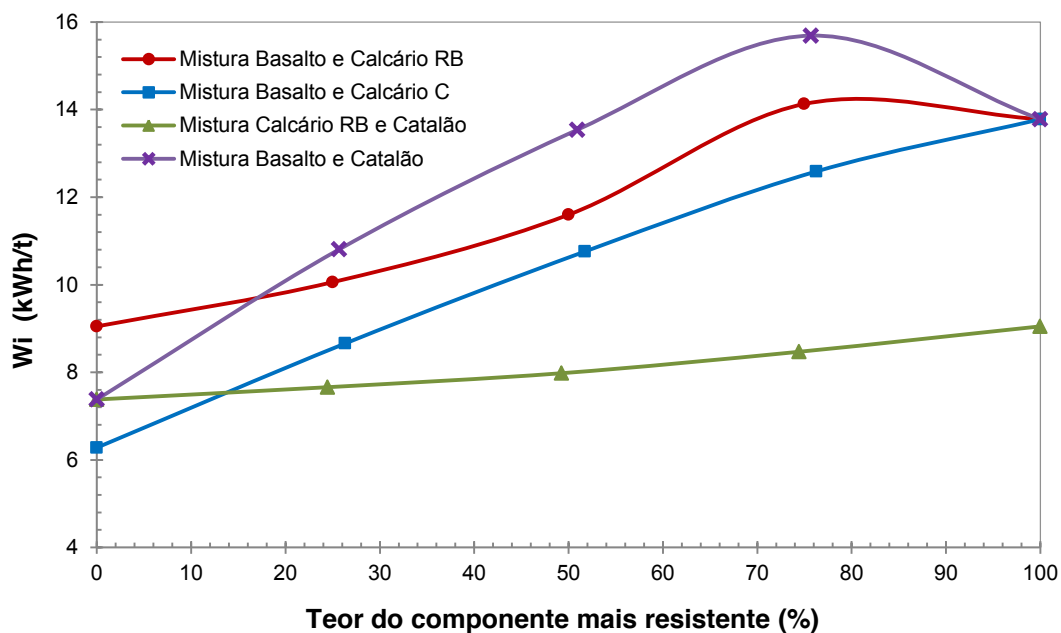


Figura 4.6 – Índice de trabalho de Bond (Wi) para as diversas misturas utilizadas no estudo

Como pode ser observado na Figura 4.7, os valores de Wi medidos para a mistura de basalto e calcário Ribeirão Branco foram aproximadamente equivalentes aos valores de Wi obtidos pela média ponderada dos valores obtidos para os componentes individualmente desta mistura, conforme mostra a equação:

$$W_i \text{ ponderado} = W_{i1} * F_{M1} + W_{i2} * (1 - F_{M1}) \quad (Eq. 39)$$

sendo W_{i1} o índice de trabalho de Bond para o material resistente, F_{M1} a fração mássica do material resistente, W_{i2} o índice de trabalho de Bond para o material frágil.

Uma exceção a essa tendência foi o resultado obtido para a mistura correspondente a 75% de basalto. Assim, pode-se concluir que, quando o teor de basalto foi maior que 50%, a energia real necessária para cominuir a mistura foi maior do que aquela calculada pela ponderação dos componentes moídos puros.

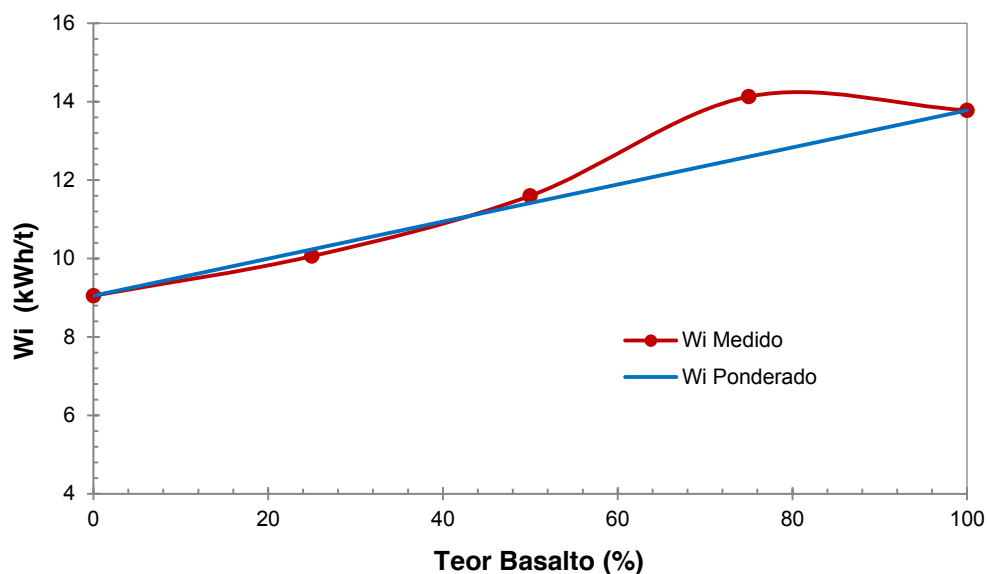


Figura 4.7 – Comparação dos resultados de Wi medido e calculado para a mistura basalto e calcário Ribeirão Branco

Para a mistura basalto e calcário Cantagalo, conforme ilustra a Figura 4.8, os valores de Wi medidos das misturas atingiram valores maiores do que os valores de Wi calculados pela média ponderada, porém muito próximos. Isto demonstra que a energia específica de moagem necessária para cominuir os componentes misturados é bastante similar à energia consumida na moagem dos componentes separados (Equação 39).

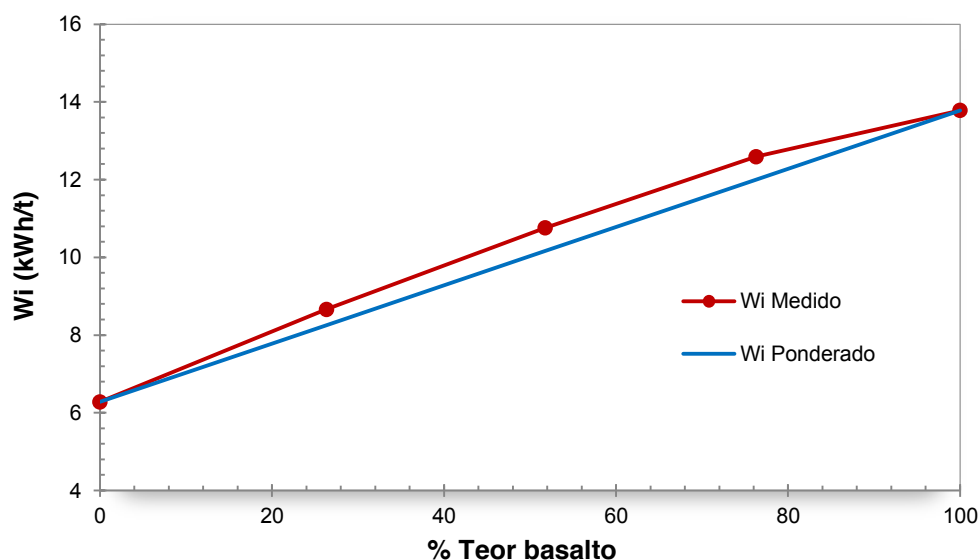


Figura 4.8 – Comparação dos resultados de Wi medido e calculado para a mistura basalto e calcário Cantagalo

Foi realizado um terceiro ensaio com calcário Ribeirão Branco e Catalão. O minério de nióbio de Catalão, apesar de não ter apresentado características de separação por dissolução ácida adequadas para uma avaliação objetiva da sua mistura com o calcário Ribeirão Branco, foi utilizado para compor esta mistura com o calcário Ribeirão Branco com o intuito de analisar a moagem de uma mistura na qual as resistências dos componentes fossem similares. O resultado obtido foi diferente daqueles encontrados nas misturas anteriores. Para este caso, os valores de W_i medidos permaneceram abaixo dos valores calculados pela média, porém próximos. Isto demonstra que a energia específica de moagem necessária para cominuir os componentes juntos também seria similar à energia consumida na moagem dos componentes separados (Figura 4.9), porém marginalmente mais baixa.

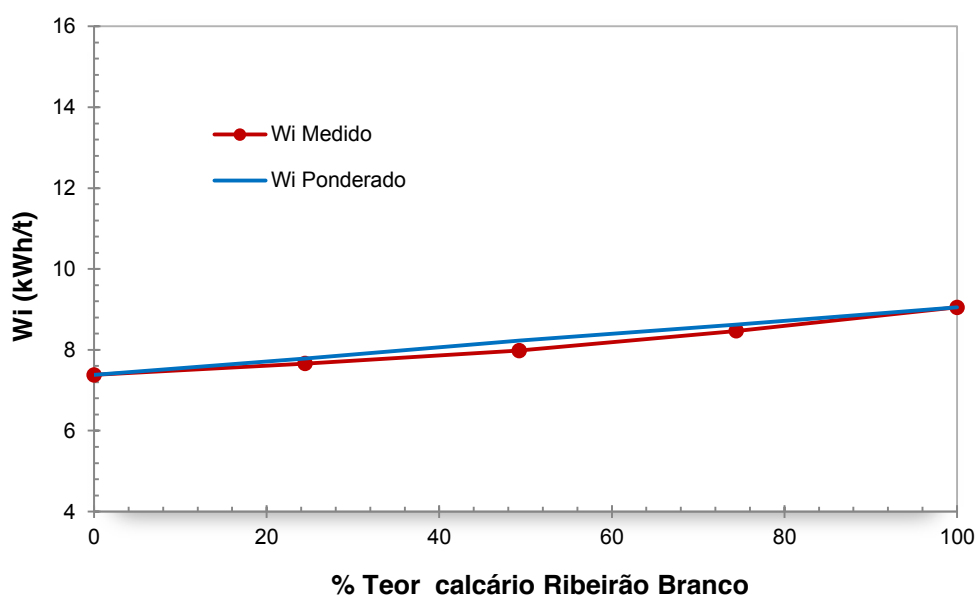


Figura 4.9 – Comparação dos resultados de W_i medido e calculado para a mistura calcário Ribeirão Branco e Catalão

A mistura basalto e Catalão também foi utilizada no plano de testes do estudo de moagem de misturas binárias. Entretanto, neste caso o W_i medido foi significativamente maior do que o W_i calculado (Figura 4.10), até mesmo em mistura com proporção de 25% e 50% do componente mais resistente, o que ainda não havia sido observado em

misturas anteriores. Inclusive, o índice medido para a mistura 75% basalto foi 13,9% maior do que o índice do componente mais resistente.

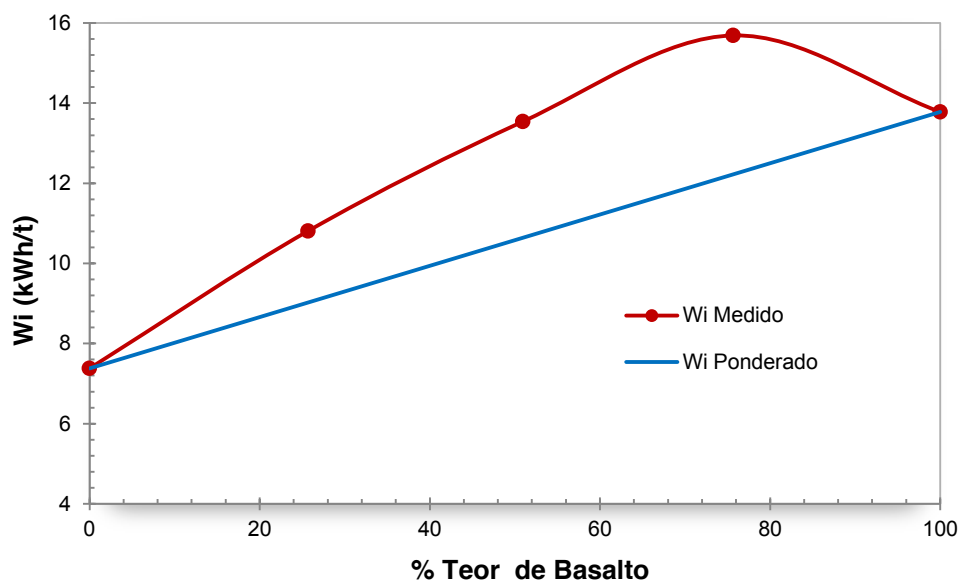


Figura 4.10 – Comparação dos resultados de Wi medido e calculado para a mistura basalto e Catalão

Para efeito de comparação, Öner (2000) e Hosten e Avsar (1998) realizaram ensaios com mistura de escória-clínquer e clínquer-tufo, respectivamente, nos quais se verificou que os valores de energias medidas na moagem foram mais altos do que os calculados pela média ponderada, o que concorda com os resultados da moagem da mistura basalto e Catalão do presente trabalho.

Após o término de cada ciclo do ensaio de moabilidade de Bond, o material contido no moinho passou pela etapa do peneiramento, sendo retirado todo o material passante na peneira de 300 μm , compondo o que é denominado “produto do ciclo”. No caso dos ensaios com misturas de diferentes proporções de basalto e calcário Ribeirão Branco foram analisadas as distribuições granulométricas dos produtos retido e final, ou seja, do último ciclo de cada ensaio.

A ilustração da Figura 4.11 e Figura 4.12 mostra uma comparação dos resultados das análises granulométricas do basalto e do calcário Ribeirão Branco, respectivamente, contidas no material retido nos diferentes ensaios envolvendo esses componentes. Pode-se observar que as amostras de basalto retidas na mistura 75% basalto e de basalto puro apresentaram granulometria mais fina se comparadas às de outras misturas. Uma hipótese para esse material, correspondente ao *hold up* final do ensaio, ter apresentado uma granulometria mais fina foi que o moinho entrou em regime permanente, ou seja, a quantidade de material alimentada no moinho deve ser igual à descarregada. Devido à menor quantidade de calcário presente ou até mesmo sua ausência, o basalto teve suas partículas quebradas. Por outro lado, o calcário Ribeirão Branco não apresentou diferenças significativas nas distribuições granulométricas do material retido quando em mistura com diferentes proporções de basalto ou quando foi moído separadamente.

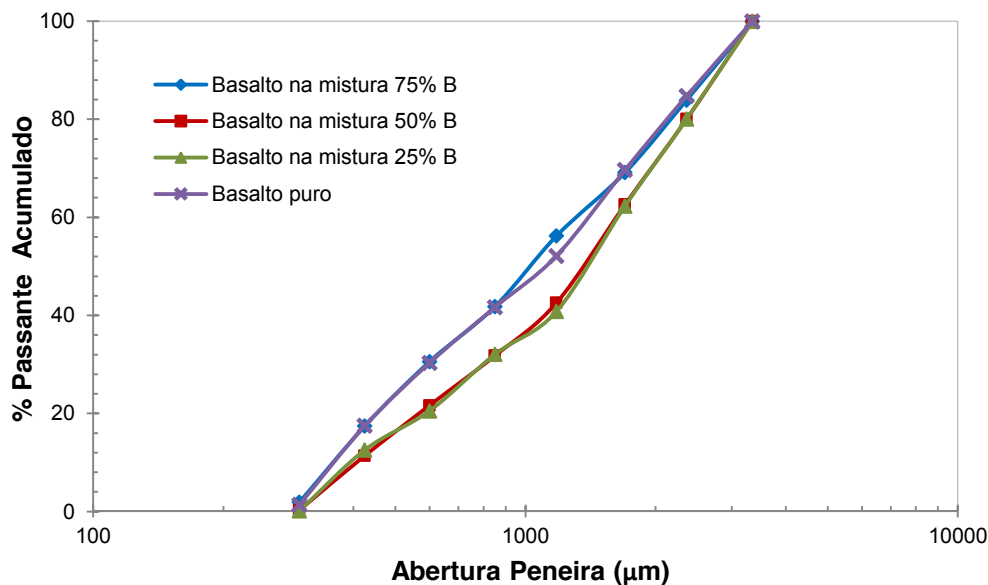


Figura 4.11 – Comparação das análises granulométricas do material retido no último ciclo para o basalto individual e em diferentes misturas com o calcário Ribeirão Branco

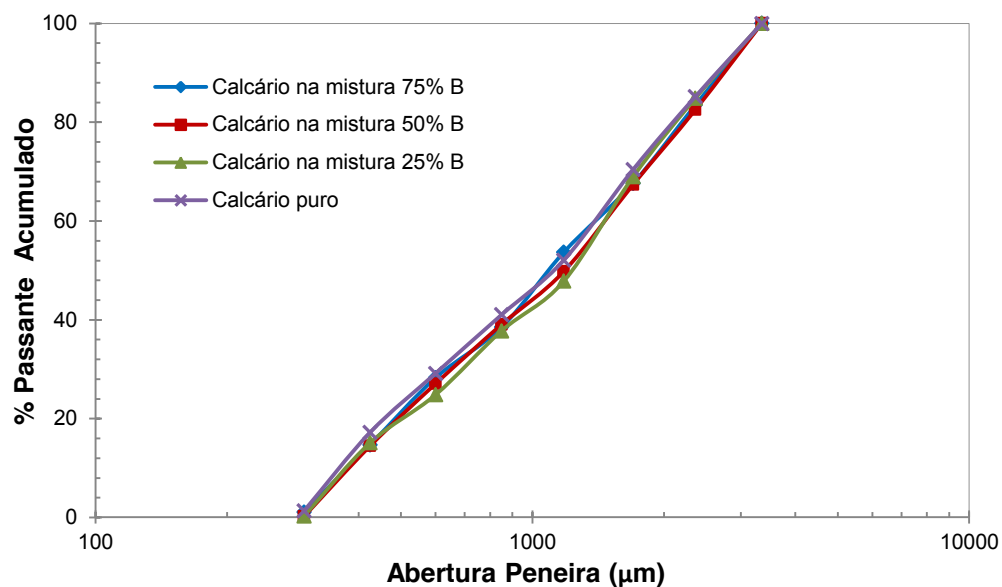


Figura 4.12 – Comparação das análises granulométricas do material retido no último ciclo para o calcário Ribeirão Branco individual e em diferentes misturas com o basalto

A Figura 4.13 e Figura 4.14 mostram uma comparação das distribuições granulométricas dos componentes individuais e de cada componente nas diferentes misturas para o basalto e para o calcário Ribeirão Branco, respectivamente, no produto final do ensaio. Verificou-se que o modo de quebra do basalto foi independente do ambiente de mistura, já o calcário apresentou granulometria mais fina quando moído em conjunto. Uma possível explicação é que o basalto auxilia na moagem do calcário.

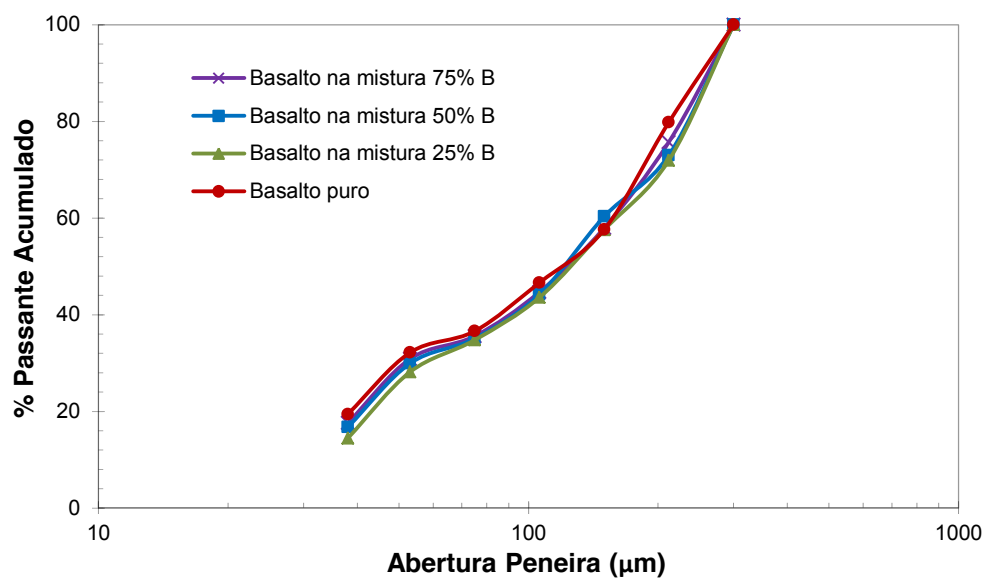


Figura 4.13 – Comparação das análises granulométricas do produto final do material basalto individual e nas diferentes misturas com o calcário Ribeirão Branco

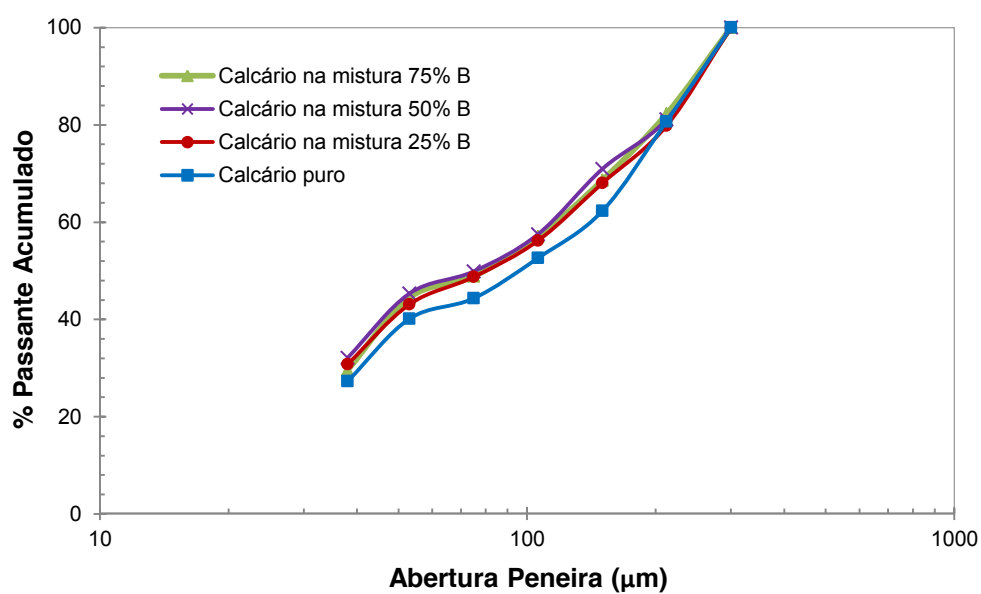


Figura 4.14 – Comparação das análises granulométricas do produto final do material calcário Ribeirão Branco individual e nas diferentes misturas com o basalto

A fim de demonstrar a diferença entre as análises dos dois componentes, a Figura 4.15 ainda mostra a porcentagem passante em 75 μm do produto final desta mesma mistura, constatando-se que esta porcentagem foi quase constante para o basalto, à medida que as proporções das misturas foram submetidas à mudança. O calcário Ribeirão Branco, entretanto, foi moído sistematicamente mais fino que o basalto nos ensaios.

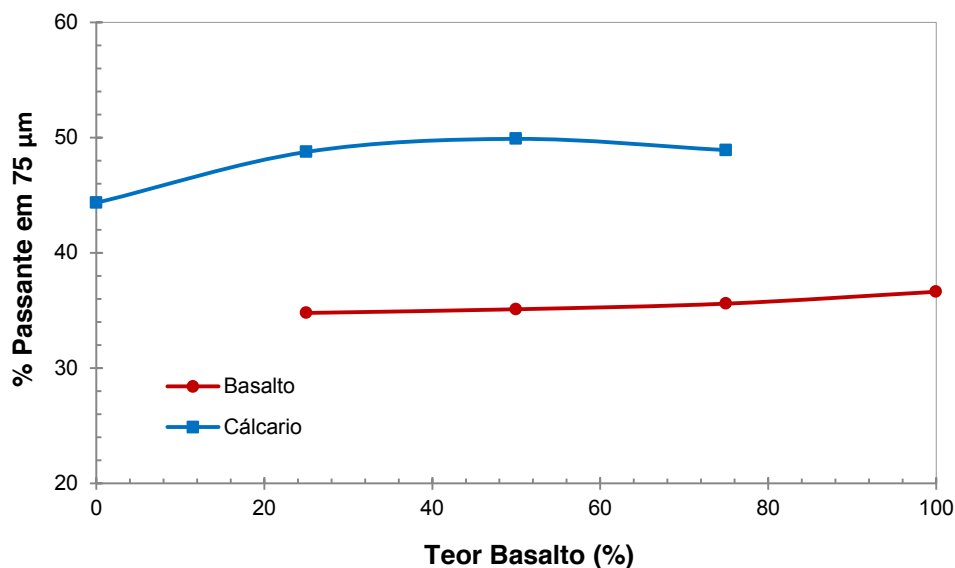


Figura 4.15 – Porcentagem passante em 75 μm do produto final da moagem de basalto e calcário Ribeirão Branco individuais e nas suas misturas

O comportamento do teor de basalto no produto, ciclo a ciclo, é exibido na Figura 4.16 para a mistura basalto e calcário Ribeirão Branco e na Figura 4.17 para a mistura basalto e calcário Cantagalo. Inicialmente o teor de calcário no produto foi maior do que aquele alimentado no moinho para ambas as misturas, devido à sua maior facilidade de se fragmentar quando comparado ao basalto. No decorrer do ensaio, foi observado que o teor de basalto aumentou gradativamente com o número de ciclos, pois sua tendência é atingir o teor no qual foi alimentado, enquanto que o teor de calcário diminui. Isto ocorreu devido ao acúmulo de basalto no moinho e a consequente necessidade do ensaio atingir o estado estacionário após determinado número de ciclos. É importante ressaltar a semelhança deste resultado com aquele obtido na moagem da mistura quartzo e calcita (Fuerstenau e Venkataraman, 1988), onde também se verificou o aumento do teor do componente mais resistente no produto.

Com a finalidade de exemplificar o efeito relatado, pode-se citar o ensaio da mistura 50% basalto e 50% de calcário Ribeirão Branco (Figura 4.16). No caso desta mistura, a alimentação do primeiro ciclo foi composta por metade da carga de basalto, porém, no produto deste mesmo ciclo, o teor de basalto decresceu para 32,8%, sendo o restante do basalto reciclado para a etapa do 2º ciclo. Já o produto do ciclo subsequente apresentou 37,3% de basalto, pois a quantidade de basalto no moinho estava maior do que a quantidade de calcário. Contudo, verificou-se que, mesmo com o aumento do teor de basalto no produto de cada ciclo, este não foi maior do que o teor de calcário em nenhum dos 8 ciclos deste ensaio, pois o calcário é menos resistente do que o basalto, quebrando mais facilmente.

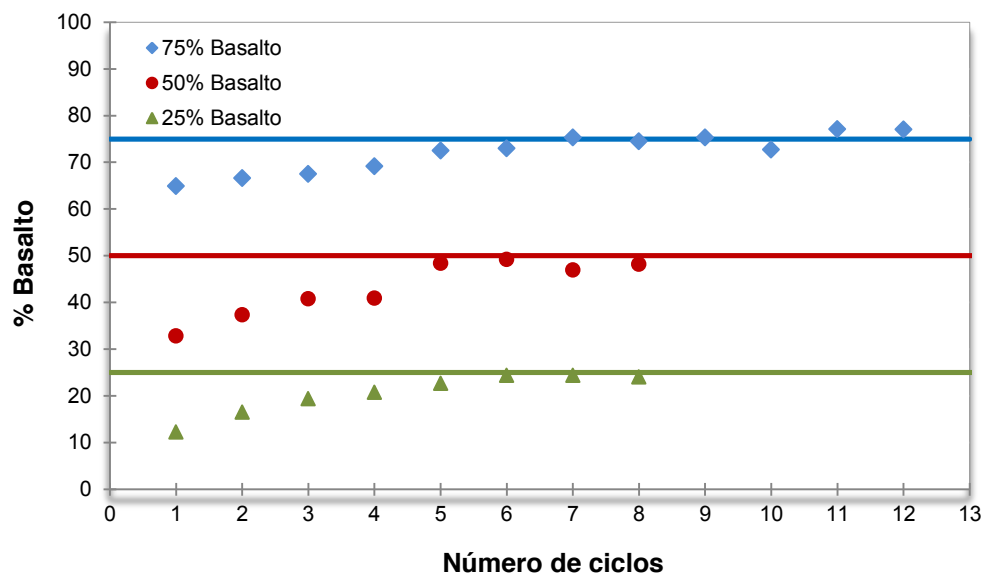


Figura 4.16 – Análise do teor de basalto no produto de cada ciclo para as misturas compostas por basalto e calcário Ribeirão Branco

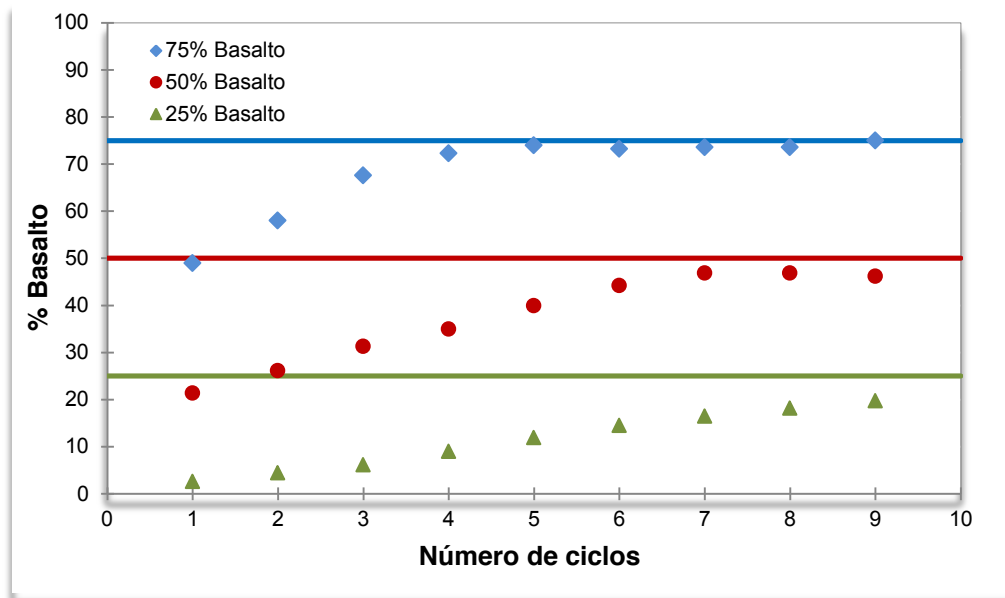


Figura 4.17 – Análise do teor de basalto no produto de cada ciclo para as misturas compostas por basalto e calcário Cantagalo

É importante ressaltar que as misturas de basalto ($W_i = 13,8 \text{ kWh/t}$) com o calcário Ribeirão Branco ($W_i = 9,1 \text{ kWh/t}$) estabilizaram a partir do 5º ciclo de moagem, já as misturas de basalto com o calcário Cantagalo ($W_i = 6,3 \text{ kWh/t}$) estabilizaram somente após o 9º ciclo, conforme ilustram a Figura 4.16 e a Figura 4.17. Isto indica que as misturas constituídas pelos componentes com maior diferencial de W_i requerem maior número de ciclos para que seu produto atinja o estado estacionário. Uma explicação plausível para esta convergência mais lenta está no fato de que o calcário Cantagalo necessita de menos energia para que sua quebra ocorra do que o calcário Ribeirão Branco. Assim, o produto da mistura com calcário Cantagalo possui uma porcentagem de basalto inicial significativamente mais baixa, como pode ser exemplificado com o valor de 21,4% na mistura de basalto com 50% calcário Cantagalo contra 32,8% na mistura de basalto com 50% calcário Ribeirão Branco, ambos os valores extraídos do primeiro ciclo.

Ao analisar a mistura com maior diferença nos valores de W_i , notou-se também que o alcance do estado estacionário dependeu das proporções dos componentes nas misturas. Quando o componente mais frágil foi dominante na mistura (25% basalto), o produto atingiu o estado estacionário após um número maior de ciclos. Isso pode ser explicado

pelo maior reciclo de basalto devido às partículas de calcário fragmentarem mais facilmente, conforme indicado na Figura 4.18. A partir desta ilustração percebe-se que, apesar de lenta, houve maior variação na porcentagem mássica de basalto no reciclo da mistura de 25% basalto.

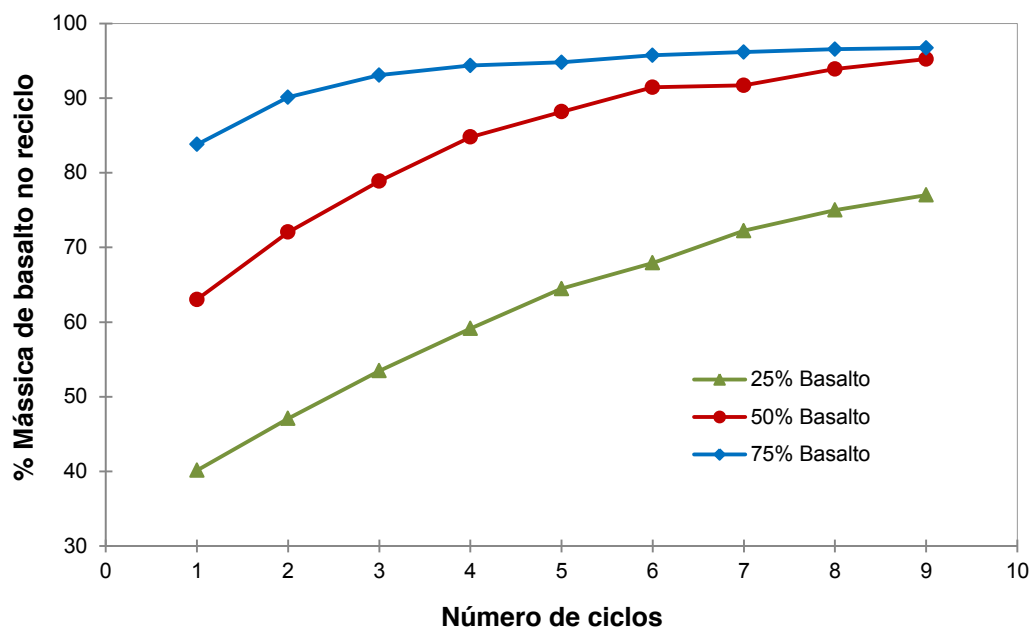


Figura 4.18 – Análise do teor de basalto no reciclo de cada ciclo para as misturas compostas por basalto e calcário Cantagalo.

A partir do balanço de massas indicado na equação 40 e dos teores dos componentes no produto de cada ciclo foi possível determinar o comportamento do teor de basalto e calcário no *hold up* do moinho, ou seja, na carga do moinho. A Figura 4.19 e a Figura 4.20 mostram a concentração de basalto no interior do moinho no decorrer dos ciclos e confirmam o acúmulo de basalto no interior do moinho. Um resultado análogo a este foi identificado no estudo de Bueno et al. (2011), no qual também foi constatado o acúmulo do material mais resistente no interior do moinho, porém em escala industrial.

$$Hold\ up = Reciclo + Massa\ de\ reposição \quad (Eq. 40)$$

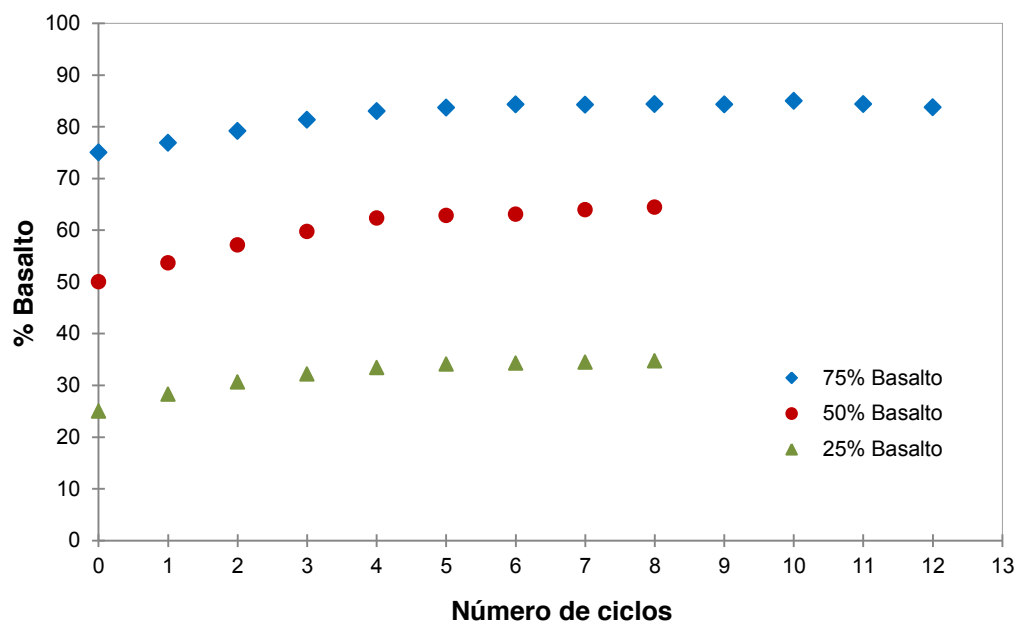


Figura 4.19 – Análise do teor de basalto no *hold up* de cada ciclo para as misturas compostas por basalto e calcário Ribeirão Branco

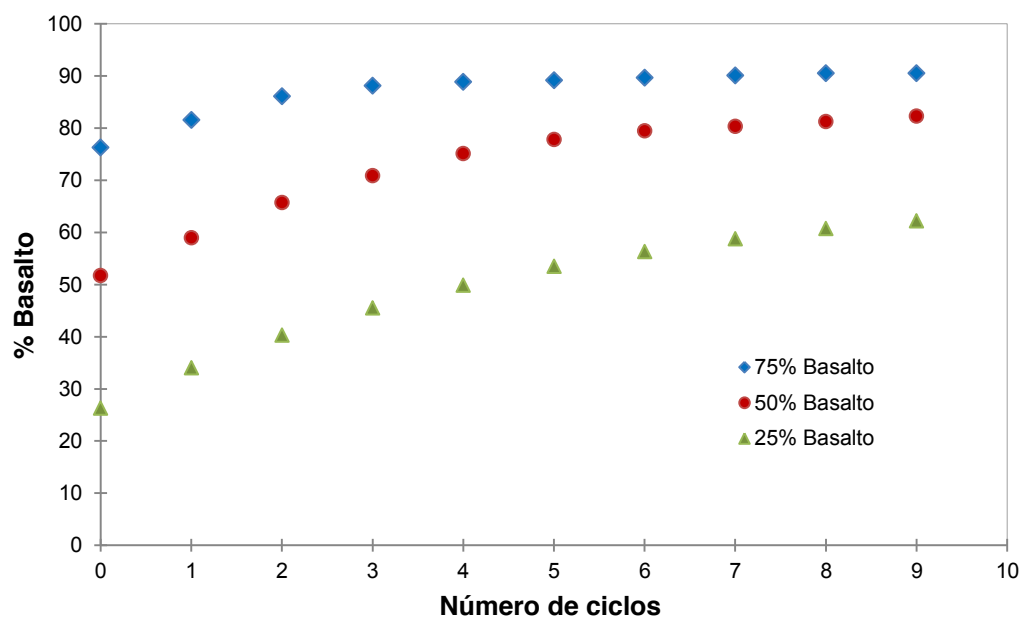


Figura 4.20 – Análise do teor de basalto no *hold up* de cada ciclo para as misturas compostas por basalto e calcário Cantagalo

Para que a diferença no acúmulo de basalto no interior do moinho pudesse ser melhor compreendida nas distintas misturas de basalto e calcário, foram destacados na Tabela 4.3 os valores da recirculação de material encontrados nos ensaios de moabilidade de Bond para cada componente envolvido na mistura. A porcentagem de basalto recirculado é notavelmente maior que de calcário, e esta porcentagem torna-se ainda maior à medida que a proporção de basalto diminui na mistura, pelo motivo de haver maior quantidade de calcário frágil para se fragmentar. Cabe destacar que esta desigualdade foi significativamente mais alta na mistura do basalto com o calcário Cantagalo, devido possivelmente ao fato deste tipo de calcário ser menos resistente do que o calcário Ribeirão Branco.

Tabela 4.3 – Porcentagem de recirculação ocorrida no ensaio de moabilidade de Bond da mistura basalto e calcário

Mistura	Componente	75% Basalto	50% Basalto	25% Basalto
Basalto+Ribeirão Branco	Basalto	284,7	369,4	400,4
	Calcário	123,7	158,9	213,3
	Mistura	251,4	249,8	249,3
Basalto+Cantagalo	Basalto	320,9	477,5	774,2
	Calcário	32,5	24,0	77,0
	Mistura	251,8	254,6	250,8

A Figura 4.21 mostra o efeito do acúmulo do material resistente dentro do moinho em relação à alimentação. Percebe-se que o acúmulo do basalto quando em mistura com o calcário Cantagalo é notavelmente maior, visto que a recirculação de basalto é maior neste caso. O calcário Cantagalo necessita de menos energia para que ocorra sua quebra do que o calcário Ribeirão Branco, diminuindo a tendência do componente mais frágil permanecer no moinho. Consequentemente, o basalto ocupa uma parcela maior no *hold up* do moinho em sua mistura com o calcário Cantagalo, conforme detalhado na Figura 4.22.

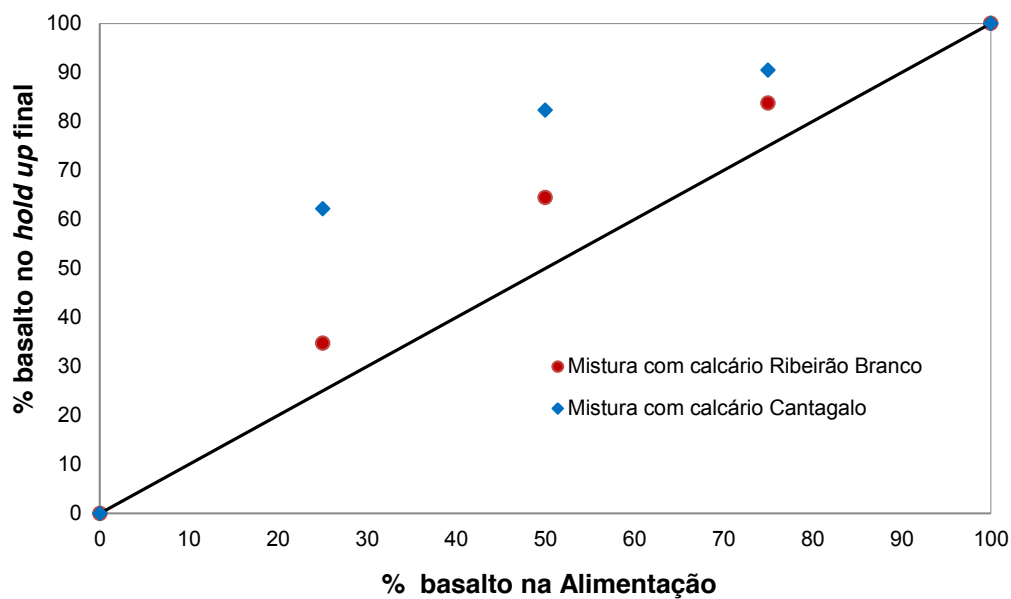


Figura 4.21 – Porcentagem de basalto no *hold up* do moinho em relação à porcentagem de basalto na alimentação em sua mistura com calcário Ribeirão Branco e Cantagalo

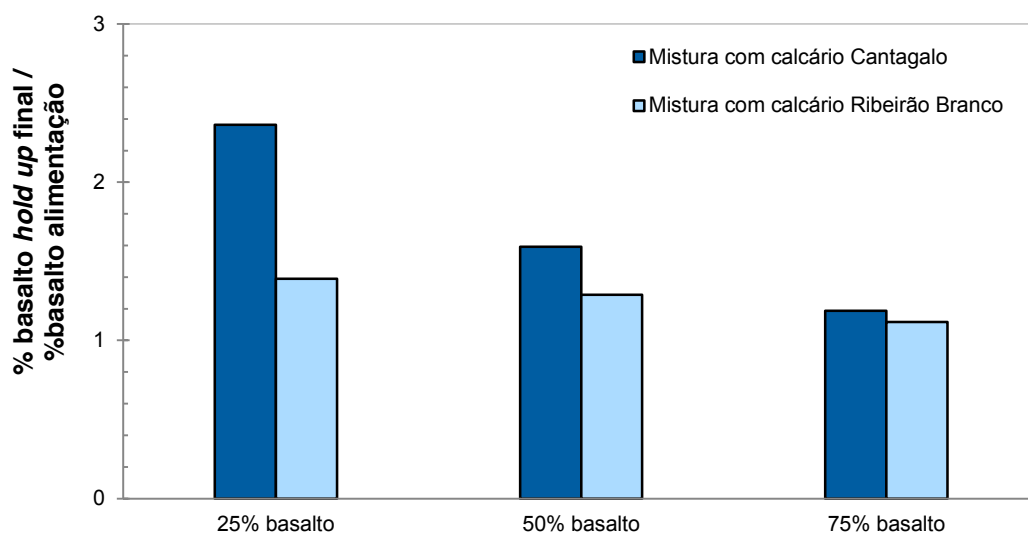


Figura 4.22 - Comparação da porcentagem de basalto no Hold up do moinho em relação a porcentagem de basalto na alimentação para misturas de diferentes proporções com calcário Ribeirão Branco e Cantagalo

À medida que a proporção de basalto na mistura aumenta, a porcentagem de basalto no *hold up* do moinho tende a diminuir e se igualar a composição da alimentação. Esta tendência pode ser exemplificada na Figura 4.22 na mistura 75% basalto.

4.2.1 Modelagem do acúmulo de material resistente no moinho

Com a finalidade de prever o comportamento de outras misturas foi proposto um modelo a partir de dados experimentais dos ensaios de moabilidade de Bond de algumas misturas (Figura 4.23). Este modelo, representado na equação 41, tem o objetivo de fornecer uma previsão do acúmulo do componente mais resistente no *hold up* do moinho a partir das características dos materiais individuais.

$$y = \frac{\alpha * x}{1 - z + \alpha * z} \quad (Eq. 41)$$

sendo y a fração do componente resistente no *hold up*, α o parâmetro da função e z a fração do componente resistente na alimentação, em massa.

A equação 41 foi usada em conjunto com os dados experimentais para otimizar o parâmetro α utilizando o método dos mínimos quadrados. A Tabela 4.4 apresenta os valores do parâmetro α otimizados.

Tabela 4.4 - Valores do parâmetro α otimizados para as misturas de basalto com calcário Ribeirão Branco e Cantagalo

Mistura	Valor de α
Basalto e Ribeirão Branco	1,705
Basalto e Cantagalo	4,429

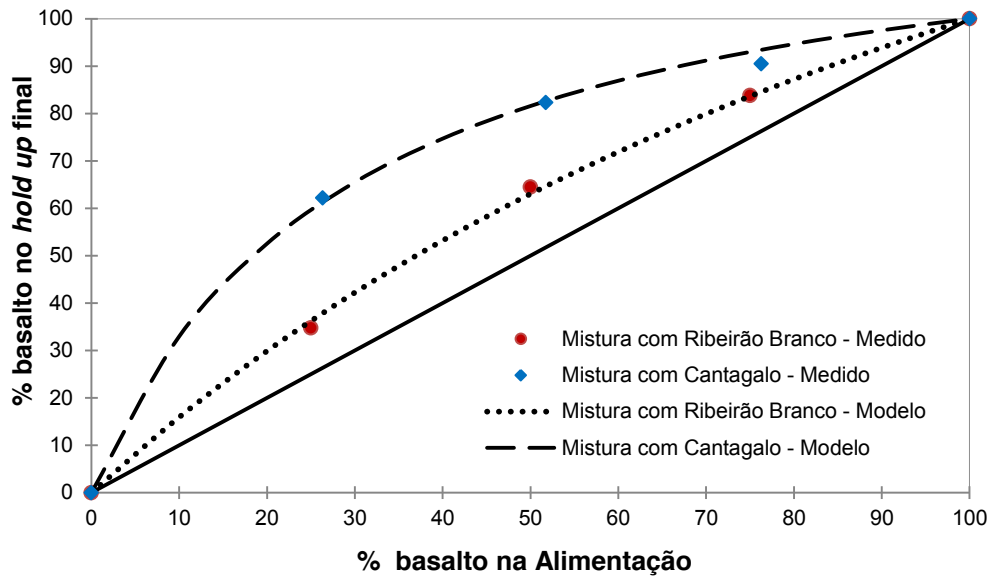


Figura 4.23 - Modelagem do comportamento das misturas

A fim de conferir um caráter preditivo ao modelo, o parâmetro α foi descrito por meio de uma expressão que o relaciona à razão entre os valores de W_i dos componentes da mistura, como é apresentado na Figura 4.24. A equação que descreve a relação entre esses seria dada por:

$$\alpha = \frac{1}{0,9852 \ln(x) + 1,0002} \quad (Eq. 42)$$

na qual, x é a razão dos valores de W_i do componente frágil e do componente resistente.

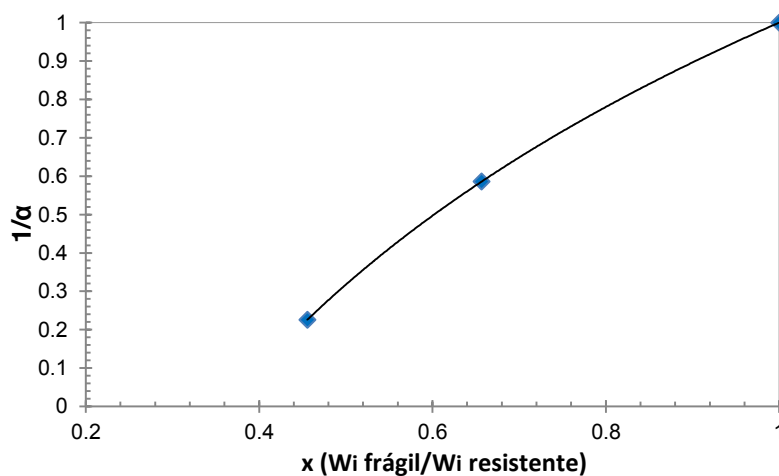


Figura 4.24 - Ajuste da função que descreve o parâmetro α

Fazendo uso desta função calibrada por outras misturas em conjunto com os valores de W_i dos componentes basalto e Catalão ($x = 0,54$), o acúmulo de basalto no *hold up* do moinho foi simulado. Com o propósito de testar o caráter preditivo deste modelo foram analisadas amostras de *hold up* de ensaios de moabilidade de Bond com a mistura basalto e Catalão em diversas proporções (Figura 4.25). Os dados experimentais obtidos mostraram que o modelo prevê satisfatoriamente a porcentagem do material resistente acumulado no *hold up* do moinho.

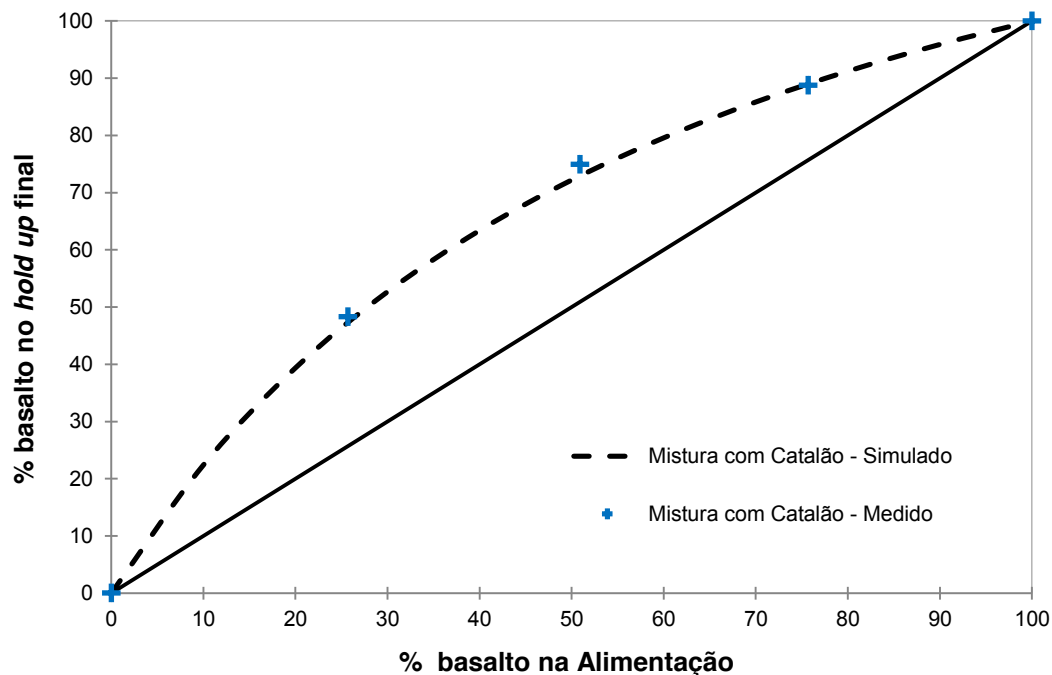


Figura 4.25 - Comparação entre valores medidos e simulados do comportamento da mistura basalto e Catalão ($\alpha = 2,59$)

A Figura 4.26 exibe a variação do acúmulo de material resistente no *hold up* do moinho ao se aumentar a diferença de W_i dos componentes da mistura. Nota-se que quanto maior é o valor de α (maior diferença de W_i), mais intenso é o acúmulo do material mais resistente no *hold up* do moinho no regime estacionário.

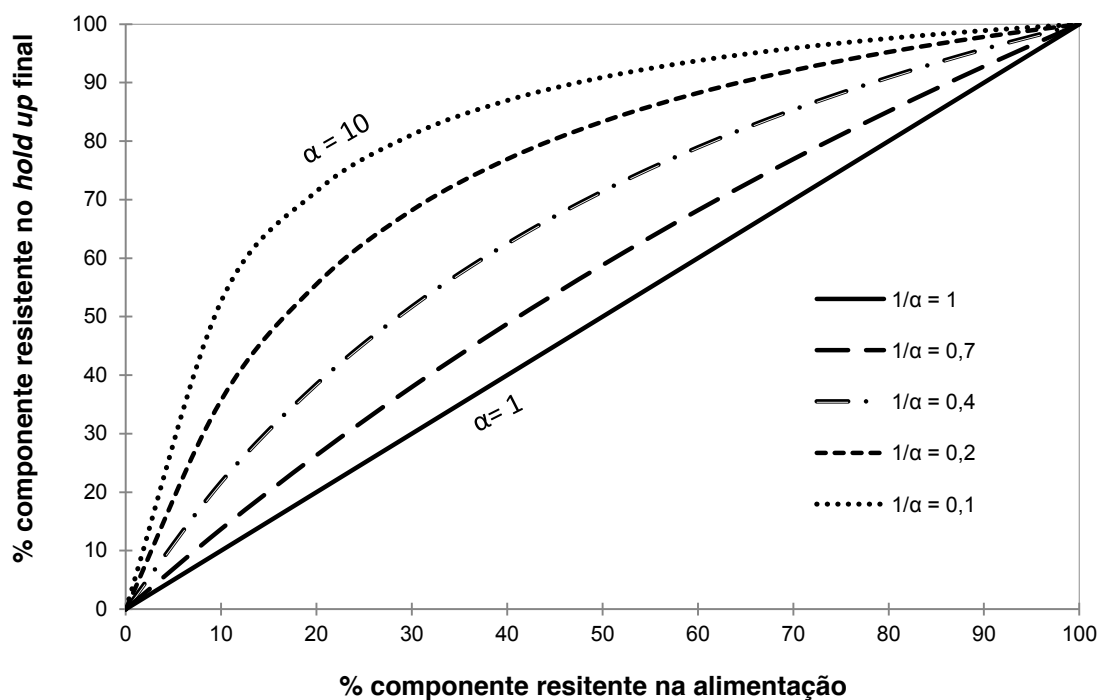


Figura 4.26 - Comportamento da porcentagem do componente resistente no *hold up* do moinho com a variação do valor do parâmetro α

4.3 Moagem descontínua de misturas

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de moagem descontínua para o basalto, o calcário Ribeirão Branco e suas misturas em proporções volumétricas de 75%, 50% e 25% de basalto em dois diferentes tamanhos iniciais (9,5 x 6,3 mm e 4,75 x 3,35 mm), os quais representam granulometrias que não puderam ser investigados por meio do ensaio de moabilidade de Bond em moinho de bolas.

4.3.1 Moagem individual do basalto e do calcário Ribeirão Branco

Primeiramente houve a necessidade de analisar o comportamento individual de cada material que constituiu a mistura a ser estudada na moagem descontínua. A Figura 4.27 ilustra as frações mássicas que permaneceram no tamanho original da alimentação após

períodos de tempo pré-estabelecidos para as amostras de basalto e calcário Ribeirão Branco nos tamanhos iniciais de 9,5 x 6,3 mm e 4,75 x 3,35 mm, respectivamente. Estes ensaios mostraram que o desaparecimento de calcário em faixas de tamanho grosseiro foi mais rápido do que o desaparecimento de basalto, ou seja, a taxa de quebra do calcário é maior do que a taxa de quebra do basalto. A Figura 4.28 e a Figura 4.29 comparam as análises granulométricas do basalto e calcário cominuídos individualmente após determinados tempos de moagem do material no tamanho original 9,5 x 6,3 mm e 4,75 x 3,35 mm, respectivamente. Esta comparação evidencia a granulometria mais fina do calcário em relação ao basalto, para os mesmos tempos de moagem.

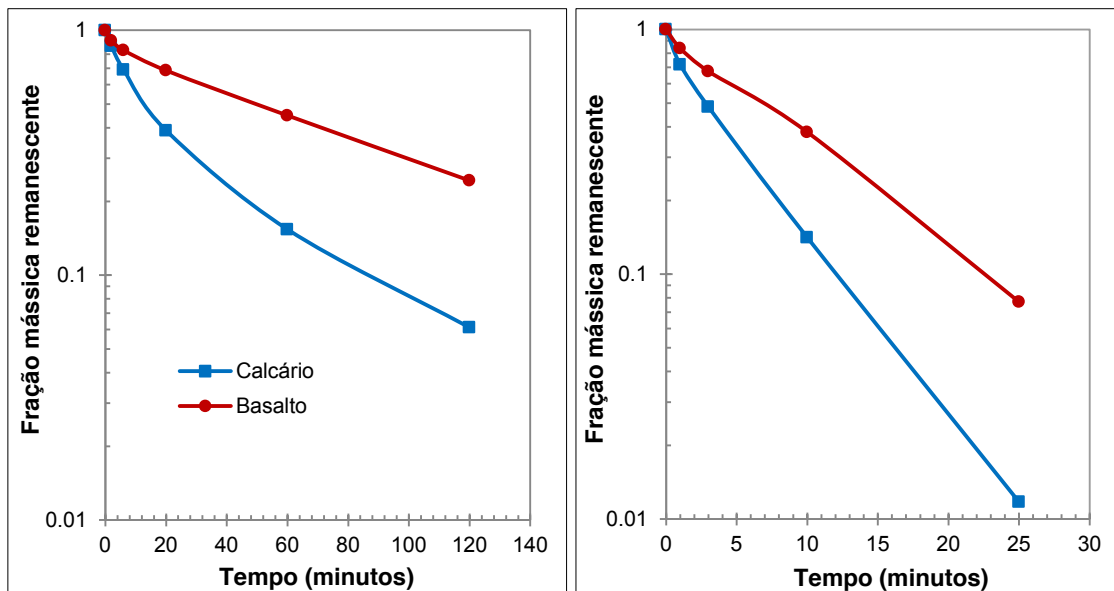


Figura 4.27 - Fração mássica remanescente da alimentação de basalto e calcário Ribeirão Branco no tamanho 9,5 x 6,3 mm e 4,75 x 3,35 mm, respectivamente.

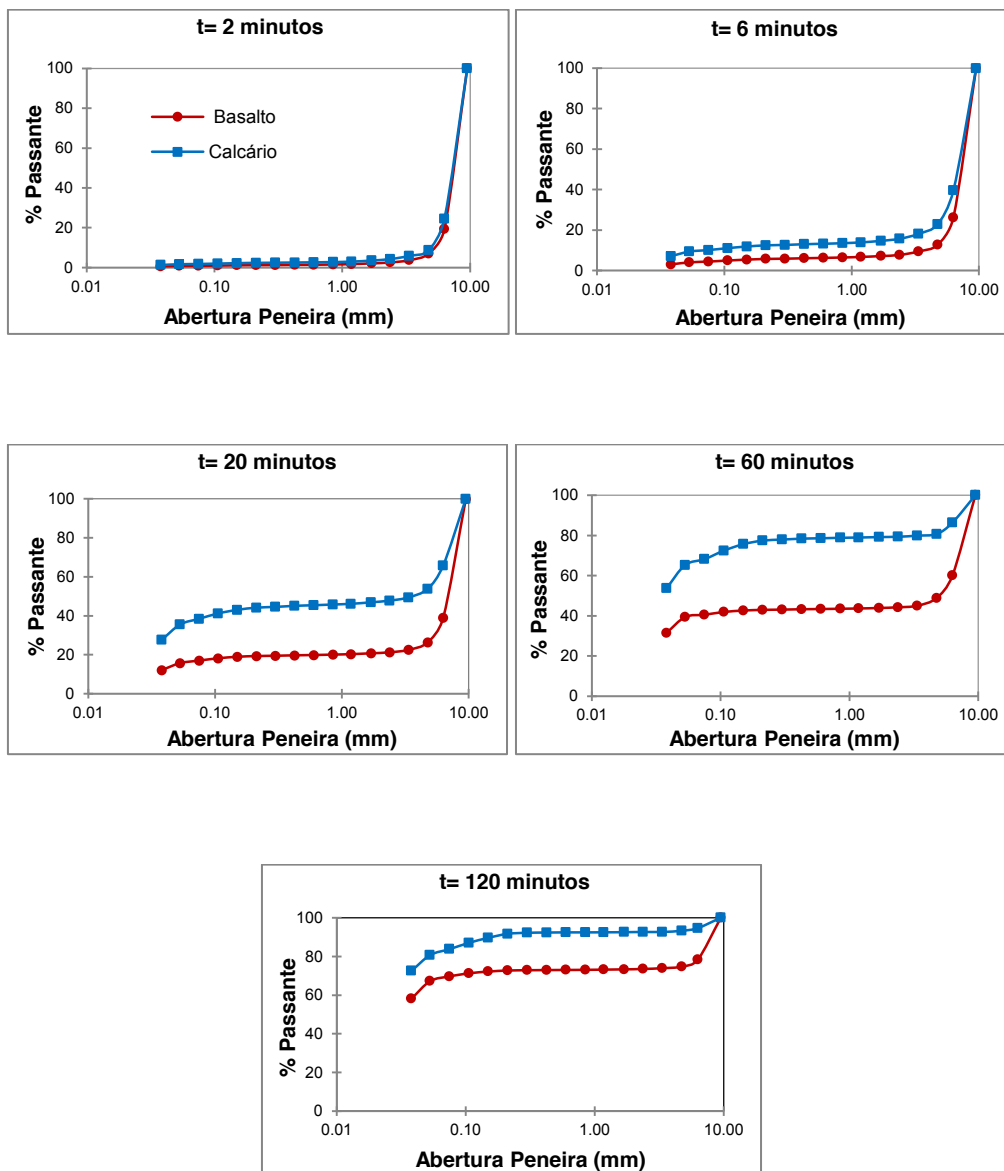


Figura 4.28 -Comparação entre as análises granulométricas do basalto e calcário Ribeirão Branco cominuídos individualmente no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm nos diversos tempos de moagem

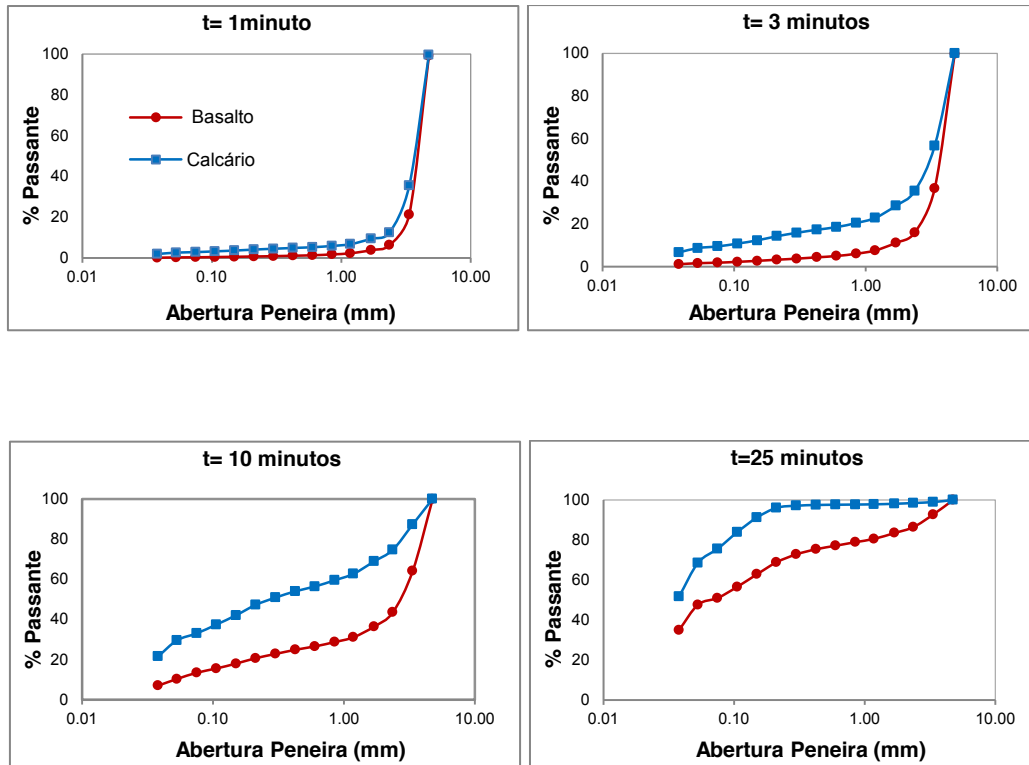


Figura 4.29 - Comparação entre as análises granulométricas do basalto e calcário Ribeirão Branco cominuídos individualmente no tamanho inicial de 4,75 x 3,35 mm em diferentes tempos de moagem

4.3.2 Taxa de quebra da moagem de misturas no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm

Com o objetivo de verificar se o comportamento da moagem dos componentes misturados pode ser explicado a partir da composição mássica do comportamento dos componentes individuais, a fração mássica remanescente de cada mistura foi medida e comparada à fração mássica calculada pela média ponderada das frações dos componentes individuais, usando a seguinte equação:

$$F_R \text{ ponderada} = \frac{\% B * F_R B + \% RB * F_R RB}{100} \quad (Eq. 43)$$

sendo F_R a fração mássica remanescente, % B o teor de basalto na mistura e % RB o teor de calcário na mistura.

A Figura 4.30 a Figura 4.32 apresentam esta comparação para cada mistura. Nas misturas de 75% e 25% basalto as taxas de quebra medidas foram mais altas que as taxas calculadas. Isto indica que as misturas quebram mais rapidamente do que seus componentes moídos separadamente. Por outro lado, na mistura 50% basalto a taxa de quebra medida foi inicialmente similar à taxa calculada pela ponderação, com exceção do tempo de moagem igual a 60 minutos.

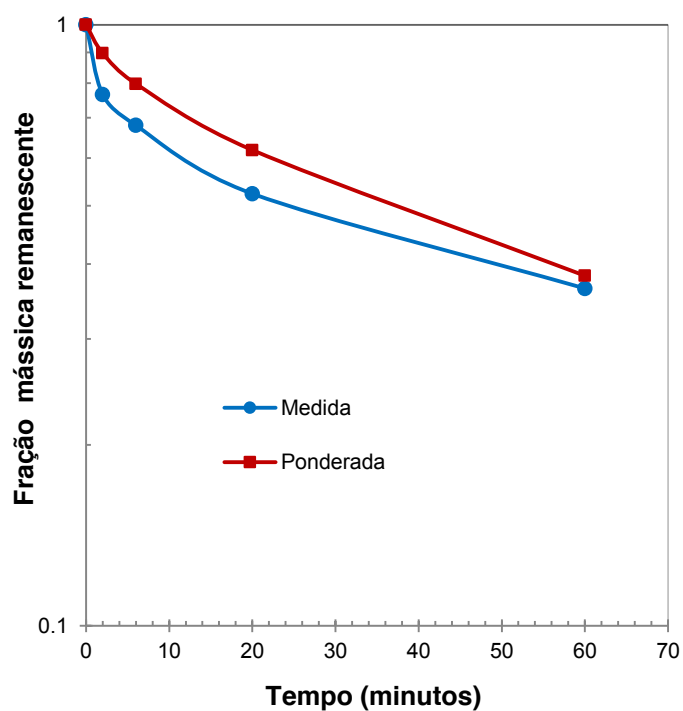


Figura 4.30 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 75% basalto no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm

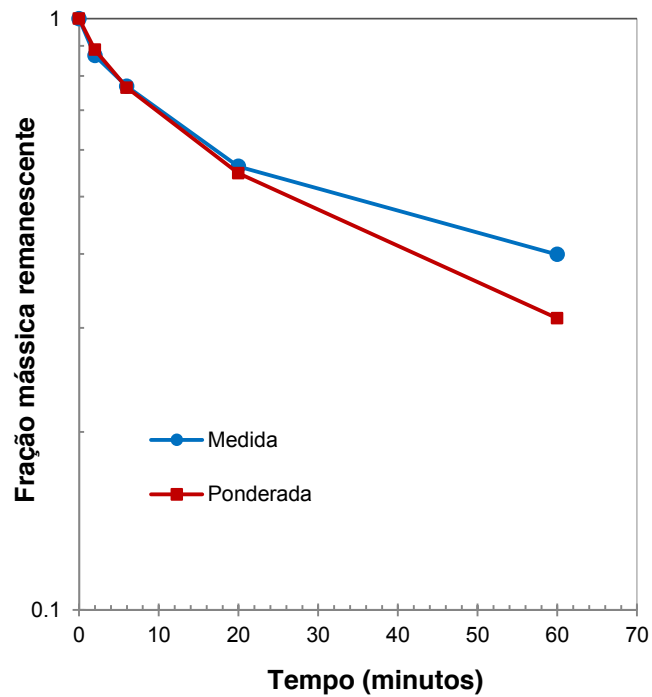


Figura 4.31 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 50% basalto no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm

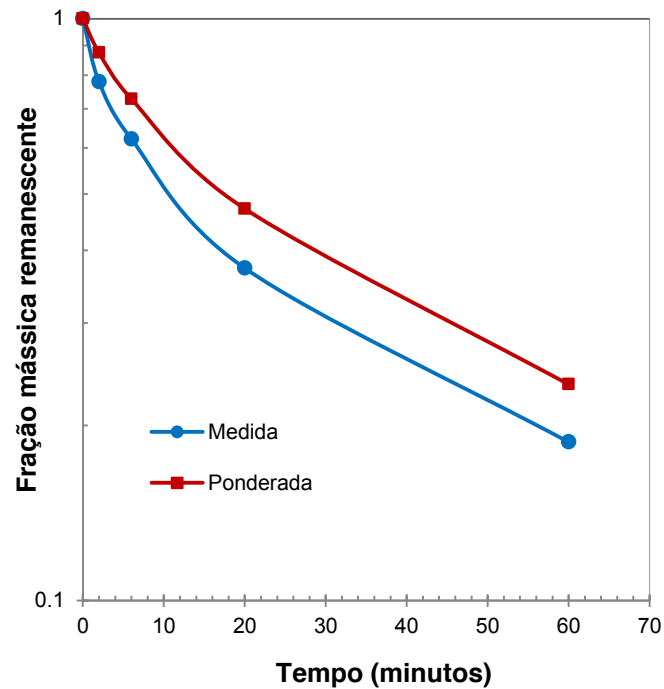


Figura 4.32 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 25% basalto no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm

É importante ressaltar que as taxas de quebras para esses tamanhos iniciais grossos se distanciam de um desaparecimento de primeira ordem. Este efeito passa a ser ainda mais notável quando ocorre a moagem de uma mistura, conforme evidenciado na Figura 4.30. Tendo em vista que o material resultante de cada tempo de moagem foi analisado quanto à sua composição, foi possível comparar as taxas de quebra de cada um dos componentes quando moídos separadamente àquelas dos componentes moídos em conjunto. No caso do basalto, esses resultados são apresentados na Figura 4.33, a qual mostra que, quando em mistura de 75% e 25% de basalto, a sua taxa de quebra é mais alta do que a do componente puro. Isso sugeriria que a moagem do basalto estaria sendo auxiliada pela presença do calcário. Entretanto, não é claro o motivo do comportamento aparentemente anômalo para a mistura de 50% de basalto. Um resultado análogo foi obtido para o calcário, o qual apresentou taxas mais altas de quebra ou equivalentes quando misturado com basalto (Figura 4.34).

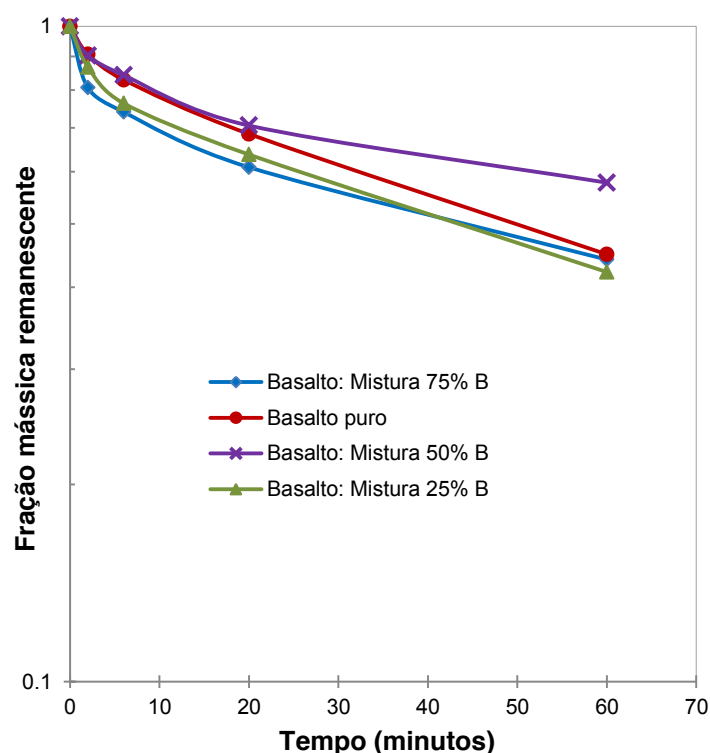


Figura 4.33 - Comparação da fração mássica remanescente da alimentação do basalto na moagem de diferentes misturas e do componente puro no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm

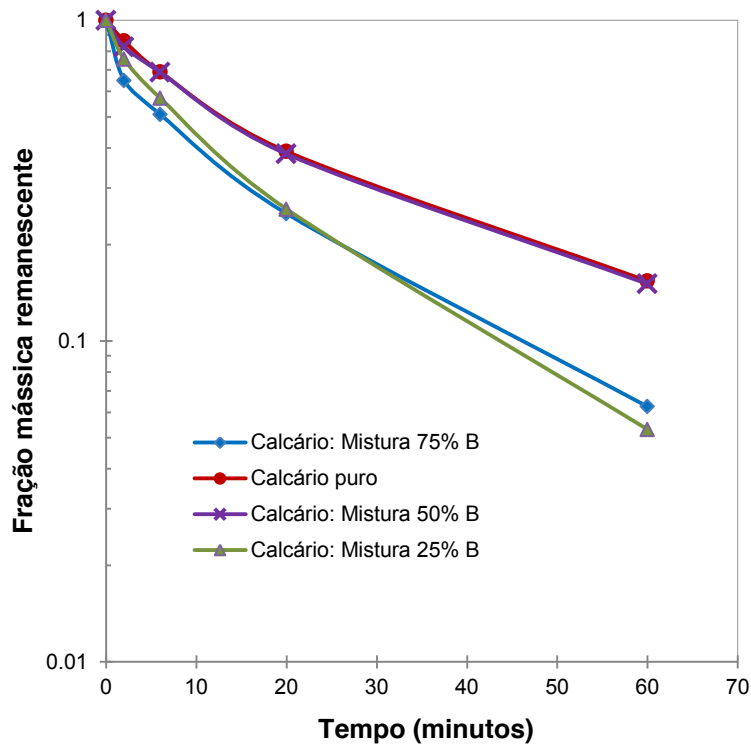


Figura 4.34 - Comparação da fração mássica remanescente da alimentação do calcário Ribeirão Branco na moagem de diferentes misturas e do componente puro no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm

4.3.3 Taxa de quebra da moagem de misturas no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm

Conforme identificado na Figura 4.35, a taxa de quebra para as misturas com tamanho inicial menor se equiparou melhor ao desaparecimento de primeira ordem. Porém o resultado neste caso se diferenciou um pouco do tamanho inicial anterior (9,5 x 6,3 mm), pois a taxa de quebra medida para a mistura 75% basalto foi mais baixa do que a calculada. Já para as outras misturas (Figura 4.36 e Figura 4.37) a taxa de quebra seguiu o mesmo comportamento da moagem de partículas com tamanho inicial mais grosso. Em todos os casos, entretanto, as taxas de quebra se mostraram muito similares para as misturas e para a ponderação a partir dos dados dos componentes individuais.

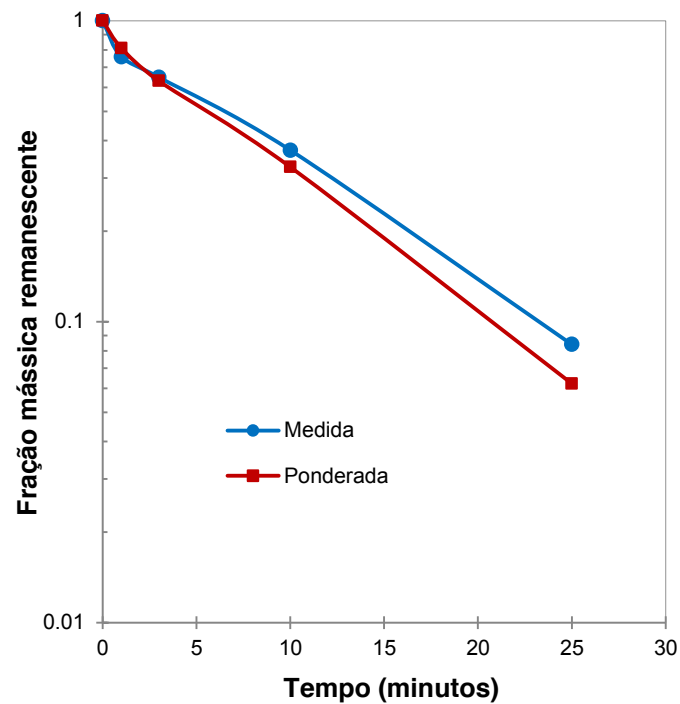


Figura 4.35 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 75% basalto no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm

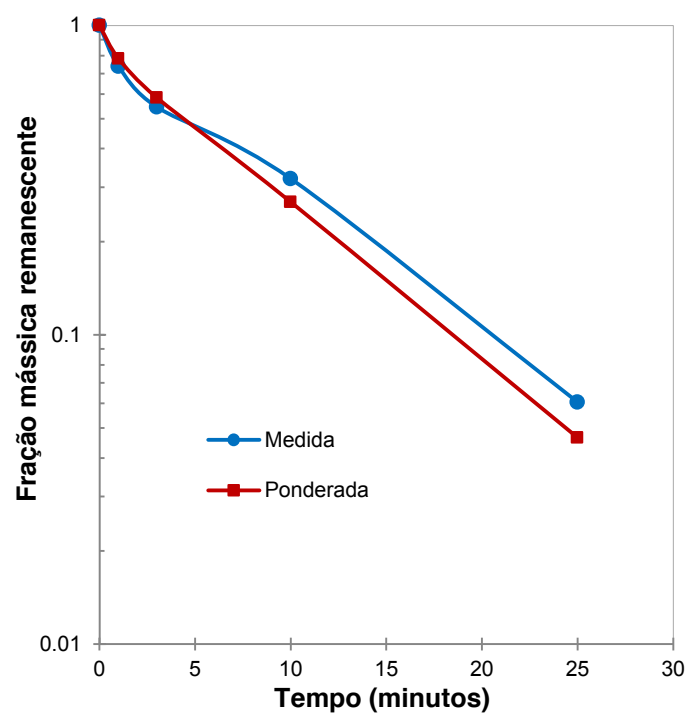


Figura 4.36 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 50% basalto no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm

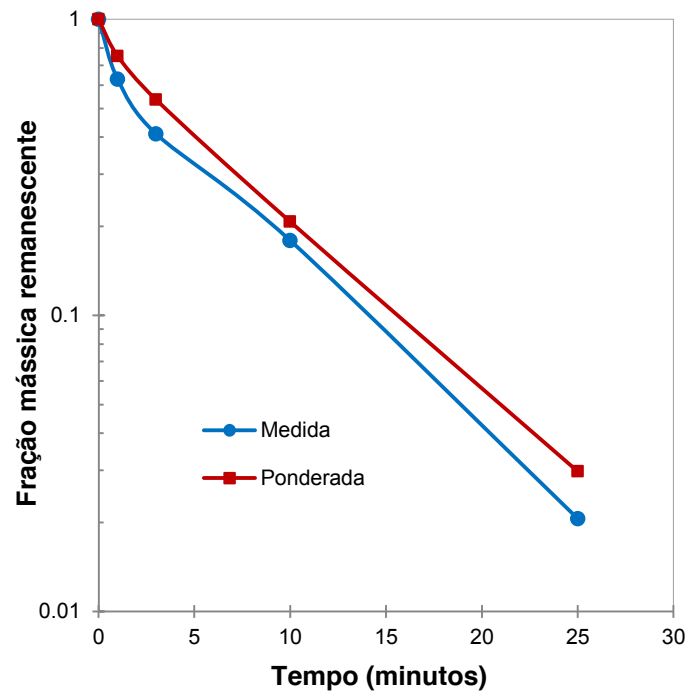


Figura 4.37 - Fração mássica remanescente da alimentação medida e calculada da mistura 25% basalto no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm

Novamente, tendo em vista que os componentes foram analisados quanto à sua composição, a comparação da taxa de quebra de um determinado componente em diferentes misturas foi observada. A Figura 4.38 e Figura 4.39 mostram este estudo para o basalto e calcário, respectivamente. As frações remanescentes do basalto foram bastante semelhantes até o 3º tempo de moagem. Após o tempo de 10 minutos, as frações remanescentes do material contido na faixa de tamanhos original do basalto na mistura de 25% basalto permaneceu maior do que as demais taxas.

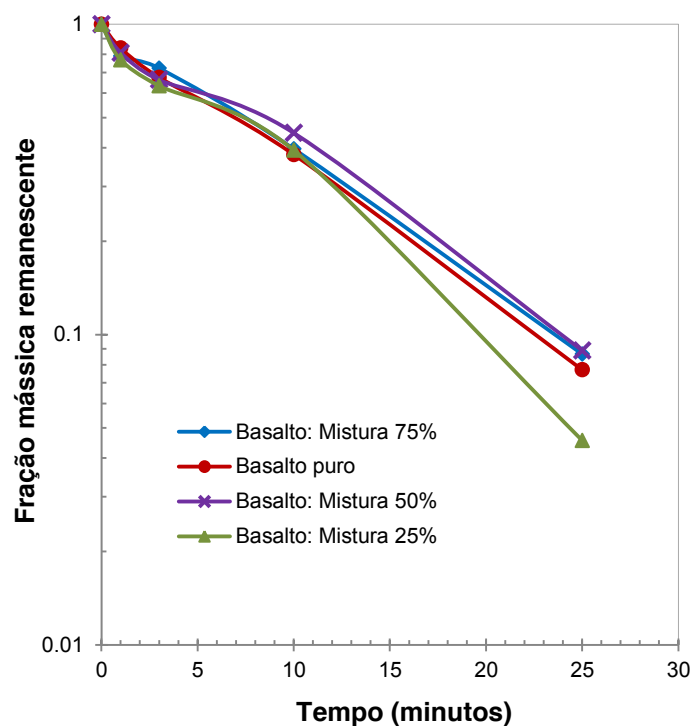


Figura 4.38 - Comparação da fração mássica remanescente da alimentação do basalto na moagem de diferentes misturas e do componente puro no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm

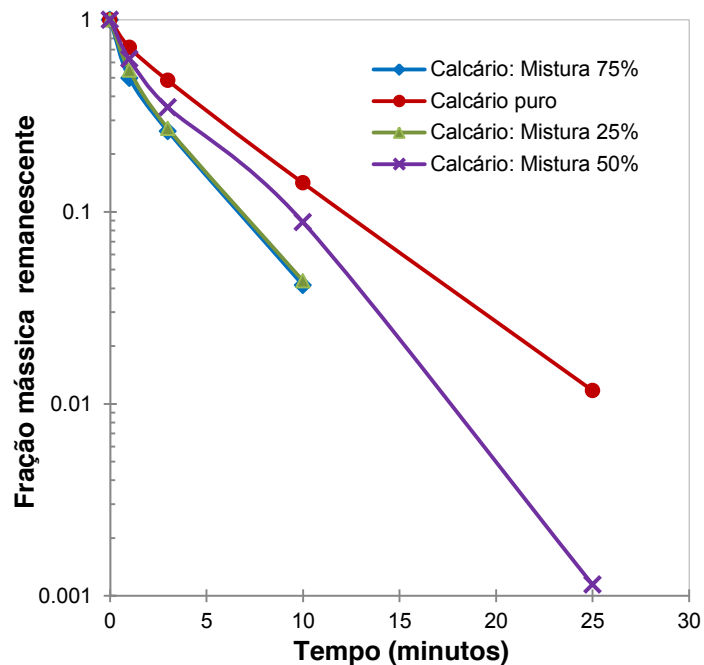


Figura 4.39 - Comparação da fração mássica remanescente da alimentação do calcário Ribeirão Branco na moagem de diferentes misturas e do componente puro no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm

No caso do calcário Ribeirão Branco, o mesmo apresentou taxa de quebra maior quando envolvido em mistura. No último tempo das misturas 75% e 25% de basalto não havia partículas remanescentes na faixa de tamanho original, enquanto que na moagem do calcário puro ainda havia uma quantidade considerável de material remanescente nesta faixa.

4.3.4 Distribuição granulométrica do produto da moagem de misturas no tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm

Enquanto a análise das taxas de quebra nos itens 4.3.2 e 4.3.3 permite avaliar a velocidade com a qual partículas deixam a faixa de tamanho inicial do ensaio, é importante também avaliar como o material, quando fragmentado, se distribui nas faixas de tamanhos mais finas. A Figura 4.40 mostra a distribuição granulométrica do basalto quando moído individualmente e em mistura com o calcário Ribeirão Branco por 2 minutos. Neste intervalo de tempo curto o basalto apresentou distribuições granulométricas mais finas quando cominuído em mistura. Contudo, para os tempos de moagem mais longos, o basalto presente na mistura de proporção igual apresentou granulometria mais grossa, conforme apresentado no resumo da Figura 4.41, a qual mostra a porcentagem passante em 600 µm para todos os tempos ensaiados.

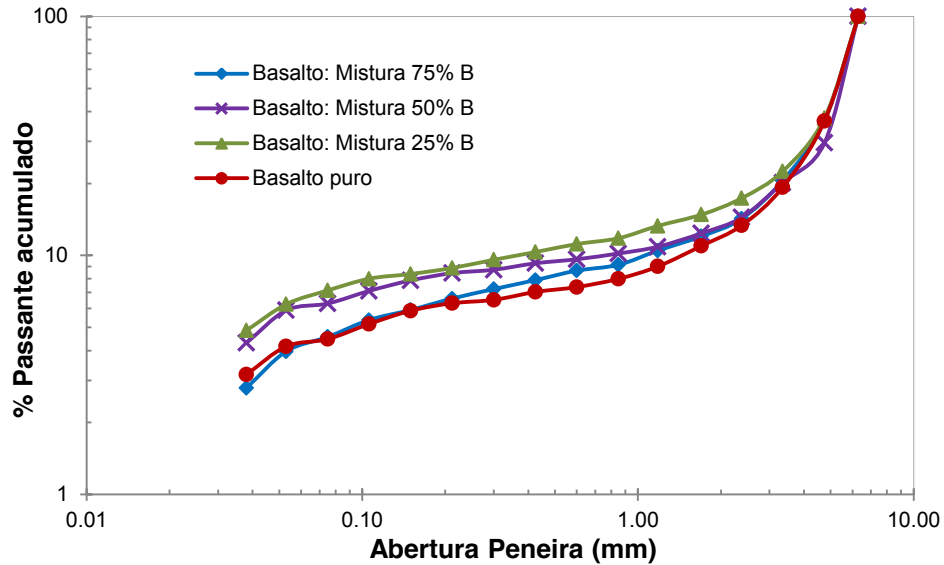


Figura 4.40 - Distribuição granulométrica do basalto na moagem individual e em misturas no tempo de moagem de 2 minutos no tamanho inicial de 9,5 x 6,3 mm

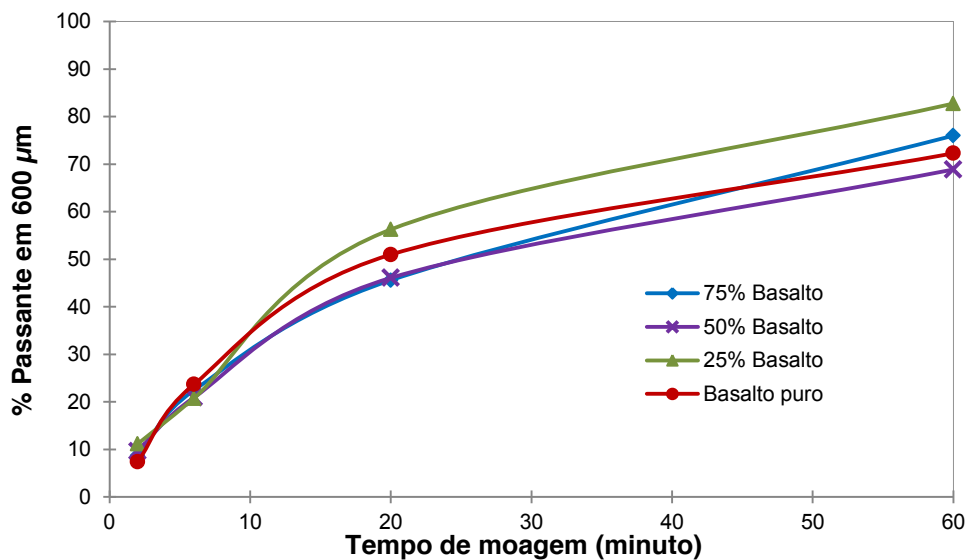


Figura 4.41 – Porcentagem passante em 600 µm do basalto moído individualmente e em diversas misturas no tamanho inicial de 9,5 x 6,3 mm

A Figura 4.42 apresenta os resultados da moagem do calcário Ribeirão Branco em separado e em sua mistura com o basalto no mesmo tempo de moagem (2 minutos). O calcário apresentou granulometria mais fina ao ser moído em conjunto, tanto para a moagem com menor duração de tempo quanto para moagem com tempo prolongado,

indicando que sua moagem em conjunto é mais eficiente, como apresentado na comparação da Figura 4.43.

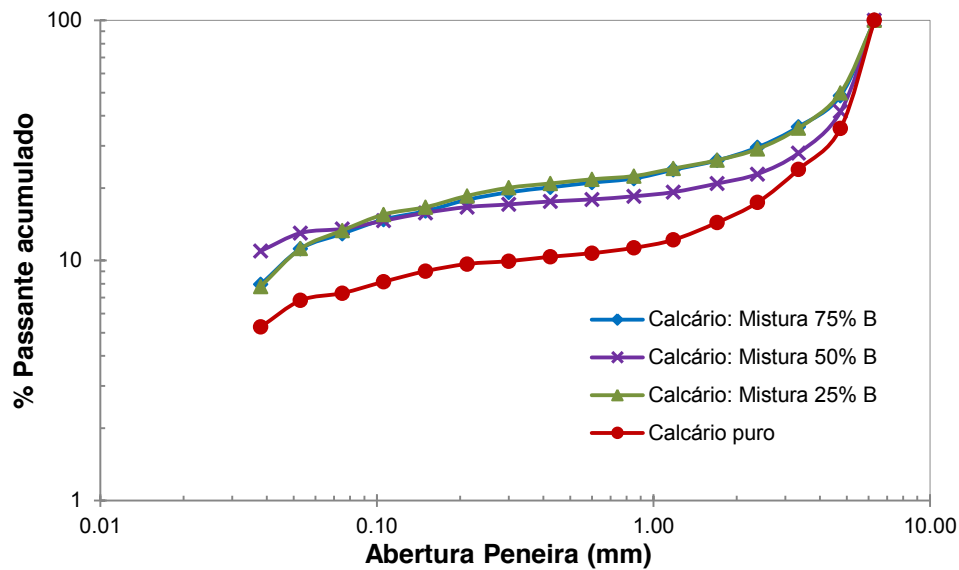


Figura 4.42 - Distribuição granulométrica do calcário na moagem individual e em misturas no tempo de moagem de 2 minutos no tamanho inicial de 9,5 x 6,3 mm

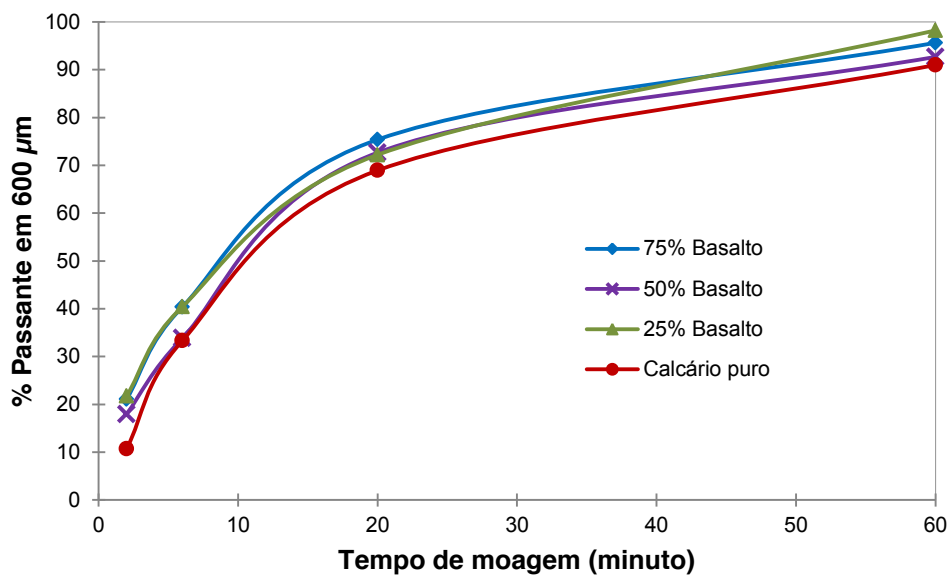


Figura 4.43 - Porcentagem passante em 600 µm do calcário Ribeirão Branco moído individualmente e em diversas misturas com o Basalto no tamanho inicial de 9,5 x 6,3 mm

4.3.5 Distribuição granulométrica do produto da moagem de misturas no tamanho inicial 4,75 x 3,35 mm

Uma comparação similar à realizada para misturas com tamanho inicial 9,5 x 6,3 mm foi feita para o tamanho inicial de 4,75 x 6,3 mm. A Figura 4.44 mostra a distribuição granulométrica do basalto após moagem de 1 minuto, apresentando um resultado semelhante ao descrito anteriormente para o tempo de moagem curto. Conforme analisado na Figura 4.45, o basalto presente na mistura apresentou granulometria mais fina ou muito próxima a do basalto cominuído separadamente.

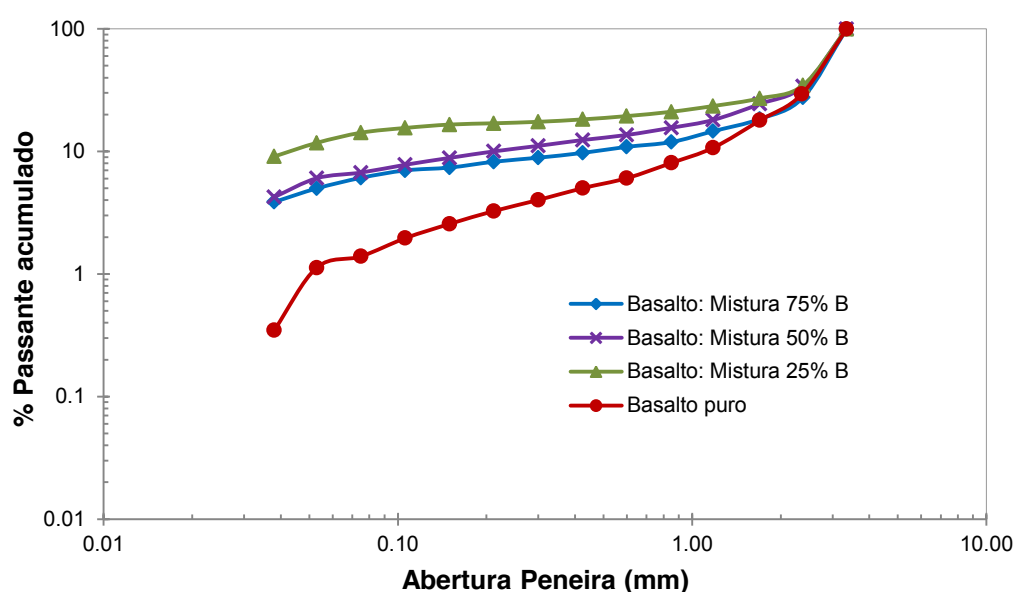


Figura 4.44 - Distribuição granulométrica do basalto na moagem individual e em misturas no tempo de moagem de 1 minuto no tamanho inicial de 4,75 x 3,35 mm

De acordo com a Figura 4.46, o calcário exibiu uma granulometria mais fina quando em mistura com basalto no tempo de moagem igual a 1 minuto. A síntese da Figura 4.47 confirma esta granulometria mais fina do calcário quando em mistura nos diversos tempos de moagem, caracterizando um auxílio em sua moagem por parte do componente mais resistente.

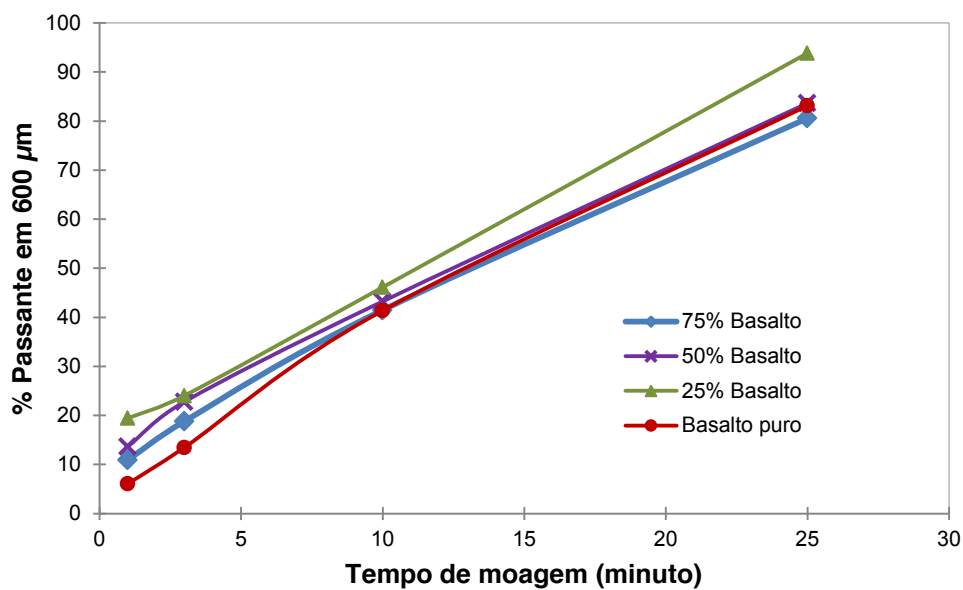


Figura 4.45 - Porcentagem passante em 600 μm do basalto moído individualmente e em diversas misturas no tamanho inicial de 4,75 x 3,35 mm

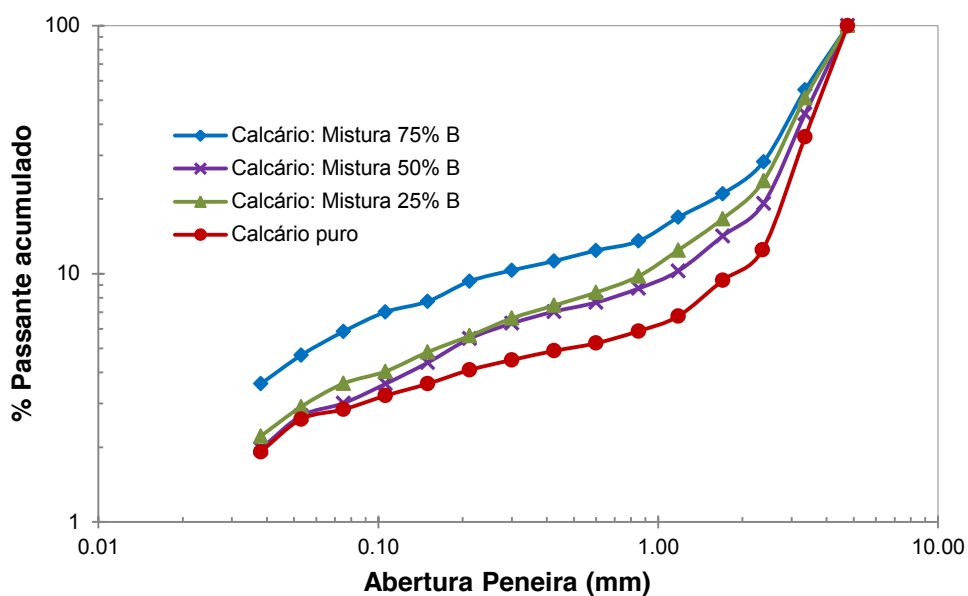


Figura 4.46 - Distribuição granulométrica do calcário Ribeirão Branco na moagem individual e em misturas no tempo de moagem de 1 minuto no tamanho inicial de 4,75 x 3,35 mm

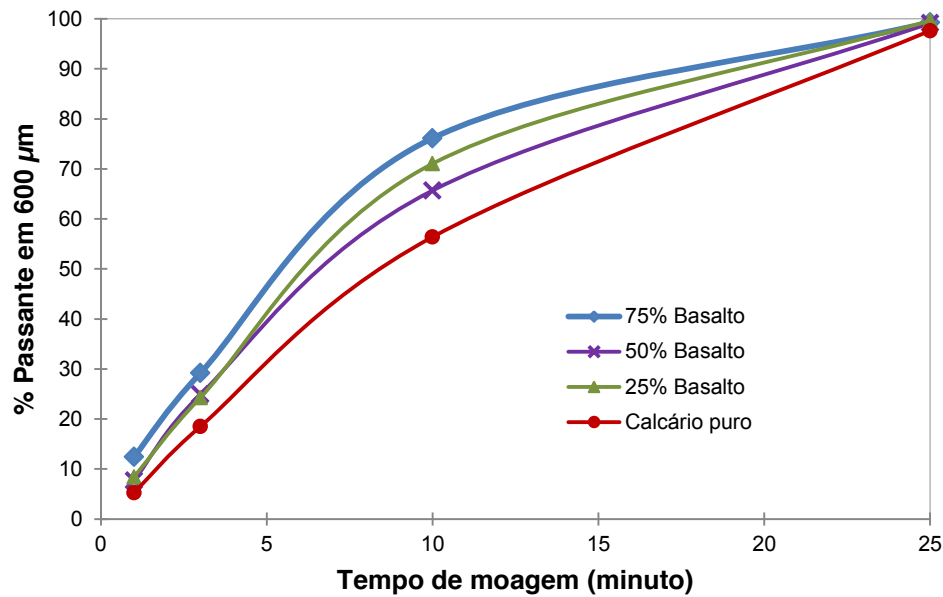


Figura 4.47 - Porcentagem passante em 600 μm do calcário Ribeirão Branco moído individualmente e em diversas misturas no tamanho inicial de 4,75 x 3,35 mm

4.4 Moagem contínua

4.4.1 Moagem em circuito aberto

Primeiramente foi necessária a determinação da distribuição granulométrica da alimentação. Na Figura 4.48 é exibida a distribuição granulométrica inicial do basalto e do calcário Ribeirão Branco. Conforme era esperado, a distribuição do basalto, que é o componente mais resistente, foi mais grossa do que o calcário, apesar de ambos terem sido submetidos ao mesmo processo de britagem.

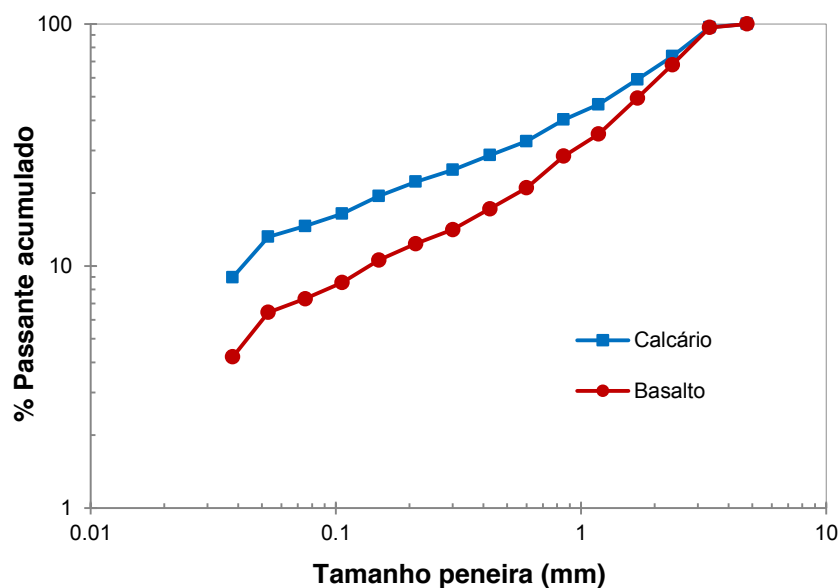


Figura 4.48 - Distribuição granulométrica do material alimentado no moinho no ensaio em circuito aberto

A alimentação do moinho ocorreu com as proporções mostradas na Tabela 4.5. As análises granulométricas das amostras coletadas durante o ensaio em circuito aberto na descarga do alimentador, interior do moinho e descarga do moinho foram comparadas na Figura 4.49 e demonstraram a granulometria mais fina do produto final da moagem, o qual atingiu um P_{80} (tamanho no qual 80% do material foi passante) de, aproximadamente, 310 μm .

Tabela 4.5 - Porcentagem mássica de cada material alimentado no moinho no ensaio em circuito aberto

Material	% Mássica
Calcário	49,23
Basalto	50,77

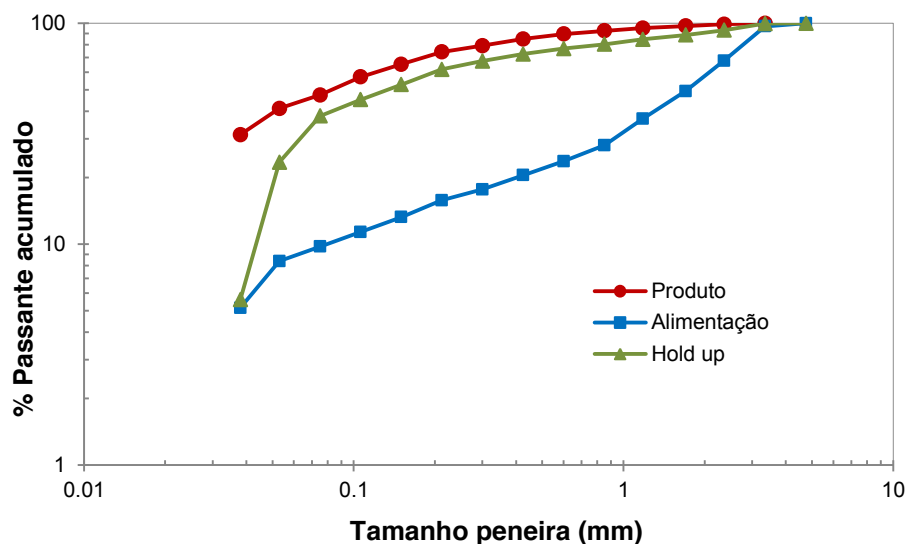


Figura 4.49 - Distribuições granulométricas das amostras da alimentação, *hold up* e produto da moagem em circuito aberto

Com o auxílio do método de separação manual e dissolução ácida foi possível verificar a proporção de basalto no *hold up* e no produto por faixa de tamanho, conforme ilustrado na Figura 4.50. Verifica-se que o basalto foi concentrado nas classes de tamanho maiores, tanto no *hold up* quanto no produto da moagem.

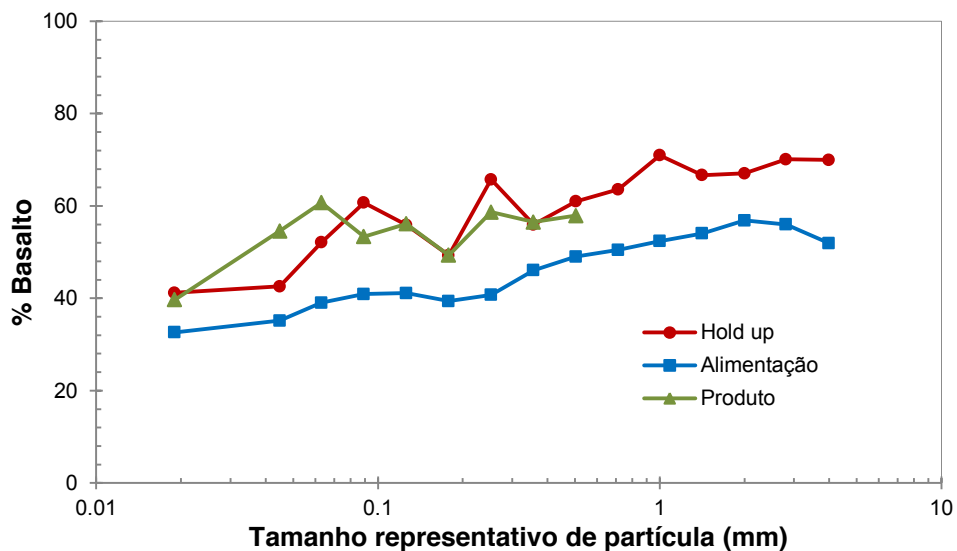


Figura 4.50 - Variação da porcentagem de basalto em relação à classe de tamanho na alimentação, *hold up* e produto do moinho quando operado em circuito aberto

Foi realizado o balanço de massas no circuito, obtendo-se os resultados de porcentagens mássicas no *hold up* e no produto do moinho apresentados na Tabela 4.6. Conforme esperado, após alcançado o estado estacionário a fração mássica do produto foi similar à da alimentação. Por outro lado, os resultados oriundos do balanço de massa para o *hold up* demonstrou que houve acúmulo de basalto no moinho, sugerindo um efeito de classificação interna.

Tabela 4.6 - Porcentagem mássica de cada material no hold up e no produto do moinho em circuito aberto no estado estacionário

% Mássica		
Amostra	Calcário	Basalto
Alimentação	49,23	50,77
<i>Hold up</i>	44,51	55,49
Produto	50,19	49,81

Com o propósito de analisar a diferença de granulometria do basalto e calcário após a moagem em conjunto, seus resultados foram representados na Figura 4.51. A partir desta ilustração é notável a granulometria mais fina do calcário.

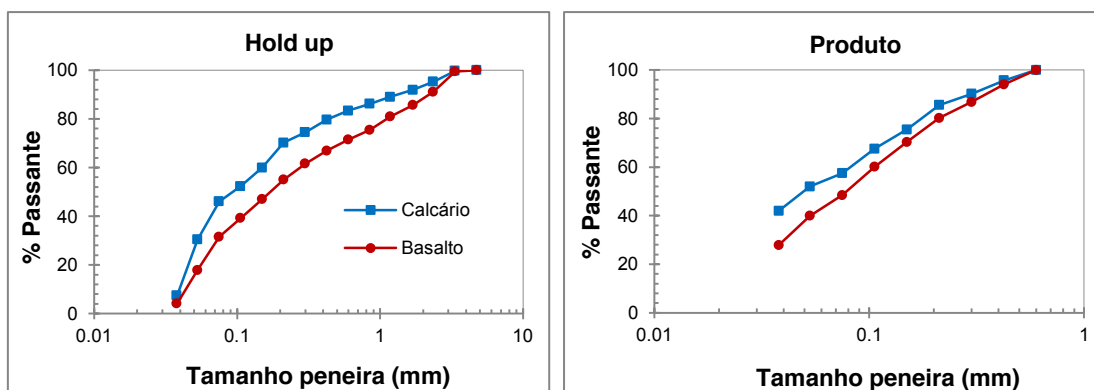


Figura 4.51 - Análise granulométrica do material do *hold up* e produto do moinho após moagem em circuito aberto

4.4.2 Moagem em circuito fechado

Analogamente ao ensaio de circuito aberto, inicialmente foram determinadas as distribuições granulométricas do material alimentado no moinho, as quais são ilustradas na Figura 4.52.

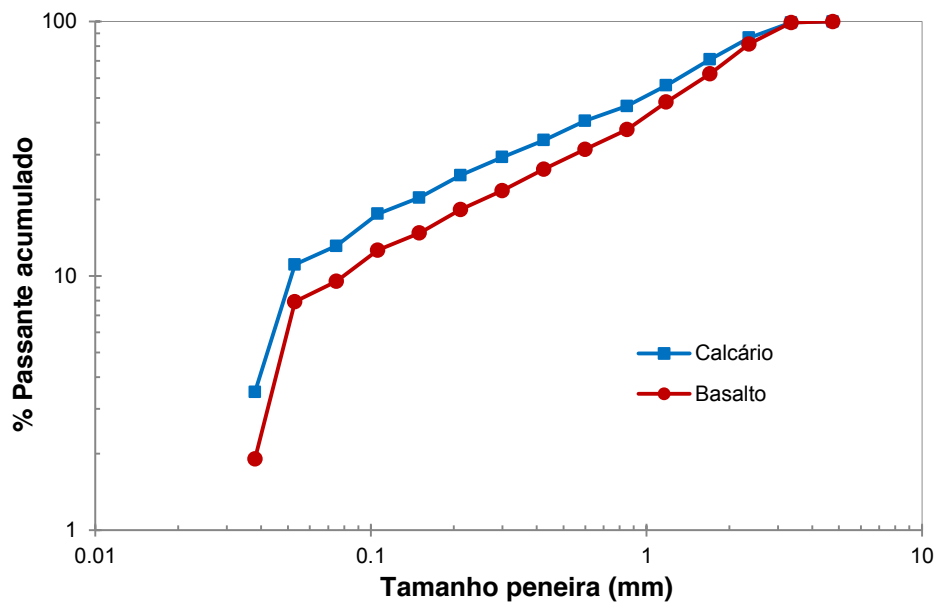


Figura 4.52 - Distribuições granulométricas dos componentes alimentados ao moinho no ensaio em circuito fechado

Conforme já mencionado no capítulo 3, diversas amostras foram coletadas durante este ensaio. A Figura 4.53 apresenta as distribuições granulométricas da mistura nos pontos de amostragem com a finalidade de exibir as alterações de tamanho sofridas pelas partículas ao longo do ensaio. Como pode ser observado, a distribuição do *hold up* foi ligeiramente mais grossa do que a da descarga do moinho, uma vez que contém a alimentação fresca ainda não moída, no entanto as formas de suas curvas de distribuição foram semelhantes.

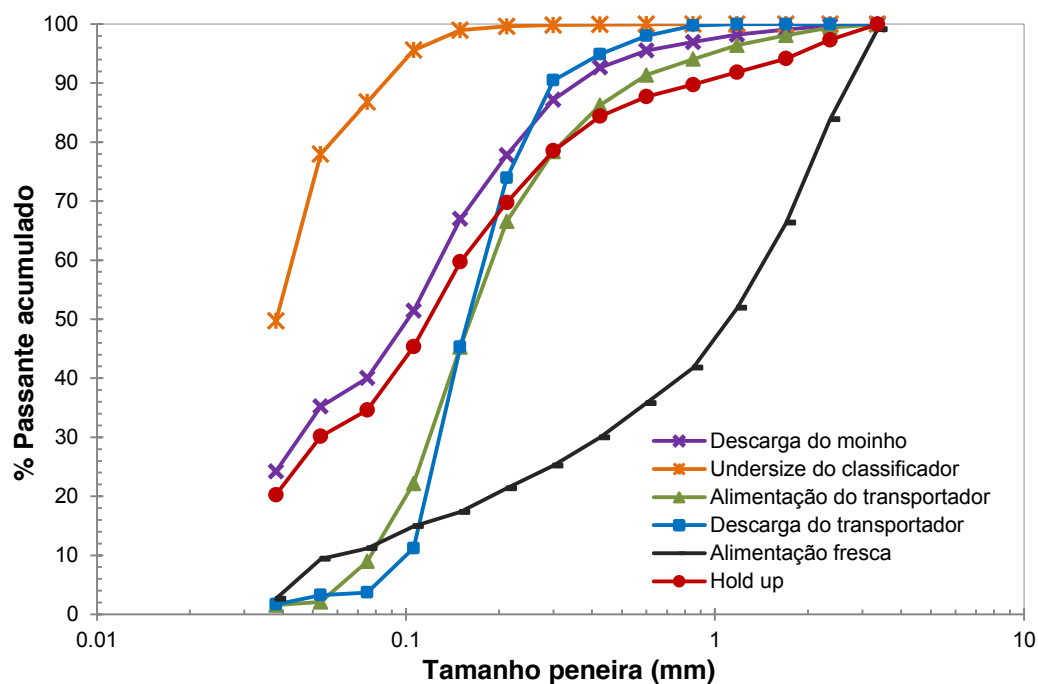


Figura 4.53 - Análise granulométrica das amostras coletadas durante o ensaio de moagem contínua em circuito fechado

Tendo em vista que não só a granulometria da mistura é alterada em cada ponto do circuito, mas também as proporções dos materiais devido à diferença de moabilidade entre eles, foi extremamente importante analisar estas amostras quanto à sua composição. Com o objetivo de estimar as proporções de cada material coletado ao longo do circuito, o material foi analisado por faixa de tamanhos e os resultados são apresentados na Tabela 4.7. Como pode ser percebido, a descarga e o *hold up* do moinho apresentaram proporções de basalto superiores à da alimentação. Este acúmulo, já previamente observado no ensaio de ciclo fechado, ocorreu uma vez que o basalto é o componente mais resistente.

Analisando a alimentação e a descarga do transportador, nota-se que a proporção de basalto é significativamente mais alta do que aquela alimentada ao moinho. Isto se deve ao reciclo das partículas de basalto não quebradas. Nota-se também que a composição

da alimentação correspondeu aproximadamente à composição do produto (*undersize* do classificador), conforme valores indicados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Porcentagem de basalto e calcário nos diferentes pontos de amostragem no ensaio de moagem contínua em circuito fechado

Ponto de amostragem	% Basalto	% Calcário
Alimentação	53,39	46,61
Descarga do moinho	62,86	37,14
Alimentação do transportador	72,84	27,16
Descarga do transportador	74,90	25,10
<i>Hold up</i>	64,00	36,00
<i>Undersize do classificador</i>	53,32	46,68

A partir da Figura 4.54 foi demonstrada a variação da porcentagem de basalto em função do tamanho de partícula. Verifica-se que tanto o *hold up* quanto o produto acumularam grandes quantidades de basalto.

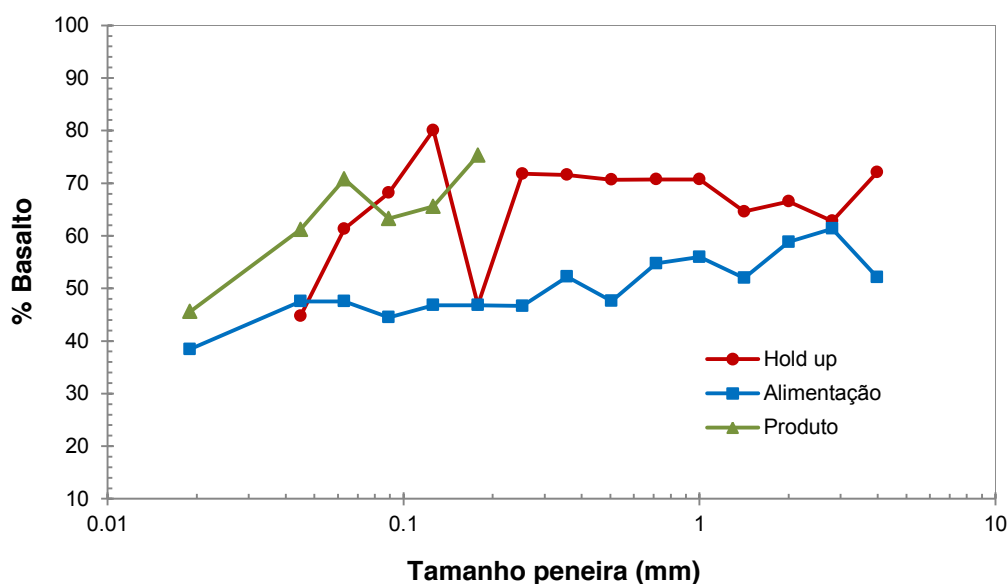


Figura 4.54 - Variação da porcentagem de basalto em relação à classe de tamanho na alimentação, *hold up* e produto do moinho quando operado em circuito fechado

Conforme realizado para o ensaio de moabilidade de Bond, no ensaio em circuito fechado também foi analisada a porcentagem da carga circulante de cada componente, cujos valores encontram-se na Tabela 4.8. Estes valores comprovam o maior reciclo de basalto em comparação ao calcário.

Tabela 4.8 - Porcentagem de carga circulante de basalto e calcário no ensaio em circuito fechado

Carga Circulante (%)	
Basalto	127,16
Calcário	54,31
Mistura	93,21

Uma análise da diferença de granulometria do basalto e calcário após a moagem em conjunto para o circuito fechado é representada na Figura 4.55, a qual indica novamente uma granulometria mais fina do calcário.

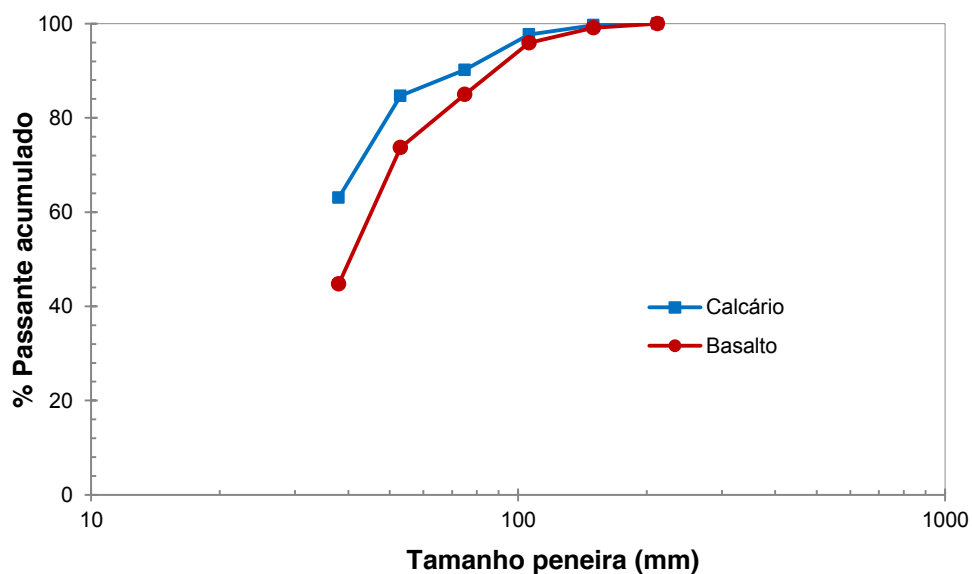


Figura 4.55 - Distribuição granulométrica por componente do produto da moagem em circuito fechado

Com a finalidade de testar a capacidade preditiva do modelo descrito na seção 4.2.1 para a moagem em circuito fechado, a porcentagem de basalto medida no *hold up* (64,0%) foi comparada a curva descrita pelo modelo (66,1%), cuja boa correspondência demonstra que o modelo também é capaz de prever satisfatoriamente o acúmulo do material resistente no moinho quando em circuito fechado.

Finalizando, cabe destacar uma comparação do acúmulo de basalto nos diferentes ensaios de moagem realizados com a mistura basalto e calcário Ribeirão Branco. Através da Figura 4.56 é possível verificar que a mistura com maior porcentagem de carga circulante apresenta um acúmulo do material resistente mais intenso.

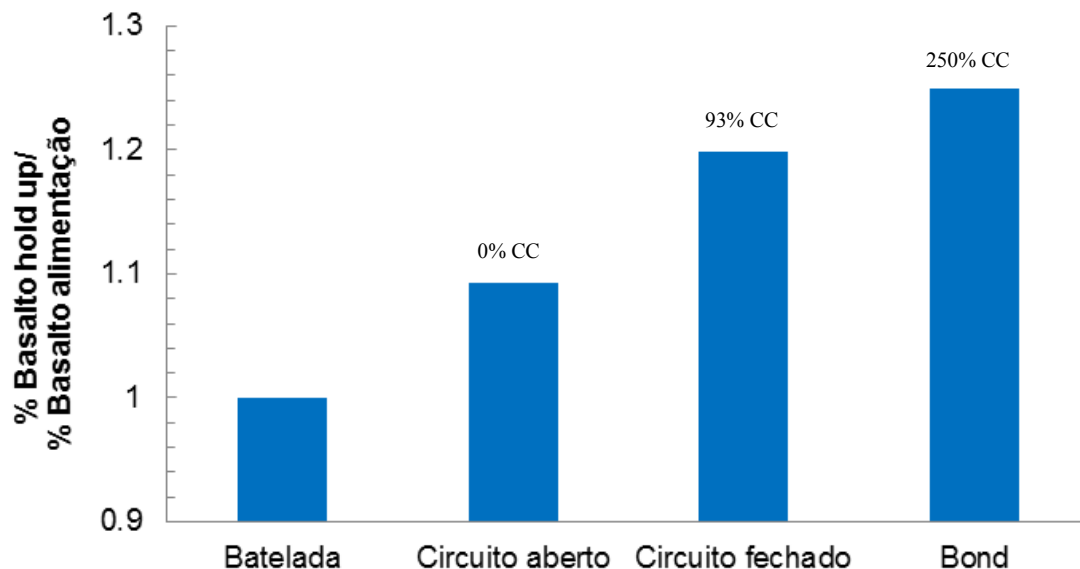


Figura 4.56 - Comparação do acúmulo de basalto nos diferentes ensaios realizados com a mistura basalto e calcário Ribeirão Branco

5 CONCLUSÕES

A moagem em conjunto dos materiais utilizados neste estudo resultou, em geral, em maior consumo energético do que a moagem individual de seus componentes, merecendo destaque especial as misturas basalto-calcário Ribeirão Branco e basalto-calcário Catalão, as quais resultaram em um consumo energético mais alto do que para o componente mais resistente cominuído individualmente quando em proporção de 75% basalto.

No produto final da moagem do ensaio de Bond, a distribuição granulométrica do basalto, componente mais resistente nas misturas, apresentou-se independente do tipo de mistura no qual ele se encontrava, resultando em distribuição granulométrica semelhante em diversas proporções ensaiadas. Por outro lado, o calcário Ribeirão Branco atingiu distribuições granulométricas mais finas ao ser cominuído em mistura com o basalto, indicando um auxílio em sua moagem por parte do componente mais resistente.

Houve uma tendência das taxas de quebra medidas das misturas contendo partículas grossas serem maiores ou similares às taxas calculadas pela ponderação das taxas obtidas na moagem individual dos componentes. Nos casos em que a taxa de quebra calculada pela ponderação foi maior, a diferença não foi significativa. Ao se comparar as frações remanescentes na moagem descontínua do calcário presente em diferentes proporções foi constatado que o mesmo foi cominuído mais rápido quando em mistura. Adicionalmente, o calcário fragmentado se distribuiu em faixas de tamanho mais finas quando esteve na presença de outro componente. Esse fato não foi verificado para o basalto, pois o mesmo não demonstrou uma tendência bem definida de aceleração ou desaceleração da taxa de quebra quando em mistura.

Pode-se afirmar também que a taxa de quebra de partículas com o tamanho inicial maior (9,5 x 6,3 mm) não se mostrou como de primeira ordem, nem para os componentes em separado nem para as misturas.

Este estudo mostrou que o efeito de acúmulo do material mais resistente no moinho é função da resistência diferencial dos componentes. Verificou-se que o acúmulo do componente mais resistente depende diretamente dos valores de W_i dos componentes envolvidos na mistura. Um modelo baseado no índice de trabalho de Bond de cada componente foi desenvolvido com a finalidade de prever o acúmulo do material mais resistente no interior do moinho. O modelo foi validado pelo ensaio de Bond e também pela moagem contínua em circuito fechado. Este modelo, de simples aplicação, descreveu satisfatoriamente o comportamento da moagem de misturas binárias.

O presente trabalho é relevante não apenas para o entendimento da ação da moagem, mas também para a modelagem e otimização da operação industrial, principalmente na indústria mineral e cimenteira, pois contribuiu para uma maior compreensão dos efeitos da composição na moagem de misturas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Austin, L.G., Concha F.A., 1993, *Diseño y simulacion de circuitos de molienda y classificacion*. CYTED, Programa Iberoamericano de ciência y tecnologia para el desarrollo – Subprograma de Tecnologia Mineral, 392p.

Austin, L.G., Klimpel, R.R., Luckie, P.T., 1984, *Process Engineering of Size Reduction*, AIME.

Beraldo J. L. 1987, *Moagem de minérios em moinhos tubulares*. São Paulo, editora Edgard Blucher Ltda, 143 p.

Bond, F.C., 1952, *The third theory of comminution*, Trans. AIME, 193, pp. 484-494.

Bozkurt, V., Özgür, I., 2007, “Dry grinding Kinetics of colematita”, *Powder Technology*, v.176, pp.88-92.

Bueno, M., Powell, M.S., Kojovic, T., Worth, J., Shi, F., Niva, E., Adolfsson, G., Henriksson, M., Partapuoli, A., Wikstrom, P., Tano, K., Fredriksson, A., 2011, “The dominance of the competent”, *Anais da Conferência SAG2011*, Vancouver, Canadá, pp. 1-20.

Carvalho, R. M. 2009, *Desenvolvimento de modelo matemática generalizado da cominuição*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

Carvalho, R.M., Tavares, L.M., 2009, “Dynamic modeling of comminution using a general microscale breakage model”, *Computer-Aided Chemical Engineering*, v. 27, pp. 519-524.

Durman, R.W., 1988. “Process in abrasion-resistant materials for use in comminution processes”, *International Journal of Mineral Processing*, v. 22, pp.381-399.

Erdogdu, K.; Tokyay, M.; Turkey, P., 1999, "Comparison of intergrinding and separate grinding for the production of natural pozzolan and GBFS-incorporated blended cements", *Cement and Concrete Research*, v. 29, pp.743–746.

Fuerstenau, D. W., Abouzeid, A. Z. M., Kapur, P. C., 1992, "Energy split and kinetics of ball mill grinding of mixture feeds in heterogeneous environment", *Powder Technology*, v.72, pp.105-111.

Fuerstenau, D. W., Venkataraman, K. S., 1988, "The comminution of multicomponent feeds under batch and locked-cycle conditions: kinetics, simulation and energy distribution", *International Journal of Mineral Processing*, v. 22, n° 1-2, pp.105-118.

Fuerstenau, D.W.; Sullivan, D.A. Jr., 1962, "Minerals beneficiation - comminution of mixtures in ball mills", *Transactions of the AIME*, v. 223, pp.152-157.

Herbst, J.A., Fuerstenau, D.W., 1980, "Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models", *International Journal of Mineral Processing*, v. 7, n.1, pp. 1-31.

Hosten C., Avsar C., 1998, "Grindability of mixtures of cement clinker and trass", *Cement and concrete research*, v. 28, n° 11, pp.1519-1524.

Iglesias J. G., Álvarez, M.M., Rodríguez, J. E., 1999, "Influence of gypsum's mineralogical characteristics on its grinding behaviour applied to cement fabrication", *Cement and concrete research*, v. 29, n°5, pp. 727-730.

Kallembach. G. M., 2009, *Montagem e Instrumentação de um circuito de moagem a seco em escala de laboratório*. Projeto final de graduação, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

Kapur P. C., Fuerstenau D. W., 1988, "Energy split in multicomponent grinding", *International Journal of Mineral Processing*, v. 24, n° 1-2, pp.125-142.

Kelly, E.G., Spottiswood, D.J., 1982, *Introduction to Mineral Processing*, Wiley, 491 p.

King R. P. ,2001, *Modelling and simulation of mineral processing systems*. Boston, Butterworth-Heinemann.

Lewis, F.M., Coburn, J.L., Bhappu, R.B., 1976, “Comminution: A guide to size reduction system design”, *Minerals Engineering*, v. 28, pp. 29-34.

Öner, M., 2000, “A study of intergrinding and separate of blast furnace slag cement”, *Cement and concrete research*, v. 30, n°3, pp.437-480.

Ray, W.H., Szekely, J., 1973, *Process Optimization: with applications in metallurgy and chemical engineering*. New York, Wiley e Sons.

Rosa, G.M., 2009, *Cominuição Seletiva de Mesclas Binárias e sua simulação por redes neurais artificiais*. Dissertação de M.Sc., UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

Rumpf, H., 1990, *Particle technology*. Ed. Chapman & Hall.

Sailors, R.H., 1989, “Cast High chromium media in wet grinding”, *Minerals and Metallurgical Processing*, v. 6, pp.172-178.

Silva, A.T., 2007, *Otimização da moagem de escória granulada de alto-forno por meio da simulação computacional usando o modelo do balanço populacional*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE-UFRJ.

Stange, W., 1996, “The modeling of binary ore behaviour in FAG/SAG milling”, *International conference autogenous and semiautogenous grinding technology*, v. 3, pp. 1063-1080.

Tavares, L.M., 2005, *Operações Unitárias em Processamento Mineral*, Apostila do curso de Processamento de Recursos Minerais I, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Tavares, L.M., Carvalho, R.M., 2010, “A mechanistic model of batch grinding in ball mills”, In: *XXV International Mineral Processing Congress*, 2010, Brisbane. Anais do XXV IMPC. Melbourne : AUSIMM, v. 1. pp. 1287-1297.

Tavares, L. M., King, R. P., 1998, “Single-particle fracture under impact loading”, *International Journal of Mineral Processing*, v.54, pp.1-28.

Tavares, L. M., Silveira, M.A.C.W., 2008, “Comparison of measures of rock crushability”. In: Meftuni Yekeler. (Org.). *Fine Particle Technology and characterization*. Kerala: *Research Signpost*, p.1-20.

Tshela, M.G., 2011, “Behaviour of multi-component systems in closed and open grinding circuits”, Relatório de Estágio, Laboratório de Tecnologia Mineral – COPPE/UFRJ.

Tsivilis, S., Voglis, N., Photou, J., 1999, “A study on the intergrinding of clinker and limestone”, *Minerals Engineering*, v. 12, n° 7, pp. 837-840.

Venkataraman, K. S., Fuerstenau, D. W., 1984, “Application of the population Balance Model to the grinding of mixtures of minerals”, *Powder Technology*, v. 39, pp. 133-142.

Wills, B.A., 2006, *Mineral Processing Technology*. Boston, Butterworth-Heinemann.

Yang, D., Mempel, G., Fuerstenau, D.W., 1967, “A laboratory mill for batch grinding experimentation”. *Transactions of the AIME*, v. 240, pp.273-275.