



CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E DA FRAGMENTAÇÃO DE TIPOLOGIAS DE MINÉRIO DE FERRO E SUA LIBERAÇÃO

José Raphael Olegário França

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.

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares
Gabriel Kamilo Pantoja Barrios

Rio de Janeiro
Janeiro de 2019

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E DA FRAGMENTAÇÃO DE
TIPOLOGIAS DE MINÉRIO DE FERRO E SUA LIBERAÇÃO

José Raphael Olegário França

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 DE MATERIAIS.

Examinada por:

Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.

Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho, D.Sc.

Pesq. Reiner Neumann, D.Sc.

Engº Henrique Dias Gatti Turrer, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2019

França, José Raphael Olegário

Caracterização mineralógica e da fragmentação de tipologias de minério de ferro e sua liberação/José Raphael Olegário França. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIX, 159 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares

Gabriel Kamilo Pantoja Barrios

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 145– 159.

1. Caracterização da fragmentação. 2. Caracterização mineralógica. 3. Liberação. I. Tavares, Luís Marcelo Marques *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

Deus é maior.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo. Agradeço aos amigos que eu fiz durante o mestrado e que participaram diretamente ou indiretamente dessa etapa da minha vida. Dentre eles são: Emanuel, Carol, Tatiane, William, Pedro, Jennifer, Werley, Mahyar, Marcelle, Luís, Bianca, Marcelli, Ketly, Meiga, Thays, Javier, Narcez, Victor, Anderson, Thiago, Luciana, Wesley, Rangler, Juliana e Francisco.

Agradeço infinitamente à minha Mãe e ao meu Pai pelo apoio. Agradeço à minha filha Louise pela inspiração. Agradeço à minha esposa, Luma, pela ajuda, como também pelas dificuldades impostas a mim.

Agradeço ao Professor Luís Marcelo pela oportunidade ímpar, aprendizado, orientação e compreensão. Agradeço também ao Gabriel pela orientação e ensinamentos.

Agradeço às instituições de fomento à pesquisa, em especial à CAPES pela bolsa de estudos para a realização do mestrado.

Agradeço à Anglo American pelo financiamento da pesquisa, como parte do Anglo American Centre for Sustainable Comminution. Agradeço à equipe de Minas Rio, em especial aos Engenheiros Henrique Turrer, Carlos Nascimento e Bolivar Duarte pelo apoio na coleta e envio das amostras, bem como na realização das análises mineralógicas.

Agradeço ao Pesquisador Reiner Neumann e ao CETEM pela realização das análises mineralógicas por difração de raios-X e pelos esclarecimentos.

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

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E DA FRAGMENTAÇÃO DE TIPOLOGIAS DE MINÉRIO DE FERRO E SUA LIBERAÇÃO

José Raphael Olegário França

Janeiro/2019

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares

Gabriel Kamilo Pantoja Barrios

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Em um depósito mineral, geralmente minérios se encontram com características variáveis, o que por sua vez afeta as etapas de processamento da usina quanto à sua eficiência e à sua produtividade. O presente trabalho foi concebido para investigar a variabilidade na etapa de cominuição de diferentes tipologias de minério de ferro da mina da Anglo American em Conceição do Mato Dentro (CMD). Para tal, foram realizadas as caracterizações da mineralogia, de quebra e de liberação das diferentes tipologias por meio de diversas técnicas de análise e ensaios de quebra. Os resultados mostraram diferentes comportamentos na cominuição dos minérios estudados e que, dependendo da dimensão das partículas (granulometria de britagem ou de moagem), tal comportamento pode mudar ou até mesmo se inverter. Dentre as características mais relevantes que influem na diferenciação e na cominuição das tipologias analisadas foram a presença de quartzo na forma sacaroidal, tamanho de grão e o arranjo entre os principais minerais do minério. A presença de quartzo na forma sacaroidal em teores próximos àqueles de minerais de ferro se mostrou relevante no comportamento da função quebra. Quando fraturados, os fragmentos reportam preferencialmente em faixas próximas ao seu tamanho de grão e praticamente liberados. O tamanho de grão, principalmente o de quartzo, foi uma característica que aparentemente definiu a competência à moagem das amostras. Por fim, o tamanho de grão e a forma do arranjo entre os minerais foram determinantes para a liberação dos minerais.

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

BREAKAGE AND MINERALOGICAL CHARACTERISATION OF THE IRON ORE
TIPOLOGIES AND THEIR LIBERATION

José Raphael Olegário França

January/2019

Advisors: Luis Marcelo Marques Tavares
Gabriel Kamilo Pantoja Barrios

Department: Metallurgical and Materials Engineering

In a mineral deposit, ore are known with variable characteristics, which affects the processing stages of the manufacturing in terms of their efficiency and productivity. The present work was designed to investigate the variability in comminution stage of different iron ore typologies from the Anglo American mine in Conceição do Mato Dentro CMD. For this purpose, the characterization of the mineralogy of the breakage and the liberation of the different samples were carried out using different analysis techniques and breakage tests. The results showed different behavior in the comminution of the studied ores and it depends on the size of the particles (crushing or milling). Hence, this behavior can change or invert. The presence of quartz in the saccharide form, grain size and the arrangement of main minerals of the ore were the most relevant characteristics which influence the differentiation and the comminution of the analyzed typologies. The presence of quartz in the saccharoidal form in levels close to the iron minerals was shown to be relevant on behavior of the breakage function. After breakage, the fragments will be preferentially in the ranges close to their grain size and practically liberated. The grain size, mainly for quartz, was the main characteristic for the grinding competence of the samples. Finally, the grain size and the shape of the arrangement among minerals were determinant for minerals liberation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	4
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2 REVISÃO BIBLIGRÁFICA.....	5
2.1 FERRO.....	5
2.1.1 MINERAIS DE FERRO	5
2.1.2 MINERAÇÃO DE FERRO	6
2.1.2.1 Mineração de Ferro no Mundo	6
2.1.2.2 Mineração de Ferro no Brasil	8
2.1.3 MINÉRIO DE FERRO DA SERRA DO SAPO EM CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO.....	9
2.2 CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO	14
2.2.1 MINERALOGIA ÓPTICA E ELETRÔNICA.....	15
2.2.2 TEXTURA	16
2.2.2.1 Textura e Cominuição	16
2.2.3 CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA E/OU QUANTITATIVA	19
2.3 CARACTERIZAÇÃO DA QUEBRA DE PARTÍCULAS INDIVIDUAIS	20
2.3.1 FRATURA E SEUS MECANISMOS	21
2.3.1.1 Mecanismos de Fratura na Cominuição	24
2.3.1.2 Esmagamento	24
2.3.1.3 Impacto	25
2.3.1.4 Abrasão.....	26
2.3.2 ENSAIOS DE QUEBRA DE PARTÍCULA INDIVIDUAL.....	26
2.3.2.1 Teste de Queda de Peso	27
2.3.2.2 Teste de Pêndulo Duplo.....	28
2.3.2.3. Ensaio de Abrasão.....	29

2.3.2.5 Ensaio de Carga Pontual.....	31
2.3.2.6 Ensaio de Quebra em Leito de Partículas Confinado.....	33
2.3.3 MODELAGEM DA QUEBRA DE PARTÍCULAS.....	35
2.4 MODELAGEM DA COMINUIÇÃO.....	38
2.4.1 MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DO MBP.....	40
2.4.1.1 Função Seleção.....	41
2.4.1.2 Função Quebra.....	42
2.5 LIBERAÇÃO DE MINERAIS.....	45
2.5.1 MEDIDAS DAS CARACTERÍSTICAS DE LIBERAÇÃO.....	46
2.5.2 ANÁLISE DE LIBERAÇÃO POR SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE ANÁLISES MINERALÓGICAS.....	47
2.5.3 LIBERAÇÃO MINERAL NA COMINUIÇÃO.....	51
2.5.3.1 Tipos de Fratura na Liberação.....	51
2.5.3.2 Observações Relevantes da Liberação Mineral na Cominuição.....	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1 AMOSTRAS E SUAS TIPOLOGIAS.....	56
3.2 ANÁLISES QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	58
3.2.1 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	58
3.2.2 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCENCIA DE RAIOS-X.....	59
3.3 ANÁLISES VIA QEMSCAN.....	59
3.4 TESTES DE COMINUIÇÃO.....	60
3.4.1 ENSAIO DE BRITABILIDADE.....	61
3.4.2 ENSAIO DE QUEDA DE PESO COMPLETO (DWT).....	61
3.4.3 ENSAIO DE ABRASÃO LOS ANGELES.....	63
3.4.4 ABRASIVIDADE A_i	64
3.4.5 MOAGEM EM BATELADA A ÚMIDO 30 X 30.....	65
3.4.5.1 Condições de Moagem.....	65

3.4.5.2 Alimentação.....	67
3.4.5.3 Método Experimental	68
3.4.6 MOAGEM EM BATELADA A ÚMIDO EM MOINHO DE 58 CM.....	71
3.4.7 ENSAIO DE CARGA PONTUAL PLT	74
3.4.8 ENSAIO DE COMPRESSÃO DE LEITOS DE PARTÍCULAS CLP.....	77
4 RESULTADOS	80
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MINÉRIOS DE FERRO	80
4.1.1 DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS	81
4.1.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL E MINERALÓGICA DAS AMOSTRAS	84
4.1.2.1 Microestrutura das Amostras.....	84
4.1.2.2 Análise Química e Mineralógica das Amostras	91
4.2 PARTÍCULAS GROSSAS.....	93
4.2.1 PÊNDULO DUPLO DE BOND	93
4.2.2 POINT LOAD TEST (PLT).....	97
4.3 PARTÍCULAS DE TAMANHOS INTERMEDIÁRIOS	100
4.3.1 ÍNDICE DE ABRASÃO LOS ANGELES LA E DE ABRASIVIDADE... 100	
4.3.2 ENSAIO DE QUEDA DE PESO DWT.....	105
4.3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO DE LEITO DE PARTÍCULAS (CLP)	110
4.4 ENSAIOS DE MOAGEM EM BATELADA A ÚMIDO	115
4.4.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO.....	116
4.4.2 DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS TEMPOS DE MOAGEM	118
4.4.3 ANÁLISES QUÍMICAS DAS GRANULOMETRIAS DA MOAGEM.....	122
4.4.4 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DAS FUNÇÕES SELEÇÃO E QUEBRA POR RETROCÁLCULO	125
4.4.4.1 Distribuições Granulométricas dos Tempos da Moagem.....	125
4.4.4.2 Retrocálculo das Funções Seleção e Quebra	129

4.5 LIBERAÇÃO MINERAL	133
4.5.1 ESPECTRO DE LIBERAÇÃO DOS MINERAIS	133
4.5.1 GRAU DE LIBERAÇÃO E FRAÇÃO CUMULATIVA DA LIBERAÇÃO	136
5 DISCUSSÕES	138
5.1 EFEITO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA/MINERALÓGICA E MICROESTRUTURA NA FUNÇÃO QUEBRA	138
5.2 EFEITO DA ESCALA DE TAMANHO DAS PARTÍCULAS NOS TESTES DE COMINUIÇÃO	140
6 CONCLUSÕES	142
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Produção mundial de minério de ferro (Adaptado de USGS, 2016).....	7
Figura 2. Reservas brasileiras de minério de ferro (Adaptado de DNPM, 2015).....	8
Figura 3. Produção Brasileira de minério de ferro (Adaptado de DNPM, 2015).....	9
Figura 4. Mapa regional mostrando a localização da Serra do Sapo e a distribuição das principais unidades geológicas (Adaptado de Silveira-Braga, 2015).	10
Figura 5. Litoestratigrafia observada das formações ferríferas da região da Serra do Sapo a mineralogia dominante. Siglas: IF – itabirito friável; IT – itabirito; ISF – itabirito semifriável; MpHem – hematita microlamelar; AnHem – hematita anédrica; Mt - martita; Kmag – kenomagnetita; Gt – goethita; Qtz – quartzo; Mbr – mica branca; Chl – clorita; Crb – carbonato. (Pires e Souza <i>et al.</i> , 2015).....	12
Figura 6. Concentração de tensões na ponta da trinca, (Adaptado de Wills e Finch, 2016).	21
Figura 7. Perfil força-deformação resultante de cargas repetidas numa partícula de mármore (Adaptado de Tavares e King, 2002).....	23
Figura 8. Fratura por compressão e cisalhamento partícula-meio (modificado de Wills e Finch, 2016).	25
Figura 9. Estilhaçamento por impacto (Adaptado de King, 2012).....	25
Figura 10. Diferentes tipos de quebra de partículas individuais (Adaptado de Tavares, 2007).....	26
Figura 11. Esquema de um aparelho de teste de queda (Adaptado de Tavares, 2007). .	27
Figura 12. Pêndulo duplo (Adaptado de Tavares, 2007).....	28
Figura 13. Dispositivo para o ensaio de carga pontual.....	31
Figura 14. Esquema do Pistão-matriz no ensaio em leito de partículas confinadas.....	34

Figura 15. Ilustração do perfil da curva tensão x deformação gerado no ensaio de compressão.....	35
Figura 16. Distribuição acumulada da energia de fratura em partículas de quartzo de diferentes tamanhos (Modificado de Tavares e King, 1998).	36
Figura 17. Variação da energia específica mediana E_{50} com o tamanho da partícula (Modificado de Tavares e King, 1998).	37
Figura 18. Relação entre t_{10} e as curvas t_{ns} para minério de cobre (Adaptado de Tavares, 2007).....	38
Figura 19. Fração remanescente de partículas na faixa de tamanho 3,35 x 2,36 mm de minério de ferro em função do tempo de moagem.....	42
Figura 20. Variação da taxa de quebra em função do tamanho das partículas de minério de ferro num moinho 30 x 30 cm.	43
Figura 21. Função quebra ilustrando os seus parâmetros que descrevem as populações das partículas grossas e finas, respectivamente n_2 e n_1 . (Adaptado de King, 2001).....	44
Figura 22. Espectro de liberação mineral (King, 2012).	48
Figura 23. Principais componentes do sistema QEMSCAN®	49
Figura 24. Modos de aplicação de cargas e mecanismos de fratura (Adaptado de Little <i>et al.</i> , 2016).	53
Figura 25. Grau de liberação dos diferentes produtos de cominuição (Bérubé e Marchand, 1984).....	55
Figura 26. Tipologias de minério de ferro da mina CMD. (Fonte: Anglo American). ..	56
Figura 27. Espectrômetro de fluorescência de raios-x.	59
Figura 28. Faixas de tamanhos dos testes.....	60
Figura 29. Dispositivo utilizado nos ensaios de queda de peso.....	63
Figura 30. Moinho padronizado para o ensaio Los Angeles.	64

Figura 31. Tambor usado no ensaio de abrasividade de Bond Ai.	65
Figura 32. Moinho de 30 x 30 cm (esquerda) e barra elevadora (direita).	66
Figura 33. Configuração do moinho 30 X 30.	66
Figura 34. Distribuição granulométrica da alimentação dos ensaios de moagem.	68
Figura 35. Esquema resumido do procedimento experimental e da retirada das alíquotas para análise química.	71
Figura 36. Moinho com dimensões de 58 x 24 cm semiaberto.	72
Figura 37. Distribuições granulométricas da alimentação do ensaio de moagem no moinho de 58 cm de diâmetro.	73
Figura 38. Esquema resumido do procedimento experimental e da retirada das alíquotas para análise química.	74
Figura 39. Equipamento adaptado para o ensaio de carga pontual.	75
Figura 41. Formas de aplicação da carga pontual em relação à orientação das bandas: à esquerda perpendicular à carga e à direita paralela à carga.	76
Figura 43. Prensa e equipamento de medição da força e deslocamento aplicado.	78
Figura 44. Imagem de tipologias do Tipo 3 (esquerda) e Tipo 4 (direita) de minério de ferro.	81
Figura 45. Tipologia IF à esquerda e tipo 3 à direita.	82
Figura 46. Tipologia IFX.	83
Figura 47. Imagem de partículas da tipologia Canga.	84
Figura 48. Imagens ortogonais com profundidade de campo, a) e b) paralelas, c) e d) perpendiculares ao plano de bandeamento ilustrando a propagação de trincas, obtidas por microscópio estereoscópico de superfícies fraturadas.	87

Figura 50. Micrografias das matrizes: (a) hematita e (b)quartzo obtidas em microscópio ótico respectivamente por seção polida e em superfície fraturada.	90
Figura 51. Partículas no intervalo 1180-600 um escaneadas via QEMSCAN com minerais enclausurados, a cor vermelha (escura) representa a hematita e a cor rosa (clara) representa o quartzo.	91
Figura 52. Distribuição de energia de fratura das tipologias ensaiadas no pêndulo duplo de Bond.	95
Figura 53. Distribuições granulométricas das tipologias resultante do ensaio de pêndulo duplo de Bond.	97
Figura 54. Distribuição de resistências a carga pontual das tipologias.	98
Figura 55. Procedimento para determinação do $I_{S(20)}$	98
Figura 56. Esquema do ensaio de carga pontual paralelo à formação bandada, ilustrando o caminho preferencial da fratura.....	100
Figura 57. Distribuição das progênes resultantes do ensaio LA e os respectivos índices.	101
Figura 58. Correlação dos parâmetros SiO_2 e $>2,36$ mm com o índice A_i	103
Figura 59. Distribuição granulométrica resultante do ensaio A_i	104
Figura 60. Relação dos parâmetros LA e com o passante na peneira de 1 mm do produto do ensaio A_i para diferentes tipologias (modificado de Tavares e Silveira, 2008).	104
Figura 61. Ajuste dos parâmetros A e b para a relação do t_{10} em função de Ecs para as faixas entre 63 x 13,2 mm da Canga (a) e em todas as amostras (b).	105
Figura 62. Distribuição das progênes gerada com Ecs de 2,5 kWh/t para as seis faixas de tamanho ensaiadas.....	107
Figura 64. Função quebra utilizada para reconstruir a distribuição de tamanho das progênes do DWT.	108

Figura 65. Distribuição granulométrica de diferentes tamanhos de partículas impactadas com 2,5 kWh/t.	109
Figura 67. Relação das energias de compressão com o t_{10} gerado para obtenção dos parâmetros A e b para o ensaio CLP.	111
Figura 68. Função quebra não normalizável dos Tipos 3, 4 e IF (a), e normalizável da Canga (b) para o ensaio de CLP.	112
Figura 69. Função quebra mostrando a relação dos t_{ns} em função do t_{10} , usada para recalcular a função quebra a partir de um certo valor de t_{10} do CLP.	113
Figura 70. Função quebra estimada a partir do t_{10} resultante da Ecs de 2 kWh/t.	114
Figura 71. Distribuições granulométricas das tipologias para níveis de energia e tamanhos diferentes no ensaio CLP.	114
Figura 72. Perfil da curva força x deformação do leito para uma força de 500 kN aplicada em diferentes faixas de tamanho.	115
Figura 73. Distribuições granulométricas da alimentação das tipologias para os ensaios nos moinhos 30 x 30 cm (a) e 58 x 24 cm (b).	116
Figura 74. Partículas contidas nas faixas de tamanho entre 300 e -38 um da alimentação dos ensaios de moagem e suas respectivas densidades da amostra Tipo 3.	117
Figura 75. Análise química das faixas granulométrica da alimentação da moagem 30 x 30, em (a) teor de SiO_2 e em (b) teor de Fe_2O_3 . As linhas pontilhadas representam o teor médio das amostras.	117
Figura 76. Distribuições granulométricas dos quatro tempos de moagem, à esquerda em escala log-linear, à direita em escala log-log.	120
Figura 77. Produção de passante em 106 um em função da energia específica (a), e geração de ultrafinos em função da energia específica (b).	121
Figura 78. Energia específica em função do inverso da raiz do P80 gerado nos tempos de moagem das tipologias.	121

Figura 79. Análises granuloquímicas nos diferentes tempos de moagem.....	124
Figura 80. Teor médio de Fe_2O_3 (a) e teor médio de SiO_2 (b) das faixas acima de 20 μm em função do tempo de moagem.....	125
Figura 81. Distribuições granulométricas dos quatro tempos de moagem: à esquerda em escala log-linear e à direita em log-log, para o moinho de 58 x 24 cm.....	127
Figura 82. Energia específica em função do inverso da raiz do P80 gerado nos tempos de moagem das tipologias no moinho de 58 x 24 cm.	128
Figura 83. Produção de passante em 106 μm em função da energia específica (esquerda) e geração de ultrafinos em função da energia específica (direita).	129
Figura 84. Função quebra (a) e função seleção (b) retrocalculadas a partir dos dados dos ensaios no moinho de 58 x 24 cm.	130
Figura 85. Distribuições granulométricas dos ensaios (símbolos), juntamente com as distribuições retrocalculadas a partir das funções quebra e seleção obtidas (linhas).	132
Figura 86. Espectro de liberação dos principais minerais portadores de ferro.....	135
Figura 87. Grau de liberação dos minerais, quartzo à esquerda e hematita à direita, em função do tamanho da partícula, para as diferentes tipologias.....	136
Figura 88. Fração cumulativa de liberação de quartzo das tipologias em função do grau de liberação em diferentes intervalos de tamanhos.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais classes e minerais de ferro (Adaptado de Klein e Dutrow, 2001) ...	6
Tabela 2. Classificação e características microestruturas dos principais óxidos de ferro (Pires e Souza <i>et al.</i> , 2015).....	13
Tabela 3. Índices de moabilidade dos finos de minério de ferro em relação às partículas policristalinas (Adaptado de Mourão, 1990).....	17
Tabela 4. Amostras e massa contidas nas diferentes faixas de tamanhos.	57
Tabela 5. Condições utilizadas no ensaio completo de DWT	62
Tabela 6. Distribuição da carga moedora e número de bolas	67
Tabela 7. Parâmetros utilizados para moagem a úmido	67
Tabela 8. Metodologia utilizada na análise granulométrica e para retirada de alíquotas para análise química	69
Tabela 9. Distribuição da carga moedora e número de bolas.....	72
Tabela 10. Faixas de tamanho e forças utilizadas no ensaio CLP	77
Tabela 11. Ensaio e parâmetros obtidos nos ensaios de fragmentação.....	79
Tabela 12. Parâmetros da distribuição de tamanho de grãos dos minerais das tipologias.	85
Tabela 13. Porcentagem das formas dos grãos minerais das tipologias	86
Tabela 14. Índice de associação de minerais finamente disseminados e enclausurados	90
Tabela 15. Composição química global em massa das tipologias obtida por FRX (%).	92
Tabela 16. Composição mineralógica global das tipologias obtida por DRX (%).	92
Tabela 17. Resultados do ensaio pêndulo duplo de Bond e parâmetros das distribuições	95

Tabela 18. Valores-p do teste estatístico de Kruskal-Wallis.....	96
Tabela 19. Resumo dos dados do ensaio de carga pontual.....	99
Tabela 20. Parâmetros e índices dos ensaios <i>LA</i> e abrasividade <i>Ai</i>	102
Tabela 21. Parâmetros do modelo que relaciona <i>t10</i> com a <i>Ecs</i>	106
Tabela 22. Parâmetros <i>A</i> e <i>b</i> ajustados que relaciona <i>Ecs</i> e <i>t10</i> para o ensaio de compressão em leitos	111
Tabela 23. Valores de competência das tipologias, baseado no modelo empírico de Bond obtidos a partir dos ensaios de moagem descontínua.....	122
Tabela 24. Valores de competência das tipologias, baseado no modelo empírico de Bond.	128
Tabela 25. Sumário dos parâmetros ajustados das funções seleção e quebra da moagem em batelada no moinho 58 x 24 cm.....	133
Tabela 26. Sumário das respostas aos ensaios de quebra das diferente tipologias de minério de ferro.....	140

1 INTRODUÇÃO

O mercado mundial de minério de ferro é altamente dependente da produção de aço, que representa mais de 90% da demanda. Nas últimas décadas, a produção mundial de aço bruto cresceu 94%. Este grande crescimento na produção de aço se deve principalmente à China, que nesse período foi responsável por 86% desse acréscimo (USGS, 2016). Além disso, a China, como a maior produtora mundial de aço, também é o principal destino das exportações brasileiras dessa *commodity*.

Outros aspectos relevantes e desafiadores para este setor são a variação dos preços do minério de ferro nos últimos anos, uma vez que a produção de aço na China ultimamente vem diminuindo, como também o aumento da capacidade produtiva de projetos. Ainda um outro aspecto é a gradual exaustão das jazidas de minério de ferro de alto teor, fazendo com que as mineradoras de ferro progressivamente explorem minérios com teores progressivamente menores e mais competentes. Diferentemente dos minérios de alto teores, esses necessitam de uma cominuição fina para se conseguir uma liberação dos minerais de interesse ou, em alguns casos, para expô-los. Também são necessárias operações adicionais de beneficiamento como separação magnética e flotação para se atingir teores significativos de ferro no concentrado.

Dessa forma, a cominuição passou a se mostrar como uma etapa de extrema relevância para o processamento mineral. Geralmente, ela é o primeiro estágio do processamento mineral e é responsável pela redução granulométrica desejável aos processos posteriores. A cominuição é a etapa mais crítica da indústria mineral como um todo, uma vez que ela é a maior consumidora de energia, representando até 50 % do consumo total de energia de uma usina de processamento mineral (Radziszewski, 2013).

Além dessas dificuldades, outro desafio que gera ineficiência para a indústria mineral, e por conseguinte aumento dos custos do produto final, é a variabilidade de minérios existente numa mina. Alruiz *et al.* (2009) e Suazo *et al.* (2010) identificaram diferentes litologias, mas com propriedades metalúrgicas similares numa usina de minério de cobre no Chile. Os autores mostraram, respectivamente, como a capacidade de processamento da usina e o desempenho da flotação variam consideravelmente dentro de uma mesma mina dependendo da área do corpo da mina, ou unidade geometalúrgica. Turrer *et al.* (2013) analisaram dois tipos de litologias diferentes de minério de ferro, denominados compacto e friável, e verificaram uma diferença entre 15 % a 18 % no

consumo de energia específica durante a moagem, consequentemente afetando a produtividade.

Com o atual cenário desafiador para as mineradoras em geral, mais especificamente para as de ferro, é de extrema importância o investimento em pesquisa. Dos três problemas citados acima, o mais tangível é o melhor entendimento das diferentes litologias processadas na usina, uma vez que o primeiro é de ordem global e econômica e o segundo requer diversos testes extensivos e dispendiosos.

Em uma mina, o minério a ser processado geralmente varia muito conforme a frente de lavra. Essa variação é causada principalmente por processos geológicos que causam ao longo do tempo importantes alterações nas rochas, gerando diferentes litologias. Um exemplo disso são as formações ferríferas bandadas (FFB) silicosas da região da Serra do Sapo, onde foram extraídas as amostras desta pesquisa. Essas formações apresentam um perfil vertical de diferentes litologias bastante peculiar proveniente de processos supergênicos, destacando-se o intemperismo, como descrito por Rosièry e Chemale Jr. (2000).

As mineradoras que atuam na região classificam essas diferentes litologias de acordo com uma ou mais características do minério de ferro, como sua composição química, mineralógica, ou quanto ao seu nível de compactidade, de acordo com o sistema de classificação de cada empresa. Na região da Serra do Sapo, a empresa Anglo American classifica as tipologias de minério de ferro de acordo com as características petrográficas macroscópicas e granulométricas do *Run of Mine* (ROM) em: Itabirito Friável, Itabirito Semifriável e Itabirito Compacto, em ordem crescente de compactidade.

Embora exista essa classificação dos diferentes tipos de minérios de ferro, há apenas um fraco entendimento do comportamento destas tipologias no processamento mineral. Estudos anteriores, especificamente na cominuição, apresentaram resultados limitados e/ou superficiais, sendo seu uso insuficiente para a modelagem dos processos de cominuição.

Dentre os trabalhos, destacam-se o de Mazzinghy *et al.* (2014) que analisaram dois tipos de minério de ferro compacto e friável quanto à moagem e observaram que o minério friável se mostrou mais competente do que o minério compacto. Silva (2003), por sua vez, concluiu por meio de ensaios de queda de peso, que o comportamento de quebra de dois minérios de ferro, um friável e o outro compacto, eram semelhantes,

contrastando com Tavares *et al.* (2012) que reconhecem as peculiaridades encontradas no comportamento de quebra desses minérios e que resulta em desafios na sua aplicação em ferramentas tradicionais de caracterização e simulação da moagem.

Aliado a isso estão as características da função quebra de alguns materiais e que são bastante pertinentes para a modelagem da cominuição, como reconhecido por Austin e Luckie (1972) e Tavares e Neves (2008). Ambos estudos reconhecem o efeito significativo da função quebra ser normalizável ou não e que caso essa característica seja negligenciada pode-se não obter resultados acurados principalmente na porção mais fina da distribuição granulométrica.

Outro aspecto relevante relacionado a essa classificação dos minérios de ferro é a liberação das fases minerais presentes. Ferreira (2013) estudou a liberação de minérios de ferro compacto e friável. Para o estudo de liberação, a classificação dos minérios de ferro foi relevante, de modo que o autor encontrou características das tipologias que as diferenciam quanto à sua liberação, embora não tenha abordado o modo de liberação dominante ocorrido em cada minério.

Vale ressaltar também que nos processos de cominuição o desgaste dos equipamentos é intenso e tem sido reportado cada vez mais pelas mineradoras. Associado a isso estão as características dos minérios, que estão, com frequência, cada vez mais finamente disseminados, competentes e abrasivos. Esses fatos têm gerado grande preocupação para as indústrias devido aos gastos com manutenção e paradas da linha de produção.

Nesse contexto, fica evidente a necessidade de uma melhor compreensão destas litologias no processamento mineral, principalmente na etapa que mais influi no custo final do produto, a cominuição.

1.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar as diferentes tipologias de minérios de ferro encontradas na jazida da Anglo American no Projeto Minas Rio, localizada na região da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro (MG) quanto ao seu comportamento na cominuição, considerando a sua composição/mineralogia, principalmente no que diz respeito ao rastreamento dos diferentes minerais quanto à preferência ou não em reportar em determinadas faixas de tamanho preferenciais quando quebradas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar as características estruturais, microestruturais e mineralógicas das diferentes litologias: Canga, Hematita (IFX), Itabirito friável (IF) e Itabirito compacto (Tipo 3 e Tipo 3).

Relacionar as características intrínsecas dos minérios com as características de quebra e de liberação dos minerais.

Comparar e relacionar os índices obtidos dos ensaios de quebra.

Analisar a composição química das faixas granulométricas das progênies proveniente de partículas grandes fraturadas.

Estimar as funções quebra e seleção a partir de ensaios cinéticos de moagem e das informações obtidas dos ensaios de quebra.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FERRO

2.1.1 MINERAIS DE FERRO

Os minerais de ferro, em sua grande maioria, são óxidos e óxido-hidróxidos de ferro, compostos de ferro Fe, oxigênio O e/ou hidróxido OH. Além desses minerais de ferro, existem outras classes como os carbonatos, sulfetos e silicatos. Esse grande número de minerais existe devido à abundância do ferro na crosta terrestre e, principalmente, à sua alta capacidade de se oxidar ou se reduzir conforme o ambiente (Cornell e Schwertmann, 2003). Apesar do grande número de minerais, apenas poucos são considerados economicamente exploráveis. Essa distinção é feita principalmente pelos seguintes fatores: teor de ferro presente no mineral, a concentração desse mineral na rocha e a facilidade de exploração da mina em que essas rochas se encontram. Dos minerais de ferro, apenas alguns apresentam teores suficientemente atrativos para que sua extração seja economicamente viável (Tabela 1). Destes, apenas os minerais óxidos/óxido-hidróxidos têm expressão econômica, destacando-se principalmente a magnetita, a hematita e a goethita.

A hematita apresenta composição química teórica de 69,94% de ferro e 30,06% de oxigênio, possui célula unitária hexagonal, massa específica de 5,26 g/cm³ e dureza entre 5,5 e 6,5 na escala de Mohs. Em microscopia óptica de luz refletida aparece com coloração cinza claro, mais brilhante que a magnetita, e com refletância de 25% a 30% (Gribble e Hall, 1985).

A goethita apresenta composição química teórica de 62,85% de ferro, 36,01% de oxigênio e 1,13% de hidrogênio, possui célula unitária ortorrômbica, massa específica de 4,3 g/cm³ e dureza entre 5 a 5,5 na escala Mohs. Em microscopia óptica de luz refletida aparece com coloração cinza azulado e refletividade de 17%.

Embora seja um tipo de morfologia da hematita, a martita é uma hematita secundária que se forma a partir da oxidação da magnetita em baixas temperaturas e em fluidos de baixa salinidade que permitiram a difusão de átomos de oxigênio a partir da magnetita (Pirajno, 2009). Essa morfologia da hematita pode apresentar diferentes graus de alteração e, conseqüentemente, de porosidade.

Tabela 1. Principais classes e minerais de ferro (Adaptado de Klein e Dutrow, 2001)

Classes	Mineral	Molécula	Teor* (%)	Designação comum
Óxidos/Óxido-hidróxidos	Magnetita	Fe_3O_4	72,36	Óxido-ferroso-férrico
	Hematita	$\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$	69,94	Óxido férrico
	Maghemita	$\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$	69,94	
	Goethita	$\alpha - \text{FeOOH}$	62,85	Hidróxidos de ferro
	Lepidocrocita	$\gamma - \text{FeOOH}$	62,85	
Carbonato	Siderita	FeCO_3	48,20	Carbonato de ferro
Sulfetos	Pirita	FeS_2	46,50	Sulfetos de ferro
	Pirrotita	$\text{Fe}_{1-x}\text{S}^{**}$	63,6	
Silicatos	Fayalita	$\text{Fe}^{2+}_2(\text{SiO}_4)$	54,81	Grupo da olivina
	Laihunita	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2(\text{SiO}_4)_2$	47,63	
	Grenalita	$\text{Fe}^{2+}_3\text{Fe}^{3+}_{0,5}\text{Si}_{22}\text{O}_5(\text{OH})_{3,3}$	44,14	Grupo da serpentina
	Grunerita	$\text{Fe}^{2+}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	39,03	Grupo dos anfibólios
	Fe-antofilita	$\text{Fe}^{2+}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	39,03	

* Teor de ferro em massa no mineral. ** X variando de 0 a 0,17.

2.1.2 MINERAÇÃO DE FERRO

2.1.2.1 Mineração de Ferro no Mundo

O minério de ferro é a principal matéria prima para a extração do ferro metálico para produzir aço. A China, como a maior produtora mundial de aço, também é a maior produtora de minério de ferro, seguida por Austrália, Brasil, Índia e Rússia (USGS, 2016).

Globalmente, o preço do minério de ferro vem caindo continuamente nos últimos anos, uma vez que a produção de aço na China diminuiu e os projetos para aumentar a

capacidade de produção de minério de ferro continuaram crescendo. No atual cenário, por exemplo, o preço médio do minério de ferro com teor de ferro de 62% no Porto de Tianjin, China, caiu nos últimos 5 anos do maior valor de US \$ 187,18 em fevereiro de 2011 para US \$ 56,43 em setembro de 2015 (USGS, 2016), colocando o segmento em uma posição desafiadora.

O mercado mundial de minério de ferro é altamente dependente da produção de aço, que representa mais de 90% da demanda. Nas últimas décadas, a produção mundial de aço bruto cresceu 94%. Este grande crescimento na produção de aço se deve principalmente à China, que nesse período foi responsável por 86% desse acréscimo de produção mundial (World Steel Association, 2016).

O mercado mundial de minério de ferro recebeu uma forte influência do acelerado crescimento na produção de aço, puxado principalmente pela China. Como mostrado na Figura 1, a China é a maior produtora de minério de ferro no mundo. A China também é a maior importadora de minério de ferro e tem sido a responsável por impulsionar a produção de outros países como a Austrália e o Brasil, os quais passaram a ser, respectivamente, segundo e terceiro colocados na produção mundial.

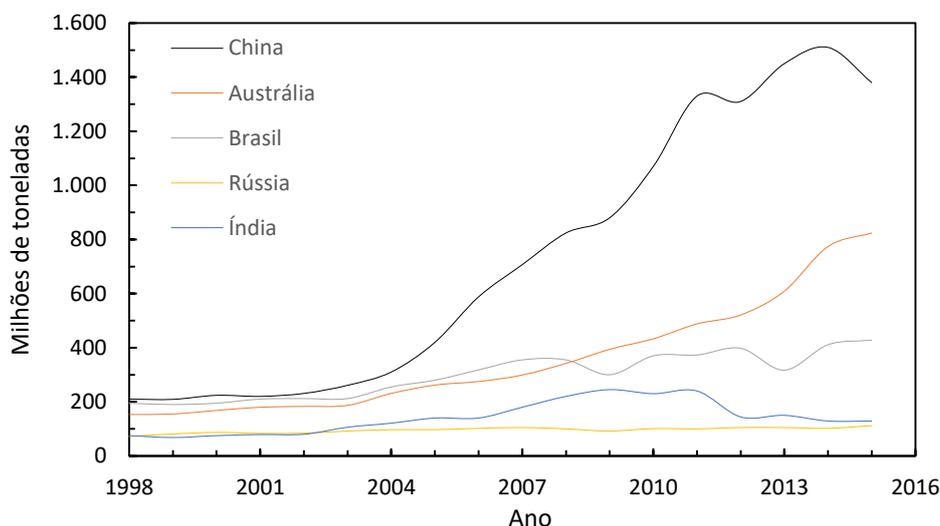


Figura 1 – Produção mundial de minério de ferro (Adaptado de USGS, 2016).

2.1.2.2 Mineração de Ferro no Brasil

As reservas de minério de ferro brasileiras são bastante significativas, representando 16,3% das reservas mundiais. Considerando, entretanto, o teor médio de ferro de 51,6%, essa reserva coloca o Brasil em uma posição de destaque no cenário mundial (USGS, 2016).

Embora muitos estados tenham reservas de minério de ferro, apenas três se destacam dos demais. Os principais estados brasileiros detentores de reservas são: Minas Gerais, com 72,5% e teor médio de 46,3% de ferro, Mato Grosso do Sul com 13,1% e teor médio de 55,3% e Pará com 10,7% e teor médio de 64,8%, (Figura 2) (DNPM, 2015).

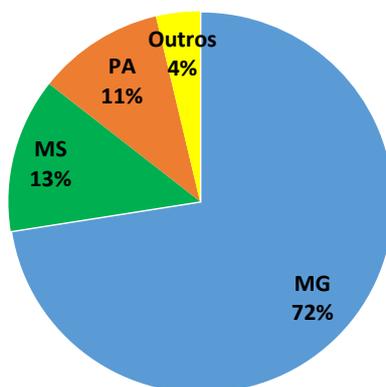


Figura 2 – Reservas brasileiras de minério de ferro (Adaptado de DNPM, 2015).

Atualmente as principais minas brasileiras em produção estão nos estados de Minas Gerais, no Quadrilátero Ferrífero, na Província Mineral de Carajás no Pará e Corumbá em Mato Grosso do Sul. Em Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, o minério de ferro é composto predominantemente de formação ferrífera bandada (FFB) definido pela alternância de bandas constituídas principalmente de hematita e de quartzo, com teores de ferro tipicamente que variam de 35% a 55%. Conseqüentemente, devido ao seu teor reduzido, requer processos adicionais de beneficiamento, como flotação, para aumentar o seu teor. No Pará o minério de ferro é composto predominantemente por hematita e menores porções de magnetita e goethita com teores de ferro variando entre 65 e 67%, prescindindo operações de beneficiamento (Quaresma, 2015).

Segundo DNPM (2015) em 2014 a produção brasileira foi assim distribuída: Minas Gerais (68,4%), Pará (29,2%), Mato Grosso do Sul (1,2%) e outros estados (1,2%) (Figura 3). A Vale S/A, com operações nesses três estados, a Samarco S/A em Minas Gerais e a Companhia Siderúrgica Nacional CSN em Minas Gerais, foram as maiores produtoras e, juntas, responderam por 84,5% da produção nacional. O tipo de produção se dividiu em minérios granulados (10%) e finos (90%). Os finos, por sua vez, são distribuídos em *sinter feed* (64,8%) e *pellet feed* (25,2%). Mais recentemente, a Anglo American, no Projeto Minas Rio em Minas Gerais, passou a produzir *pellet feed* (2015).

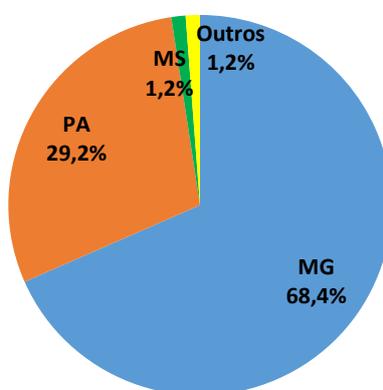


Figura 3 – Produção Brasileira de minério de ferro (Adaptado de DNPM, 2015).

2.1.3 MINÉRIO DE FERRO DA SERRA DO SAPO EM CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO

A formação Serra do Sapo compõe o grupo Serro e está localizada ao longo da fronteira leste da porção meridional do supergrupo Serra do Espinhaço. Ela é definida pela predominância de sedimentos químicos que incluem formações ferríferas bandadas FFB metamórficas na base e metadolomitos no topo (Rolim *et al.*, 2016). De acordo com Almeida-Abreu e Renger (2007) e Rolim *et al.*, (2016) a FFB da formação Serra do Sapo possui três principais corpos localizados na região de conceição do Mato Dentro. Eles são o da Serra do Sapo localizada ao norte de CMD com espessura média de 100 m, o da Serra da Serpentina localizada ao sul de CMD com espessura entre 30 a 100 m e o do Morro do Pilar localizado ao sul de CMD com profundidade de 50 a 250 m, (Figura 4).

As características litológicas e mineralógicas dos minérios de ferro encontrados na Serra do Sapo, de acordo Rolim (2016), são geralmente de cor cinza clara a cinza escura, localmente negra azuladas, formadas por alternância de camadas milimétricas a centimétricas ricas em quartzo, com faixas de mesma gama de espessuras, cinza escuras a negras, ricas em hematita, hematita especularita e, localmente, magnetita.

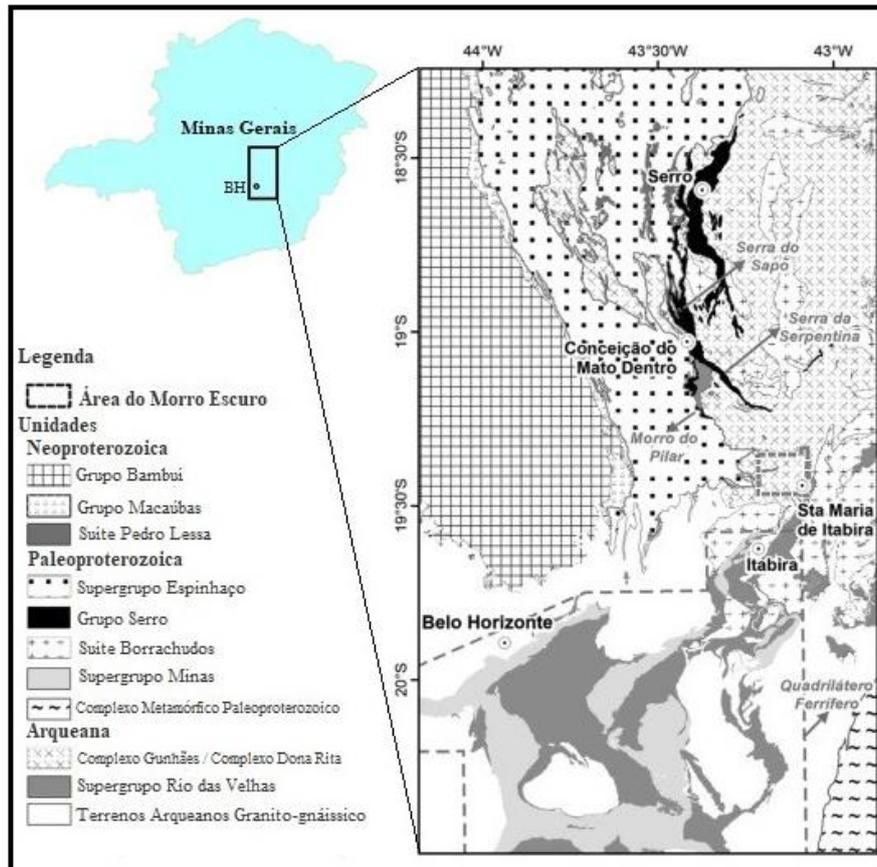


Figura 4. Mapa regional mostrando a localização da Serra do Sapo e a distribuição das principais unidades geológicas (Adaptado de Silveira-Braga, 2015).

Os teores médios, em peso, dessas formações ferríferas bandadas são: 32,5% Ferro total; 51,8% SiO₂; 0,023% P; 1,24% Al₂O₃; e 0,89% FeO, similares a outras FFB em todo mundo (Rolim *et al.*, 2016). Quando intemperizadas são enriquecidas em ferro alcançando teores médios em peso de: 43,9% Ferro total; 38,8% SiO₂; 1,6% Al₂O₃; 0,022% P; e 0,98% FeO. Corpos ricos, associados às grandes falhas de empurrão e de origem hidrotermal têm teores médios em peso de 66,9% Ferro total; 3,1% SiO₂; 0,024% P; 0,85% Al₂O₃; e 0,55% FeO. Estes corpos ricos aparecem descontinuamente, são

altamente foliados com cristais de hematita alongados, especularita, não bandados, com 100 a 300 m de comprimento e espessura variando de 10 a 30 m.

Silveira-Braga *et al.* (2015) analisaram e compararam as características texturais e mineralógicas das FFBs da borda leste da Serra do Espinhaço Meridional, Serra do Sapo, Serra da Serpentina e regiões adjacentes, como Morro Escuro com a FFB do Quadrilátero Ferrífero. As formações das primeiras apresentam características estruturais, homogeneidade textural e mineralógica, associações com quartzitos e ausência de camadas extensas de carbonatos que denotam correlações entre si. Tais características descritas acima impedem uma correlação com o complexo, variado de faces composicionais e polideformado Supergrupo Minas.

As formações ferríferas da região da Serra do Sapo apresentam uma litoestratigrafia bastante peculiar e tal perfil litológico é proveniente de processos supergênicos, destacando-se o intemperismo próximo à superfície, como descrito por Rosièry e Chemale Jr. (2000). O processo de intemperismo, que ocorre acentuadamente na superfície e decresce com a profundidade, gera um perfil vertical de diferentes litologias.

Empresas de mineração e pesquisadores realizaram na região, principalmente nos últimos anos, um intenso trabalho de mapeamento geológico e extração de testemunho de sondagens. A partir dessa grande quantidade de dados e informações, colunas litoestratigráficas foram propostas por diversos autores, dentre eles Almeida-Abreu e Renger (2007); Zacchi (2010); Pires e Souza *et al.* (2015); Silveira-Braga *et al.* (2015); Rolim *et al.* (2016).

Pires e Souza *et al.* (2015) se basearam nas descrições petrográficas macroscópicas, nível de intemperismo e nível de compactidade das diferentes litologias encontradas nos testemunhos de sondagem da Serra do Sapo para classificar os diferentes tipos de minério de ferro. A Figura 5 apresenta um perfil esquemático das camadas litológicas e a caracterização mineralógica e textural de cada tipo de minério de ferro é apresentada na Tabela 2.

Tal perfil de litologias encontrado na região condiz com o perfil resultante de processo supergênico, como o intemperismo próximo à superfície, descrito por Rosièry e Chemale Jr. (2000) e Lascelles (2012). Nas condições climáticas locais, águas meteóricas, bastante comuns nessa região, lixiviam o quartzo das FFB, enriquecendo-o e

simultaneamente tornando-o poroso e friável (Dorr, 1964; Rosièry e Chemale Jr., 2000). Os autores apresentaram perfis de intemperismo idealizados em FFB apresentado do topo para a base em ordem decrescente de intensidade: Canga – hematita friável – itabirito brando ou semi-friável (ISF) – itabirito friável (IF) – itabirito duro/compacto (IT).

A profundidade de cada litologia pode variar dependendo da intensidade do intemperismo, e o contato inferior da Formação Serra do Sapo com a Formação Meloso é gradacional, caracterizados pela diminuição progressiva do conteúdo de minerais de ferro (Rolim *et al.*, 2016).

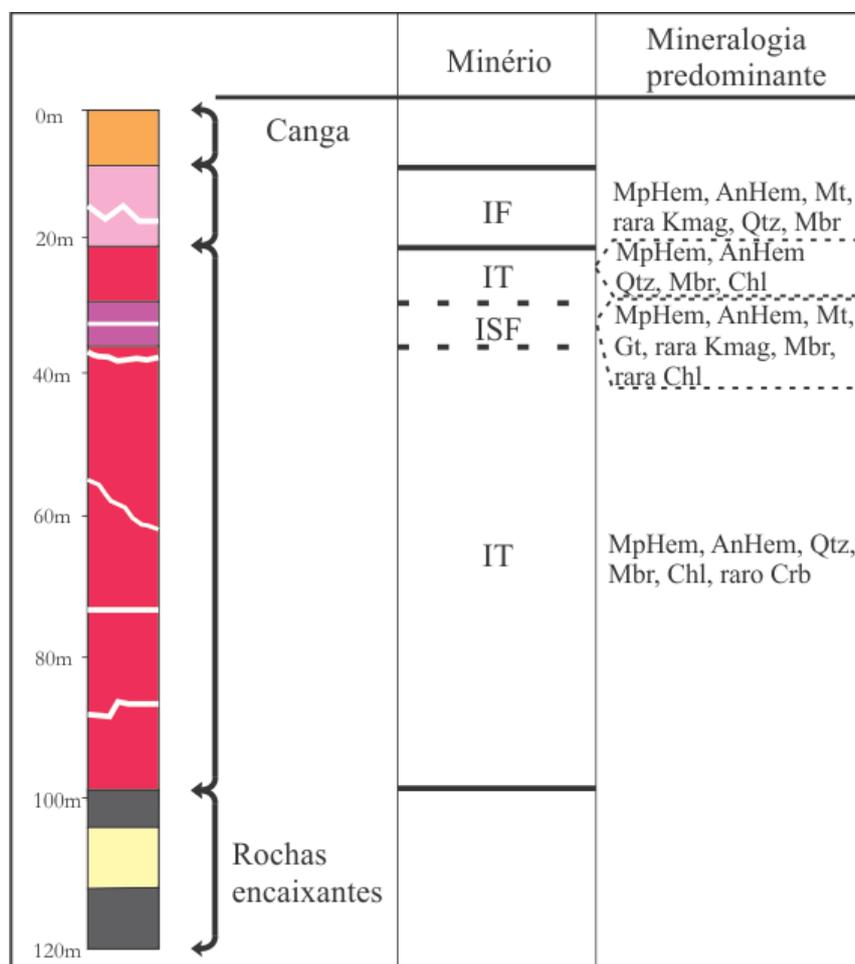
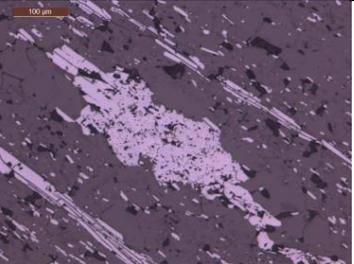
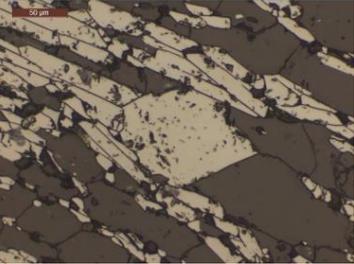
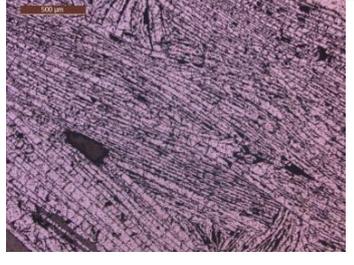


Figura 5. Litoestratigrafia observada das formações ferríferas da região da Serra do Sapo a mineralogia dominante. Siglas: IF – itabirito friável; IT – itabirito; ISF – itabirito semifriável; MpHem – hematita microlamelar; AnHem – hematita anédrica; Mt - martita; Kmag – kenomagnetita; Gt – goethita; Qtz – quartzo; Mbr – mica branca; Chl – clorita; Crb – carbonato. (Pires e Souza *et al.*, 2015).

Tabela 2. Classificação e características microestruturas dos principais óxidos de ferro
(Pires e Souza *et al.*, 2015).

Tipo	Descrição	Fotomicrografia
Hematita Lamelar (PHem) e microlamelar (MpHem)	Cristais de hematita alongados de granulação fina a grossa, que comumente constituem a massa de hematita dos itabiritos.	
Hematita anédrica (AHem)	Aglomerados anédricos e porosos, que ocorrem comumente associados aos cristais de hematita microlamelar.	
Martita (Mt)	Cristal de hematita pseudomorfo do cristal octaédrico de magnetita.	
Kenomagnetita (Kmg)	Fase intermediária que se forma durante a oxidação da magnetita para hematita. Pode ser descrita como uma magnetita deficiente em Fe+2. Apresenta cor rósea e ocorre no centro dos cristais de martita.	
Hematita especular	Cristais de hematita alongados, com comprimentos muito longos, e muito deformados. Comuns em veios de quartzo.	

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO

Minérios de ferro, conforme foram sendo explorados ao longo do tempo, têm se apresentado cada vez mais na forma de grãos com tamanhos mais reduzidos e mais disseminados, tornando mais difícil de se produzir minério tipo granulado ou hematítico de alto teor de ferro, ou seja, acima de 63%. Esse produto é caracterizado por sua granulometria acima de 12,5 mm, alto teor de ferro, podendo ser utilizado diretamente nos altos-fornos de usinas siderúrgicas. Por essas características, esse minério tem maior valor de mercado. Devido ao esgotamento e a dificuldade de se produzir esse tipo de minério, tornou-se necessária a utilização do minério de granulometria mais fina através da concentração de minérios de teores mais baixos.

Devido aos minerais de ferro cada vez mais finamente disseminados nas rochas, tornou-se necessário reduzir a granulometria para atingir a sua liberação (Wiegel, 1975; Clout, 2002). Operações adicionais de beneficiamento, também são necessárias para se atingir teores significativos de ferro.

Para a indústria siderúrgica, os finos de minério de ferro são classificados de acordo com a sua granulometria em *sínter (sinter feed)*, entre 6,3 mm e 0,15 mm, e finos para aglomeração de pelotas (*pellet feed*), com tamanho inferior a 0,15 mm. Essas granulometrias não são ideais para a utilização direta em altos-fornos, visto que os finos afetam a permeabilidade da carga e podem inviabilizar o processo. Para satisfazer as necessidades das siderúrgicas, os minérios finos sofrem processo de aglomeração como, sinterização ou pelotização, adequando a granulometria para uso em altos-fornos (Clout, 2005).

Como mencionado, a tendência para produção de minérios finos está aumentando e os processos de aglomeração vão se configurando e se fortalecendo como um caminho para mineração e, assim, expandir a vida útil de quase todas as jazidas de minério de ferro. Para se ter uma ideia, apenas 10% da produção de minério de ferro no Brasil é de minério granulado (Quaresma, 2015).

A região do Quadrilátero Ferrífero possui, além do minério tipo hematítico de alto teor, o minério itabirítico (Rosière *et al.*, 1993). Inclusive, muitas mineradoras classificam os minérios em: minérios itabiríticos compactos, que são os tipos maciços, com alta coesão e resistência dos grãos e baixo índice de porosidade; minérios itabiríticos friáveis, devido a processos de intemperismo e/ou lixiviação, que possuem baixa coesão e

resistência dos grãos e alta porosidade; além do minério itabirítico médio, muitas vezes classificado como itabirito semi-compacto, que corresponde ao minério intermediário. Essa classificação também é utilizada para os hematíticos. Adicionalmente, é ainda reconhecido um terceiro tipo, denominado de Canga, o qual corresponde ao minério laterítico, fortemente intemperizado que é encontrado tipicamente próximo à superfície, enriquecido de minerais com a presença de hidróxidos, além de argilas.

2.2.1 MINERALOGIA ÓPTICA E ELETRÔNICA

Para a caracterização de minérios de ferro existem duas técnicas de microscopia para aquisição da imagem que se destacam e são a microscopia eletrônica de varredura MEV e a microscopia óptica de luz refletida (MOLR). Ambas são capazes de fornecer informações dos tipos e quantidades de minerais existentes, associações de minerais, distribuição e forma dos grãos. Essas técnicas têm suas vantagens e desvantagens. Entre as principais vantagens da MOLR em relação à MEV são a melhor discriminação entre óxidos e hidróxidos, a velocidade de análise, a manutenção e na maioria dos casos o baixo custo (Donskoi *et al.*, 2013).

Segundo Donskoi *et al.* (2016), outras vantagens importantes da MOLR é a sua melhor capacidade de identificação dos diferentes óxidos e oxihidróxidos de ferro, enquanto que na MEV esta distinção de minerais de composição química semelhante como, hematita, magnetita, maghemita e goethita é mais difícil. Além disso a MOLR permite identificar poros, assim como na MEV. Essa identificação dos poros é importante para a identificação de minerais como a goethita e a hematita martítica que quase sempre apresentam grande porosidade e são mais friáveis (Santos e Brandão, 2003).

As principais desvantagens da MOLR em comparação à MEV são a distinção entre os diferentes minerais que têm refletividades semelhantes e a distinção de minerais transparentes da resina.

A mineralogia eletrônica baseada em MEV é outra técnica imprescindível à caracterização de minérios e materiais de um modo geral, principalmente quando acoplado a um espectrômetro de dispersão de energia EDS para a identificação de elementos químicos em pontos de até 2 *um* de diâmetro (Neuman *et al.*, 2010). Este

assunto é abordado detalhadamente na seção 2.5.2, onde é apresentado o seu princípio de funcionamento, tipos de análise e seus avanços na indústria mineral.

2.2.2 TEXTURA

Diversos autores têm mostrado a importância crítica das características texturais e microestruturais dos minérios na compreensão do comportamento de partículas que vão desde o processamento mineral até os processos metalúrgicos.

Em seu trabalho Clout (2005) trata da importância de que não apenas a mineralogia, mas também as texturas dos minérios, controlam o desempenho do processamento mineral desde a cominuição até a classificação e o beneficiamento, como também no controle de processos metalúrgicos de aglomeração (sinterização e pelletização) e o comportamento da carga no alto-forno.

Araujo *et al.* (2003) destacaram a importância da caracterização mineralógica na seleção do processo de beneficiamento de minério de ferro. Os critérios para a seleção do método de beneficiamento mais adequado para cada aplicação dos finos (*sinter feed* e *pellet feed*) incluem uma série de parâmetros. Para os autores, a mineralogia desempenha um papel fundamental na escolha de um determinado método.

O conhecimento geológico sobre o depósito mineral e as características de diferentes tipos de minérios são os pontos fundamentais a serem considerados ao selecionar o processo de beneficiamento para recuperação dos minérios de ferro (Upadhyay *et al.*, 2009). Dependendo de suas características minerais e diferentes associações, minérios lateríticos, friáveis, pulverulentos, goethíticos e hematíticos, exigem beneficiamentos específicos, independentemente ou em combinação com outros. Diversas configurações têm sido consideradas viáveis para o enriquecimento dos minérios.

2.2.2.1 Textura e Cominuição

Mourão e Stegmiller (1990) apresentaram uma metodologia para classificar os finos de minério de ferro da Companhia Vale do Rio Doce, hoje VALE, de acordo com o seu índice de moabilidade e sua microestrutura para a produção de *pellet feed*. Essa

metodologia se fundamenta na teoria de Rittinger aplicada às partículas finas. Neste caso, o parâmetro de controle do produto moído foi a superfície específica (cm^2/g). Na teoria de Rittinger, o trabalho realizado na fragmentação é diretamente proporcional à nova superfície produzida, na qual a constante de proporcionalidade ou índice de moabilidade é dado neste caso em ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}.\text{W}^{-1}.\text{h}^{-1}$). Os resultados obtidos nos estudos permitiram estabelecer a influência das partículas policristalinas na moabilidade e, conseqüentemente, na produtividade dos moinhos. Os autores constataram a grande influência das partículas policristalinas na moabilidade dos finos de minério de ferro (Tabela 3), mostrando que minérios contendo maiores proporções de partículas policristalinas demandaram menos energia para atingir a mesma área superficial do produto.

Tabela 3 – Índices de moabilidade dos finos de minério de ferro em relação às partículas policristalinas (Adaptado de Mourão, 1990)

Grupo	Partículas policristalinas (%)	Índice de moabilidade ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}.\text{W}^{-1}.\text{h}^{-1}$)
1	Abaixo de 30	1,160 a 1,251
2	De 30 a 50	1,435 a 1,983
3	De 50 a 70	2,158 a 2,623
4	Acima de 70	Acima de 3,084

Segundo Tavares (2000) a microestrutura afeta significativamente todas as propriedades mecânicas dos materiais. Em seu estudo foi feita uma análise detalhada do comportamento de ruptura de partículas individuais por meio de medições de dados fundamentais de deformação, fratura primária e o comportamento da fragmentação. Foram utilizados uma variedade de materiais monofásicos e multifásicos (policristalinos) na célula de carga de impacto. De acordo com os resultados, as partículas monofásicas geralmente exibem fratura frágil e sua energia de fratura decresce continuamente com o aumento do tamanho da partícula. Porém, as energias de fratura de partículas multifásicas se tornam constantes acima de um tamanho de cerca de 1 mm. Materiais policristalinos apresentaram maior acúmulo gradual de danos e presença de comportamento inelástico

antes de fraturarem. Quanto à fragmentação, as partículas multifásicas com defeitos intergranulares pré-existentes produziram fragmentação mais intensa do que as partículas monofásicas.

Lindqvist *et al.* (2007) discutiram as relações entre propriedades intrínsecas, tal como a mineralogia e a microestrutura, e propriedades funcionais e de durabilidade de rochas usadas como material de construção. Como parte das primeiras são analisadas a mineralogia, o tamanho de grão, a porosidade e a presença de trincas. O segundo grupo de propriedades descreve como a rocha responde às condições do ambiente, tais como os esforços mecânicos, os ciclos de congelamento e descongelamento e a exposição à umidade, sendo controladas pelas propriedades intrínsecas. Posteriormente, Tavares e Neves (2008) fizeram um trabalho mais detalhado quanto à microestrutura e à textura de rochas usadas na construção civil no Brasil, utilizando essas propriedades intrínsecas, relacionaram-nas com as características de quebra e de britagem. De forma resumida, os autores propuseram as seguintes relações das propriedades intrínsecas e funcionais:

- Para rochas do mesmo tipo, aquelas com menor tamanho de grão geralmente apresentam mais alta resistência, sendo isso válido para rochas que apresentam matriz de grãos finos.
- Considerando que as trincas respondem de forma diferente nos contatos de fases e os contatos de grãos, as primeiras apresentam maior influência nas propriedades mecânicas, devido ao fato que o contato de fases atua como descontinuidade, enquanto o contato de grãos como iniciador e propagador de trincas. Neste sentido a influência do tamanho de grão é importante para as rochas compostas de apenas um tipo de mineral, já que estas podem interagir como um grão grande e oferecer propriedades comparadas às rochas com tamanhos de grãos mais grossos.
- Rochas com ampla distribuição de tamanhos de grão têm maior resistência do que aquelas com tamanhos de grãos mais uniformes.
- A forma dos grãos também influi na propagação das trincas, já que os cristais euédricos (com limites bem definidos) podem atuar como descontinuidades na estrutura onde as trincas podem iniciar. O incremento da complexidade na forma dos grãos e na geometria dos seus contornos leva à alta resistência da rocha.

- A presença de micas tem um importante efeito na resistência das rochas. Isto depende muito do tamanho e orientação delas. Pequenos grãos de mica orientados aleatoriamente podem incrementar a resistência da rocha, mas se um grão de mica é significativamente maior que o tamanho de grão da matriz mineral, este oferecerá um caminho para propagação de trincas. Contudo, a proporção de micas tem um limitado efeito na resistência.
- Minerais que estão presentes em pequenas quantidades influenciam na resistência, sendo isso verdadeiro para aqueles que apresentam diferentes respostas à deformação, em comparação com a matriz que os envolve, devido ao fato de poderem atuar como concentradores de tensões.
- As propriedades da rocha com uma estrutura orientada diferem daquelas de rochas com estrutura sem orientação predominante.
- Trincas preexistentes podem auxiliar na propagação das trincas, enquanto que um poro pode facilitar tanto a propagação como o bloqueio da propagação da trinca.
- A heterogeneidade da estrutura influencia na resistência à fragmentação. Por exemplo, em uma rocha heterogênea as trincas podem iniciar com esforços de baixa magnitude, enquanto que em rochas homogêneas a fratura iniciará com esforços perto da ruptura.

Em relação à cominuição, Bourgeois *et al.* (2015) introduziram um novo conceito, a textura mecânica, o qual incorpora propriedades de texturas dos materiais que controlam a fratura e fragmentação de minérios. O artigo mostra que a energia específica de fratura é altamente sensível à variação na textura do minério. Os autores aplicaram esse conceito ao concreto e concluíram que um conjunto de características específicas de porosidade dentro da textura do material tem forte correlação com a cominuição de concretos no processo de reciclagem. Por fim, fica evidente que as propriedades texturais tem ligações com propriedades macroscópicas relevantes para a cominuição.

2.2.3 CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA E/OU QUANTITATIVA

Para a caracterização mineralógica de minérios é indispensável a utilização de mais de uma técnica. Na caracterização de minérios é indispensável a identificação e a

quantificação dos minerais de interesse e de canga que constituem o minério, além de fotomicrografias de MEV e MO.

Nos centros de pesquisas das indústrias mineradoras de ferro, as técnicas que mais têm encontrado aplicação para análise qualitativa e quantitativa são a fluorescência de raios-x (FRX) e a difração de raios-X (DRX), além das técnicas baseadas em microscopia. Essas técnicas são de extrema importância na validação de outras técnicas de análise mineralógica, além do controle de qualidade dos produtos finais (Marques, 2013).

A difração de raios X é uma das principais ferramentas na caracterização mineralógica de minérios. Ela é fundamental na identificação de minerais, uma vez que seu funcionamento se baseia na interação dos raios X com o retículo cristalino dos minerais. A partir dessa interação, essa técnica também é capaz de detectar alterações nos minerais, como exemplo a oxidação de magnetita e elementos substitucionais em minerais de ferro (Neumann *et al.*, 2010). Essa técnica também é capaz de quantificar os minerais por meio do método de refinamento do espectro resultante do ensaio de DRX, mais conhecido como o método de Rietveld. Como destacado por Neumann *et al.* (2010), apesar de ser amplamente utilizado, a quantificação por esse método requer alguns cuidados na preparação das amostras e na interpretação dos resultados.

A fluorescência de raios X tem se tornado nos últimos anos uma das técnicas mais utilizadas nas análises de materiais. Tal fato é devido à sua simplicidade de uso, versatilidade e facilidade de análise. Essa técnica pode analisar tanto qualitativamente como quantitativamente, estabelecendo uma proporção de cada elemento presente. Na FRX os raios X interagem com os átomos, que quando excitados emitem uma radiação secundária que é característica de cada elemento químico. A análise quantitativa consiste na medida das linhas do espectro da radiação característica dos elementos procurados e do relacionamento dessas intensidades com sua concentração na matriz onde se encontram dispersos (Neumann *et al.*, 2010).

2.3 CARACTERIZAÇÃO DA QUEBRA DE PARTÍCULAS INDIVIDUAIS

A compreensão da quebra de minérios e sua caracterização é de grande importância para a estimativa de parâmetros que relacionam as características mecânica do minério, como dureza, resistência à quebra, acúmulo de dano, entre outros, com o

processo de cominuição. Em processos industriais de cominuição, as partículas são principalmente fraturadas por esforços de compressão e as propriedades fundamentais do processo de fratura podem ser estudadas por uma extensa variedade de ensaios do tipo compressivo.

Para entender as características de quebra das partículas é necessário primeiro revisar alguns conceitos teóricos fundamentais da fratura, revisados a seguir.

2.3.1 FRATURA E SEUS MECANISMOS

A fratura de partículas é o processo fundamental que governa a cominuição e entendê-la é indispensável para o desenvolvimento de técnicas mais eficientes de redução de tamanho (Wills e Finch, 2016).

É sabido que a maioria dos minerais são materiais cristalinos nos quais os átomos são dispostos regularmente em arranjos tridimensionais e apresentam comportamento elástico. Sob carregamento uniforme, os diferentes minerais existentes nas rochas são responsáveis por gerar tensões internas não uniformemente distribuídas, principalmente pelos seus tamanhos variados. A distribuição das tensões depende das propriedades mecânicas dos minerais individuais, mas, mais importante ainda, da presença de trincas ou falhas na matriz, que atuam como locais de concentração de tensões (Figura 6).

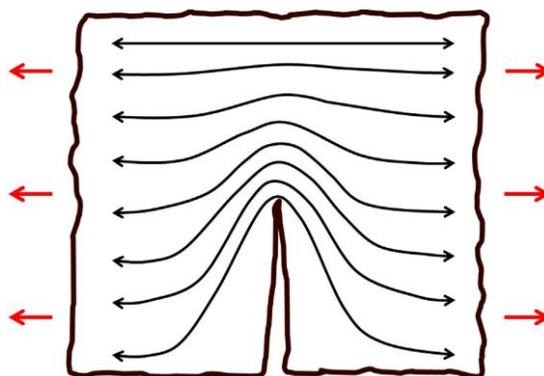


Figura 6 – Concentração de tensões na ponta da trinca, (Adaptado de Wills e Finch, 2016).

Em seu trabalho Inglis (1913) demonstrou que o aumento da tensão em uma falha é proporcional à raiz quadrada do comprimento da trinca perpendicular à direção da

tensão. O autor verificou que há um valor crítico para o comprimento da trinca num certo nível de tensão o qual aumentado é suficiente para quebrar a ligação atômica nessa ponta.

Outro trabalho relevante para a teoria da fratura foi o de Griffith (1921), o qual mostrou que os materiais rompem como resultado da propagação de trincas quando é energeticamente viável, ou seja, quando a energia liberada pela relaxação da energia de deformação é maior que a energia da nova superfície produzida. Materiais elásticos liberam a energia de deformação principalmente pela propagação de trincas, enquanto que materiais tenazes como aço podem liberar a energia de deformação sem propagação de trincas pelo mecanismo de deformação plástica. A tensão mínima na ponta da trinca necessária para fraturar é dada por

$$\sigma = \sqrt{\frac{4E\gamma}{L}} \quad \text{eq. 1}$$

na qual E é o módulo de Young, γ é a energia livre para criar superfície e L é o comprimento da trinca.

A energia de fratura E de uma partícula corresponde à energia armazenada pela partícula até o momento da fratura e corresponde à área abaixo da curva força-deformação:

$$E = \int_0^{\Delta_c} F d\Delta \quad \text{eq. 2}$$

na qual Δ é a deformação da partícula e Δ_c é a deformação na fratura.

Porém, a abordagem clássica da mecânica da fratura não consegue descrever algumas situações mais complexas. Tavares e King (2002) usou a mecânica do dano, ramo da mecânica dos sólidos, para descrever situações adicionais que são relevantes para a cominuição de partículas. Nesse trabalho, os autores exploraram a relação entre o acúmulo de danos que ocorre em um único impacto e o enfraquecimento progressivo que ocorre depois de repetidos impactos.

A Figura 7 mostra o efeito de impactos repetidos resultando numa degradação progressiva da rigidez das partículas até o ponto em que a sua integridade é totalmente perdida, resultando em fratura no sétimo impacto.

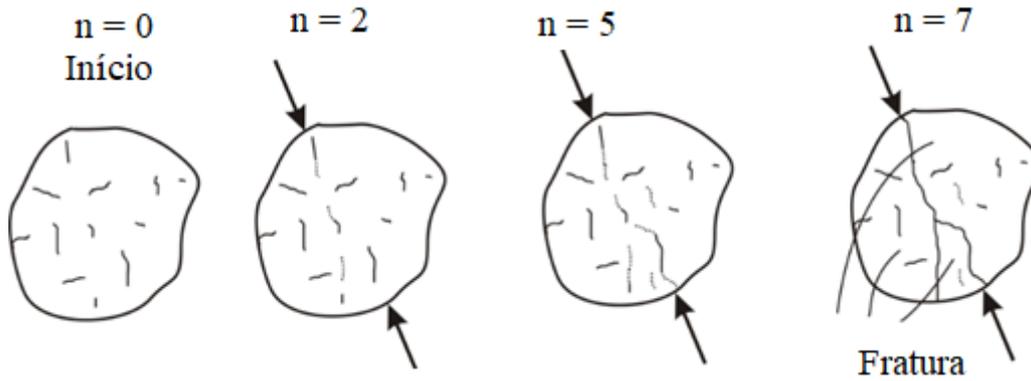
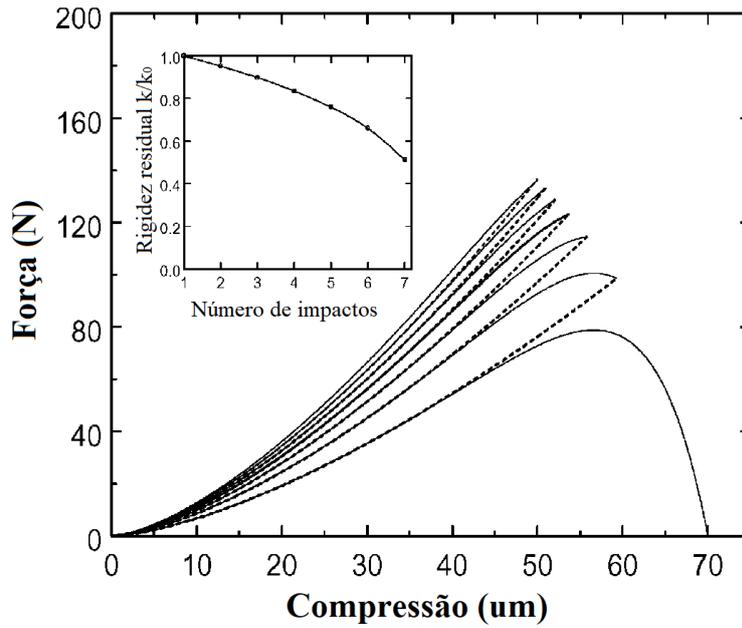


Figura 7 – Perfil força-deformação resultante de cargas repetidas numa partícula de mármore (Adaptado de Tavares e King, 2002).

Depois do primeiro carregamento o n -ésimo dano pode ser calculado por:

$$D_n^* = \left(\frac{\alpha_n}{\alpha_c} \right)^\gamma \quad \text{eq. 3}$$

sendo α_n a máxima deformação atingida durante o n -ésimo evento de carregamento.

Após algumas manipulações e considerações, tem-se a equação que representa a quantidade de dano sofrido no n -ésimo ciclo de carregamento (Tavares e King, 2002):

$$D_n^* = \left(\frac{2\gamma E_{k,n}}{(2\gamma + 5 - 5D_n^*)E_{n-1}} \right)^{\frac{2\gamma}{5}} \quad \text{eq. 4}$$

Este modelo evita trabalhar diretamente com as curvas tensão-deformação que existem para cada partícula e simplifica a modelagem de forma que o único parâmetro a ser ajustado é o γ .

Dos resultados experimentais, foi concluído que a resistência inicial das partículas, a intensidade dos impactos, a microestrutura e textura do material influenciam diretamente na resposta do material sob impactos repetidos. Assim, esse efeito de enfraquecimento se mostra relevante e tem sido adicionado em modelos matemáticos mais avançados de cominuição como o modelo mecanicista de Tavares e Carvalho (2009).

2.3.1.1 Mecanismos de Fratura na Cominuição

Naturalmente na cominuição, as partículas têm formas irregulares e quando são solicitadas mecanicamente as cargas não são uniformes, em outras palavras, as cargas podem ser em um único ponto ou em pequenas áreas de contato da partícula. Assim, a quebra de partículas na cominuição é principalmente por esmagamento, impacto, atrição e cisalhamento e os modos de aplicação dos esforços são compressão, tração e cisalhamento, dependendo das propriedades das rochas e dos equipamentos de cominuição.

2.3.1.2 Esmagamento

Quando uma partícula irregular é quebrada por compressão ou esmagamento, os produtos caem em duas faixas de tamanho distintas - partículas grosseiras resultantes da falha de tração induzida e finos de falha de compressão perto dos pontos de carregamento ou por cisalhamento nas projeções (Figura 8). A quantidade de finos produzidos pode ser reduzida minimizando a área de carregamento, e isto é frequentemente feito em britadores utilizando superfícies de esmagamento onduladas.

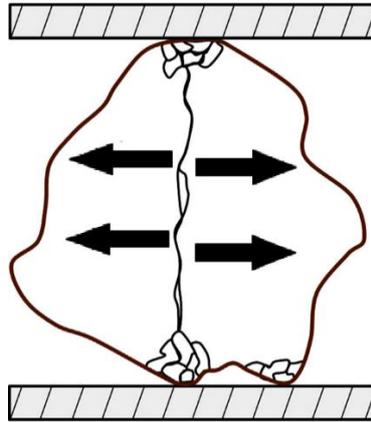


Figura 8 – Fratura por compressão e cisalhamento partícula-meio (modificado de Wills e Finch, 2016).

2.3.1.3 Impacto

Na quebra por impacto, devido ao carregamento rápido, uma partícula experimenta um esforço mais elevado enquanto sofre mais deformação do que é necessário para a fratura simples, e tende a quebrar rapidamente, principalmente por esforços de tensão, gerando o estilhaçamento do material (Figura 9). Os produtos da ruptura de impacto quando a falha ocorre são tipicamente lineares. Se a energia de impacto for menor que o limite de elasticidade, a fratura pode não ocorrer, mas apenas tirar lascas do material onde há bordas salientes (Tavares e King, 1998).

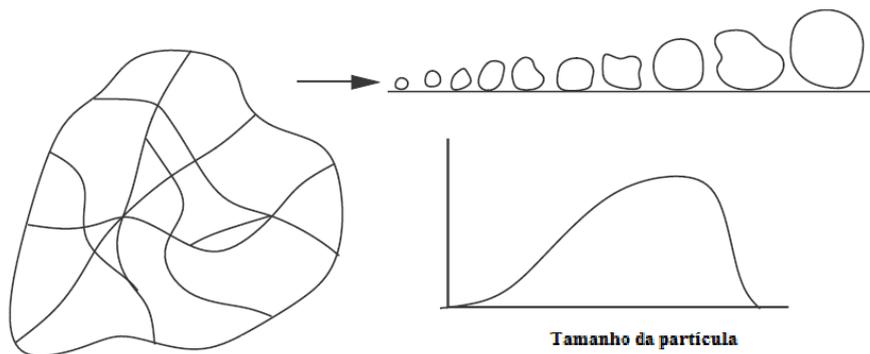


Figura 9 – Estilhaçamento por impacto (Adaptado de King, 2012).

2.3.1.4 Abrasão

Atrito ou abrasão não é estritamente um evento de quebra, mas sim um fenômeno de superfície no qual a tensão de cisalhamento faz com que o material desgaste. Produz muito material fino e pode ser indesejável, dependendo do estágio da cominuição. A abrasão ocorre devido à interação partícula-partícula ou também devido à interação de partícula-meio (Figura 8).

2.3.2 ENSAIOS DE QUEBRA DE PARTÍCULA INDIVIDUAL

Os ensaios de quebra de partículas individuais têm sido utilizados com sucesso para caracterizar os parâmetros de quebra de minérios que servem de ferramenta para a simulação de britadores e moinhos. Em alguns casos, as limitações de tempo, disponibilidade de amostras e o custo, podem impedir a realização destes testes.

Dentro da abordagem geometalúrgica, as amostras são coletadas e caracterizadas quanto à sua composição química, mineralógica e às características de quebra para a cominuição. Assim, um teste de quebra deve ser selecionado visando não só à sua repetibilidade, mas também à confiabilidade dos dados obtidos. Os principais testes de quebra de partículas podem ser divididos, conforme mostra a Figura 10, em impacto simples, impacto duplo e compressão lenta (Tavares, 2007).

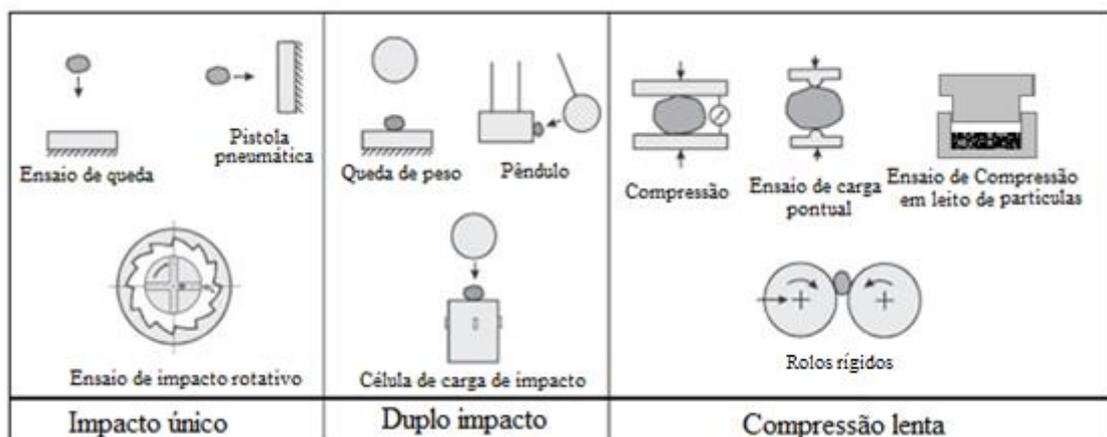


Figura 10 – Diferentes tipos de quebra de partículas individuais (Adaptado de Tavares, 2007).

Essa classificação de acordo com os modos de aplicação dos esforços apresenta formas relativamente semelhantes de cálculo da energia de quebra para determinado modo. A seguir, são apresentados alguns exemplos de metodologias e equipamentos de caracterização de partículas individuais e em leitos utilizados neste trabalho. Os outros ensaios omitidos estão descritos em Tavares (2007).

No tópico 2.3.3 são apresentadas as formas como os dados gerados nesses ensaios são analisados e apresentados de acordo com a peculiaridade de cada teste.

2.3.2.1 Teste de Queda de Peso

Esse teste é um dos métodos mais simples e mais comumente utilizados para investigar as características de ruptura de materiais. A energia de entrada é relacionada com a área de superfície criada, ou com o tamanho característico do produto. O ensaio consiste em deixar cair um peso, a partir de uma altura conhecida, contra uma partícula posicionada no topo de uma bigorna dura (Figura 11).

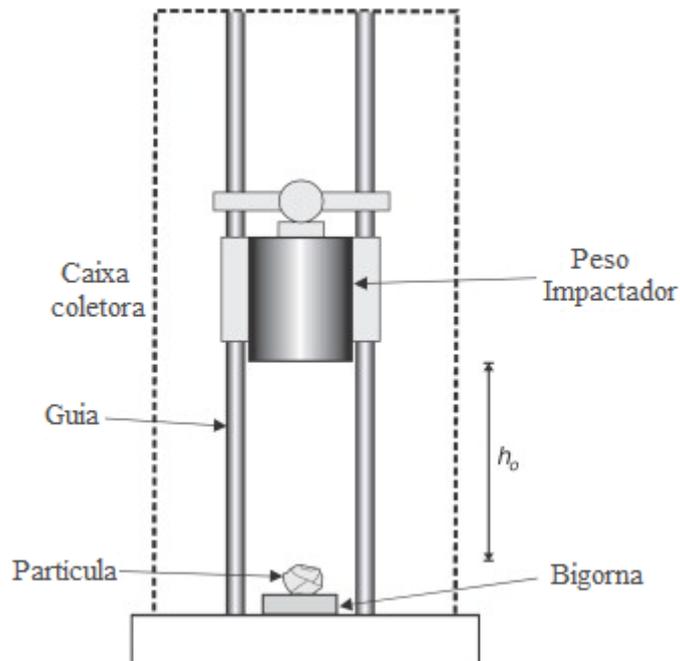


Figura 11 – Esquema de um aparelho de teste de queda (Adaptado de Tavares, 2007).

A energia aplicada é dada por:

$$E_{en} = m_p g h_0 \quad \text{eq. 5}$$

na qual m_p é a massa do peso de queda e h_0 é a altura da queda, isto é, a distância entre a base do peso de queda e o topo da partícula. Os fragmentos gerados são coletados e sua distribuição de tamanhos medida.

Talvez a maior limitação dos testes de peso de queda está no fato de que eles não permitem a medição direta da energia absorvida pelas partículas na fragmentação. No entanto, esta limitação é superada pela versão instrumentada do dispositivo, chamado de célula de carga de impacto (Tavares, 2007).

2.3.2.2 Teste de Pêndulo Duplo

Em testes de pêndulo duplo, a partícula é fraturada entre dois martelos montados no pêndulo que são liberados a partir de uma determinada altura e foi padronizada por Bond, sendo usada no cálculo do índice de trabalho de impacto de Bond. A Figura 12 mostra a configuração experimental para o teste de pêndulo duplo. Uma única partícula é montada em um porta-amostra e, em seguida, simultaneamente impactado pelos martelos. O procedimento é repetido até a partícula quebrar, aumentando assim o ângulo de deflexão dos martelos.

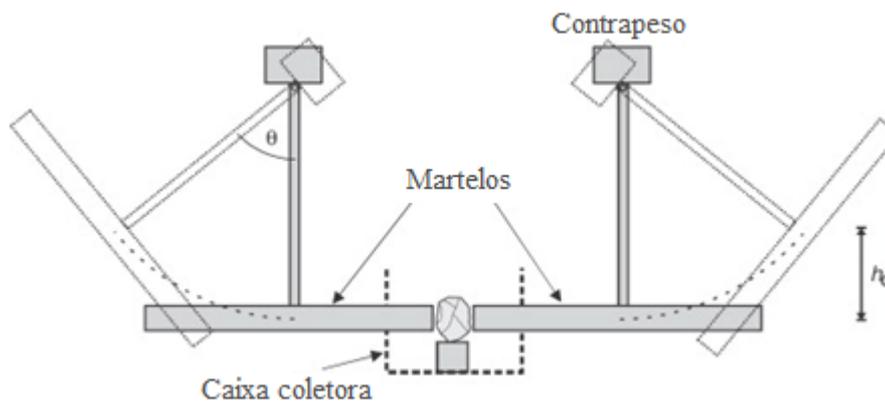


Figura 12 – Pêndulo duplo (Adaptado de Tavares, 2007).

Bond (1947), definiu o índice de trabalho de Bond W_i como

$$W_i = \frac{53.49 C_B}{\rho_p} \quad \text{e} \quad C_B = \frac{117(1 - \theta)}{d_p} \quad \text{eq. 6}$$

o qual é dado em kWh/t, sendo ρ_p a densidade da partícula em g/cm³ e C_B a energia de impacto por espessura da partícula em J/mm para o ultimo ângulo de deflexão.

Este índice de trabalho de Bond é usado para calcular o consumo de energia específica em britadores de acordo com a lei de Bond da cominuição e é dada por

$$W = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad \text{eq. 7}$$

na qual F_{80} corresponde ao tamanho passante de 80% em μm da alimentação e P_{80} o passante do produto.

2.3.2.3. Ensaios de Abrasão

Os ensaios de abrasão se baseiam na premissa de que a fratura por atrito não é estritamente um evento de quebra total da partícula, mas sim um fenômeno superficial ou quebra superficial provocado principalmente por tensões cisalhantes. Assim, os equipamentos desenvolvidos e a metodologia dos ensaios foram projetadas para aplicar esforços de baixa magnitude, similares àqueles que atuam nos equipamentos de cominuição. O produto resultante destes ensaios são duas populações bem distintas, compostas por partículas de granulometria grossa e partículas muito finas.

O Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) da Austrália desenvolveu o teste de tamboreamento de partículas grossas através do qual a abrasão ou atritamento ocorre entre as camadas de partículas-partículas e partículas-superfície do moinho. Este ensaio é realizado num moinho de tamanho padrão com barras padronizadas. O resultado deste ensaio é o parâmetro t_a dado por 1/10 da porcentagem

passante do 1/10 do tamanho inicial da partícula (Napier-Munn *et al.*, 1996). Quanto maior esse índice menor a resistência à quebra por abrasão.

O parâmetro t_a obtido desse ensaio é usado na modelagem principalmente da moagem autógena e semi-autógena. Nesses processos, diferentes modos de quebra ocorrem, sendo a abrasão o principal modo. Tavares e Silveira (2008) também destacaram a importância desse modo de quebra em britadores de eixo vertical e o potencial uso do parâmetro t_a na modelagem deste equipamento. Quanto às características dos materiais que influem no resultado, Tavares e Neves (2008) destacaram algumas particularidades microestruturais de rochas que influem no parâmetro t_a como o tamanho dos grãos e Devasahayam (2013) destacou o fator de forma das partículas no resultado deste ensaio.

Outro ensaio relacionada às características de quebra por abrasão é o ensaio de Los Angeles. Esse ensaio é muito utilizado na indústria de agregados para analisar a qualidade dos mesmos em relação ao desgaste. O índice de Los Angeles é obtido de acordo com a norma padrão ASTM C535 e o seu índice tem sido muito utilizado por vários fabricantes de britadores na análise de desgaste e do desempenho destes materiais na britagem, como bem apresentado por Tavares e Silveira (2008).

2.3.2.4 Ensaio de Abrasividade

Nos processos de cominuição o desgaste dos equipamentos é intenso devido tanto ao processo em si, como também à abrasividade natural que os materiais geológicos apresentam. Aliado a isso, os minérios de alto teor atualmente estão cada vez mais escassos, finamente disseminados e competentes. Esses fatos têm gerado uma grande preocupação para as indústrias devido aos gastos com manutenção e paradas da linha de produção.

Diversas técnicas têm sido usadas para caracterizar a abrasividade destes materiais e podem ser encontradas em Kasling e Thuro (2010), no entanto, o mais utilizado na indústria de processamento mineral é o teste desenvolvido por Bond. Como resultado deste método é obtido o índice de abrasividade A_i , dado em g, o qual é usado em correlações com o desgaste de equipamentos de cominuição, dado em g/kWh de uso dos mesmos (Bergstrom, 1985).

Os fatores que influenciam a abrasividade dos materiais geológicos são as características mineralógicas, como a presença de minerais de elevada dureza no minério e os tamanhos dos grãos, e as características mecânicas, como a tenacidade à fratura (Tavares e Neves, 2008; Hafeez, 2012).

2.3.2.5 Ensaio de Carga Pontual

Este ensaio é usado na caracterização mecânica de rochas, principalmente na engenharia civil em projetos estruturais e na indústria de petróleo. Nele, a carga é aplicada às partículas individualmente por compressão lenta, onde duas pontas com formato cônico geram uma carga compressiva pontual por meio de máquinas de teste de compressão universal (Figura 13).

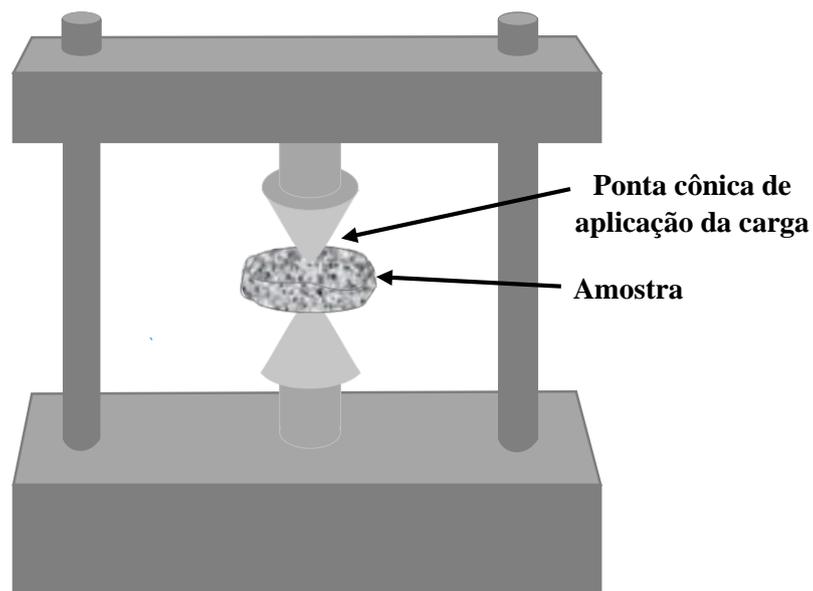


Figura 13. Dispositivo para o ensaio de carga pontual.

Uma vantagem dos testes de compressão em relação aos demais até então descritos é que as forças aplicadas e as deformações das partículas são registradas durante o teste e o perfil da curva tensão/deformação pode ser determinado. Desta forma, diferentes medidas relacionadas à resistência podem ser obtidas diretamente ou indiretamente por meio de relações, como a resistência à carga pontual, o módulo de

elasticidade e a energia de fratura (Silva, 2018; ASTM D 5731, 2008). Outra vantagem é a sua simplicidade experimental e que pode ser usada no campo.

A resistência a carga pontual I_{S50} pode ser obtida pela relação da carga aplicada F no momento da fratura com o diâmetro de aplicação da carga D^2 . O índice de resistência à carga pontual é obtido pela carga F_{50} de ruptura com o diâmetro padrão de $D_{50} = 50$ mm:

$$I_{S50} = \frac{F}{D_{50}^2} \quad \text{eq. 8}$$

Caso as amostras tenham diâmetros diferentes de D_{50} , o F_{50} é obtido por interpolação correspondente à carga F no valor do diâmetro padrão de 50 mm. Para partículas de formas irregulares o diâmetro é calculado da seguinte forma:

$$D = \frac{4A}{\pi}, \text{ onde } A = WD \quad \text{eq. 9}$$

na qual W é a largura média e D é a distância de aplicação da carga e o diâmetro de aplicação da carga da partícula testada deve satisfazer às relações $0,3 W < D < W$.

Hiramatsu e Oka (1966) analisaram o estado de tensões desenvolvido em partículas de diferentes formas sob carga pontual e concluíram que as partículas fraturam neste ensaio por esforços de tração. Os autores concluíram que a resistência à tração σ_t das partículas de diferentes formas pode ser obtida conforme a equação:

$$\sigma_t = \frac{0,9F}{D^2} \quad \text{eq. 10}$$

Por conveniência, D pode ser a média geométrica das peneiras limites usada para preparar o monotamanho das amostras (Tavares, 2007).

Os resultados de resistência de rochas deste ensaio foram comparados a outros resultados de ensaios de quebra usados na cominuição, como o do pendulo duplo. Bearman *et al.* (1997) conseguiram obter boas correlações entre a resistência a carga pontual e o comportamento na britagem por meio do índice de Bond W_i , além dos parâmetros A e b obtidos no ensaio de queda de peso.

Embora Bearman *et al.* (1997) tenha obtido boa correlação dos resultados deste ensaio com parâmetros relacionados à cominuição, este ensaio não tem aplicação direta na modelagem de processos de cominuição, sendo o seu uso na mineração limitado. Assim ele é indicado principalmente para classificar e comparar a competência de minérios onde exista uma variabilidade destes.

2.3.2.6 Ensaio de Quebra em Leito de Partículas Confinado

O estudo de quebra de partículas em leito serviu de base para o desenvolvimento de novas tecnologias de cominuição como o *high pressure grinding roll* (HPGR). A base desses estudos foi apresentada na pesquisa de Schönert (1979), onde o mesmo afirmou que a quebra de partículas em leito entre duas placas sob compressão é a mais eficiente em termos energéticos.

Atualmente, a tecnologia HPGR se encontra bastante madura de modo que a sua aplicação tem se diversificado em diferentes configurações de circuitos de cominuição (Kellerwessel, 1996) e na cominuição de diferentes materiais, desde clínquer para cimento, na remoagem pré-pelotização até minérios competentes de cobre, ouro e platina (Dundar *et al.*, 2013). Simultaneamente, o ensaio de quebra em leitos partículas confinado tem sido pesquisado e usado intensamente por muitos pesquisadores na modelagem e na análise de vários aspectos da redução de tamanho no HPGR devido às condições semelhantes de tensões interpartículas que agem no leito de ambos (Hosten e Cimilli, 2009).

O método deste ensaio é realizado usando a configuração pistão-matriz (Figura 14) em uma prensa hidráulica capaz de registrar os dados de força e deslocamento. A matriz possui uma forma cilíndrica e é preenchida com partículas para formar um leito de partículas, o qual é comprimido a uma taxa lenta de carregamento por meio do pistão.

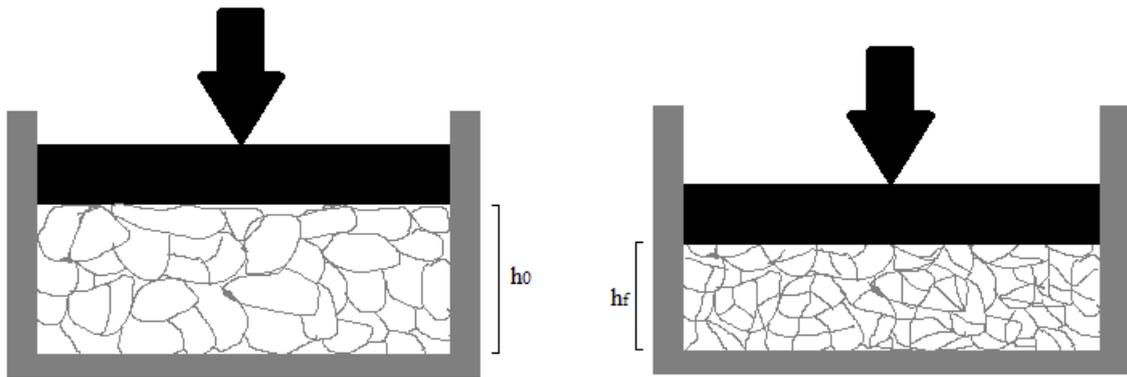


Figura 14. Esquema do Pistão-matriz no ensaio em leito de partículas confinadas.

As dimensões do leito de partículas foram determinadas por Schonert (1996) para eliminar o efeito da parede em um leito cilíndrico de diâmetro D e altura h , como segue:

$$\frac{h}{x_{max}} > 6 \quad e \quad \frac{D}{h} > 3$$

na qual x_{max} é o tamanho máximo da partícula. Além dessas dimensões, a estrutura do leito e a compactação devem ser homogêneas em um volume ou massa conhecida de partículas para caracterizar um leito de partículas ideal.

Para a modelagem da quebra das partículas, a energia fornecida ao leito deve ser medida como também a redução de tamanho resultante. A partir dos dados adquiridos de força e deslocamento fornecidos pela prensa, pode-se calcular a energia aplicada ao leito, a qual corresponde à área abaixo da curva tensão-deformação, ou o trabalho realizado pelo pistão (Figura 15). Essa equação representa a energia total fornecida pela prensa, incluindo a energia elástica devido à resistência do equipamento.

A partir dos dados de energia e da distribuição de tamanho das progênies resultantes são geradas relações entre as mesmas e são detalhadas no próximo tópico. Essas relações fornecem importantes parâmetros de materiais para a modelagem da distribuição de tamanho do produto de HPGRs, destacando-se a função de aparência para o modelo de Morrel *et al.* (1997) e função quebra de Dunder *et al.* (2013).

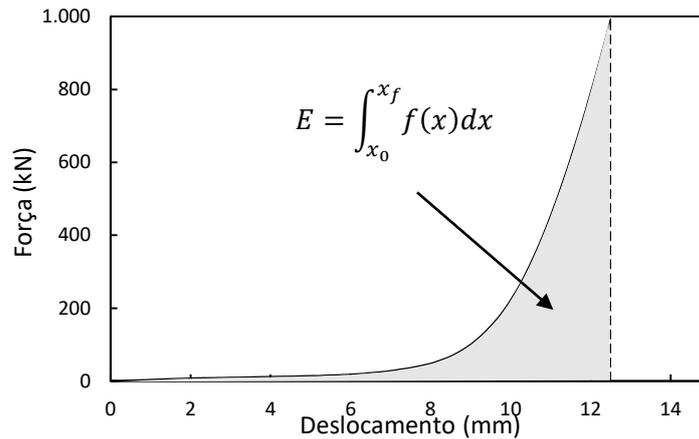


Figura 15. Ilustração do perfil da curva tensão x deformação gerado no ensaio de compressão.

2.3.3 MODELAGEM DA QUEBRA DE PARTÍCULAS

A partir de dados como energia de fratura, energia de cominuição e a distribuição das progênes, que são gerados nos ensaios descritos nos dois últimos tópicos, diversos pesquisadores propuseram uma série de relações para descrever o comportamento de quebra e a fragmentação dos materiais geológicos.

A energia de fratura de partículas pertencentes a uma certa faixa de tamanho é caracterizada por apresentar uma grande dispersão dos seus resultados, sendo necessária sua descrição estatística. Para representar a variabilidade das características de fratura de partículas individuais foram propostas diferentes distribuições estatísticas, dentre elas a distribuição de Weibull (Weibull, 1951) e a distribuição log-normal, que tem obtido mais êxito na descrição da energia de fratura de partículas (King e Bourgeois, 1993; Tavares e King, 1998):

$$P(E) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln E - \ln E_{m50}}{\sqrt{2\sigma_E^2}} \right) \right] \quad \text{eq. 11}$$

Na qual E_{m50} é a mediana da distribuição de energias de fratura das partículas, ou seja, é a energia específica de fratura que corresponde a quebra de 50% das partículas da população, σ_E^2 é a variância da distribuição e E é a energia de fratura. A Figura 16

apresenta a distribuição de energia de fratura para diferentes faixas de tamanho de partículas de quartzo.

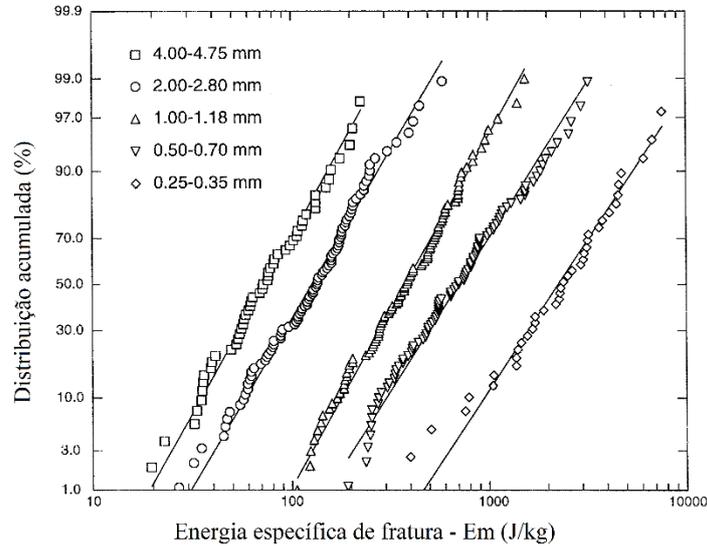


Figura 16. Distribuição acumulada da energia de fratura em partículas de quartzo de diferentes tamanhos (Modificado de Tavares e King, 1998).

Uma das características mais notáveis nesse tipo de resultado é a variação significativa da energia de fratura com o tamanho da partícula. Diversos autores observaram essa característica e derivaram relações entre a energia de fratura e o tamanho da partícula (Krogh 1980; Yashima *et al.*, 1987). Há um aumento de energia específica de fratura média ou resistência específica média das partículas conforme seu tamanho se reduz. Um dos modelos que melhor descreve esse aumento de competência específica e também a tendência a constância da competência específica a partir de um tamanho crítico (Figura 17) é proposto por Tavares (1997):

$$E_{m50} = E_{m,\infty} \left[1 + \left(\frac{d_o}{d_p} \right)^\phi \right] \quad \text{eq. 12}$$

no qual d_p é o tamanho representativo das partículas, $E_{m,\infty}$, d_o e ϕ , são parâmetros do modelo e específicos dos materiais.

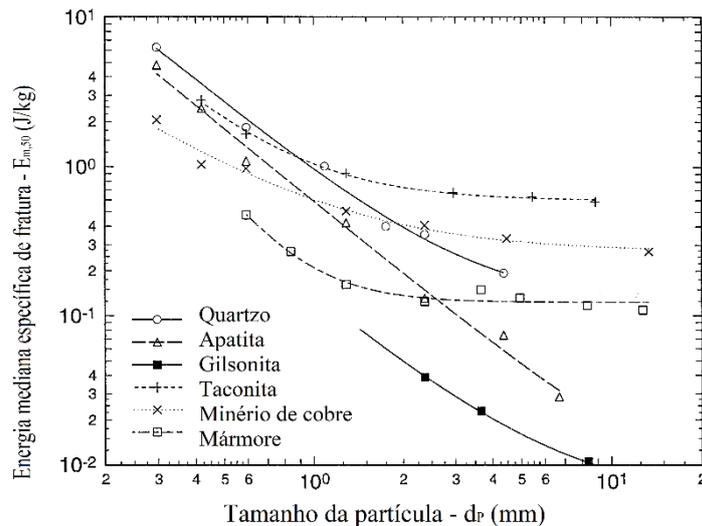


Figura 17. Variação da energia específica mediana E_{50} com o tamanho da partícula (Modificado de Tavares e King, 1998).

Quanto à fragmentação ela é adequadamente investigada usando as distribuições das progênes geradas a partir das várias técnicas de quebra descrita acima e com diferentes níveis de energia aplicados. Várias equações com diferentes quantidades de parâmetros têm sido proposta para descrever a redução de tamanho dos ensaios de quebra resultante de diferentes níveis de energia e estão descritas em Tavares (2007). No entanto, devido à complexidade associada às diferentes inclinações nas distribuições de tamanho com o aumento da energia aplicada levou Narayanan e Whiten (1983) a propor uma abordagem alternativa. Os autores propuseram descrever a relação entre a curva cumulativa passante e um número de parâmetros chamado t_n , os quais descrevem a fração passante de um tamanho n vezes menor que o tamanho inicial. O parâmetro t_{10} , o mais utilizado, refere-se à porcentagem do produto que passa por uma peneira de abertura de 1/10 do tamanho de partícula inicial. Cada distribuição de tamanho da progênie tem um único valor de t_{10} e todos os valores de t_n são relacionados a esta distribuição individual. Durante os ensaios de quebra, são aplicados diferentes níveis de energia e esses parâmetros são relacionados, resultando na família de curvas t_{ns} (Figura 18). Estas curvas são geradas a partir da interpolação dos pontos t_{ns} usando splines, Rosin-Rammler truncada (King, 2001) ou beta incompleta (Milin, 1994; Carvalho, 2009).

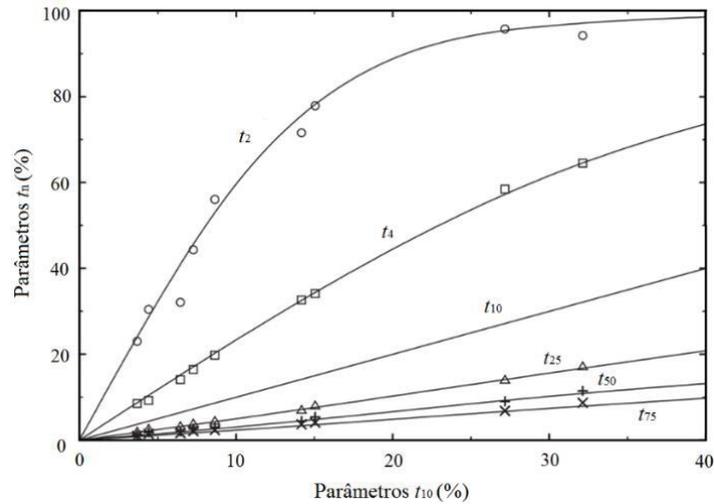


Figura 18. Relação entre t_{10} e as curvas t_{ns} para minério de cobre (Adaptado de Tavares, 2007)

Napier-Munn (1996) descreveu a relação entre a energia aplicada E_{cs} e a fragmentação da progênie t_{10} a qual pode descrever a distribuição de tamanho das partículas geradas a partir da família de curvas t_{ns} em função do t_{10} :

$$t_{10} = A [1 - \exp(-b * Ecs)] \quad \text{eq. 13}$$

na qual A e b são parâmetros do modelo e específicos do material. A representa o máximo valor de t_{10} , ou seja, o nível máximo de redução de tamanho de partícula em um evento de impacto simples em altas energias.

Outros modelos que relacionam a energia aplicada à probabilidade de fratura e a fragmentação foram propostos e levam em consideração outros fatores e propriedades dos materiais que influem na quebra e na fragmentação (Vogel e Peukert, 2003; Tavares 2004; Shi e Kojovic, 2007).

2.4 MODELAGEM DA COMINUIÇÃO

A modelagem da cominuição basicamente se concentra, entre outros, no desenvolvimento de modelos para prever o comportamento da cominuição de partículas. Concomitante a isso, para que ocorra a cominuição de partículas há a necessidade de aplicação de alguma forma de energia. Desta forma, foram criados os primeiros modelos

os quais relacionavam a energia aplicada à redução tamanho. Estes modelos foram propostos empiricamente e são reconhecidos como as teorias ou leis da cominuição (von Rittinger, 1867; Kick, 1885; Bond, 1952). Este tipo de abordagem da modelagem tem evoluído e apresentado uma boa previsão nas solicitações de energias específicas de diversos circuitos de cominuição (Morrell, 2004).

Esses modelos, no entanto, apresentam limitações na apresentação de informações de extrema importância para o processamento mineral. Dentre as principais limitações, destacam-se o uso de um só ponto d_{80} da curva de distribuição de tamanho das partículas, não considera os efeitos das condições operacionais e aplicado somente para circuito fechado (Austin e Concha, 1994; Tavares 2017).

Outras abordagens para a modelagem de processos de cominuição surgiram afim de superar as limitações dos modelos empíricos e descrever mais detalhadamente os complexos mecanismos envolvidos nestas operações. Para tal aprimoramento, pesquisadores adaptaram o método do balanço populacional (MBP), o qual já era usado por cientistas e pesquisadores para descrever o comportamento de populações onde ocorria o aparecimento e o desaparecimento de partículas (Ramkrishna, 2000). Este modelo fenomenológico é atualmente o mais utilizado nos simuladores de processos de cominuição e será abordado mais detalhadamente a seguir.

A estrutura do MBP tem encontrado grande aplicação na modelagem de processos de cominuição e tem sido utilizada na maioria dos modelos, desde modelos baseados nos fenômenos da cominuição, até como parte de modelos mais avançados ou mecanicistas, onde sub-modelos fundamentais da cominuição são adicionados ao MBP (Yu, 2016; Tavares, 2017). Estes modelos avançados, embora tenham evoluído bastante e retratem bem os micromecanismos da cominuição, eles ainda não são utilizados nos simuladores de processos utilizados pelas indústrias, como os modelos fenomenológicos. Sua principal limitação ainda é a grande demanda computacional, apesar dela estar sendo superada pelos atuais progressos tecnológicos e novas abordagens de simulação como o pós processamento (Rodríguez *et al.*, 2018). Mais detalhes destes modelos avançados podem ser encontrados em Weerasekara *et al.* (2013) e Tavares (2017).

2.4.1 MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DO MBP

O MBP foi introduzido na modelagem da cominuição afim de obter mais informações do que as relações empíricas de energia aplicada e a redução de tamanho. A ideia básica por trás desse tipo de abordagem era estabelecer uma relação matemática para descrever mudanças na distribuição de tamanho da alimentação ao produto, levando em consideração variáveis operacionais e algumas características dos equipamentos.

Outros conceitos tangentes aos processos de cominuição foram introduzidos por Epstein (1948) o qual definiu os parâmetros de fratura, a função seleção e a função quebra. Segundo o mesmo, a função seleção está associada à probabilidade de uma partícula ser selecionada para a quebra, enquanto a função quebra é a distribuição de tamanhos das partículas quebradas.

Essas funções descritas acima serviram como base na modelagem da cominuição e foram incorporadas ao MBP. Baseado nessas conceitos surgiram os modelos de processos de cominuição, destacando-se os modelos de matriz de Lynch (1977), os modelos cinéticos Austin *et al.* (1984) e Whiten (1974) e de energia Herbst e Fuerstenau (1980). Destes, os três últimos são os mais utilizados nos simuladores de processos de cominuição.

A equação 14 descreve o balanço de massa com discretização da distribuição granulométrica para a moagem em batelada com os parâmetros de fratura de Epstein:

$$\frac{d[m_i(t)]}{dt} = -S_i m_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ i>1}}^{i-1} b_{ij} S_j m_j(t), \quad i \geq j \geq 1 \quad \text{eq. 14}$$

na qual $m_i(t)$ é a fração em massa de partículas contidas no intervalo de tamanho i após o tempo t de moagem; S_i é a função seleção, ou taxa de quebra das partículas na faixa de tamanho i (min^{-1}); b_{ij} é a função quebra na forma distribuída correspondendo à fração em massa de partículas no intervalo de tamanho i produzidas pela quebra da partículas no intervalo de tamanho j .

A solução dessa equação da moagem em batelada foi realizada tanto analiticamente quanto numericamente com o interesse de prever a distribuição de

tamanho do produto por diversos pesquisadores, sendo a solução analítica de Reid (1965) a mais popular. Uma das premissas dessa metodologia é a determinação experimental das funções quebra e seleção. A solução dessas equações de balanço de massa usado para modelar a cominuição ainda perdura e diferentes metodologias têm sido propostas (Das *et al.*, 1995; Hosten 2005; Yu *et al.*, 2018).

2.4.1.1 Função Seleção

A função seleção S_i foi proposta por Epstein (1948) e representa a taxa ou a velocidade de desaparecimento de material num intervalo de tamanho i para outras faixas menores de tamanho. Loveday (1967) realizou experimentos com partículas de monotamanho e observou que a taxa de quebra segue uma função de primeira ordem, de acordo com a equação:

$$\frac{d[m_1(t)]}{dt} = -S_1 m_1(t) \quad \text{eq. 15}$$

Presumindo que a taxa específica de desaparecimento da massa das partículas na faixa do maior tamanho S_I é independente do tempo e integrando a equação 15, tem-se:

$$\log[m_1(t)] = \log[m_1(0)] - \frac{S_1 t}{2,303} \quad \text{eq. 16}$$

Lançando em gráfico $m_1(t)$ em função do tempo de moagem tem-se uma linha reta, cuja inclinação corresponde a $-S_I/2,303$ (Figura 19).

Usando essa metodologia, Austin (1984) propôs uma equação para descrever o comportamento da função seleção:

$$S_i = a \left(\frac{x_i}{x_0} \right)^\alpha Q_i \quad e \quad Q_i = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu} \right)^\Lambda} \right] \quad \text{eq. 17}$$

sendo x_0 o tamanho padrão da partícula adotado, geralmente 1 mm, x_1 o tamanho da partícula, α e Λ os parâmetros que dependem do material, a parâmetro que depende das condições de moagem e μ parâmetro dos diâmetros das bolas e do moinho (Figura 20).

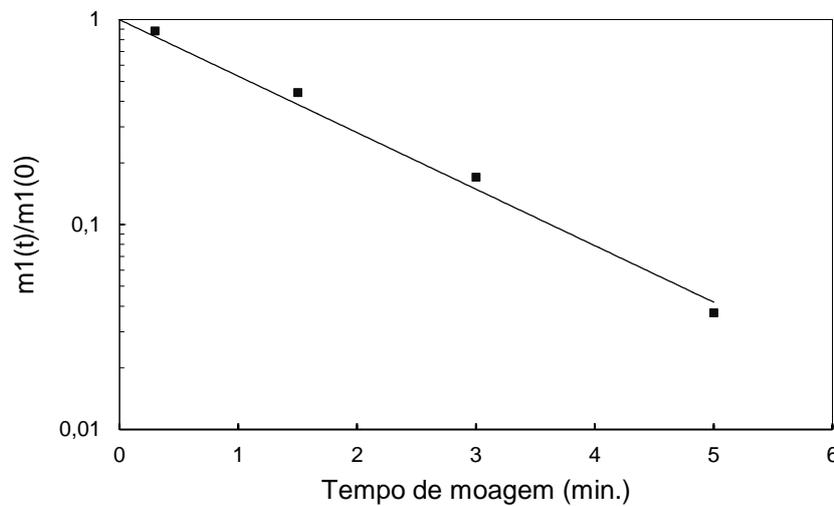


Figura 19. Fração remanescente de partículas na faixa de tamanho 3,35 x 2,36 mm de minério de ferro em função do tempo de moagem.

O termo multiplicativo Q_i é um fator empírico que descreve o decréscimo da função seleção na região das partículas grossas e varia de $0 < Q_i \leq 1$. Esse decréscimo da taxa de quebra ocorre após um certo tamanho limite, onde os impactos dos corpos moedores não são suficientemente enérgicos para quebrar as partículas mais grossas.

2.4.1.2 Função Quebra

A função quebra representa a quantidade de partículas quebradas, geralmente em massa, que atinge um intervalo de tamanho menor que o intervalo de tamanho da partícula mãe como consequência da quebra. Essa função, segundo King (2001), é de extrema

importância na descrição quantitativa das distribuições granulométricas dos processos de cominuição. Entretanto, vale ressaltar que ela não representa o produto final de um processo de cominuição, mas sim a distribuição de quebra primária. Essa quebra primária é descrita pelas progênes geradas no primeiro evento de quebra sem que haja a requebra em outros eventos de fratura.

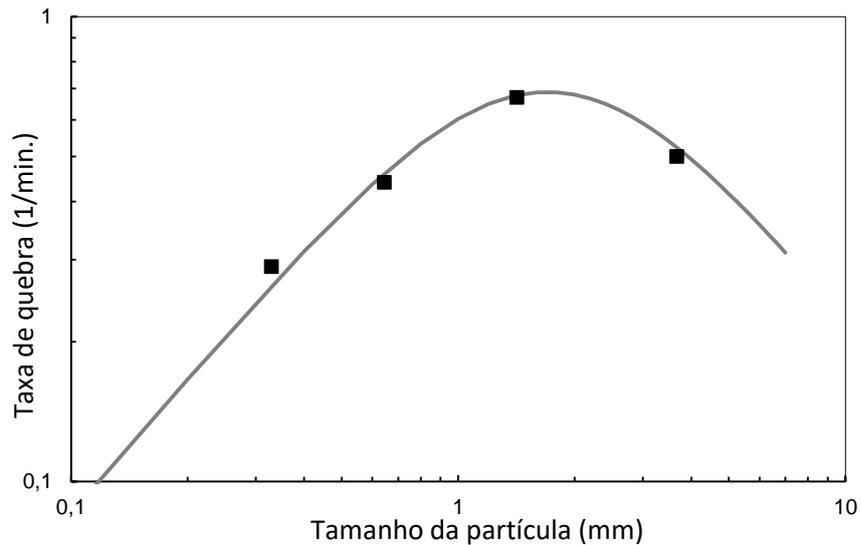


Figura 20. Variação da taxa de quebra em função do tamanho das partículas de minério de ferro num moinho 30 x 30 cm.

As funções quebra são representadas de diferentes formas e originalmente baseadas em distribuições padrões truncadas como as distribuições logarítmicas, Rosin-Rammler, log-normal e logística, sendo que mais detalhes destas funções podem ser encontrados em King (2001), enquanto comparações de algumas destas estão em Rozenblat *et al.* (2012).

Dentre esses modelos empíricos o que tem encontrado maior aplicação na descrição de processos de cominuição e um dos mais populares, devido à sua boa descrição de dados experimentais, é o de Austin e Luckie (1972):

$$B_{i,j} = \phi \left(\frac{d_i}{d_j} \right)^{n1} + (1 - \phi) \left(\frac{d_i}{d_j} \right)^{n2}, \quad i > j > 0 \quad \text{eq. 18}$$

na qual d_i/d_j representa a razão de redução e é menor que 1. Esses dois termos descrevem duas populações geradas na quebra, uma resultante de esforços de tração representando as partículas grandes e a outra resultante de intensos esforços compressivos representando as partículas menores, respectivamente, o segundo n_2 e o primeiro termo n_1 (Figura 21). Esse modelo apresenta a soma ponderada desses dois termos, onde ϕ é o termo de ponderação.

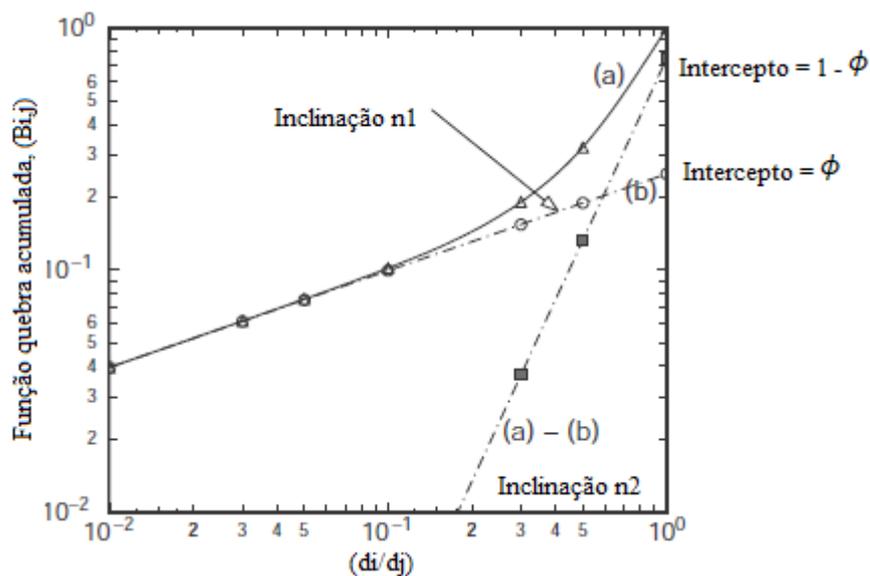


Figura 21. Função quebra ilustrando os seus parâmetros que descrevem as populações das partículas grossas e finas, respectivamente n_2 e n_1 . (Adaptado de King, 2001)

Quando a função quebra é independente do tamanho da partícula mãe e depende somente da relação d_i/d_j ela é dita normalizável em relação a partícula mãe, como é o caso da equação 18. Porém, para alguns materiais a função quebra é dependente do tamanho inicial da partícula. Austin e Luckie (1972) adicionaram uma função, equação 19, que substitui o primeiro termo da função original, ϕ da equação 18, para descrever a variação desta variável em relação ao tamanho da partícula mãe:

$$\phi(d_j) = \phi_0 \left(\frac{d_0}{d_j} \right)^{n_3}, \quad \text{para } d_0 > d_i \quad \text{eq. 19}$$

na qual d_0 é um tamanho de referência.

Essa característica da função quebra de alguns materiais é bastante pertinente na modelagem da cominuição, como reconhecido por Austin e Luckie (1972) e Tavares e Neves (2008). Segundo os mesmos, em seus resultados de moagem em batelada, observaram um efeito significativo na quantidade de finos devido à função quebra ser não normalizável e que caso essa característica seja negligenciada pode-se não obter resultados acurados.

Alguns autores têm levado esse aspecto em consideração na modelagem, como também apresentaram algumas características microestruturais dos materiais que influem nessa característica como também no seu grau de não normalização. Gupta *et al.* (1981) apresentaram algumas limitações da função apresentada por Austin e Luckie (1972) e apresentaram outras funções, porém sem grande sucesso. Gao e Forssberg (1989) observaram esse comportamento no minério de ferro de Kirkenes na Noruega. Segundo os mesmos, isso se deve às heterogeneidades, como maior densidade de falhas e trincas em partículas grossas, apresentadas pelo minério de ferro dessa região. Tavares e Neves (2007) destacaram algumas características microestruturais, como o tamanho médio de grão e o faturamento preferencial nos contornos de grãos, as quais são determinantes para o comportamento não normalizável da função quebra de rochas de pedreiras.

A determinação experimental dessas funções quebra e seleção requerem uma grande quantidade de amostras e são muito laboriosos, como detalhado em Austin e Concha (1993). No entanto, elas podem ser determinadas por retrocálculo a partir de ensaios de moagem em diferentes tempos através das distribuições granulométricas resultantes de diferentes tempos de moagem usando a solução de Reid (1964) do MBP (Gupta *et al.*, 1981; Klimpel e Austin 1977; Rajamani e Herbst, 1984). Esses métodos para determinar os parâmetros dessas funções, porém, não devem ser usados indiscriminadamente e um conhecimento das características dos minérios e da moagem é necessário para a calibração das variáveis desses modelos.

2.5 LIBERAÇÃO DE MINERAIS

A recuperação e concentração de minerais de interesse disseminados nas rochas inicia-se com sua separação da matriz de minerais de canga. Para isso, torna-se necessária

a fragmentação das rochas em partículas finas as quais apresentam maior probabilidade de se encontrarem liberadas. A maneira mais convencional e utilizada é através da aplicação de uma grande quantidade de energia mecânica por meio de britadores e moinhos. Essas etapas são as mais críticas para a indústria mineral, uma vez que ela pode representar até 50% do consumo total de energia (Tromans, 2008; Radziszewski, 2013). A eficiência deste processo de liberação determina o desempenho final do processo de separação do mineral que é usado para obter o concentrado metalúrgico ou para operações subsequentes.

A liberação depende de certas características do material como a sua textura e propriedades mecânicas. As características texturais englobam: os tamanhos e formas dos grãos minerais, a forma das interfaces entre os minerais e as associações minerais. Com relação às propriedades mecânicas destacam-se: a resistência interna dos grãos, resistência intergranular e energia de fratura dos componentes minerais da rocha (Wills e Finch, 2016; King, 2012). Outro fator que influi na liberação mineral é o mecanismo de aplicação de esforços mecânicos. Há também alguns tratamentos que se utilizam das diferentes propriedades físicas dos minerais que constituem a rocha, destacando-se a descarga elétrica e microondas.

O tópico de liberação é bastante amplo e, conforme salientaram Neumann *et al.* (2010), nos estudos de liberação mineral deve-se ter clara a diferença entre três tópicos fundamentais: medição do grau e espectro de liberação, previsão de liberação e simulação de liberação. Neste trabalho é abordado apenas o tópico de medição de liberação, pela sua relevância no presente trabalho.

2.5.1 MEDIDAS DAS CARACTERÍSTICAS DE LIBERAÇÃO

As medidas utilizadas para determinar diretamente as características de liberação de minerais são o grau de liberação e o espectro de liberação. Por outro lado, os métodos de determinação de tais medidas destacam-se: o método de Gaudin (1939), separação em meio denso, separação em suspensões coloidais ferromagnéticas sob campo magnético externo (Schneider, 1995), liberação por análise química (Porphírio *et al.*, 2010), análise de imagens e microtomografia computadorizada de raios X (Lin e Miller, 2002; Schena *et al.*, 2007).

O grau de liberação, de acordo com Gaudin (1939) e Barbery (1992), é a fração de uma fase mineral liberada de uma partícula composta por diferentes espécies minerais em relação a todas partículas mistas e livres. Por sua vez, uma fase mineral liberada é considerada o estado de uma partícula consistindo de apenas um mineral. A fração liberada pode ser em função do volume de partículas, da área de seções ou do comprimento de segmentos.

Devido à sua relativa facilidade de utilização, este método de representação das características de liberação ainda encontra uma grande aplicação em análises de rotina e trabalhos acadêmicos. Além disso, conhecer apenas o grau de liberação pode não ser suficiente, pois o grau de liberação apresenta um único ponto do espectro de liberação correspondente às partículas livres.

O espectro de liberação mineral, de acordo com Schneider (1995), Schena *et al.* (2007) e Neumann *et al.* (2010) é a distribuição de teores, partículas mistas e liberadas, de um determinado mineral em uma população de partículas em diferentes faixas de tamanho (Figura 22). Resumidamente, o espectro de liberação é a distribuição de uma população de partículas em função do tamanho e da composição das mesmas.

Existem muitas técnicas de determinação dessas duas características de liberação de minerais, porém os métodos que mais se destacam na indústria mineral e têm encontrado avanços significativos são as técnicas automáticas de análises de imagens. Este método é revisado a seguir.

2.5.2 ANÁLISE DE LIBERAÇÃO POR SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE ANÁLISES MINERALÓGICAS

As análises mineralógicas automáticas foram desenvolvidas como um resultado da necessidade de um controle automatizado rápido e confiável da mineralogia de processo, sobretudo na necessidade de um sistema de identificação mineral automático (Gottlieb, 2008). Para tal necessidade, os sistemas automáticos de análises mineralógicas trabalham com sistemas analíticos principalmente baseados em microscopia eletrônica de varredura (MEV) combinados com energia dispersiva de raios – X (EDS) que permitem análises qualitativas e quantitativas.

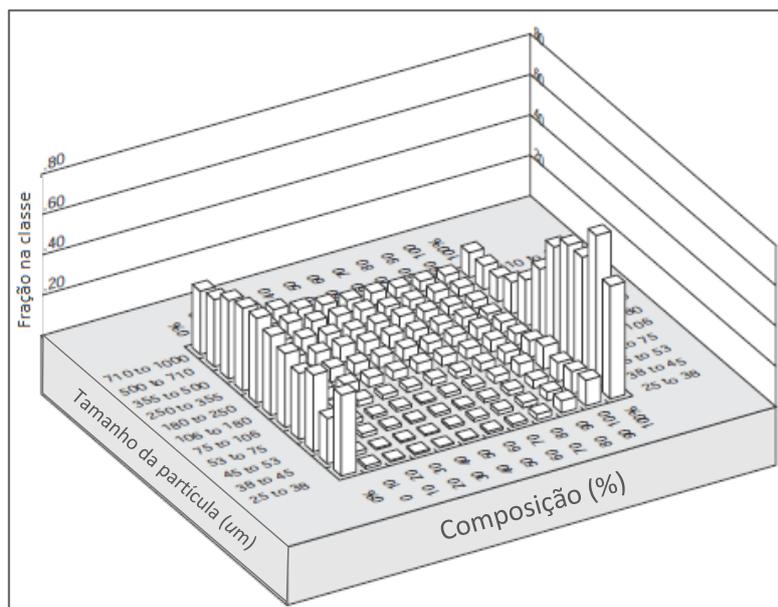


Figura 22. Espectro de liberação mineral (King, 2012).

Estes sistemas foram originalmente desenvolvidos como uma ferramenta metalúrgica de diagnóstico de amostras de testes em bancada e em escala piloto para dar suporte e melhorar o processamento mineral das usinas. Posteriormente foram usados na caracterização dos produtos, concentrados e rejeitos, para projetar e otimizar concentradores. Recentemente, eles estão sendo amplamente utilizados para ajudar na previsão do comportamento no processo e no entendimento da relação do tipo de alimentação com o comportamento nas etapas subsequentes das usinas, combinando características mineralógicas com propriedades metalúrgicas, via abordagem geometalúrgica.

Uma sucessão de sistemas automáticos de análises mineralógicas têm sido desenvolvidas ao longo dos anos e em diversos locais, destacando-se o QEMSCAN[®] e MLA[®] ambos pertencentes à mesma empresa, FEI *Company*.

Atualmente, os sistemas automáticos de análises mineralógicas são muito versáteis e consistem de um *hardware*, principalmente baseados em MEV em conjunto com detectores EDS além de *softwares* que controlam a coleta de dados brutos, constroem e analisam as imagens automaticamente e processam os dados. A Figura 23 apresenta uma imagem dos principais componentes do QEMSCAN.

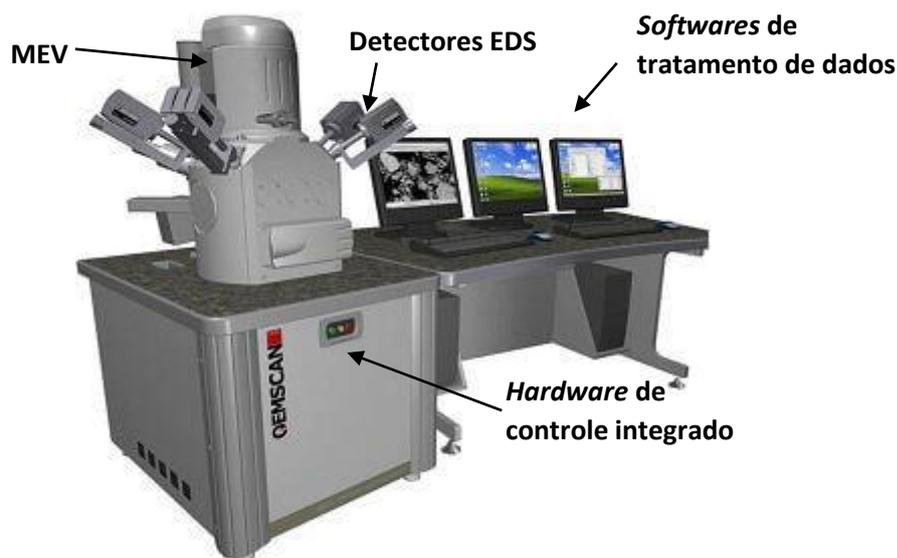


Figura 23. Principais componentes do sistema QEMSCAN®

Os *softwares* foram evoluindo e ficando mais robustos com a implementação de algoritmos baseados em teorias matemáticas de aleatoriedade e amostragem, processamento e análise de imagens e métodos de correção estereológica. Com os desenvolvimentos citados acima e os avanços tecnológicos dos equipamentos, novas aplicações surgiram, como também novas análises, destacando-se a liberação mineral (Gottlieb, 2008). Gottlieb *et al.* (2000) e Fandrich *et al.* (2007) abordam detalhadamente a sequência de aquisição das informações, como também, todas as etapas das análises dos sistemas automáticos de mineralogia QEMSCAN e MLA, respectivamente.

Diferentes tipos de amostras, como seções polidas de rochas individuais, e amostras particuladas montadas em resina com seções polidas, podem ser utilizadas para análises nos diferentes modos de operação, dependendo do objetivo do estudo. Dentre os principais modos de operação dos sistemas automáticos destacam-se:

- **BMA (*Bulk Mineralogical Analysis*)**

Este modo de análise faz varreduras em linhas, onde as informações dos interceptos de todas as espécies minerais são gravadas. A partir dos dados, como o número de interceptos, seus comprimentos e o número e tipos de transições entre as espécies minerais, pode-se determinar a mineralogia modal, textura, as áreas das superfícies dos minerais, associação mineral, distribuição de tamanhos dos grãos e de

partículas. Este modo de operação apresenta uma grande capacidade de análise e pode ser realizada tanto em blocos de rochas como em partículas e possui uma grande capacidade de análise. No entanto, não são produzidas imagens completas nem mapas das amostras (Gottlieb *et al.*, 2000).

- **PMA (*Particle Mineralogical Analysis*)**

O modo PMA é usado para caracterização mineralógica detalhada. A partir dos elétrons retroespalhados é gerada uma imagem de cada campo e analisada para determinação de medidas de perímetro das seções das partículas, área e sua localização dentro do campo. O mapeamento das partículas é realizado de acordo com a resolução requerida, que comanda o espaçamento dos pontos e linhas de varredura. O espaçamento é escolhido de modo a determinar a textura das fases nas partículas. A identificação mineral é analisada usando o mesmo procedimento que o modo BMA. Esta análise é ideal para análises de liberação e avaliação textural, além das análises BMA (Gottlieb *et al.*, 2000).

- **SMS (*Specific Mineral Search*)**

A análise SMS realiza a busca de um mineral específico ou busca por traços de minerais. Por meio dos elétrons retroespalhados essa análise busca partículas que possuam minerais com brilho superior a um determinado valor especificado. As imagens são criadas apenas para as partículas que contenham os minerais especificados. Esse modo é ágil na pesquisa de determinado mineral pelo fato de não analisar todas as partículas por EDS. Pode-se identificar minerais traços com concentração volumétrica de 0,5% ou menos. Na busca por traços de minerais, essa análise considera que os mesmos não se encontrem em todos os campos. Na pesquisa por um mineral específico, a análise assume que o mesmo estará presente em todos os campos de análise (Gottlieb *et al.*, 2000).

Os modos de operação descritos acima são os principais encontrados nos sistemas automáticos de análises mineralógicas. Outras funções e diferenças dos equipamentos podem ser encontradas nos trabalhos de Gottlieb *et al.* (2000) e Fandrich *et al.* (2007), para QEMSCAN e MLA, respectivamente.

As medidas de liberação podem ser medidas por meio da distribuição dos teores mineralógicos das partículas. Tal distribuição é obtida por pontos, análises

unidimensional por linhas, ou bidimensional 2D por área, como descrita nos modos de operação dos sistemas automáticos. Há também a análise tridimensional 3D por volume que pode ser obtido por microtomografia computadorizada de raios X (Lin e Miller, 2002; Schena *et al.*, 2007).

Para converter as medidas de liberação de 1D e 2D para 3D foram desenvolvidas várias técnicas de conversão estereológica, as quais destacam-se King e Schneider (1993); Schena e Chiaruttini (2000); Iatti e Adair (2001). Esses procedimentos são bastante complexos e sua descrição fogem do escopo deste trabalho, porém, algumas características influem no viés estereológico. O grau do viés estereológico depende sobretudo da textura do minério e em alguns casos não se torna necessário para medidas precisas de liberação (Spencer e Sutherland, 2000; Gottlieb, 2000).

2.5.3 LIBERAÇÃO MINERAL NA COMINUIÇÃO

Na liberação mineral por redução de tamanho, existe uma correlação intuitiva entre a liberação e a cominuição, ou seja, quanto mais fragmentadas estiverem as partículas, mais liberadas devem estar as fases minerais. Embora haja depósitos minerais onde os minerais já se encontram liberados, como depósitos aluvionares e de praias, a maioria dos depósitos minerais explotados são formados de grãos minerais de diferentes espécies finamente disseminados e aderidos um aos outros nas rochas. Nesse contexto, a cominuição tem o objetivo principal de promover a separação física dos minerais de interesse dos minerais de ganga. Adicionalmente, para um processo de cominuição mais eficiente, é desejável que a liberação ocorra em tamanhos de partículas os mais grossos possível.

2.5.3.1 Tipos de Fratura na Liberação

Durante a quebra de partículas a trinca pode se propagar de diferentes maneiras de modo que a liberação das fases minerais de uma rocha ocorra totalmente ou não. Na literatura sobre liberação mineral, dois termos gerais são usados para descrever os mecanismos de fratura: aleatória ou não aleatória (Mariano *et al.*, 2016; Little *et al.*, 2016). King (2001) descreveu que quando o padrão de fratura que é desenvolvido durante a cominuição do minério é dependente da sua textura, composição mineralógica e

propriedades mecânicas dos minerais, o processo de fratura é considerado não aleatório, caso contrário a quebra é considerada aleatória (King e Schneider, 1998).

Em relação à fratura não aleatória, Fandrich *et al.* (1997) identificaram duas formas de quebra denominada de fratura diferencial ou preferencial e fratura interfacial. King e Schneider (1998) descreveram seis tipos de fratura brevemente descritos:

- **Quebra seletiva:** ocorre quando os minerais de uma rocha possuem resistências diferentes, onde o mais frágil fratura mais facilmente. Consequentemente, partículas com altos teores de fases frágeis terão uma taxa específica de quebra maior.
- **Quebra diferencial:** ocorre quando a função quebra depende da composição e textura da partícula mãe.
- **Quebra preferencial:** ocorre quando a trinca se propaga mais frequentemente em uma fase mineral. É caracterizada por apresentar uma variação da composição média com o tamanho da população das partículas.
- **Fratura no contorno de fase:** ocorre quando as trincas tendem a se propagarem por entre os grãos minerais e não através dos mesmos.
- **Liberação por destacamento:** ocorre quando os grãos de um certo mineral estão moderadamente ligados à matriz do minério. Esse tipo de fratura gera uma liberação total da fase mineral.
- **Fratura na região de contorno:** ocorre quando a região da vizinhança dos contornos de minerais diferentes é altamente estressada levando à fratura preferencial desta região. Essa região altamente estressada é gerada por uma diferença significativa no módulo de elasticidade dos minerais.

No entanto, a diferenciação entre esses mecanismos pode ser confusa, uma vez que alguns destes são muito semelhantes e podem ser agrupados em dois tipos de fratura, conforme foi definido por Little *et al.* (2016). Segundo os autores, os três primeiros mecanismos podem ser referidos como uma fratura preferencial e os três últimos como fratura intergranular. Um esquema ilustrando esses mecanismos de fratura, juntamente com os modos de aplicação dos esforços transmitidos a uma partícula é apresentado na Figura 24.

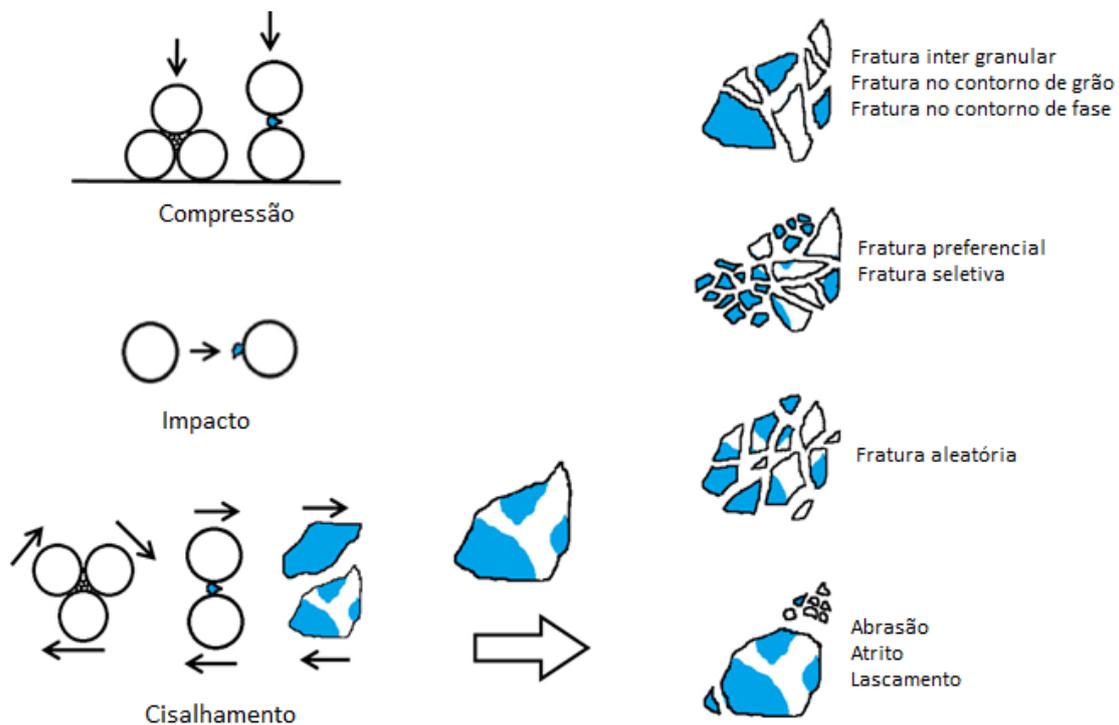


Figura 24. Modos de aplicação de cargas e mecanismos de fratura (Adaptado de Little *et al.*, 2016).

Alguns métodos para investigar e medir esses tipos de quebras não aleatórias têm sido relatados e são principalmente baseados em ferramentas como MEV e sistemas de microtomografia de raios X. Mais detalhes podem ser encontrado em Mariano *et al.* (2016); Little *et al.* (2016); Leibner *et al.* (2016); Reyes *et al.* (2018).

2.5.3.2 Observações Relevantes da Liberação Mineral na Cominuição

Como mencionado anteriormente, o tipo de mecanismo empregado para a redução de tamanho de partículas também influi na liberação mineral. Na cominuição de minérios, a maioria dos equipamentos usam uma combinação dos mecanismos de quebra: compressão, impacto, abrasão e cisalhamento. Destes mecanismos, a compressão em leito de partículas apresenta evidências na literatura de aumentar a liberação de minerais, destacando-se os trabalhos de Clarke e Wills (1989); Fandrich *et al.* (1997); Hosten e Ozbay (1998); Ozcan e Benzer (2013); Liu *et al.* (2018).

Ozcan e Benzer (2013) alegam que a ruptura em leito de partículas sob alta pressão tem o potencial de aumentar a liberação de minerais através da quebra preferencial de partículas minerais compósitas ao longo dos limites de grão. Tavares (2005) afirmou que, devido à quebra entre partículas contidas num leito, que ocorre quando as forças compressivas de rolos rotativos, como o HPGR, transmitem energia através de camadas de partículas, ocorre um enfraquecimento preferencial das partículas mais grosseiras. Isso pode resultar em liberação preferencial.

Outros autores, porém, não observaram mudanças significativas nas características de liberação mineral e contestam os resultados descritos acima para a quebra em leito de partículas (Vizcarra *et al.*, 2010; Palm *et al.*, 2010; Solomon *et al.*, 2011).

Vizcarra *et al.* (2010) investigaram a influência de dois tipos de mecanismos de quebra, por impacto em um moinho de martelos e por compressão em uma unidade de compressão de pistão-matriz, na liberação mineral de minérios de cobre e de zinco. Eles concluíram que tanto os minerais de interesse quanto os minerais de canga, as propriedades de liberação tamanho por tamanho foram independentes do mecanismo de quebra usado para produzir as partículas.

Solomon *et al.* (2011) também investigaram a influência de diferentes equipamentos de fragmentação, moinho de bolas e uma prensa de rolos HPGR, na liberação de minérios de platina. Nenhuma evidência conclusiva de liberação preferencial foi observada para amostras preparadas por quebra de leito de partículas em comparação com a moagem convencional. Além disso, os melhores resultados de flotação foram obtidos do produto do moinho de bolas.

Outra observação importante é a independência do grau de liberação mineral em uma dada fração de tamanho da distribuição de tamanho das partículas, como reportado por Vizcarra *et al.* (2010) e corroborado por Carrasco *et al.* (2016). Segundo Mariano (2016) o grau de liberação de um mineral numa dada faixa de tamanho permanece praticamente constante, independentemente de onde a amostra seja amostrada num circuito de cominuição.

Bérubé e Marchand (1984) também observaram essa independência do grau de liberação de frações de tamanho com a distribuição granulométrica. No trabalho, eles avaliaram o comportamento de minério de ferro em diferentes equipamentos de

cominuição quanto à sua liberação. Diferentes distribuições granulométricas foram geradas e o grau de liberação de dez faixas de tamanho foram observadas. Nos tamanhos menores do que 210 μm o grau de liberação de uma dada faixa de tamanho permaneceu constante independentemente do modo e do grau de cominuição das partículas (Figura 25).

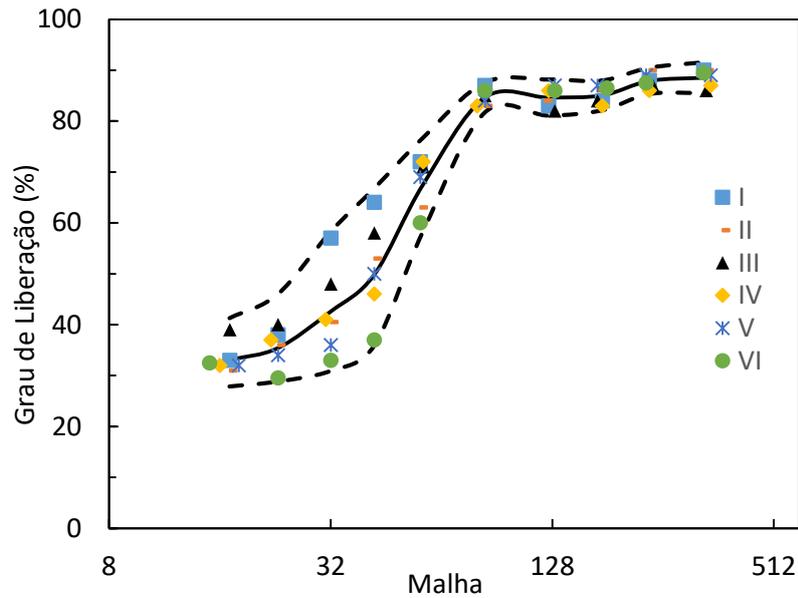


Figura 25. Grau de liberação dos diferentes produtos de cominuição (Bérubé e Marchand, 1984).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho de caracterização dos minérios de ferro teve início com o recebimento das amostras provenientes da mina localizada na Serra do Sapo no município de Conceição do Mato Dentro (CMD), no estado de Minas Gerais, já identificadas pela equipe da Anglo American, secadas e posteriormente separadas por classes de tamanho. Na mina de CMD, técnicos da Anglo American identificaram e classificaram cinco tipos diferentes de litologias portadoras de minerais de ferro as quais foram ensaiadas individualmente, além de uma amostra composta da mistura das litologias.

Para uma maior confiabilidade dos resultados dos ensaios, sempre que possível, seguiu-se a mesma forma de preparação das amostras para todas as amostras. Outro padrão utilizado em todas as amostras foi a ordem dos ensaios realizados, iniciando-se por ensaios de partículas grandes posteriormente os testes de partículas menores.

3.1 AMOSTRAS E SUAS TIPOLOGIAS

Ao todo foram recebidos cinco tipos distintos de minérios de ferro e uma sexta amostra resultante da blendagem entre as cinco tipologias. Segundo a equipe da Anglo American a variabilidade de minérios de ferro identificada pode ser esquematicamente descrita pela Figura 26.

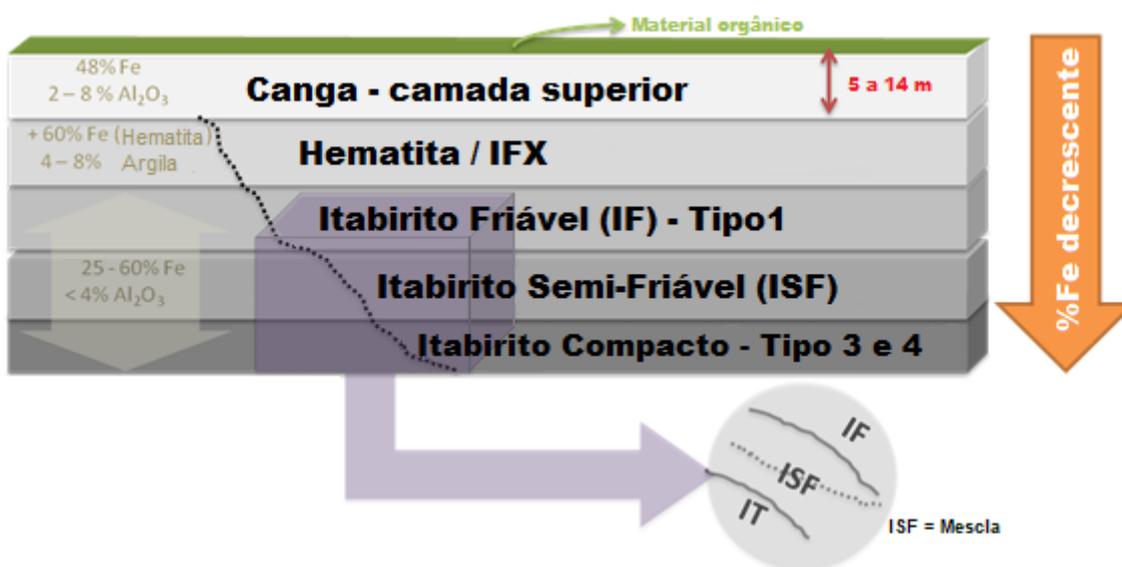


Figura 26. Tipologias de minério de ferro da mina CMD. (Fonte: Anglo American).

Foram recebidas duas remessas de amostras, a primeira foi recebida em meados de janeiro de 2017 e continha as tipologias Tipo 4, Tipo 3 e Canga. A segunda remessa foi recebida no início de junho de 2017 e continha as tipologias Tipo 4, Tipo 3, IF, IFX e uma blend, denominada “Allscan”. Um resumo da quantidade de partículas grossas e finas é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Amostras e massa contidas nas diferentes faixas de tamanhos.

Amostra (Tipologia)	Tamanho dp (mm)	Massa (kg)
Tipo 4 (Super Compacto)	> 50	350
	< 50	15
Tipo 3 (Compacto)	> 50	40
	9,5 < dp < 50	18
	< 9,5	171,7
Canga	> 50	100
	9,5 < dp < 50	23
	< 9,5	79
Tipo 1 (Itabirito Friável, IF)	9,5 < dp < 50	11
	< 9,5	87,7
IFX (Hematita)	9,5 < dp < 50	12,5
	< 9,5	87,3
Blend (Allscan)	9,5 < dp < 50	24,3
	< 9,5	88,2

Por se tratar de um número considerável de amostras, algumas de certa forma semelhantes, como também para evitar possíveis erros, optou-se por manusear cada amostra sequencialmente. De acordo com a disponibilidade de partículas grossas das amostras, foi seguida a ordem conforme a Tabela 4 para a realização dos ensaios.

3.2 ANÁLISES QUÍMICA E MINERALÓGICA

Amostras selecionadas foram quarteadas e retiradas alíquotas representativas para análise química e mineralógica. As técnicas de análises utilizadas foram a análise química por fluorescência de raio-X (FRX) e mineralógica por difração de raio-X (DRX). Para complementar essas análises, foi realizado ensaio de perda ao fogo para a quantificação de materiais orgânicos e voláteis.

3.2.1 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Para a identificação e quantificação dos principais dos minerais e suas fases que constituem cada tipologia, usou-se a técnica DRX pelo método do pó. A análise foi realizada num equipamento Bruker-AXS D4 Endeavor com as seguintes condições operacionais: radiação $K\alpha$ de um anodo de Cobalto ($\lambda = 1,79 \text{ \AA}$), 40 kV e 40 mA, velocidade do goniômetro de $0,02^\circ 2\theta$ por passo com tempo de contagem de 1 segundo por passo e coletados de 4 a $105^\circ 2\theta$, com detector sensível à posição LynxEye. A identificação dos minerais foi realizada por comparação do difratograma obtido com os padrões contido no banco de dados PDF-04 (ICDD, 2016) no software Bruker-AXS Diffrac EVA 4.1.

As amostras foram homogeneizadas e quarteadas e posteriormente maceradas em gral de ágata até ficarem inferiores a 0,075 mm. Com o objetivo de identificar e quantificar os principais minerais e suas fases dos diferentes minérios de ferro, as amostras não passaram por nenhum processo de separação ou concentração, como sugere Neumann *et al.*, (2010).

A quantificação dos minerais foi realizada pelo método de refinamento de espectro multifásico total de difração de raios-X, mais conhecido como método de Rietveld (Neumann *et al.*, 2010), usando o programa Topas V.4.2. Esta caracterização foi realizada no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).

3.2.2 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCENCIA DE RAIOS-X

O equipamento usado para esta análise foi um espectrômetro de fluorescência de raios-x, modelo EDX-720 Shimadzu® (Figura 27), pelo método do pó prensado, o qual apresenta maior sensibilidade e que pode determinar e quantificar os principais óxidos.

As alíquotas das amostras foram maceradas em gral de ágata até ficarem inferiores a 0,075 mm para garantir que os principais óxidos sejam detectados e medido os seus teores. Os óxidos analisados foram Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , SO_3 , MnO , TiO_2 , P_2O_3 , K_2O .

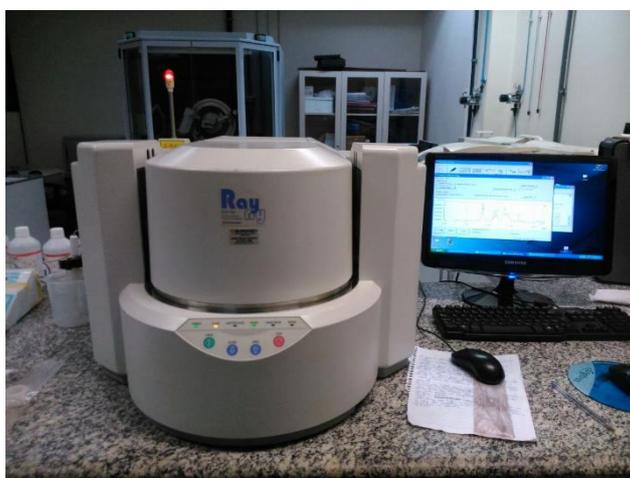


Figura 27. Espectrômetro de fluorescência de raios-x.

3.3 ANÁLISES VIA QEMSCAN

Para estas análises foi utilizado QEMSCAN *FEI Company* e realizada no centro de pesquisas da Anglo American em CMD. As análises no Qemscan foram realizadas a partir das amostras referentes à alimentação do ensaio de moagem no moinho com dimensões de 58 cm x 24 cm (seção 3.4.6). As faixas granulométricas listadas na Tabela 8 foram embutidas em resina, lixadas e polidas para a confecção das seções polidas de cada amostra. Posteriormente, as seções polidas foram revestidas com carbono para a aquisição das imagens. O procedimento de preparação das seções polidas foi realizado pelos técnicos da Anglo American em CMD.

O modo de operação para realizar as análises das amostras foi o PMA (*particle mineralogical analysis*) o qual é descrito detalhadamente no item 2.5.2. Neste modo, as

partículas são mapeadas por meio de uma varredura onde as espécies minerais são identificadas. A partir do mapeamento das partículas são geradas imagens digitais e uma série de dados. Tais resultados foram exportados e processados no EXCEL (Microsoft) para obtenção das medidas de quantificação mineralógica modal, grau de liberação, tamanho e forma dos minerais e associação mineral.

O número de partículas analisadas e o número de seções polidas em cada fração de tamanho das tipologias foi obtido recursivamente em função das partículas analisadas (número e composição) e o coeficiente de variação dessas medidas até se atingir um valor estatisticamente aceitável. No geral, o número de partículas analisadas diminui com o aumento de tamanho das partículas e o número de seções polidas aumenta.

3.4 TESTES DE COMINUIÇÃO

Para a investigação do comportamento das diferentes tipologias durante a cominuição, as amostras recebidas foram submetidas a diversos testes padronizados, que aplicam diferentes mecanismos de fragmentação e em diferentes faixas de tamanho.

Conforme mostra a Figura 28, para cada ensaio, as amostras foram preparadas de acordo com a faixa de tamanhos demandada para cada tipologia, segundo a disponibilidade de material existente.

Cada ensaio foi meticulosamente realizado seguindo padrões de execução interno do Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM).

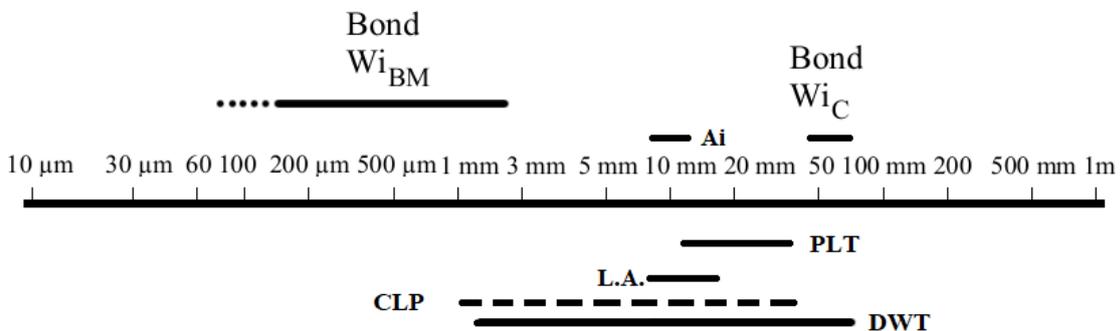


Figura 28. Faixas de tamanhos dos testes.

3.4.1 ENSAIO DE BRITABILIDADE

Neste ensaio foi utilizado o pêndulo duplo de Bond (Figura 12 da seção 2.3.2.2). Dois martelos em queda livre são soltos simultaneamente numa trajetória pendular, impactando cada partícula na faixa de tamanhos entre 75 e 50 milímetros. 20 partículas foram usadas para a realização deste teste para cada amostra. Inicialmente os martelos são soltos de um ângulo de 10°. Caso a partícula não quebre, o ângulo é aumentado 5° em um novo impacto até que se caracterize a quebra da partícula, a qual ocorre quando a partícula perde 10% da sua massa inicial.

A energia de impacto E é calculada a partir da energia potencial dos martelos que por sua vez é relacionada com o ângulo de soltura da quebra da partícula. O índice de trabalho de Bond é calculado a partir da média da energia de impacto E e a densidade através de uma equação empírica proposto por Bond (equação 7).

3.4.2 ENSAIO DE QUEDA DE PESO COMPLETO (DWT)

O ensaio de queda de peso (*drop weight test* ou DWT) foi realizado seguindo o padrão interno do LTM baseado no procedimento JKMRC Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (Napier-Munn *et al.*, 1996). A Figura 29 ilustra o equipamento utilizado para o ensaio.

Energias pré-determinadas são aplicadas nas partículas de um certo intervalo de tamanho e em níveis diferentes de energias (Tabela 5). Como o minério de ferro é menos competente, decidiu-se reduzir pela metade os níveis de energias, exceto o maior nível de energia aplicado a cada faixa de tamanhos.

As partículas são quebradas uma a uma e os fragmentos são coletados para posterior peneiramento a seco usando peneiras que seguem uma série com razão igual à raiz quadrada de dois.

Com o resultado deste ensaio é possível relacionar os níveis de energia E_{cs} aplicados e a intensidade da fragmentação das amostras t_{10} , a partir dos quais se obtém obter os parâmetros A e b da equação 13.

Tabela 5. Condições utilizadas no ensaio completo de DWT

Intervalo de tamanhos (mm)	Energia específica de impacto (kWh/t)	Número de partículas/lote	Massa do impactor (kg)
63 x 53	0,05	10	40
	0,125	10	50
	0,8	10	57
45 x 37,5	0,05	15	15,2
	0,125	15	40
	1,0	15	50
31,5 x 26,5	0,125	30	15,2
	0,5	30	40
	2,5	30	50
22,4 x 19,0	0,125	30	3,2
	0,5	30	15,2
	2,5	30	15,2
16 x 13,2	0,125	30	3,2
	0,5	30	3,2
	2,5	30	15,2
5,6 x 4,75	0,25	100	0,67
	1,0	100	0,67
	2,5	100	1

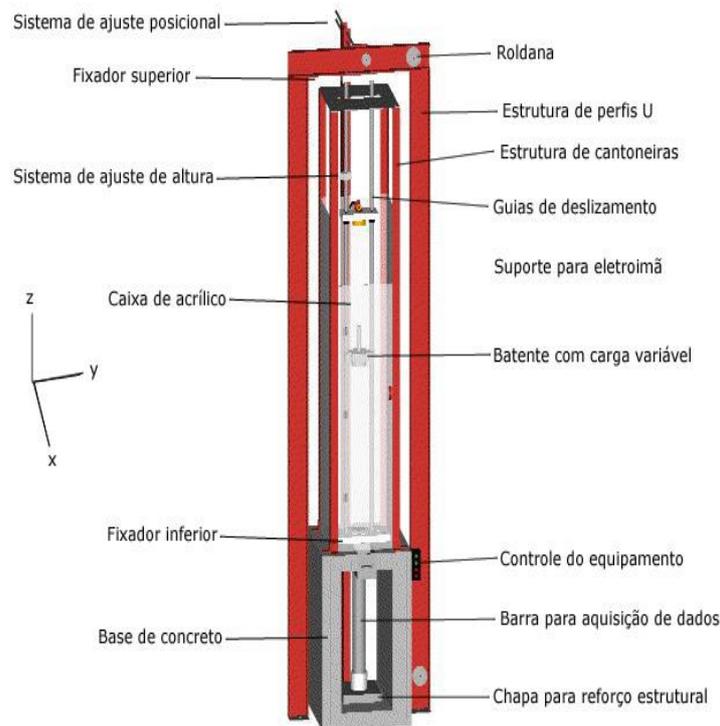


Figura 29. Dispositivo utilizado nos ensaios de queda de peso.

3.4.3 ENSAIO DE ABRASÃO LOS ANGELES

Este ensaio é frequentemente utilizado na indústria de agregado para avaliar o comportamento de rochas no desgaste à abrasão. Este modo de fragmentação ocorre consideravelmente nos meios de cominuição e se faz necessário uma investigação dos minérios de ferro a quebra por abrasão.

O ensaio é realizado num tambor de 700 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento, equipado com uma barra elevadora de 90 mm (Figura 30). A carga moedora é composta de 11 esferas de aço de 48 mm de diâmetro. A amostra é composta de dois lotes, um com faixa de tamanho de 19,0 a 12,5 mm e o outro com 12,5 a 9,5 mm, cada lote com 2,5 kg.

O resultado deste ensaio é o índice de abrasão, o qual corresponde à porcentagem de material passante na peneira de 1,70 mm, após o peneiramento do material ensaiado. Mais detalhes são encontrados na norma ABNT NBR 6465.



Figura 30. Moinho padronizado para o ensaio Los Angeles.

3.4.4 ABRASIVIDADE A_i

O ensaio de abrasividade objetiva analisar o desgaste que a amostra causa numa palheta com dimensões e dureza padronizada (50 HRC). Durante o ensaio, a palheta sofre desgaste abrasivo por um certo período de tempo. Correlações têm sido estabelecidas que relacionam a perda de massa da palheta e o desgaste de metal em equipamentos de cominuição (Bergstrom, 1985).

O equipamento de abrasão consiste basicamente de um rotor de 114 mm de diâmetro, que gira a uma velocidade de 632 ± 10 rotações por minuto, enclausurado por um tambor concêntrico de 305 mm de diâmetro que gira a uma velocidade de 70 ± 3 rotações por minuto no mesmo sentido do rotor. A superfície interna do rotor possui barras levantadoras (Figura 31). O rotor tem uma reentrância de profundidade de 25 mm, onde é inserida a palheta.

Uma amostra representativa de 3,2 kg na faixa de tamanhos de 19 a 12,5 mm é tomada e separada em oito alíquotas com 400 g cada. O rotor com a palheta inserida é carregado com um lote e posto a operar nas condições ditas acima por um período de 15 minutos. Este procedimento é repetido quatro vezes, e após isso, a palheta é limpa e pesada. A palheta deve ser girada de modo que uma nova face seja ensaiada com outros quatro lotes restantes.

O peso final da palheta é verificado numa balança analítica com precisão de 0,0001g. A massa em gramas de metal removido por abrasão corresponde ao índice de abrasividade para o material testado.



Figura 31. Tambor usado no ensaio de abrasividade de Bond Ai.

Diversas correlações empíricas foram propostas por Bond para avaliar o desgaste de equipamentos de cominuição através do índice Ai, sendo que mais detalhes podem ser encontrados em Bergstrom (1985).

3.4.5 MOAGEM EM BATELADA A ÚMIDO 30 X 30

Ensaio de moagem descontínua são uma importante ferramenta na determinação das funções quebra e seleção, as quais descrevem as características de quebra do material no moinho de laboratório. A partir destas funções, também é possível escalonar e prever a distribuição granulométrica do produto da moagem. Este ensaio também é importante para identificar a moabilidade das diferentes tipologias sob alimentação com distribuições granulométricas semelhantes, como também na geração de finos afim de identificar qual destas tem maior contribuição.

3.4.5.1 Condições de Moagem

O ensaio de moagem a úmido foi realizado num moinho com 30 cm de diâmetro por 30 cm de profundidade com oito barras elevadoras de dimensões 15 mm de altura por 25 mm largura. Essas dimensões das barras elevadoras produzem um intenso movimento em forma de catarata da carga dentro do moinho (Figura 32).

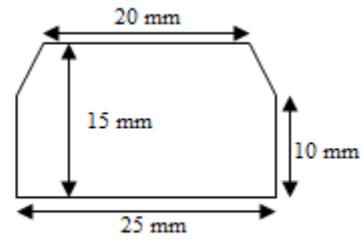


Figura 32. Moinho de 30 x 30 cm (esquerda) e barra elevadora (direita).

Um sensor de torque é acoplado ao eixo que transfere a potência do motor para o moinho, como ilustrado na Figura 33. Esse equipamento mede a variação do torque, da velocidade de rotação e da potência ao longo do tempo e esses dados são utilizados para medir a energia especificada moagem.

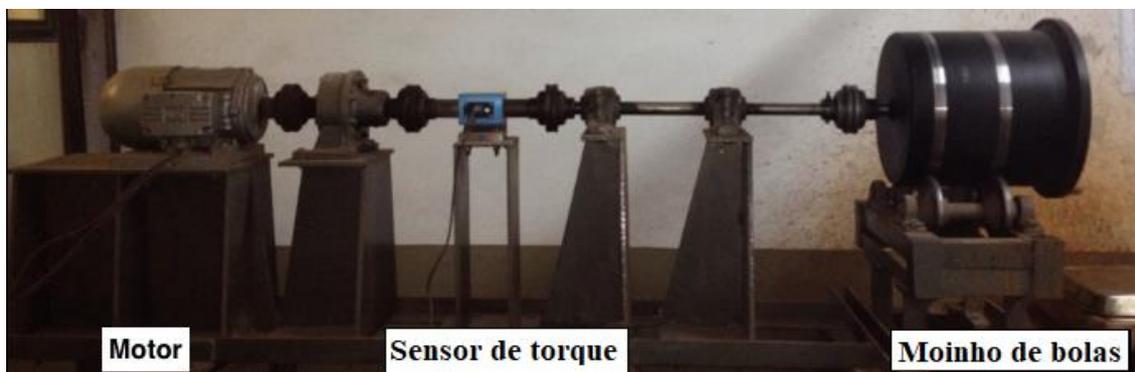


Figura 33. Configuração do moinho 30 X 30.

A carga moedora é composta por bolas de aço de diferentes tamanhos a qual segue a distribuição padrão do teste de moabilidade de Bond, como mostra a Tabela 6.

As condições de moagem que foram utilizada para todas as tipologias são apresentadas na Tabela 7. Devido à forma agressiva das barras elevadoras a fração da velocidade crítica foi reduzida.

Tabela 6. Distribuição da carga moedora e número de bolas

Diâmetro da bola (mm)	Distribuição em peso (%)	Número de bolas
36,5	42,05	50
30,2	37,11	79
25,4	3,29	12
19,1	9,95	83
15,9	7,59	110

A partir dessas condições e das densidades de cada tipologia, calculou-se a massa de cada amostra. O volume de água da polpa foi calculado de acordo com a concentração de sólidos utilizada pela usina, igual a, aproximadamente, 57% em volume.

Tabela 7. Parâmetros utilizados para moagem a úmido

Condição operacional	Símbolo	Condição
Grau de enchimento	J	24
Porosidade da carga	ε	40
Preenchimento de vazios	U	100
Concentração de sólidos (em volume)	C_s	57
Fração da velocidade crítica	φ_c	50

3.4.5.2 Alimentação

Objetivando comparar a competência de cada amostra, assim como a geração de finos durante a moagem, as distribuições granulométricas de todas as tipologias foram cuidadosamente preparadas de modo que ficassem bastante semelhantes entre si, conforme mostra a Figura 34.

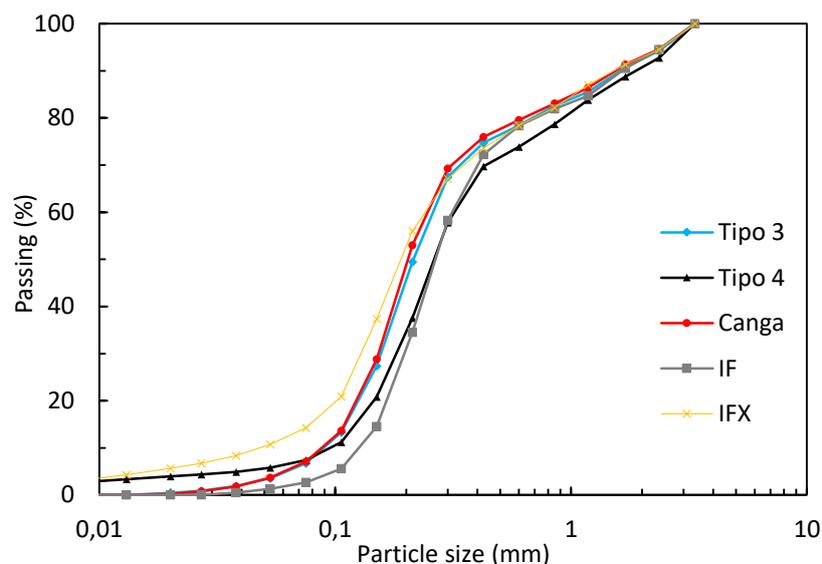


Figura 34. Distribuição granulométrica da alimentação dos ensaios de moagem.

A preparação da alimentação para todas as tipologias foi feita se baseando na distribuição granulométrica natural do Tipo 3, material que compõe predominantemente a alimentação da usina. O *top size* da alimentação, 2360 μm , foi escolhido de acordo com o maior tamanho da bola e também para que haja energia suficiente para o estilhaçamento do material contido no *top size*, caso essas se colidam. O excesso de finos na alimentação, definido como o material com tamanho abaixo de 150 μm , foi reduzido para que estes não atuem como dissipadores de energia da carga moedora.

3.4.5.3 Método Experimental

O ensaio de moagem em batelada foi realizado em quatro tempos de moagem. Os dois primeiros tempos foram estipulados em um e dois minutos num total acumulado de três. A partir dos resultados preliminares estipulou-se os dois últimos tempos, objetivando atingir a energia específica média da etapa de moagem da usina que, é entre 4,0 e 4,5 kWh/t, calculado em seis e quatorze minutos acumulado.

Com o objetivo de rastrear o comportamento dos minerais na moagem, foram retiradas alíquotas de dois gramas para realização de análise química da alimentação, do produto do segundo tempo e do último tempo de moagem. As faixas de tamanhos que foram retiradas alíquotas seguem uma sequência com razão igual a 2 até o tamanho de 75

µm e foram separadas por peneiramento a seco. Para tamanhos menores, foram retiradas seguindo a sequência $\sqrt{2}$ até o tamanho menor que 20 µm e foram separadas por peneiramento a úmido (Tabela 8). A análise química foi feita num espectrômetro de fluorescência de raio-X, EDX-720 Shimadzu®.

Tabela 8. Metodologia utilizada na análise granulométrica e para retirada de alíquotas para análise química

Método de análise	Tamanho (mm)	Análise química
Peneiramento Ro-Tap®	2,360	2,360
	1,700	(-2,360 +1,180)
	1,180	
	0,850	(-1,180 +0,600)*
	0,600	
	0,425	(-0,600 +0,300)*
	0,300	
Sympatec® Mytos ou Peneiramento a úmido para análise química	0,212	(-0,300 +0,150)*
	0,150	
	0,106	(-0,150 +0,075)*
	0,075	
	0,053	0,053*
	0,038	0,038*
	0,027	0,025
	0,020	0,020
	0,013	-0,020
	0,009	

* Faixas de tamanhos utilizadas nas análises via QemScan.

Após cada tempo de moagem a úmido a polpa era cuidadosamente retirada e o moinho era limpo com água abundante para garantir a remoção total da mesma. O

material decantado era então posto para secar em estufas à temperatura de 63° C, a fim de evitar aglomeração. O material fino o qual não tinha decantado era filtrado e posteriormente posto na estufa para secagem.

A alimentação e o produto de cada tempo do ensaio foram analisados por dois métodos diferentes. A cada análise granulométrica o material era previamente quarteado no quarteador Jones para retirar uma amostra representativa. Para as partículas entre 3350 e 300 μm , usou-se o peneiramento seguindo uma sequência geométrica de $\sqrt{2}$ entre os tamanhos das peneiras. Para essa faixa maior de tamanho, utilizou-se o Ro-Tap[®], o qual suporta sete peneiras, por tempo padrão de 15 minutos.

Para as partículas menores do que 300 μm , utilizou-se para fazer análises o Sympatec[®] Mytos, equipamento de análises de tamanho de partículas por difração a laser. Com esta técnica a distribuição granulométrica pode ser analisada até tamanhos inferiores a 10 μm , como ilustrado na Tabela 8. Após o peneiramento no Ro-Tap[®], as partículas retidas no fundo, inferiores a 300 μm , foram pesadas e novamente quarteadas até cerca de 10 g para serem analisadas no Sympatec[®] Mytos. Após essas análises a distribuição granulométrica foi reconstruída pela interpolação da porção mais fina, obtida no Mytos, com a porção mais grossa, obtida no peneiramento.

A Figura 35 resume o procedimento experimental utilizado no ensaio de moagem a úmido, assim como na retirada das alíquotas para análise química.

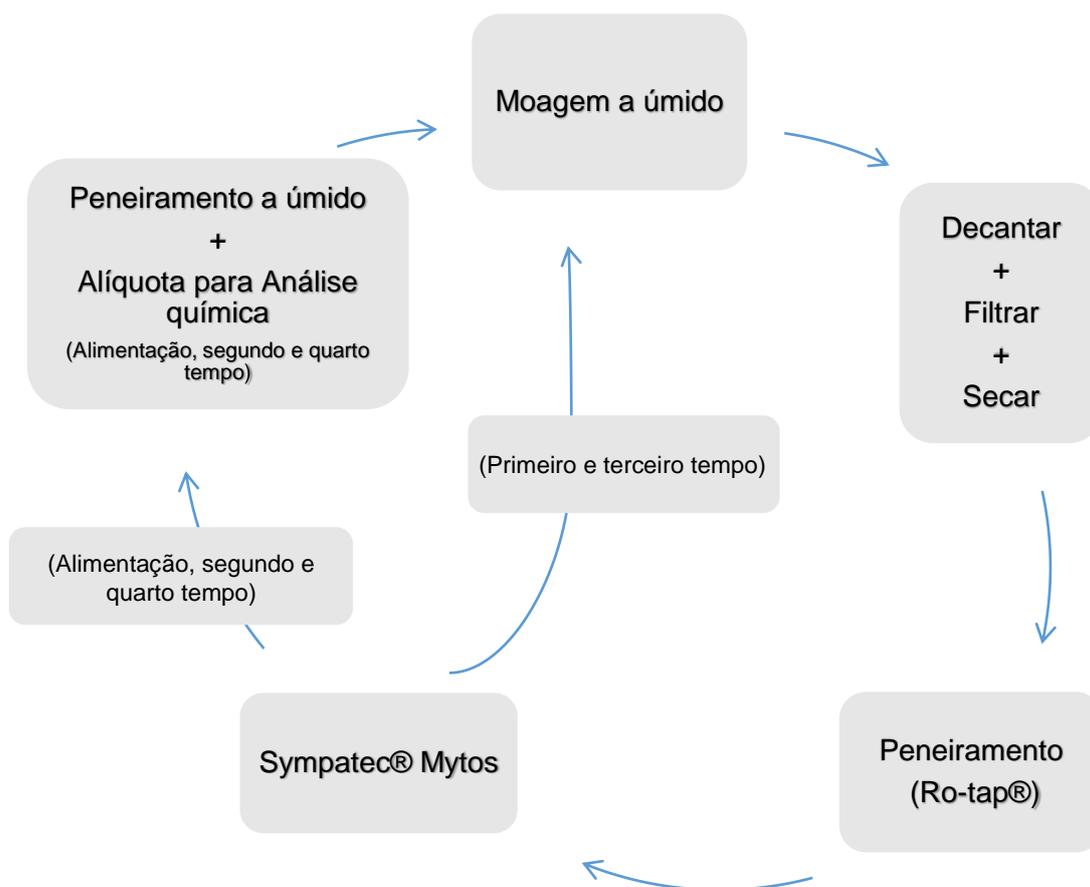


Figura 35. Esquema resumido do procedimento experimental e da retirada das alíquotas para análise química.

3.4.6 MOAGEM EM BATELADA A ÚMIDO EM MOINHO DE 58 CM

O ensaio de moagem a úmido foi realizado num moinho de 58 cm de diâmetro por 24 cm de profundidade com oito barras elevadores com 10 mm de altura por 25 mm largura (Figura 36).

A metodologia experimental, assim como os parâmetros de moagem, foi equivalente àquela usada nos ensaios com o moinho de 30 x 30 cm, sendo a seguir apenas destacadas as diferenças entre eles.

A distribuição da carga moedora a qual é descrita na Tabela 9 é composta por bolas de aço de diferentes tamanhos a qual segue, aproximadamente, a mesma distribuição utilizada na usina.



Figura 36. Moinho com dimensões de 58 x 24 cm semiaberto.

A condição de moagem utilizada para todas as tipologias é apresentada na Tabela 9, com exceção da fração da velocidade crítica φ_c , que foi de 76,1%, igual à condição da usina.

A preparação da alimentação seguiu os mesmos procedimentos de preparação dos ensaios de moagem no moinho de 30 x 30 cm, com a diferença que, neste caso, o *top size* foi de 8000 μm (Figura 37).

Tabela 9. Distribuição da carga moedora e número de bolas.

Diâmetro da bola (mm)	Distribuição em peso (%)	Número de bolas
63	34,1	24
50	40,6	57
38	18,3	58
25	7	78

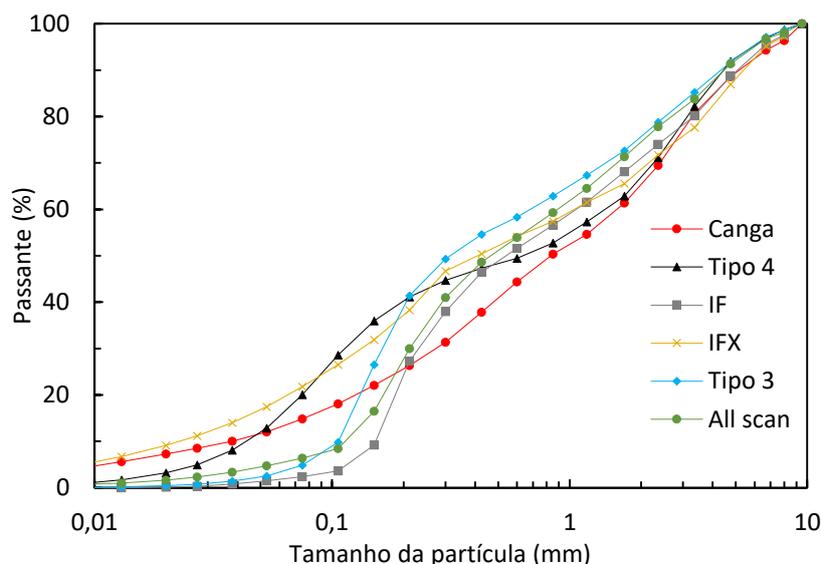


Figura 37. Distribuições granulométricas da alimentação do ensaio de moagem no moinho de 58 cm de diâmetro.

Quanto aos tempos de moagem, neste ensaio foi utilizado um tempo final prolongado, a fim de sobremoer o minério e analisar a geração de finos, como também na distribuição dos teores dos minerais. Para tal propósito, aplicou-se um máximo de cerca de duas vezes a energia específica média utilizada pela usina. Quanto à análise química, a retirada de alíquotas se limitou apenas à alimentação e ao produto do quarto tempo de moagem.

Para resumir a metodologia completa, o esquema da Figura 38 mostra uma visão geral do procedimento experimental utilizado nesses ensaios de moagem, assim como na retirada das alíquotas para análise química.

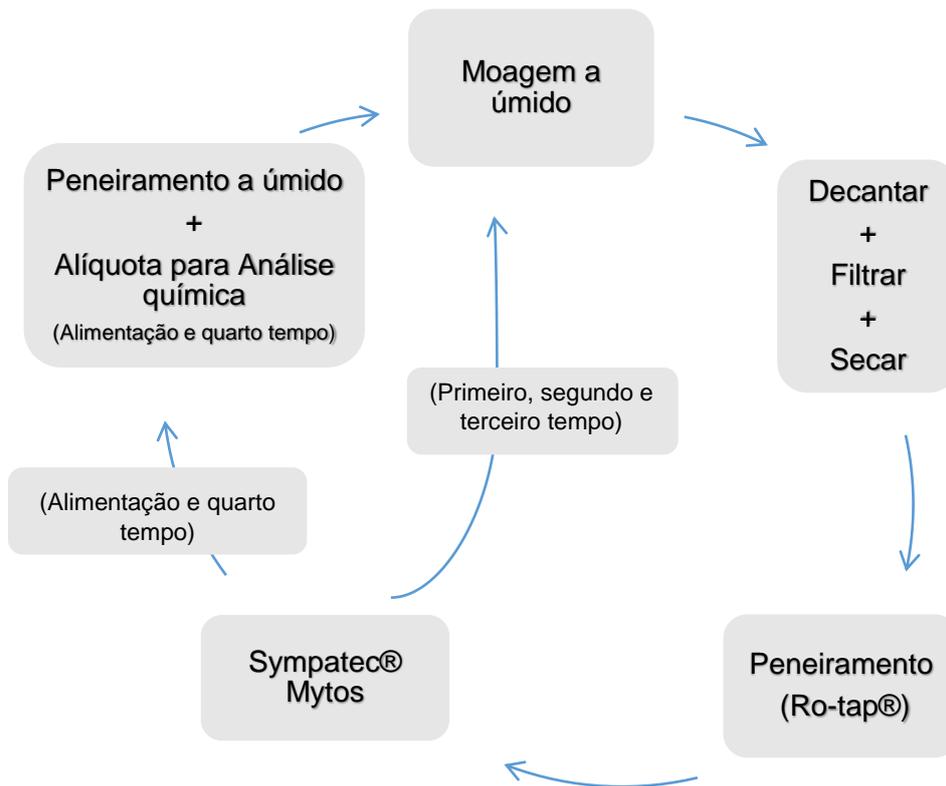


Figura 38. Esquema resumido do procedimento experimental e da retirada das alíquotas para análise química.

3.4.7 ENSAIO DE CARGA PONTUAL PLT

Este ensaio sujeita a amostra a uma carga pontual crescente até que a fratura ocorra. A carga concentrada é aplicada coaxialmente na amostra entre as pontas cônicas, conforme mostra a Figura 39. O índice de resistência a carga pontual $I_{s(D)}$ é calculado de acordo com a equação 8, porém, por limitações técnicas e falta de amostras com diâmetros próximos à 50 mm, o diâmetro padrão usado nesse trabalho será 20 mm e o $I_{s(20)} = P_{(35)}/(D_{20})^2$. A resistência à tração σ_t das partículas é calculada pela equação 10.

Outra importante medida é energia específica utilizada para fraturar a partícula, obtida por meio da integração da área sob o gráfico força versus deslocamento, também conhecido como tenacidade, dada por $W = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx$. Para a obtenção dessa medida é necessário que o equipamento seja capaz de medir e registrar a força aplicada e a deformação sofrida pela partícula, o que não é usual nesse ensaio. A Figura 39 ilustra o

equipamento utilizado para realização do ensaio. Trata-se de uma máquina de tração e compressão Instron® modelo 33R5567 composta de uma célula de carga de 5.000 N conectada a um computador que registra os dados de força e deformação.

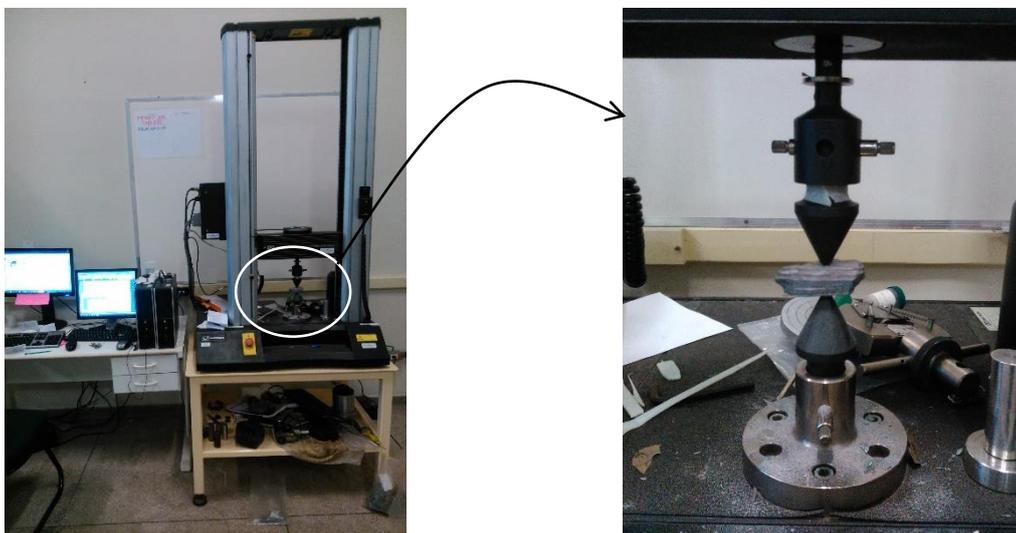


Figura 39. Equipamento adaptado para o ensaio de carga pontual.

A carga máxima da fratura corresponde ao ponto de máxima carga, no qual ocorre a ruptura da partícula, ou seja, quando a fratura atravessa as duas faces de contato da amostra com os punções. Há casos em que ocorre a quebra superficial ou lascamento da amostra e que pode comprometer a identificação da fratura da mesma. Neste caso o ensaio é desconsiderado. Isso é ilustrado na Figura 40, que mostra um exemplo de lascamentos superficiais e posteriormente a fratura total da partícula.

Para o caso de amostras com formações bandadas, como é o caso do minério de ferro itabirítico, é importante considerar o ângulo de aplicação da carga em relação à orientação das bandas. Pode-se obter um índice de anisotropia $I_{a(20)}$ através da relação dos $I_{s(20)}$ obtido paralelo e perpendicular à formação bandada (Figura 41), e quanto mais próximo da unidade, menor a anisotropia.

De cada tipologia foram ensaiadas trinta partículas a fim de obter dados representativos da população, dependendo da disponibilidade, na faixa de tamanho -37,5 mm +31,5 mm. As faces da amostra foram selecionadas de modo que, preferencialmente, estivessem livres de irregularidades abruptas que pudessem servir de concentrações

tensões e o diâmetro D da partícula era medido, devendo estar na faixa de $0,3 L < D < L$, na qual $L = (L_1 + L_2)/2$, de acordo com a Figura 42.

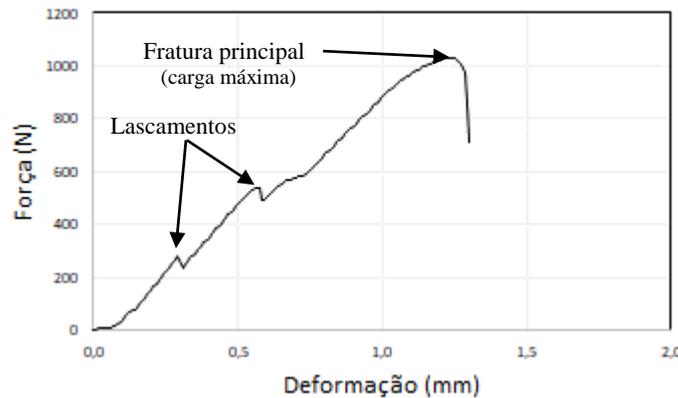


Figura 40. Perfil da força versus deformação ilustrando as fraturas superficiais e a fratura principal.

A carga foi aplicada centralmente na partícula e continuamente crescente, a uma taxa de 5 mm/min. até que a falha ocorresse. Os resultados obtidos nesse tipo de ensaio são dispersos e por isso são descritos estatisticamente. Uma distribuição cumulativa de probabilidades das variáveis medidas deve ser feita e os dados ajustados a uma distribuição apropriada, geralmente a distribuição log-normal ou Weibull. Os gráficos das distribuições dão um indicativo da resistência inerente das partículas à carga pontual, assim como permitem a comparação entre as tipologias.

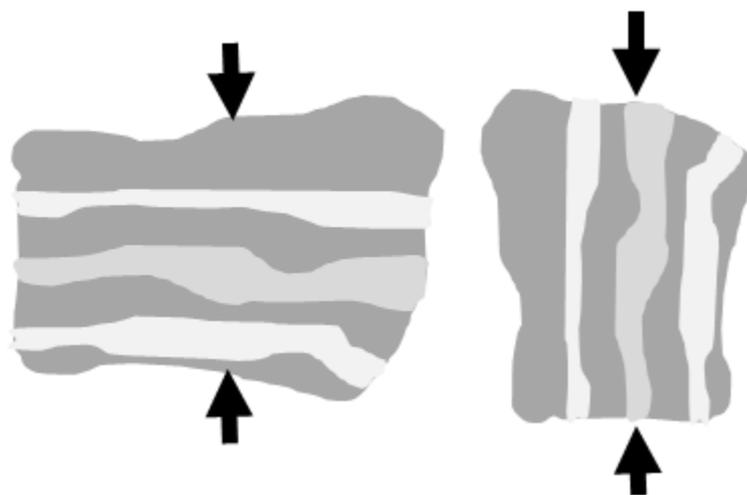


Figura 41. Formas de aplicação da carga pontual em relação à orientação das bandas: à esquerda perpendicular à carga e à direita paralela à carga.

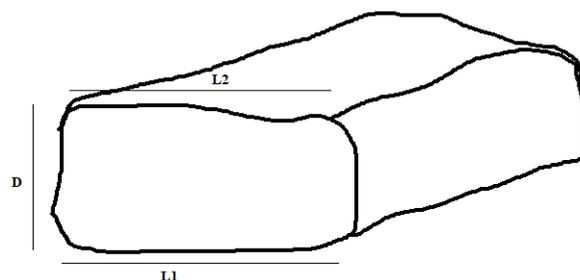


Figura 42. Esquema das dimensões e da forma das partículas ensaiadas no ensaio de PLT.

3.4.8 ENSAIO DE COMPRESSÃO DE LEITOS DE PARTÍCULAS CLP

Este ensaio é usado no ajuste de modelos e na simulação de HPGR (Benzer *et al.*, 2017), assim como na determinação das propriedades de quebra das partículas num leito confinado. Para o ensaio são usadas partículas em faixas estreitas de tamanho as quais são sujeitas a compressão em diferentes níveis de força, conforme mostra a Tabela 10. A massa do leito de partículas é calculada de acordo com o diâmetro do pistão e a altura do leito.

Tabela 10. Faixas de tamanho e forças utilizadas no ensaio CLP

Diâmetro do pistão (cm)	Altura do leito (mm)	Intervalo de tamanhos (mm)	Força (kN)			
			50	100	500	1000
170	60	32-26	4	4	4	4
170	60	19-16	4	4	4	4
170	60	11.2-9.5	4;2	4;2	4;2	4;2
100	40	6.7-5.6	4;3;2	4;3;2	4;3;2	4;3;2
100	40	3.35-2.8	4;3	4;3;2;1	4;3;2	4;3;2
100	40	2-1.68	4;3	4;3;2	4;3	4;3;2
100	40	0,850 - 0,6	4	4	4	4

*(Tipo 4 – 4; Tipo 3 – 3; Canga – 2; I.F. – 1).

A prensa com capacidade máxima de 1000 kN Shimadzu® servo-controlada é acoplada com LVDT com precisão de 10 µm para que seja registrada a curva força versus deslocamento (Figura 43). A partir dessa curva foi calculada a energia a qual o leito recebeu, que corresponde à área abaixo da curva e é calculada por integração da curva

$$W = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx.$$



Figura 43. Prensa e equipamento de medição da força e deslocamento aplicado.

Quatro lotes de partículas para cada faixa de tamanho foram preparados e, para cada um, foi aplicado um certo nível de energia a uma taxa de carregamento de 5 mm/min. A altura inicial do leito, assim como a altura final foram medidas. A distribuição granulométrica de cada lote ensaiado foi então analisada por peneiramento no Ro-Tap® seguindo uma sequência com razão igual a $\sqrt{2}$.

A partir dos resultados das curvas de força versus deslocamento, da análise granulométrica, t_{10} e t_{ns} e da massa as propriedades de quebra são determinadas. Para tal, o software LTM Piston-Die Test (LTMPDT) foi utilizado, o qual permite a estimação dos parâmetros de quebra a partir dos dados citados acima. O resultado do LTMPDT é a interpolação da *appearance function*, o ajuste da relação t_{10} versus energia específica, os parâmetros da relação de maciez e a reconstrução da função quebra para energia específica padrão de 2 kWh/t (Benzer *et al.*, 2017).

Os resultados dos testes fornecem números e parâmetros, baseados na energia específica, que foram usados para comparar as tipologias, como também observar a

geração de finos a partir de partículas grossas. A Tabela 11 resume todos os ensaios e os seus respectivos parâmetros extraídos.

Tabela 11. Ensaios e parâmetros obtidos nos ensaios de fragmentação

Ensaio	Resultados
Britabilidade	Índice de trabalho de Bond, Wic
DWT	A*b e Função quebra de impacto
Abrasão Los Angeles	Índice de abrasão Los Angeles
Abrasividade Ai	Índice de abrasividade de Bond
Moagem 30 X 30 cm e Moagem 58 X 24 cm	Funções quebra e seleção, produção de finos e moabilidade
CLP	A*b e função quebra de compressão
PLT	Resistência à compressão uniaxial, anisotropia e energia de fratura uniaxial

4 RESULTADOS

A ordem de apresentação dos resultados e discussões é feita de acordo com a dimensão das partículas requerida em cada ensaio. Vale frisar que para materiais geológicos, como os estudados no presente trabalho, a resistência e a energia de fratura das partículas são dependentes de sua dimensão, como observado por Tavares e King (1998). Deste modo, comparações e correlações dos resultados serão realizadas com base nas dimensões das partículas. Assim, os resultados são apresentados das partículas maiores para as menores.

Discussões a respeito das tipologias também são apresentadas, onde características macroscópicas e texturais são detalhadas. Nesse tópico são ressaltados fatores importantes que influenciam certos comportamentos de quebra, desde partículas grossas até partículas finas, das tipologias.

Por fim, serão discutidos os resultados de todas as classes de tamanhos utilizadas a fim de identificar perfis de competência dependentes do tamanho das partículas. Essa discussão se torna importante devido à inversão de comportamento na diminuição de algumas tipologias.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MINÉRIOS DE FERRO

Neste tópico é feita uma discussão das principais características e diferenças das tipologias, uma vez que cada uma tem diferentes estruturas e microestruturas que são relevantes na sua resposta aos ensaios no que tange à sua fratura, à sua fragmentação e à forma das partículas geradas.

A caracterização das amostras de minérios de ferro utilizadas nesse trabalho foi realizada tanto qualitativamente quanto quantitativamente por meio de diferentes técnicas. As principais características estruturais são descritas qualitativamente baseadas na análise macroscópica das amostras. Por outro lado, as características microestruturais dos minérios que descrevem as suas texturas são apresentadas quantitativamente.

Também é apresentada uma discussão preliminar a respeito do comportamento de quebra, onde as características estruturais e microestruturais se mostram um fator relevante para as características de quebra.

4.1.1 DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS

ITABIRITO TIPO 3

A Figura 44 apresenta partículas das amostras Tipo 3 e Tipo 4. Na imagem, as duas tipologias foram juntas a fim de ilustrar a principal diferença macroscópica nas suas estruturas. Da direita para esquerda, percebe-se claramente o aumento da formação bandada, tanto na quantidade, como também na largura das bandas. Esse bandeamento é caracterizado por apresentar laminações de minerais de ferro intercaladas com minerais de ganga, predominantemente de quartzo, sendo essa a característica predominante da tipologia Tipo 3.



Figura 44. Imagem de tipologias do Tipo 3 (esquerda) e Tipo 4 (direita) de minério de ferro.

Essa tipologia é coesa e não se degrada facilmente. Os grãos de quartzo podem ser observados à olho nu e estão distribuídos predominantemente entre 300 e 106 μm . Os grãos de minerais de ferro apresentam granulação mais fina e não são observáveis a olho nu.

ITABIRITO TIPO 4

A tipologia Tipo 4, embora apresente semelhanças com a Tipo 3, apresenta características diferentes da anterior. Como pode ser observado na Figura 44, as partículas do lado direito apresentam quase nenhuma formação bandada que se estenda por toda a

partícula. Nessa tipologia, há uma matriz de minerais de ferro que circunda os veios milimétricos de minerais de canga, predominantemente formada por quartzo. Esses veios estão dispersos aleatoriamente pela matriz e possuem formas variadas.

Essa tipologia é muito coesa e não se degrada facilmente. Os grãos de quartzo possuem dimensões ligeiramente inferiores à tipologia Tipo 3. Os minerais de ferro possuem grãos finos, não observáveis a olho nu.

ITABIRITO FRIÁVEL (IF)

Assim como a tipologia Tipo 3, a amostra de itabirito friável IF também apresenta formação bandada com alternância de minerais de ferro e quartzo, como ilustra a Figura 45. Nessa amostra, pode-se encontrar grãos de quartzo de grandes dimensões, como também pode-se identificar a presença de algumas fases alaranjadas dispersas nos minerais de ferro no sentido das laminações. De forma geral, os grãos são visivelmente maiores e perceptíveis a olho nu. Como pode ser observado na Figura 45, as partículas à esquerda de IF em comparação com o Tipo 3 à direita.



Figura 45. Tipologia IF à esquerda e tipo 3 à direita.

Esse material apresenta menor coesão se comparado aos anteriores, textura tátil escamosa e aparenta também ter microporosidade. As partículas de grandes dimensões se degradam facilmente durante o manuseio, o que dificulta a realização de ensaios que requerem partículas de tamanhos mais grossos.

ITABIRITO FRIÁVEL – X (IFX)

A amostra de Itabirito Friável X IFX, é uma tipologia caracterizada por possuir microbandas de minerais ferrosos com baixa a alta porosidade entre as mesmas e de grande friabilidade (Figura 46). Essa tipologia é produto da intensa lixiviação do quartzo (Dorr 1964), sendo enriquecida em hematita. Visivelmente possui poucas microbandas de minerais de ganga, e seus grãos não são observáveis a olho nu.



Figura 46. Tipologia IFX.

Assim como IF, ela facilmente se degrada em partículas extremamente finas e estas ao toque se mostram suave, semelhante ao itabirito xistoso macio de alto grau como reportado por Dorr (1964), Spier *et al.* (2003) e Rosière *et al.* (2008). Suas partículas são altamente lamelares assim como as suas progênies, devido à sua formação xistosa e à microporosidade existente entre as foliações.

CANGA

Diferentemente das outras tipologias, a canga não apresenta formação bandada (Figura 47). Ela se encontra nas camadas superficiais do depósito, sendo produto de processos supergênicos tais como erosão e intemperismo. Devido a isso, a canga possui quantidades variáveis de fragmentos detríticos oriundos de outras rochas que foram litificados (Dorr, 1964). Aparenta ser um material cimentado de coloração alaranjada que indica a presença de mineral de ferro hidratado, principalmente a goethita.

Devido a processos citado acima, ela apresenta alto grau de porosidade que varia dimensionalmente de pequena à grande, como pode ser visto na Figura 47.



Figura 47. Imagem de partículas da tipologia Canga.

4.1.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL E MINERALÓGICA DAS AMOSTRAS

A seguir a descrição microestrutural e mineralógica das amostras é apresentada quantitativamente. Essa descrição é dividida nas características intrínsecas dos minérios que os diferenciam e são fundamentais na resposta destes no processamento mineral, aqui focado para a cominuição. As principais características microestruturais que influem na textura dos minérios estão relacionadas às propriedades dos grãos minerais, tais como: os tamanhos dos grãos, a forma e a associação dos minerais. Por outro lado, as características mineralógicas e químicas identificam e quantificam as fases minerais e a composição química respectivamente.

4.1.2.1 Microestrutura das Amostras

A análise microestrutural das tipologias de minério de ferro foram descritas de acordo com a nomenclatura clássica da petrografia contido em Best (2003) e Passchier e Trouw (2005).

Tamanho de grão dos minerais

Os minérios de ferro são constituídos principalmente de minerais portadores de ferro e minerais silicosos, principalmente o quartzo. Os tamanhos dos grãos desses minerais variam dentro do minério e por isso são descritos aqui por uma função de distribuição dos tamanhos de cada mineral.

Os dados dos tamanhos de grãos dos minerais foram obtidos via Qemscan através do programa iDiscover[®] usando o diâmetro da esfera equivalente nas faixas mais grossas das partículas analisadas, 1,18 mm a 0,3 mm, de modo que o tamanho dos grãos são menores do que o tamanho das partículas. Esse intervalo foi escolhido com o auxílio de um microscópio estereoscópico onde se realizou uma estimativa preliminar do tamanho dos grãos. A Tabela 12 apresenta o tamanho médio D_{50} e a variância σ obtidos pela transformação dos parâmetros da distribuição lognormal ajustada aos dados.

Tabela 12. Parâmetros da distribuição de tamanho de grãos dos minerais das tipologias.

Parâmetros	Tipo 3		Tipo 4		IF		IFX	
	Hem.	Quart.	Hem.	Quart.	Hem.	Quart.	Hem.	Quart.
D_{50} (um)	140,05	169,18	109,95	137,55	142,83	150,59	107,66	156,65
σ	134,56	155,49	88,43	87,67	132,86	94,46	143,42	138,04

Como apresentado na Tabela 12, o D_{50} do principal mineral de ganga, quartzo, é maior do que os grãos de hematita, principal mineral portador de ferro, em todas as amostras. A amostra Tipo 4 apresenta os menores valores de D_{50} dos minerais, enquanto que Tipo 3 e IF possuem os tamanhos de grãos dos minerais maiores, assim como já observado por Mazzinghy *et al.* (2014). A granulometria dos minerais apresentada pelas tipologias também está de acordo com os resultados de Pires *et al.* (2015), que caracterizaram minérios de ferro provenientes desta região.

Forma dos grãos minerais

A forma dos grãos minerais pode ser caracterizada de diferentes formas de acordo com os descritores utilizados (Merkus, 2009; Nouri e Sola, 2018). Ela é um parâmetro da

microestrutura relacionada à geometria dos minerais, que pode ser descrita qualitativamente em função das dimensões dos eixos, diâmetro máximo de Ferret, e podem ser classificadas como granular ($x \cong y \cong z$), acicular ($x \gg y \cong z$) e tabular ($x \cong y > z$).

Os dados dos diâmetros foram obtidos via QemScan pelo programa iDiscover e exportados para o Excel para a classificação das formas de acordo com os descritores. A medida do diâmetro dos minerais referente ao terceiro eixo foi estimada por microscópio estereoscópico em imagens ortogonais das amostras (Figuras 48 e 49). A Tabela 13 apresenta a porcentagem das formas dos principais minerais que constituem as amostras.

De acordo com o resultado, a forma dos grãos de hematita é predominantemente tabular, com exceção daqueles encontrados na tipologia IFX, enquanto que os minerais de quartzo são majoritariamente granulares, independentemente da tipologia das amostras.

Tabela 13. Porcentagem das formas dos grãos minerais das tipologias

Formas	Tipo 3		Tipo 4		IF		IFX	
	Hem.	Quart.	Hem.	Quart.	Hem.	Quart.	Hem.	Quart.
Granular (%)	11,17	67,48	7,69	66,81	9,29	73,34	9,83	82,19
Acicular (%)	11,31	-	9,22	-	13,21	-	50,16	-
Tabular (%)	79,52	32,52	83,09	33,19	77,50	26,66	40,01	17,81

De acordo com o resultado, a forma dos grãos de hematita é predominantemente tabular, com exceção daqueles encontrados na tipologia IFX, enquanto que os minerais de quartzo são majoritariamente granulares, independentemente da tipologia das amostras.

As Figuras 48 a-d e 50 b apresentam imagens com profundidade de campo obtidas pela sobreposição de múltiplas fotos em focos distintos, de modo que é possível observar as características dos minerais nas três dimensões. Essas imagens foram obtidas com o auxílio do *software* Zeiss ZEN no modo Z-Stack. As Figuras 48 a-d são ortogonais e foram obtidas respectivamente paralela e perpendicular à direção do bandejamento das amostras.

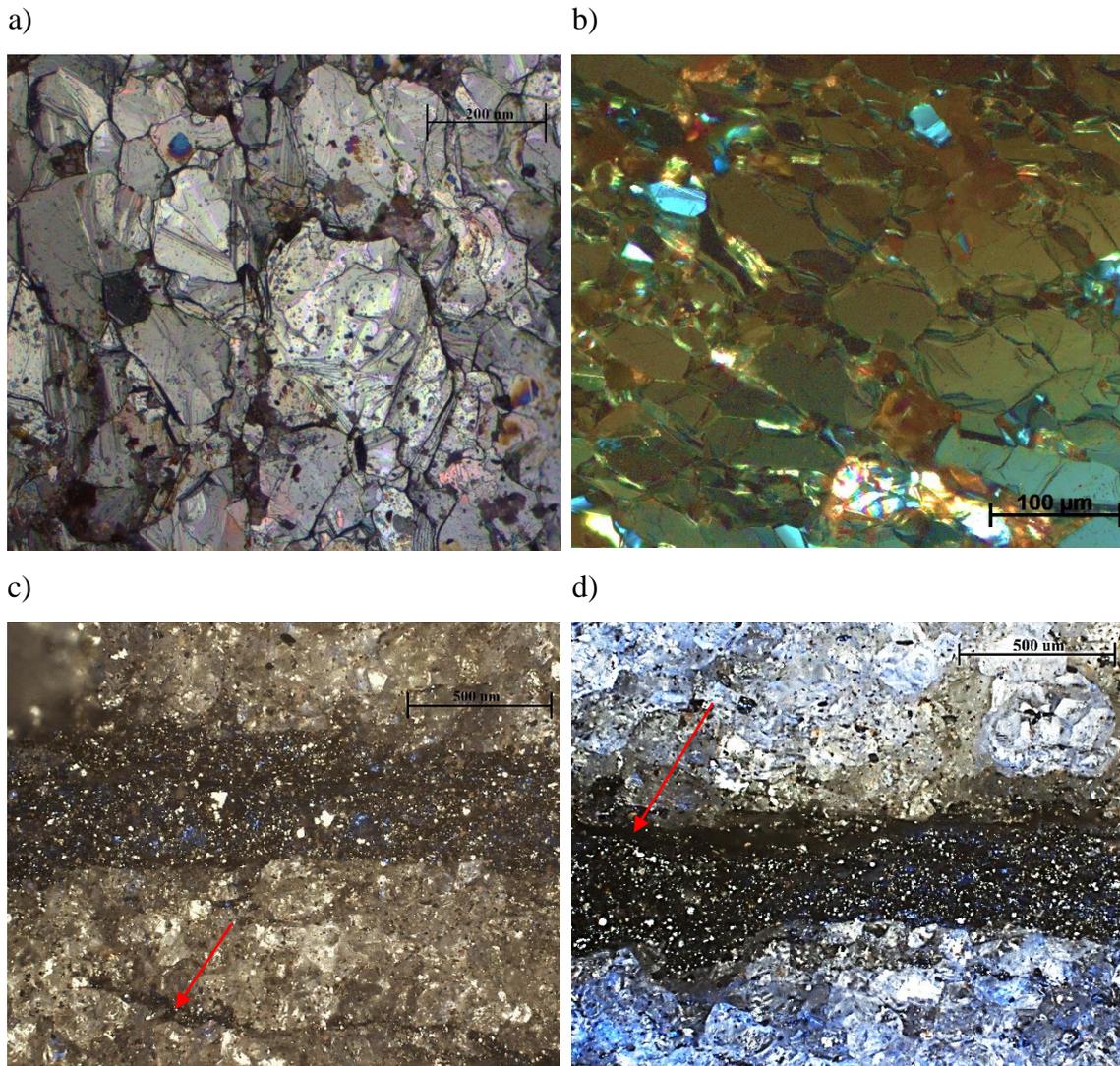


Figura 48. Imagens ortogonais com profundidade de campo, a) e b) paralelas, c) e d) perpendiculares ao plano de bandeamento ilustrando a propagação de trincas, obtidas por microscópio estereoscópico de superfícies fraturadas.

Os grãos de hematita se mostram subédricos, sendo predominantemente de forma tabular, o que caracteriza a sua matriz como lepidoblástica a lepidogranoblástica. Esse tipo de trama é caracterizada pela presença de clivagem¹ paralela ao plano basal dos cristais ou ao plano da foliação, como já reportado por Rosière *et al.* (2001), predominante nas tipologias Tipo 3 e IF. Na tipologia IFX essas características são acentuadamente

¹ Clivagem em petrologia está relacionada à orientação preferencial de grãos tabulares ou de outra forma planar de rochas. Neste plano ocorre com relativa facilidade o deslocamento da rocha, ou seja, a divisão em placas mais finas.

desenvolvidas onde prevalece a hematita especular e o deslocamento ocorre com relativa facilidade.

Os grãos de quartzo se apresentam com forma poligonal, equidimensionais e formam uma matriz granoblástica. Como pode ser observado na Figura 49 a-c esse mineral se apresenta na forma sacaroidal compactado (aspecto de grânulos de açúcar compactados).

Essas características estão em conformidade com as análises microscópicas apresentadas por Pires e Souza *et al.* (2015) que estudaram essas tipologias de minério de ferro do depósito da Serra do Sapo.

Esse resultado é reflexo direto da intensa deformação na qual essa formação ferrífera foi submetida, como destacaram Almeida-Abreu e Renger (2007) e Zacchi (2010). Esse tipo de processo geológico é crucial para as características microestruturais das rochas, principalmente quanto à forma dos grãos dos minerais (Rosière *et al.*, 2001).

Associação e interface entre os minerais

Essas características microestruturais, associação mineral e interface entre os grãos minerais representam como os grãos dos minerais estão distribuídos pela matriz do minério e como os contatos interfaciais dos grãos se apresentam, respectivamente.

A associação mineral aqui é tratada apenas em relação aos principais minerais, hematita e quartzo. Assim, é discutido o intercrescimento dos aglomerados de grãos de quartzo, ou matriz de quartzo, com os aglomerados de hematita, ou matriz de hematita. Paralelamente, também é discutida a forma da interface dessas associações entre os minerais, onde os contornos entre os grãos de hematita-hematita, hematita-quartzo e quartzo-quartzo são abordadas e estão resumidos no último parágrafo deste item.

Analisando macroscopicamente a estrutura da formação bandada (Figura 49a, 49b e 49c) observa-se que os grãos de quartzo estão associados entre si nas bandas de quartzo, fazendo um aglomerado de grãos de quartzo, assim como os grãos de hematita estão associados nas bandas de hematita. Na Figura 49a e 49c os aglomerados de quartzo e de hematita estão associados linearmente na direção da laminação, gerando interfaces retas. Na Figura 49b os aglomerados de hematita estão entrelaçados aos aglomerados de quartzo gerando complexa associação e interface.

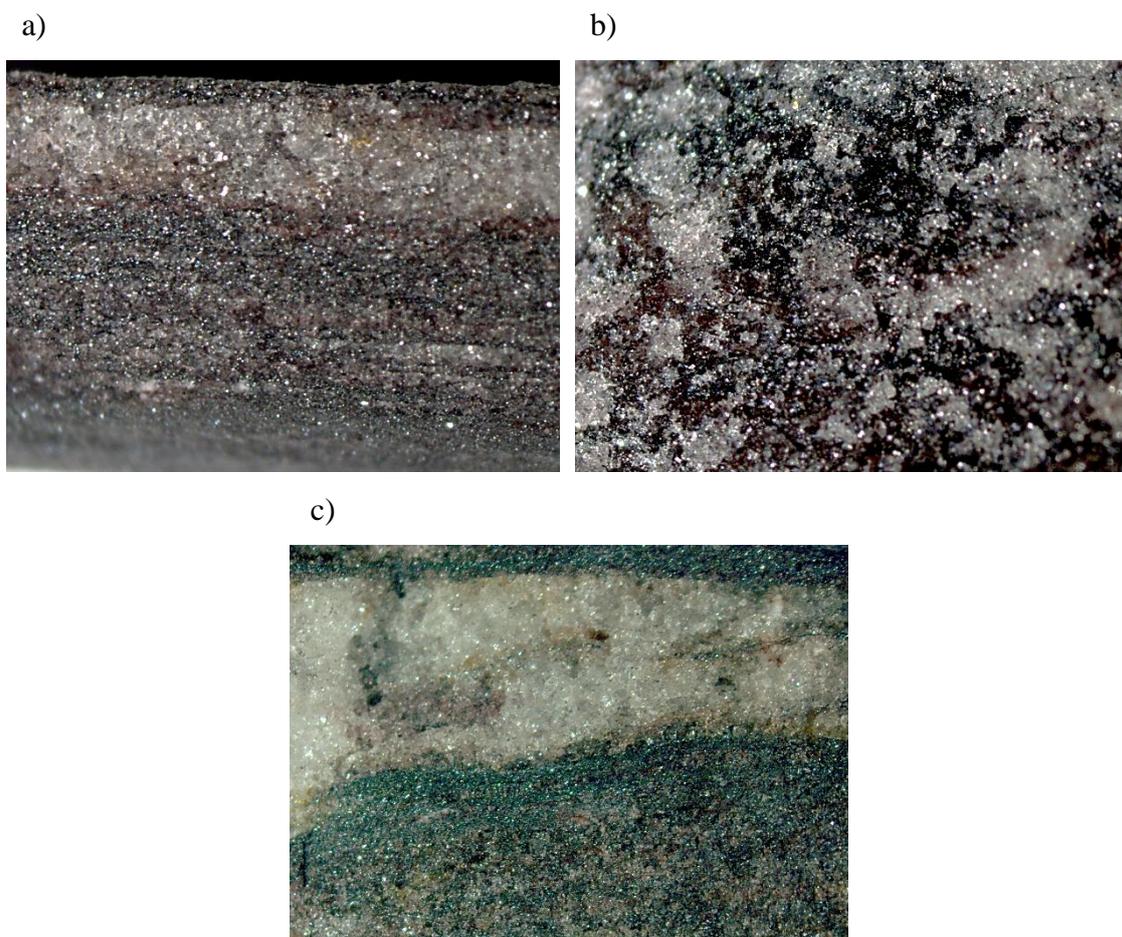


Figura 49. Aspecto macroscópico da estrutura das amostras, a) Tipo 3, b) Tipo 4 e c) IF.

Por outro lado, analisando microscopicamente a microestrutura, nota-se que nos aglomerados existem inclusões de outros minerais. A Figura 50a apresenta alguns cristais de quartzo que estão enclausurados na matriz de hematita. A imagem foi obtida em microscópio óptico com seção polida. A Figura 50b apresenta grãos de hematita que estão circundados na matriz de quartzo.

A partir do escaneamento das partículas via QEMSCAN e posterior análise das imagens quanto à existência de associações com minerais enclausurados em aglomerados foi possível quantificar as partículas com esse tipo de associação mineral. A Figura 51 apresenta partículas no intervalo de 1180-600 μm escaneadas com minerais enclausurados pela matriz ou aglomerado mineral.

Existem outras formas de associação mineral menos complexa onde os minerais semelhantes estão aglomerados e ligados a outros aglomerados. No entanto, a quantidade de associação em que as partículas estão finamente disseminadas e circundadas na matriz

(Figuras 51 e 50) reflete diretamente na complexidade da liberação mineral do minério. Esse tipo de associação exige um alto grau de cominuição das partículas para se obter um grau de liberação adequado. Um índice é aqui proposto para quantificar a associação mineral finamente disseminada, IA_{FD} . Ele é definido pelo quociente da quantidade de partículas com este tipo de associação mineral em relação à quantidade total de partículas analisadas.

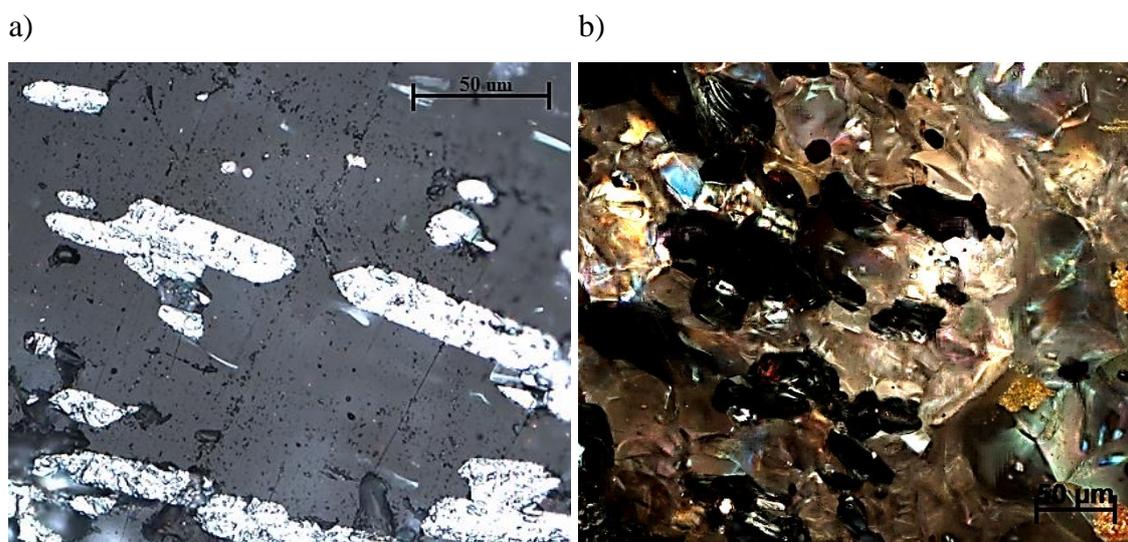


Figura 50. Micrografias das matrizes: (a) hematita e (b)quartzo obtidas em microscópio ótico respectivamente por seção polida e em superfície fraturada.

Os resultados foram extraídos das análises QEMSCAN e processados no Excel[®]. A Tabela 14 apresenta os resultados de IA_{FD} das tipologias. A amostra Tipo 4 apresenta um alto IA_{FD} , que é reflexo da sua complexa associação e características macroscópicas, como discutido previamente. A amostra IFX, conforme observado, é produto de intensa lixiviação do quartzo o que resulta em pouca associação com o quartzo.

Tabela 14. Índice de associação de minerais finamente disseminados e enclausurados

	Tipo 3	Tipo 4	IF	IFX*
$IA_{FD}(\%)$	12,4	39,6	10,0	1,7

*IFX está associada principalmente com Gibbsita

A interface predominante na matriz de quartzo é caracterizada por apresentar contatos retos sem orientação preferencial e isso é reflexo dos grãos poligonais bem definidos de quartzo (Figura 50a e 50b). Do mesmo modo, as interfaces com os grãos de hematita são retas e bem regulares, microscopicamente (Figura 50a e 48b). A interface na matriz de hematita é mais complexa devido à forma dos grãos e à sua trama. No plano basal de cristais tabulares de hematita os contatos são retos e estão preferencialmente orientados no plano de foliação e que define a clivagem¹ (Figura 48a e 48b), como também observado por Rosière *et al.* (1996 e 2001). No plano perpendicular ao basal as interfaces são menos regulares, com contornos lobados a retos.



Figura 51. Partículas no intervalo 1180-600 um escaneadas via QEMSCAN com minerais enclausurados, a cor vermelha (escura) representa a hematita e a cor rosa (clara) representa o quartzo.

4.1.2.2 Análise Química e Mineralógica das Amostras

Os resultados das análises químicas dos principais óxidos e mineralógicas de amostras representativas das tipologias são apresentados respectivamente nas Tabelas 15 e 17, e representam a amostra global de cada tipologia.

Analisando as Tabelas 15 e 16, pode-se classificar as tipologias em dois grupos de minérios. Um grupo é caracterizado por apresentar baixos teores de óxido de ferro e PPC, sua ganga é constituída principalmente por SiO₂, representado por Tipo 3, 4 e IF. O outro grupo apresenta altos teores de óxido de ferro e de PPC, sendo sua ganga constituída principalmente por Al₂O₃, representado pelas tipologias IFX e Canga.

Tabela 15. Composição química global em massa das tipologias obtida por FRX (%)

Tipologia	Fe₂O₃*	SiO₂	Al₂O₃	SO₃	MnO	TiO₂	P₂O₃	K₂O	PPC**
Tipo 3	44,87	52,68	0,54	1,21	0,04	0,03	0,05	0,11	0,28
Tipo 4	47,43	49,44	1,37	1,12	0,03	0,03	0,00	0,20	0,31
IF	52,79	42,87	2,78	0,85	0,20	0,00	0,14	0,11	0,13
IFX	69,94	10,43	15,03	0,85	0,10	0,01	0,27	0,07	3,10
Canga	68,48	5,43	14,37	0,93	0,06	0,71	0,11	0,14	9,68

*Fe₂O₃ é o teor de óxido de ferro total; **PPC perda por calcinação.

A composição mineralógica apresentada na Tabela 16 mostra que a hematita é o principal mineral portador de ferro das tipologias Tipo 3, 4, IF e IFX e o quartzo como o principal mineral não portador de ferro. Nessas tipologias, a magnetita ocorre em baixas quantidades, assim como a goethita. Diferentemente, a Canga é constituída por goethita e hematita como os minerais portadores de ferro e a gibbsita e quartzo como os minerais principais minerais não portadores de ferro.

Como pode ser observado nas Figuras 5 e 26, respectivamente das seções 2.1.3. e 3.1, que descrevem a litoestratigrafia da formação ferrífera aqui estudada, as amostras IFX e Canga estão localizadas mais superficialmente. Assim sendo, essas tipologias foram expostas a intensos processos geológicos superficiais, como o intemperismo, que lixiviaram ao longo dos anos os minerais de quartzo e enriqueceram em ferro essas tipologias, como também na adição de materiais sedimentares e orgânicos (Dorr 1964 e Rosière 2004).

Tabela 16. Composição mineralógica global das tipologias obtida por DRX (%)

Mineral	Tipo 3	Tipo 4	IF	IFX	Canga
Hematita	42,2	48,9	53,2	77,7	40,3
Magnetita	0,9	0,8	1,2	1,8	0,0
Goethita	1,6	1,0	0,8	2,3	49,4
Quartzo	54,3	48,0	44,0	9,1	4,0
Caulinita	0,8	1,1	0,5	4,5	1,0
Gibbsita	0,1	0,1	0,0	3,2	4,7
Muscovita	0,2	0,2	0,3	1,4	0,6

4.2 PARTÍCULAS GROSSAS

4.2.1 PÊNDULO DUPLO DE BOND

No caso deste ensaio a intensidade de energia específica aplicada (kWh/t) às partículas é relativamente baixa e a uma taxa de carregamento moderadamente alta, controlada pela gravidade e ângulo do pêndulo (Saedi *et al.*, 2017). A distribuição granulométrica resultante desse ensaio é caracterizada por apresentar predominantemente duas populações de partículas, uma próxima à faixa de tamanho inicial, produzida por falha de tração, e outra faixa de partículas menores, resultante dos esforços de compressão na região do contato (Kelly e Spottiswood, 1990; Wills, 2016).

A partir dos dados do ensaio de cada partícula é calculado o índice de trabalho de Bond W_i , o qual é apresentado na Tabela 17. Os resultados são apresentados na Figura 52, onde os dados foram melhor ajustados à distribuição log-normal.

As tipologias I.F e I.F.X. não foram ensaiadas pela indisponibilidade de material suficiente nas faixas deste ensaio. Das quatro tipologias ensaiadas, Tipo 3, Tipo 4, Canga e blend elas apresentam diferenças significativas que podem ser notadas na figura. Embora as energias medianas E_{m50} sejam muito similares, exceto a Canga, a inclinação da curva varia bastante, mesmo estando as partículas contidas num mesmo intervalo de tamanhos. Essa inclinação está relacionada diretamente com a homogeneidade do material, que por sua vez é dependente da distribuição de trincas pré-existentes, sua quantidade e tamanho, como também devido à forma das partículas (Tavares 2007; Krogh 1980).

Para descrever tal variabilidade estatisticamente, ordenou-se os resultados atribuindo $i = 1, 2, 3, \dots, N$ seguindo do menor para o maior valor do resultado observado, sendo N o número de observações. A distribuição de probabilidades cumulativa da energia específica de fratura $P(E_m, i)$ é aproximada por:

$$P(E_{m,i}) = \frac{i - 0,5}{N} \quad \text{eq. 20}$$

Os pares resultantes $[E_{m,i}, P(E_{m,i})]$ são bem ajustados e expressos como uma linha reta quando são lançados num gráfico log-normal, de acordo com a Figura 52, a qual pode ser bem representada por:

$$P(E_{m,i}) = \delta \ln E_{m,i} + \beta \quad \text{eq. 21}$$

onde β é constante, δ é o coeficiente angular que está relacionado diretamente com a homogeneidade do material e $P(E_{m,i})$ é a probabilidade cumulativa que varia de 0 a 1.

Para uma energia de impacto mediana $E_{m,50}$, onde 50% das partículas são quebradas, tem-se $P(E_{m,50}) = 0,5$, substituindo na equação 21 e isolando a constante β tem-se:

$$\beta = 0,5 - \delta \ln E_{m,50} \quad \text{eq. 22}$$

combinando as equações 21 e 22, chega-se à relação

$$\frac{E_{m,i}}{E_{m,50}} = \exp\left(\frac{P(E_{m,i}) - 0,5}{\delta}\right) \quad \text{eq. 23}$$

Se os parâmetros da distribuição acima, como o número de homogeneidade α , e $E_{m,50}$ são muito similares entre certas amostras, a distribuição de probabilidades é independente da tipologia, ou seja, a distinção entre as tipologias é irrelevante, caso contrário a distinção é relevante e a distribuição de probabilidades depende das tipologias.

Para analisar se a distinção entre as tipologias é relevante, um teste estatístico não paramétrico foi realizado, uma vez que as distribuições de probabilidades das tipologias não seguem a distribuição normal. O teste realizado foi o teste de Kruskal-Wallis o qual é alternativo ao teste F da análise de variância (Montgomery, 2013). Ele é indicado para analisar se diferentes funções de distribuição de probabilidades são semelhantes ou não.

Mais detalhes do teste e do procedimento de execução podem ser encontrados em outra publicação (Kruskal e Wallis, 1952).

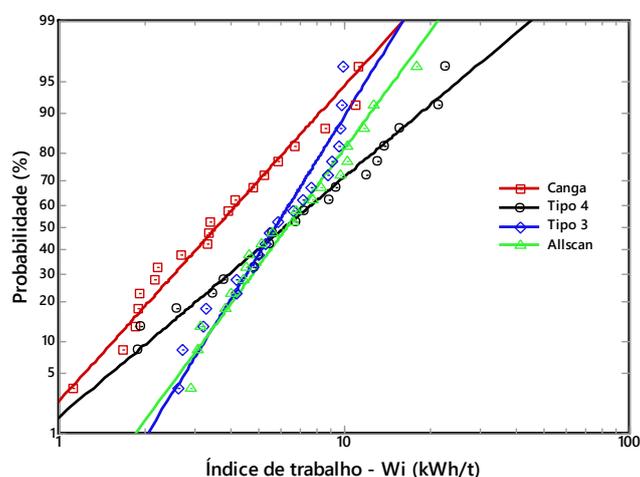


Figura 52. Distribuição de energia de fratura das tipologias ensaiadas no pêndulo duplo de Bond.

O teste foi realizado assumindo a hipótese nula de que não há diferença entre as tipologias. Para um nível de significância de 0,05, os valores-p inferiores a este significam a rejeição da hipótese nula, ou seja, há diferença entre as tipologias. A comparação um a um e em grupos é apresentada na Tabela 18, onde é apresentado os valores-p.

Tabela 17. Resultados do ensaio pêndulo duplo de Bond e parâmetros das distribuições

Parâmetro	Tipo 3	Tipo 4	I.F.	I.F.X	Canga	Blend
ρ (g/cm ³)	3,54	3,45			3,26	3,16
W_I (kWh/t)	6,24	8,32	-	-	4,34	7,15
E_{m50} (kWh/t)	5,68	6,20	-	-	3,37	6,11
σ	2,54	6,29			2,97	3,93
δ	0,659	0,342	-	-	0,451	0,559
C_B (J/mm)	0,375	0,4	-	-	0,205	0,361

Tabela 18. Valores-p do teste estatístico de Kruskal-Wallis

Tipologias	Tipo 3	Tipo 4	Canga	Blend
Tipo 3	-	0,646	0,016	0,589
Tipo 4	0,646	-	0,020	0,850
Canga	0,016	0,020	-	0,009
Blend	0,589	0,850	0,009	-
Tipo 3 e Tipo 4	-	-	0,022	0,841

Os resultados das comparações mostram que os valores-p da canga são inferiores a 0,05 e a hipótese nula é rejeitada, assim, a Canga se diferencia de todas as outras tipologias. Para as outras tipologias, os valores-p foram superiores a 0,05 e a hipótese nula não foi rejeitada. Isso pode ser interpretado de duas formas, ou não há diferença significativa na distinção das tipologias, quanto à distribuição de energia de fratura de partículas grossas, ou pode ser que o teste estatístico não foi capaz de detectar alguma diferença.

Embora os resultados apresentados acima e o teste estatístico realizado mostrem uma resposta bem similar para as tipologias, exceto a Canga, a fragmentação se mostra bem diferente. A Figura 53 apresenta as distribuições granulométricas das tipologias resultantes do ensaio. Como pode ser observado, as progênies geradas são quantitativamente bastante distintas. A tipologia Tipo 4 que possui W_i maior apresentou pouca fragmentação em contraste com a tipologia Tipo 3 que se fragmentou intensamente. Em outras palavras, a tipologia Tipo 4 recebeu mais energia e mesmo assim apresentou pouca fragmentação, se mostrando bastante competente em relação às demais.

Quanto à forma das curvas de distribuição das progênies, a Canga tem uma curva diferente das demais e não apresenta um ponto de inflexão adicional. Abaixo desse ponto de inflexão há um acúmulo de material nas faixas inferiores, enquanto que nas faixas logo acima há uma escassez. Tavares e Neves (2008) e King (2001) observaram esse comportamento de determinados materiais e constataram a não normalização da distribuição abaixo desse ponto. Essa característica é bastante relevante para propósitos de modelagem e será mais detalhadamente discutida nas seções posteriores.

Fazendo uma analogia à etapa de britagem, onde o mecanismo de quebra é similar ao ensaio, sem considerar a forma das partículas geradas após a fratura, a tipologia Tipo

4 necessitaria de vários eventos de fratura até entrar na faixa de tamanho adequada para as etapas posteriores.

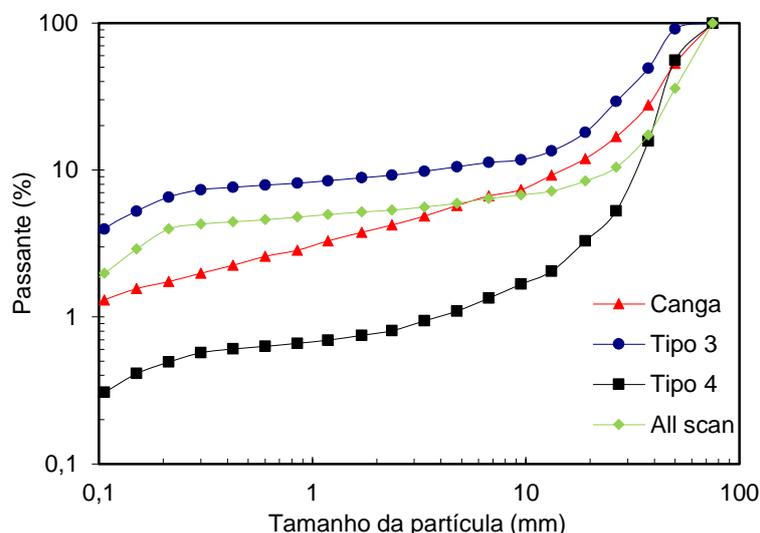


Figura 53. Distribuições granulométricas das tipologias resultante do ensaio de pêndulo duplo de Bond.

4.2.2 POINT LOAD TEST (PLT)

Neste ensaio, como descrito na metodologia, as partículas são carregadas até que a fratura ocorra a uma taxa de carregamento baixa e constante sob duas pontas cônicas de raio de 5 mm. Devido à carga concentrada que é aplicada às partículas a fratura ocorre principalmente devido às tensões de tração. Essas tensões são geradas internamente e de forma perpendicular à direção de carregamento (Oka e Majima, 1970). As progênies geradas desse ensaio são dois ou três fragmentos grandes e uma pequena porção de partículas finas geradas devido aos esforços de compressão gerados nos contatos dos punções com a partícula.

Neste ensaio, as partículas fraturam principalmente como resultado dos esforços de tração. De acordo com Hiramatsu e Oka (1966), a resistência máxima à tração pode ser aproximada pela equação 10 apresentada na seção 2.3.2.5. Os resultados deste ensaio são descritos estatisticamente como apresentado na seção 4.2.1. A distribuição de probabilidades da resistência à carga pontual das partículas irregulares é apresentada na Figura 54.

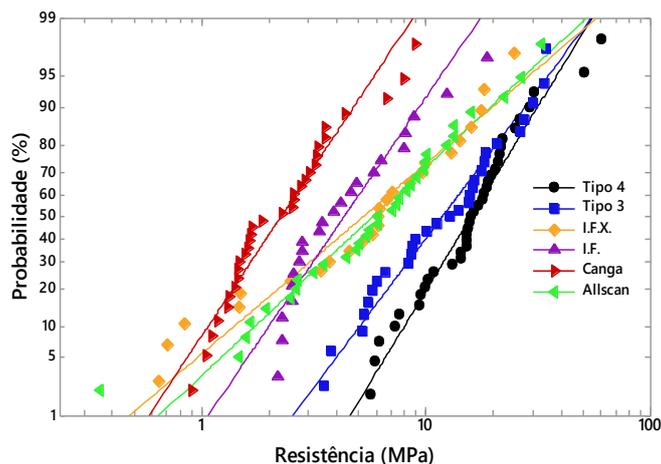


Figura 54. Distribuição de resistências a carga pontual das tipologias.

Comparando-se as distribuições de resistências a carga pontual das tipologias, percebe-se uma tendência similar à distribuição de energias específica da Figura 52, onde as tipologias Tipo 3 e Tipo 4 se apresentam bastante semelhantes e a canga se apresenta menos resistente. Os dados da distribuição estão sumarizados na Tabela 19.

A Figura 55 mostra o resultado de cada amostra ensaiada e os $I_{S(20)}$ das tipologias. Como pode ser observado, o $I_{S(20)}$ das tipologias segue a mesma ordem de competência obtida no ensaio do pêndulo duplo de Bond.

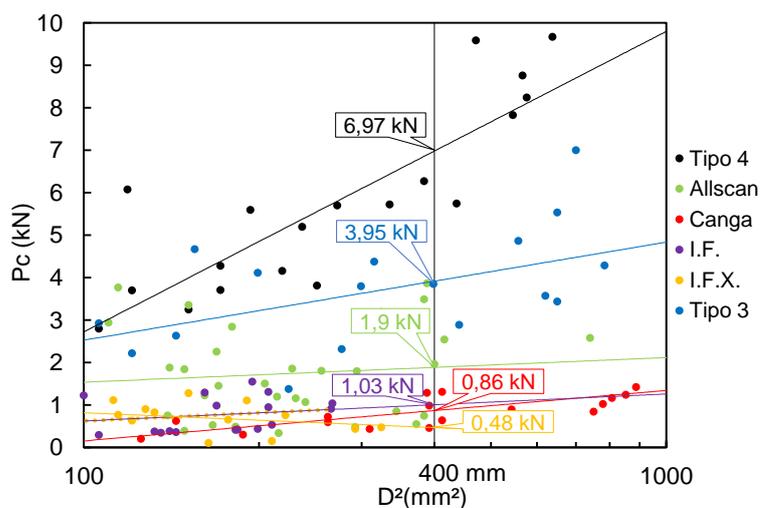


Figura 55. Procedimento para determinação do $I_{S(20)}$.

Quanto ao resultado para analisar a anisotropia $I_{a(20)}$ das tipologias, as partículas lamelares ensaiadas com orientação paralela à direção de carregamento, como ilustrada na Figura 41, foram ensaiadas seguindo a condição descrita no item 3.4.7. Devido à ausência de partículas grossas de algumas tipologias e que satisfaçam a condição $0,3 L < D < L$ na orientação paralela às bandas, conseguiu-se amostras suficientes apenas da tipologia Tipo 4 e Tipo 3. Tal dificuldade é explicada pela fratura preferencialmente seguindo a direção das bandas e que geram partículas lamelares, ou seja, $D < 0,3 L < L$ na orientação paralela da Figura 42. O procedimento para obtenção do índice de resistência a carga pontual paralelo $I_{S//(20)}$ é idêntico ao obtido perpendicularmente. Os resultados estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Resumo dos dados do ensaio de carga pontual

Parâmetro	Tipo 3	Tipo 4	I.F.	I.F.X	Canga	Blend
ρ (g/cm ³)	3,54	3,45	4,01	4,31	3,26	3,16
$I_{S(20)}$ (MPa)	11,19	17,43	2,56	1,23	2,15	4,75
$I_{S//(20)}$ (MPa)	7,35	9,06	-	-	-	-
I_a	0,65	0,52	-	-	-	-
I_{S50}	11,35	18,5	3,65	6,14	1,64	6,11
σ	9,14	11,76	3,98	6,33	1,76	7,33
δ	0,44	0,51	0,47	0,28	0,48	0,34

Como pode ser observado nos resultados, há uma diferença significativa da resistência dependendo da orientação em que o carregamento é aplicado sobre as partículas. Esse grau de anisotropia se torna relevante para a forma com a qual as progênies são geradas a partir de partículas grossas. Devido a essa diferença de propriedade mecânica, as partículas grandes irão fraturar principalmente nessa orientação de fraqueza, tendendo a gerar partículas de formato aciculares, como ilustrado na Figura 56. Essa característica pode influenciar significativamente o produto das etapas iniciais de britagem, principalmente quando britadores de mandíbula ou cônico são usados, onde partículas alongadas e delgadas podem passar sem serem classificadas para a zona de quebra do equipamento.



Figura 56. Esquema do ensaio de carga pontual paralelo à formação bandada, ilustrando o caminho preferencial da fratura.

4.3 PARTÍCULAS DE TAMANHOS INTERMEDIÁRIOS

4.3.1 ÍNDICE DE ABRASÃO LOS ANGELES LA E DE ABRASIVIDADE

Embora a fragmentação superficial seja dominante ensaio, ocorrem também impactos de maior magnitude, os quais são estimados serem maiores do que 0,3 kWh/t, equivalente a um impacto de uma bola de 10 mm caindo aproximadamente de 3/4 do diâmetro do moinho de 700 mm. Assim sendo, o resultado deste ensaio mostra uma distribuição de progênies oriunda de fragmentação superficial, como também de impactos moderados.

Os valores do índice de abrasão das tipologias testadas estão destacados na Figura 57 e apresentados de forma resumida na Tabela 20. A tipologia Tipo 3 apresentou índice bastante superior em relação às outras tipologias, enquanto que Canga e Tipo 4 apresentaram índices respectivamente mais baixos e similares.

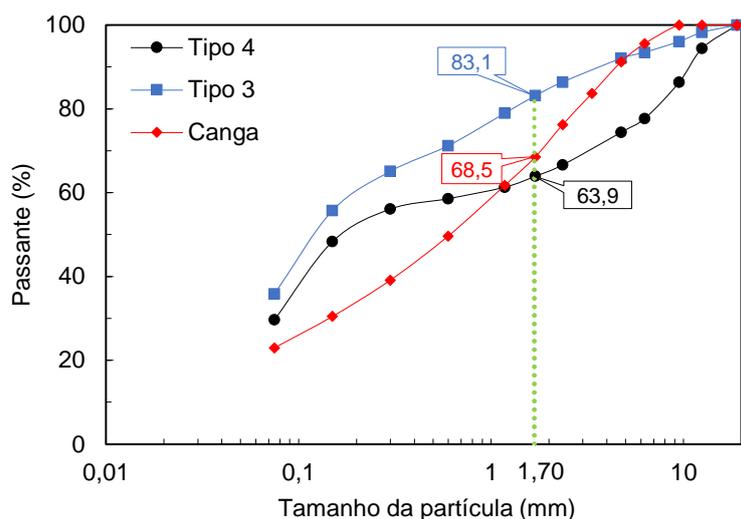


Figura 57. Distribuição das progênies resultantes do ensaio LA e os respectivos índices.

Além do índice de abrasão *LA*, outras informações podem ser extraídas deste ensaio. Observando a Figura 57, apesar dos índices das tipologias Tipo 4 e Canga serem semelhantes, as distribuições granulométricas são muito distintas. Cerca de 15% das partículas da tipologia Tipo 4 permaneceram na faixa de tamanho inicial do ensaio e sobreviveram aos impactos moderados das bolas, como também ao desgaste, enquanto que apenas 5% da Tipo 3 sobreviveram. As partículas da Canga foram todas fragmentadas e desgastadas, gerando uma distribuição de progênies em proporções semelhantes nas faixas de tamanho. As amostras dos Tipos 3 e 4 apresentaram cúmulo de material abaixo de 0,3 mm, enquanto a curva do Tipo 4 dá indícios que as partículas sofreram principalmente quebra por abrasão e resistiram mais aos impactos das bolas, diferentemente das outras tipologias que, aparentemente, fragmentaram como resultado de estilhaçamento (Kelly e Spottiswood, 1990).

O ensaio de abrasividade *A_i* mede o desgaste causado por uma certa quantidade de massa de partículas por uma palheta de aço. A energia dos impactos que a palheta sofre das partículas depende da massa das partículas, além das velocidades dos rotores, e pode ser descrita pela energia cinética. Assim, entre outras características, a resistência ao impacto das partículas tem uma influência significativa no desgaste das palhetas, de modo que as partículas maiores permanecem intactas por mais tempo e impactando a palheta com maiores forças.

O resultado deste ensaio é a perda de massa da palheta pós ensaio e, a partir dele, pode-se estabelecer correlações de taxa de desgaste de equipamentos de cominuição. A perda de massa da palheta tem correlações significativas com a competência das partículas, bem como com a presença de minerais muito abrasivos que compõem o minério. A Tabela 20 apresenta os resultados do A_i juntamente com os teores de quartzo, o qual é o mineral mais abrasivo presente nessas amostras de minério, bem como a porcentagem de partículas relativamente grandes sobreviventes, retido em 2,36 mm, $R_{2,36}$, que permanecem aplicando impactos significativos ao longo do tempo do ensaio.

Tabela 20. Parâmetros e índices dos ensaios LA e abrasividade A_i

Parâmetro	Tipo 3	Tipo 4	I.F.	I.F.X	Canga	Blend
LA (%)	83,14	63,94	-	-	68,55	-
A_i (g)	0,1342	0,4752	0,0742	0,0253	0,0160	0,2817
SiO_2 (%)	54,3	48	44	9,1	4	46
$R_{2,36}$ (%)	10,68	28,13	8,27	16,14	18,11	18,44
$(SiO_2 * > 2,36)^{\frac{1}{2}}$ (%)	24,07	36,75	19,07	12,14	8,46	29,13

Tipo 4, Blend e Tipo 3 apresentaram os maiores valores A_i enquanto que a Canga, IF e IFX apresentaram os menores índices. O parâmetro $R_{2,36}$ sozinho não explica os valores A_i , como observado na Tabela 20. A Canga apresentou valor alto, mas baixos valores de SiO_2 e A_i . O parâmetro de SiO_2 também não explica sozinho a variável resposta A_i , pois o IF apresentou alto teor de SiO_2 e baixos valores do parâmetro $R_{2,36}$ e de A_i . A Figura 58 mostra a correlação dos dois parâmetros na variável resposta A_i . Fazendo uma ponderação com pesos iguais, n_1 e n_2 para os dois parâmetros, o resultado A_i para esses minérios de ferro é bem descrito por uma função exponencial em função dos dois parâmetros, equação 24.

$$A_i = 0,0061 * \exp[0,122 * (SiO_2^{n_1} * R_{2,36}^{n_2})^{1/(n_1+n_2)}] \quad \text{eq. 24}$$

O coeficiente de correlação R^2 entre a equação 24 e os resultados do ensaio A_i para minério de ferro foi de 0,99, o que mostra uma excelente correlação.

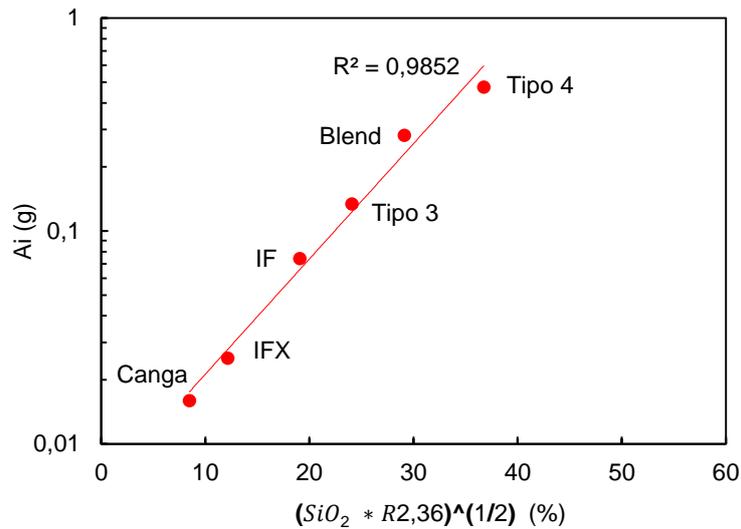


Figura 58. Correlação dos parâmetros SiO_2 e $>2,36$ mm com o índice A_i .

No entanto, a energia específica dos impactos que as partículas sofrem neste ensaio depende somente das velocidades de rotação dos rotores, de forma análoga ao ensaio no *Rotary Breakage Tester* (JKRBT). Deste modo, a fragmentação das amostras neste ensaio é oriunda de uma mesma energia específica (equação 25), de modo que, a distribuição granulométrica pode ser analisada para comparar a competência das diferentes tipologias.

$$E_{KS}(J/g) = \frac{v_p^2}{2} \quad \text{eq. 25}$$

Um resultado relevante pode ser obtido a partir da distribuição granulométrica das partículas ensaiadas. Fazendo uma analogia ao ensaio anterior a distribuição de progênies é resultante de abrasão e de impactos moderados. A Figura 59 apresenta as distribuições granulométricas e pode-se notar uma grande semelhança das curvas do Tipo 3, Tipo 4 e Canga com a do ensaio anterior, o que mostra similaridade da abrasão e impactos sofridos pelas partículas nos dois ensaios. Desta forma, a partir da Figura 59 e por indução pode-se perceber como as tipologias IF, IFX e Blend (Allscan) se comportariam no ensaio anterior LA.

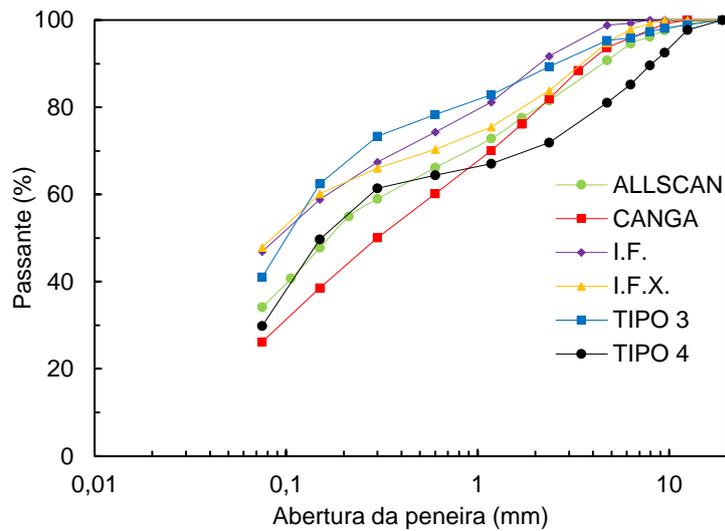


Figura 59. Distribuição granulométrica resultante do ensaio Ai.

Uma comparação entre as distribuições granulométricas resultantes dos ensaios Ai e LA mostra que a intensidade de energia aplicada e a forma de carregamento são bastante similares, sendo de maior intensidade para o ensaio Ai. A Figura 60 apresenta o índice LA, passante em 1,70 mm, em função de um índice retirado da distribuição granulométrica do ensaio Ai, passante em 1 mm, para vários tipos de minérios e diferentes tipos de minério de ferro.

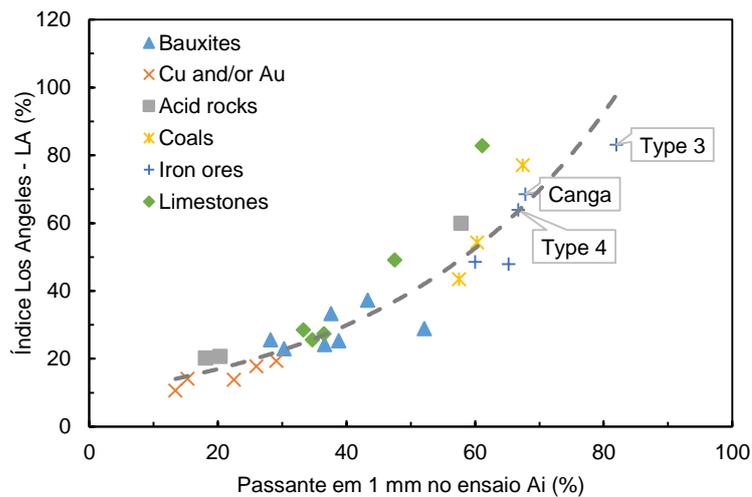


Figura 60. Relação dos parâmetros LA e com o passante na peneira de 1 mm do produto do ensaio Ai para diferentes tipologias (modificado de Tavares e Silveira, 2008).

4.3.2 ENSAIO DE QUEDA DE PESO DWT

No ensaio de DWT, as partículas sofrem impactos de alta energia e a comparativamente altas taxas de carregamento com o propósito de provocar o estilhaçamento das mesmas. A partir da distribuição de tamanhos gerada na quebra das partículas, pode-se relacioná-las com a energia aplicada de acordo com o modelo descrito por Napier-Munn *et al.* (1996) pelo ajuste dos parâmetros A e b da equação 13.

A Figura 61 ilustra a relação t_{10} em função da energia para as faixas entre 63 x 13,2 mm, conforme a equação 13, e a Tabela 21 apresenta os parâmetros de ajuste A e b das tipologias ensaiadas nas faixas entre 63 x 13,2 mm e 63 x 4,75 mm.

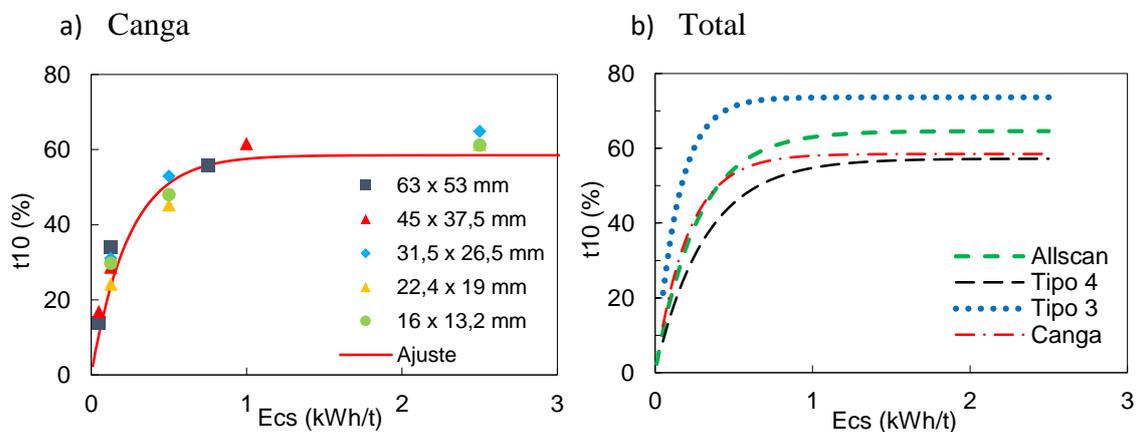


Figura 61. Ajuste dos parâmetros A e b para a relação do t_{10} em função de E_{cs} para as faixas entre 63 x 13,2 mm da Canga (a) e em todas as amostras (b).

O produto destes parâmetros está correlacionado com a fragmentação das partículas em determinadas energias e, quanto menor o seu valor, mais competente é o minério. Como pode ser observado na Tabela 21, Tipo 4 apresenta menor $A*b$ seguido de Canga, Blend e Tipo 3. Essa foi a mesma ordem de competência observada no ensaio de britabilidade.

A Figura 62 compara as distribuições de tamanho das progênes geradas do ensaio DWT para as maiores energias de entrada em cada faixa de tamanho de cada tipologia. O produto destes parâmetros está correlacionado com a competência das partículas e, quanto menor o seu valor, mais competente o minério.

Tabela 21. Parâmetros do modelo que relaciona t10 com a Ecs.

Parâmetro	Tipo 3	Tipo 4	I.F.	I.F.X	Canga	Blend
A (63 – 4,75 mm)	72,55	58,36	-	-	58,52	64,60
b (63 – 4,75 mm)	3,89	3,19	-	-	4,79	3,70
A (63 – 13,2 mm)	72,67	56,23	-	-	59,04	60,89
b (63 – 13,2 mm)	6,99	3,45			5,13	3,99
A*b (63 – 13,2 mm)	507,96	193,99			302,87	242,95

Uma característica interessante da distribuição granulométrica das tipologias Tipo 4, Tipo 3 e Blend é a presença de um ponto de inflexão adicional na faixa entre 0,425 e 0,212 mm diferentemente da Canga, na qual ele é inexistente. Tal peculiaridade é observada também já havia sido observada nas distribuições granulométricas resultantes dos outros ensaios, como Wi, LA e abrasividade Ai. Como brevemente discutido no ensaio Wi de impacto de Bond, esse ponto de inflexão adicional, sempre que presente na distribuição granulométrica, significa que há um acúmulo de partículas nas faixas imediatamente abaixo desse valor enquanto que nas faixas acima há uma diminuição na proporção de partículas presentes.

Além do fato explicado acima, tal padrão é sobretudo relevante para a modelagem e simulação de processos de cominuição. Como observado por King (2001) e Tavares e Neves (2008), abaixo desse ponto de inflexão a função quebra deixa de ser normalizável, em outras palavras as distribuições de tamanho das progênies fragmentadas não se sobrepõe quando lançadas em gráfico em função do tamanho representativo inicial, como bem ilustrado na Figura 63, que mostra uma função quebra não normalizável com o intervalo onde a mesma deixa de ser normalizável (Tipo 4, Tipo 3 e Blenda) e outra normalizável (Canga).

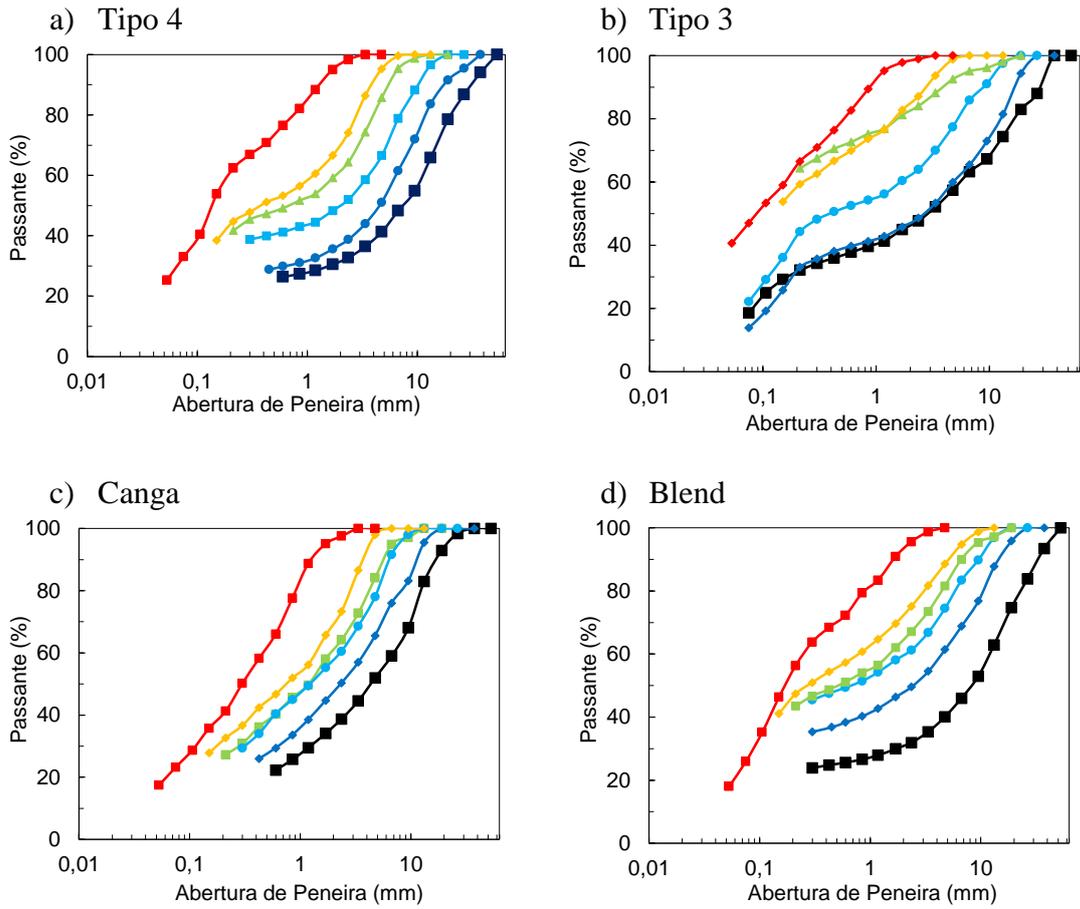


Figura 62. Distribuição das progênes gerada com Ecs de 2,5 kWh/t para as seis faixas de tamanho ensaiadas.

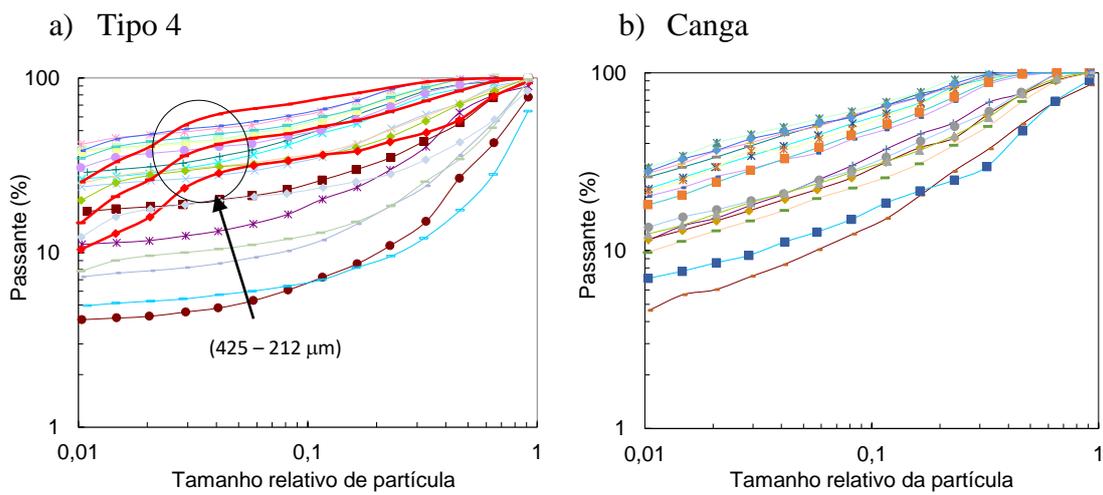


Figura 63. Função quebra resultante do ensaio DWT, (a) função quebra não normalizável, (b) função quebra normalizável.

Os dados para os tamanhos mais grossos que o ponto de inflexão são apresentados num gráfico de curvas t_{ns} , na qual t_n é o passante em $1/n$ do tamanho representativo original, em função de t_{10} para a construção da função quebra (Figura 64), que é utilizada para a modelagem e simulação de britadores e moinhos (Napier-Munn *et al.*, 1996). Tavares e Neves (2008) ressaltam que ao não se considerar um limite para a normalização tem-se uma superestimação da produção de partículas finas na distribuição granulométrica das progênies.

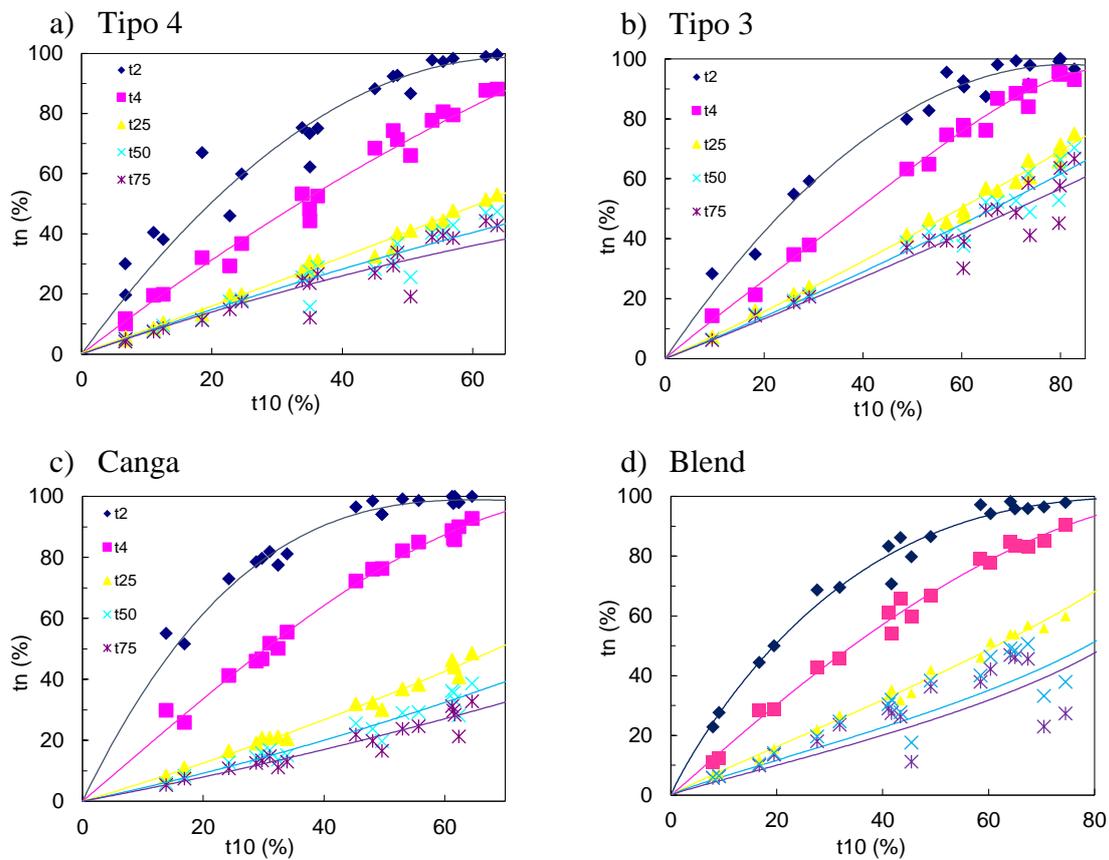


Figura 64. Função quebra utilizada para reconstruir a distribuição de tamanho das progênies do DWT.

A Figura 65 compara a distribuição granulométrica resultante de um impacto de 2,5 kWh/t aplicado às partículas de tamanho grossos, médios e finos. Para a faixa de tamanhos mais fina, a Canga se mostra mais competente que as demais. Já para as partículas médias e grossas a Canga se apresenta menos competente. Por se tratar de uma

mistura entre as tipologias, em alguns casos a Blend (Allscan) se assemelha ao Tipo 3 e, em outras, ao Tipo 4.

Uma comparação adicional pode ser feita entre o índice LA e os parâmetros A*b das tipologias de acordo com Tavares e Silveira (2008). A Figura 66 mostra uma boa correlação descrita matematicamente pela equação 26 com um coeficiente de correlação R² de 0,746.

$$A * b = 0,927LA^{1,3276} \quad \text{eq. 26}$$

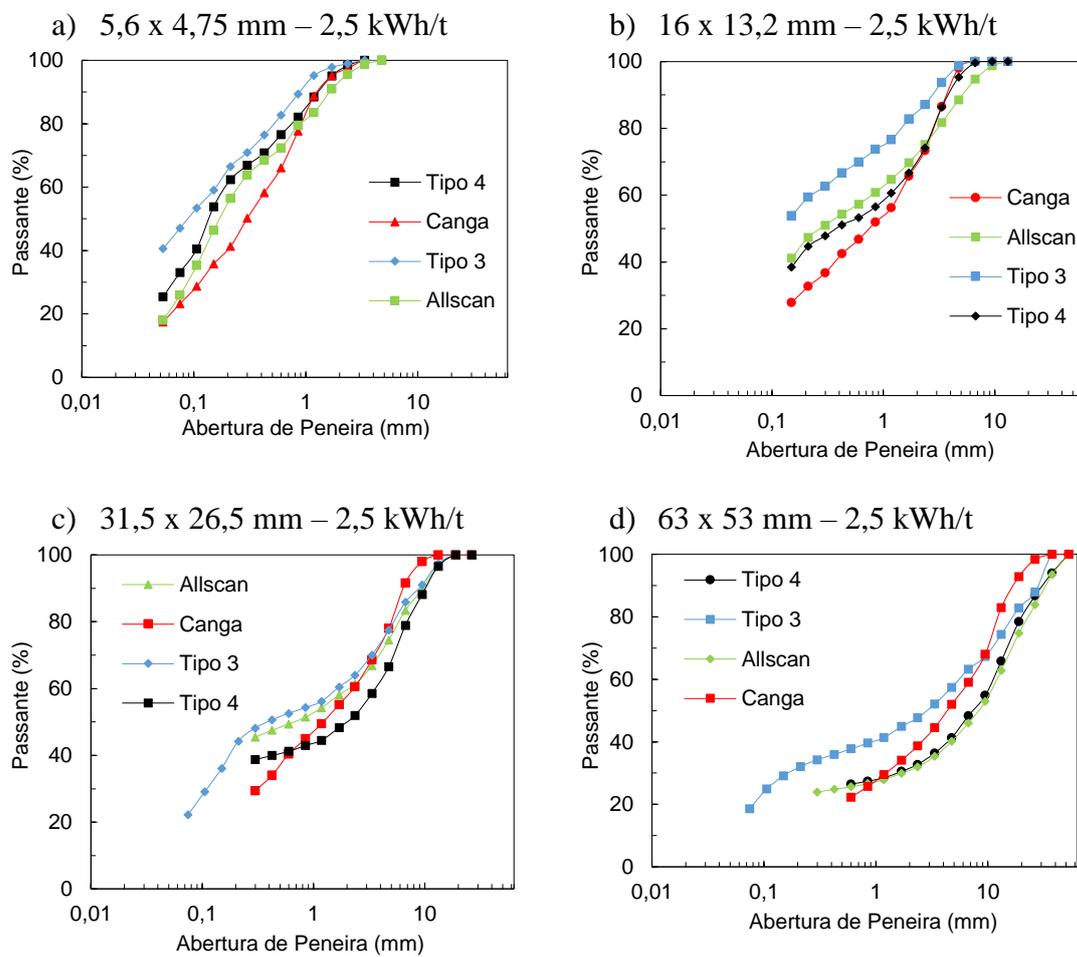


Figura 65. Distribuição granulométrica de diferentes tamanhos de partículas impactadas com 2,5 kWh/t.

A comparação mostrada na Figura 66 apresenta uma boa correlação entre os índices dos ensaios DWT e LA o que é esperado devido ao carregamento por impacto das bolas no ensaio LA ser similar àquele no ensaio DWT.

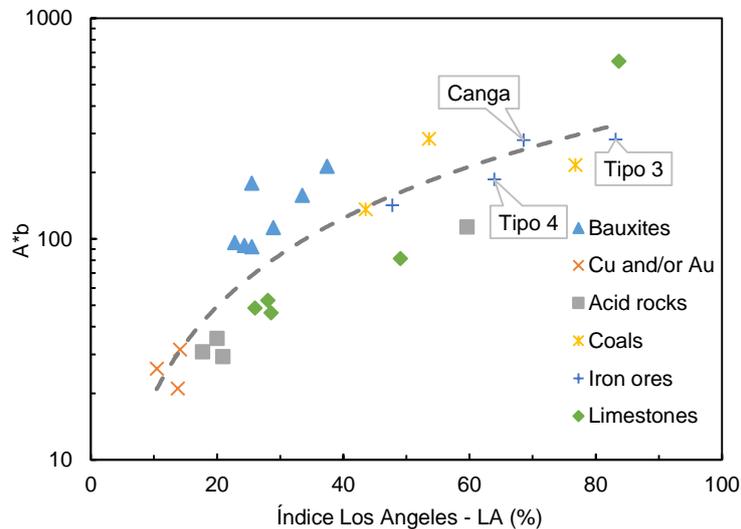


Figura 66. Relação entre o índice LA e o parâmetro A*b das tipologias e de diversos minerais (modificado de Tavares e Silveira, 2008).

4.3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO DE LEITO DE PARTÍCUALS (CLP)

No ensaio de CLP, diferentemente do DWT, um leito de partículas contidas em um mono tamanho é prensado a uma baixa taxa de carregamento até que se atinja a força pré-determinada, conforme a Tabela 10. A partir dos dados de carregamento e da distribuição de tamanho das partículas gerada, pode-se obter os parâmetros necessários para a simulação da prensa de rolos HPGR (Benzer *et al.*, 2017).

A Figura 67 apresenta a relação entre as energias aplicadas e os t_{10} gerados. Destes dados, os parâmetros A e b são ajustados ao mesmo modelo usado no DWT e o modelo é representado na figura pelas linhas sólidas. Os valores ajustados são apresentados na Tabela 22. A Canga, diferentemente dos outros ensaios, se apresenta mais competente quando prensada em leito de partículas. Tipo 4 e Blend se apresentam com resistência intermediária e Tipo 3 com baixa resistência à compressão.

Tavares (2007) observou que é comum aparecer variações na relação $t_{10} \times Ecs$ em função do tamanho das partículas ensaiadas. Como notado na Figura 67 e apresentado

na Tabela 22, principalmente para Canga e Blend, a relação varia significativamente desde a faixa mais fina, mostrando-se mais competente, para a mais grossa, menos competente.

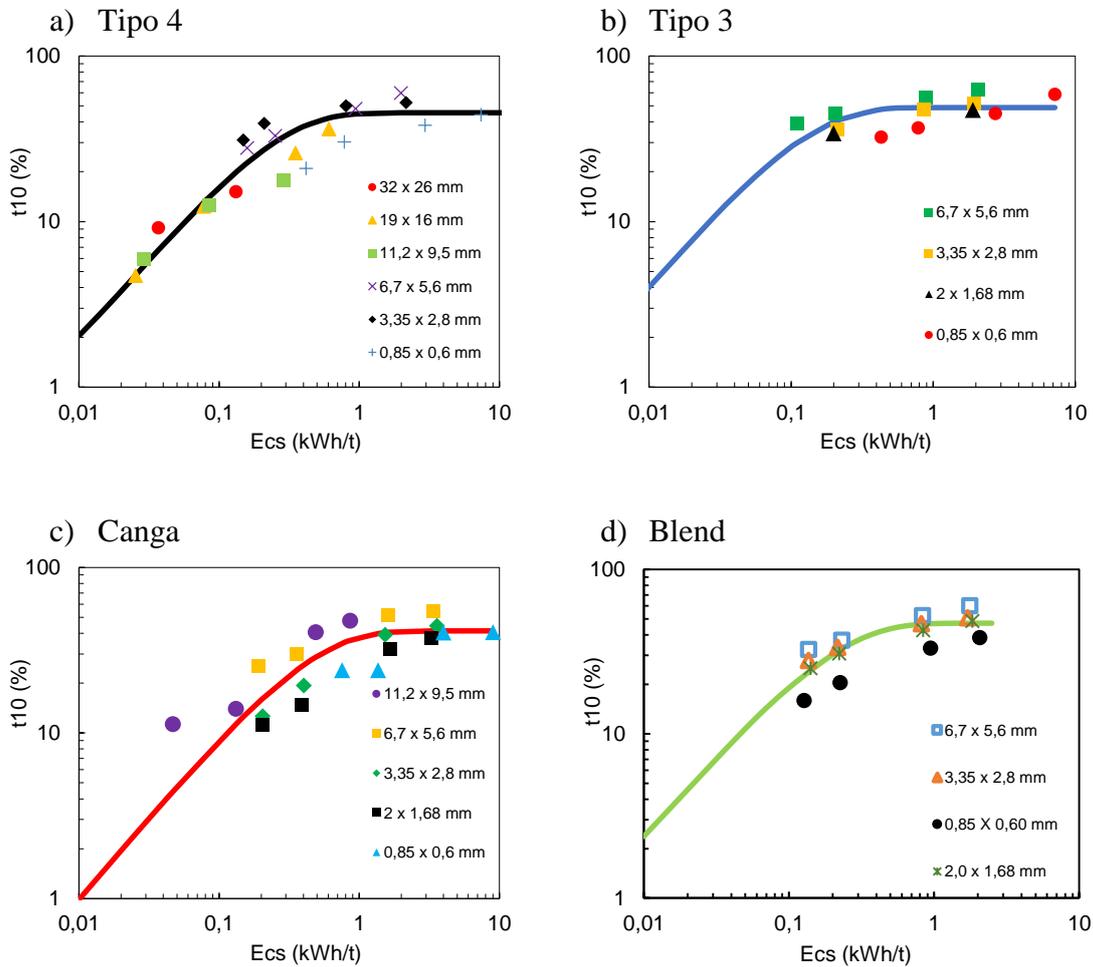


Figura 67. Relação das energias de compressão com o t10 gerado para obtenção dos parâmetros A e b para o ensaio CLP.

Tabela 22. Parâmetros A e b ajustados que relaciona Ecs e t10 para o ensaio de compressão em leitos

Parâmetro	Tipo 3	Tipo 4	I.F.	I.F.X	Canga	Blend
A*b total	418,66	197,73			74,38	241,52
A*b (6,7 – 5,6 mm)	506,15	210,56	-	-	144,27	298,11
A*b (850 – 600 µm)	97,97	68,82	100,54	101,16	35,49	142,35

As funções quebra apresentadas pelas tipologias neste ensaio, apesar da forma de carregamento serem totalmente diferente, comportam-se de forma semelhante ao ensaio DWT, ou seja, apenas a Canga se mostra normalizável, conforme é evidenciado na Figura 68.

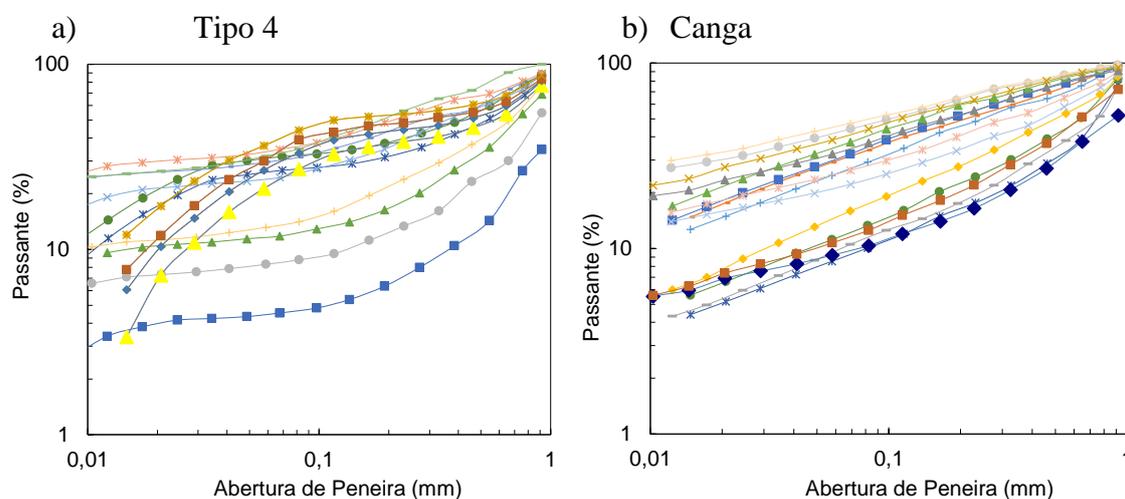


Figura 68. Função quebra não normalizável dos Tipos 3, 4 e IF (a), e normalizável da Canga (b) para o ensaio de CLP.

Devido à semelhança observada das funções quebra entre DWT e CLP, aplica-se aqui os mesmos cuidados usados nos dados do DWT, sendo desnecessário repetição. A Figura 69 apresenta as curvas t_{nS} plotadas em função de t_{10} para a construção da função quebra dependente da energia.

A partir dos resultados apresentados, a função quebra correspondente à energia absorvida de 2 kWh/t pelo leito de partículas pode ser estimada. Pelo modelo que relaciona a E_{cs} com o t_{10} , estima-se o valor do t_{10} correspondente a tal energia, e a partir desse t_{10} e os dos outros t_{nS} é obtida a função quebra. A Figura 70 apresenta as funções quebra estimadas para essa dada energia, dentre as quais apenas se distingue aquela da Canga.

Outro aspecto importante a ser destacado é geração de finos. Como pode ser notado na Figura 70, a granulometria da Canga possui 14,7% de progênies abaixo de 40 μm , praticamente duas vezes mais que as outras amostras. Extrapolando a curva da Canga, supondo que a curva continue com o mesmo comportamento, ela apresenta uma geração finos (% passante abaixo de 10 μm) acima de 10%, o que é muito significativo.

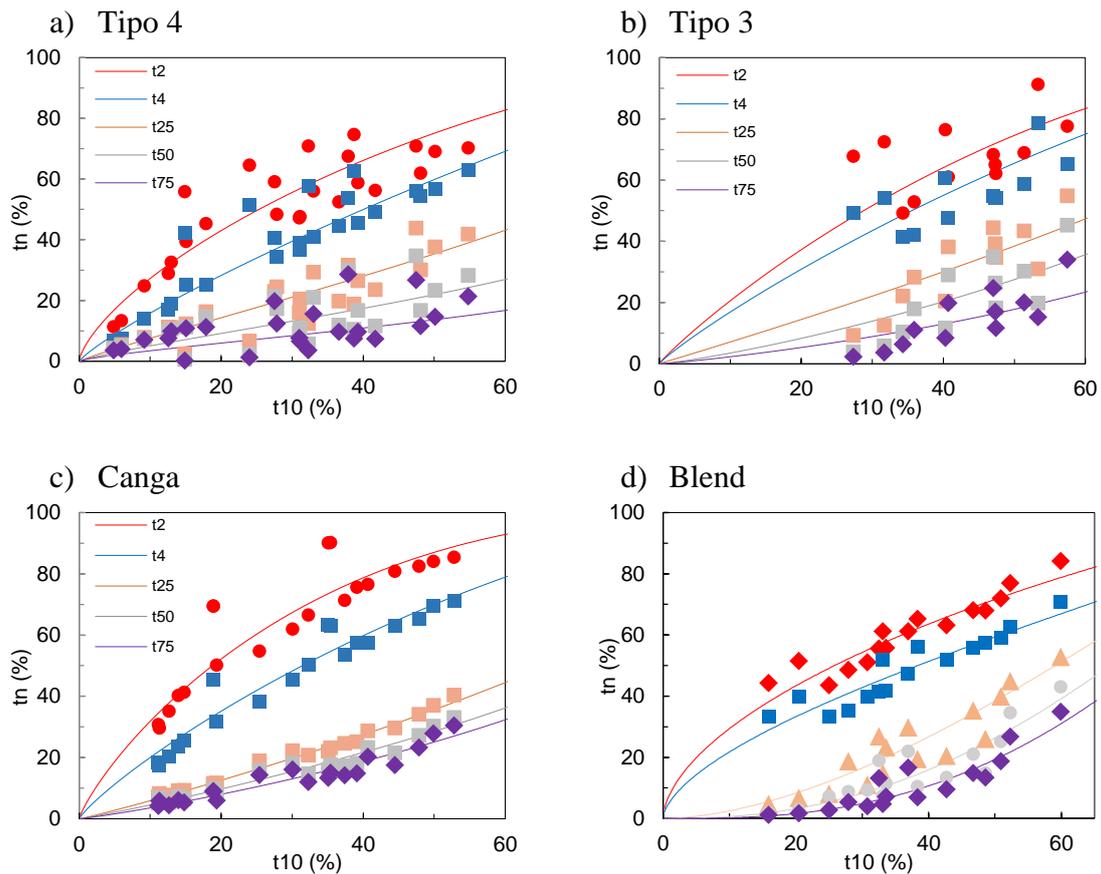


Figura 69. Função quebra mostrando a relação dos t_{ns} em função do t_{10} , usada para recalculer a função quebra a partir de um certo valor de t_{10} do CLP.

A Figura 71 permite analisar o efeito da força aplicada em diferentes tamanhos nas tipologias. Nota-se que a forma da função quebra praticamente não varia com o tamanho inicial da partícula testada, uma vez que o que muda é a intensidade da quebra para diferentes cargas, o que é esperado e reportado na literatura. Porém para a máxima carga 1000 kN as funções quebra das tipologias tornam-se mais semelhantes, ou seja, o leito se fratura praticamente na mesma intensidade.

A Canga, como mostrado nos resultados deste tópico, apresenta-se mais resistente à fragmentação quando prensada num leito de partículas. Os parâmetros A e b que, para este ensaio, dão uma medida de resistência à quebra por compressão em leito, apresentaram valores significativamente mais baixos para tal tipologia. Porém, observou-se que, embora as forças aplicadas sejam iguais, as energias resultantes são diferentes. A Figura 72 apresenta como a energia, área abaixo da curva, muda significativamente para as mesmas condições de força e tamanho de partícula.

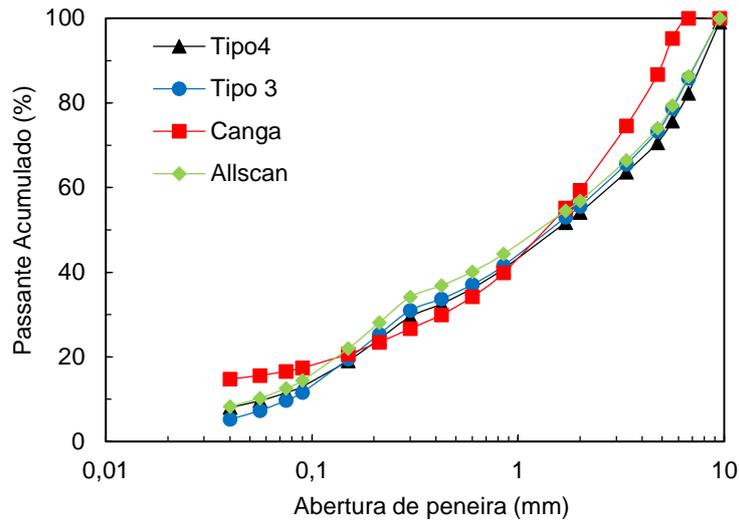


Figura 70. Função quebra estimada a partir do t_{10} resultante da Ecs de 2 kWh/t.

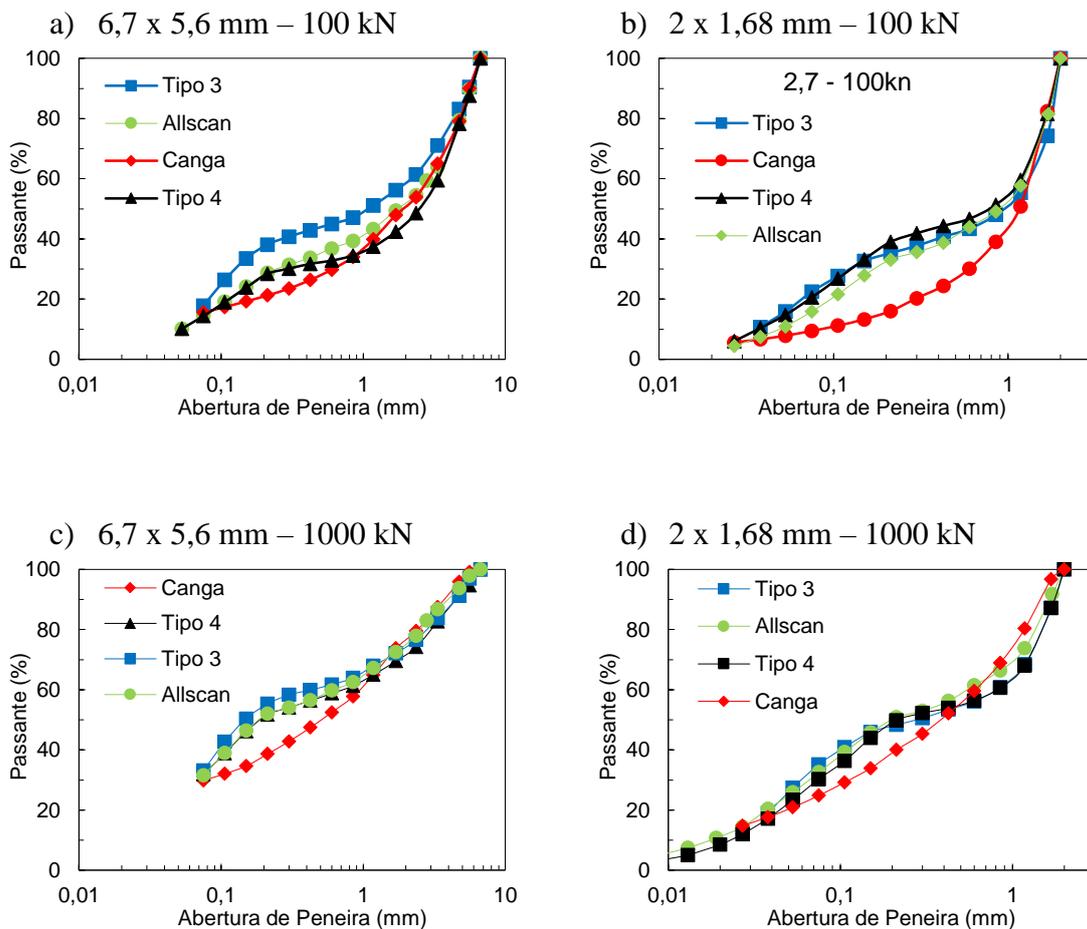


Figura 71. Distribuições granulométricas das tipologias para níveis de energia e tamanhos diferentes no ensaio CLP.

Para a força aplicada de 500 kN para a faixa 11,2 x 9,5 mm a energia E_{cs} calculada é demasiadamente diferente para a Canga e Tipo 4. Essa alta energia quando relacionada com o t_{10} resultante, naturalmente resulta em parâmetros A e b baixos.

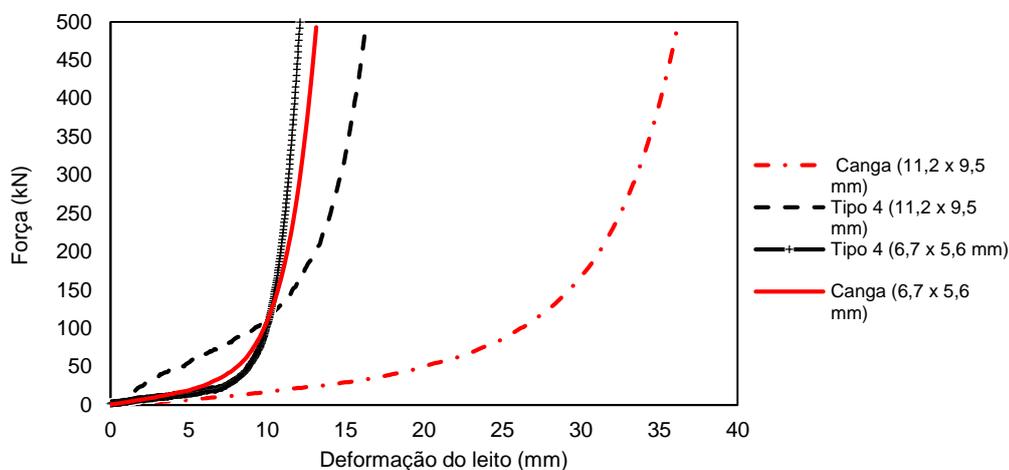


Figura 72. Perfil da curva força x deformação do leito para uma força de 500 kN aplicada em diferentes faixas de tamanho.

A tipologia Canga apresenta um alto grau de porosidade, caracterizado por poros que variam de tamanhos de pequenos a grandes, como discutido na seção 4.1.1. Esse efeito é mais significativo nas partículas ensaiadas de classes mais grossas, nas quais a porosidade é mais acentuada (Figura 72). Assim, na realidade essa alta energia não representa bem uma deformação no leito como acontece nas demais tipologias, mas sim uma deformação adicional causada pelo colapso dos poros presentes nas partículas de Canga.

4.4 ENSAIOS DE MOAGEM EM BATELADA A ÚMIDO

Os resultados apresentados e discutidos nesta seção estão divididos em etapas relevantes para o resultado do ensaio de moagem. Dentre elas, a preparação da alimentação da moagem, distribuições granulométricas dos tempos de moagem e análises química. Uma discussão de características das tipologias que influem nos parâmetros das funções quebra e seleção também é explanada.

4.4.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO

O resultado da preparação da alimentação de todas as tipologias ensaiadas é apresentado na Figura 73. A distribuição granulométrica da alimentação da moagem das tipologias segue a mesma forma da alimentação da moagem na usina, com o cuidado de manter próximo o teor de finos. Observando-se a distribuição granulométrica cerca de cinquenta por cento do material está distribuído nas faixas entre 425 e 150 μm . Não é coincidente que o ponto de inflexão observado nas tipologias descritas acima como não normalizáveis, exceto a Canga e IFX, está na mesma faixa de acúmulo de material. Conforme essas tipologias vão sendo cominuídas desde as etapas iniciais de britagem das partículas grossas até partículas médias, como visto até aqui, uma quantidade demasiada de progênes nessa faixa vão sendo geradas e acumuladas.

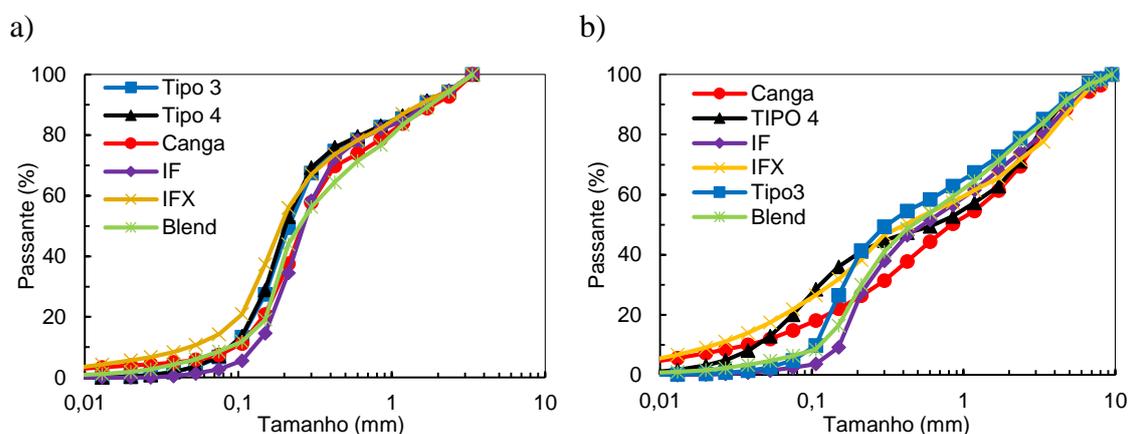


Figura 73. Distribuições granulométricas da alimentação das tipologias para os ensaios nos moinhos 30 x 30 cm (a) e 58 x 24 cm (b).

Um ponto importante, visivelmente observado durante a preparação das amostras, foi a diferença de coloração do material contido nas diferentes faixas de tamanho. A Figura 74 ilustra as partículas das faixas de tamanho entre 300 μm e -38 μm .

Como pode ser notado, as partículas de quartzo, com coloração mais clara, se encontram concentradas nas faixas entre 212 e 53 μm , que apresentam menor densidade, enquanto que as partículas de hematita, escuras, se concentram principalmente nas faixas mais finas, de maior densidade. Nos tamanhos mais grossos que 300 μm não se observa a olho nu diferenças significativas. Esse comportamento é observado nas tipologias Tipo 3, Tipo 4 e IF e não observado nas amostras IFX e Canga.

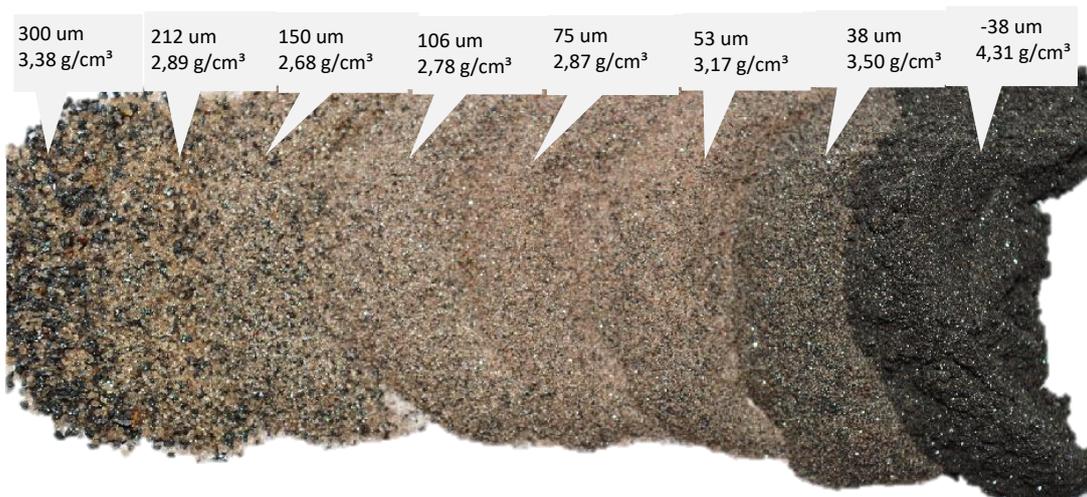


Figura 74. Partículas contidas nas faixas de tamanho entre 300 e -38 um da alimentação dos ensaios de moagem e suas respectivas densidades da amostra Tipo 3.

Tal observação é confirmada pela análise química por fluorescência de raios-X das faixas granulométricas da alimentação a qual quantifica os principais minerais encontrado (Figura 75), onde os maiores teores de ferro são encontrados na faixa menor que 38 μm .

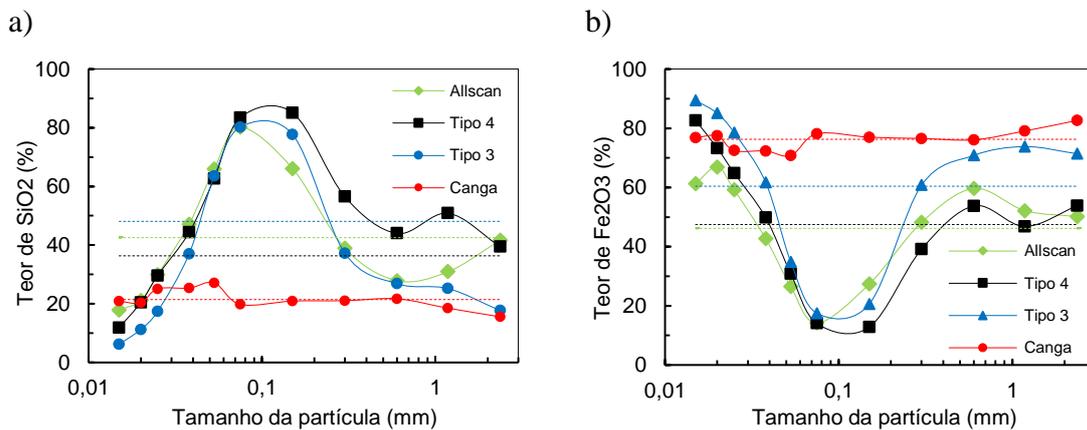
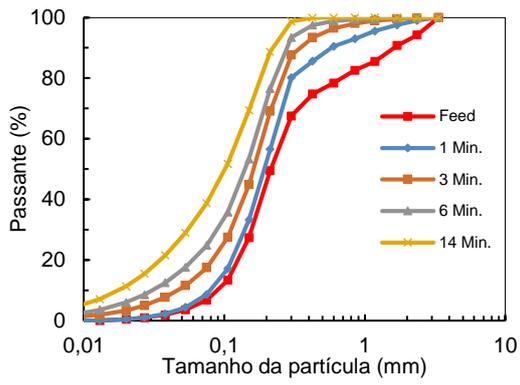


Figura 75. Análise química das faixas granulométrica da alimentação da moagem 30 x 30, em (a) teor de SiO₂ e em (b) teor de Fe₂O₃. As linhas pontilhadas representam o teor médio das amostras.

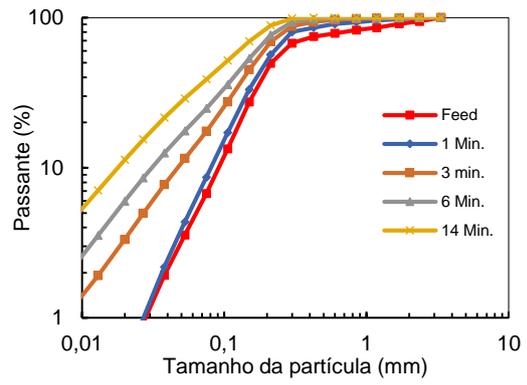
4.4.2 DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS TEMPOS DE MOAGEM

Com a distribuição granulométrica da alimentação preparada e semelhante entre si realizou-se os ensaios de moagem. As distribuições granulométricas dos quatro tempos de moagem são apresentadas na Figura 76. As partículas das faixas de tamanho maiores, superiores a 600 μm , foram moídas facilmente em 6 minutos de ensaio, exceto no caso da Canga, a qual ainda apresentou uma quantidade residual razoável. Também, o ponto de inflexão da distribuição granulometria da alimentação das amostras IFX e Canga (Figura 76) nos tempos mais longos de moagem foi se suavizando, diferentemente das demais amostras.

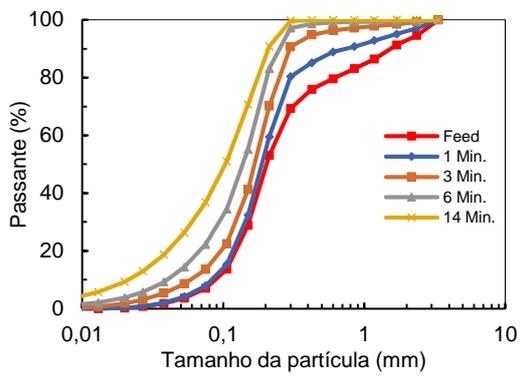
Tipo 3



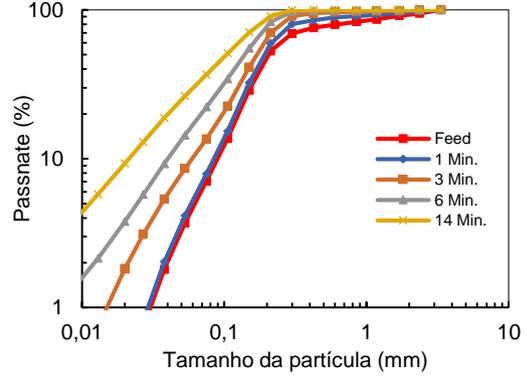
Tipo 3



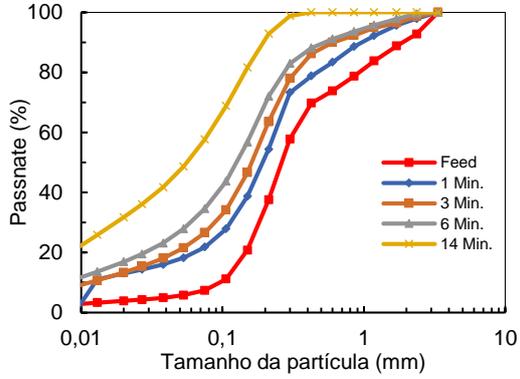
Tipo 4



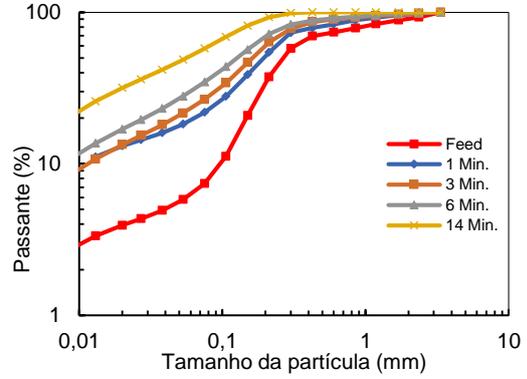
Tipo 4



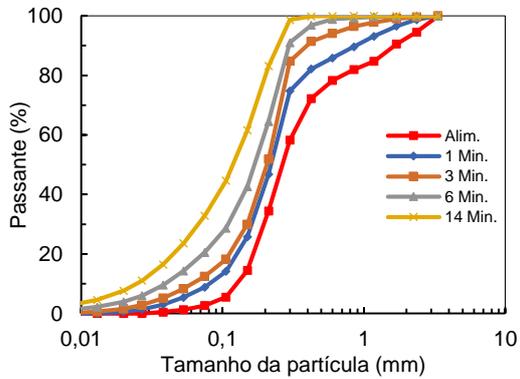
Canga



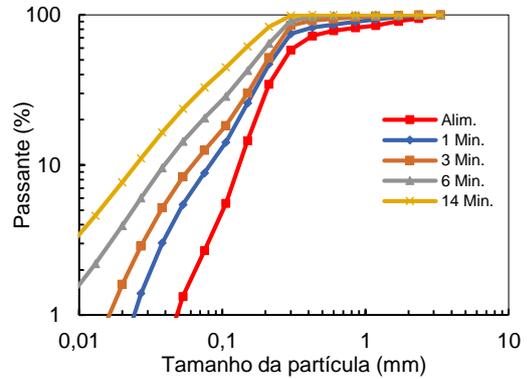
Canga



IF



IF



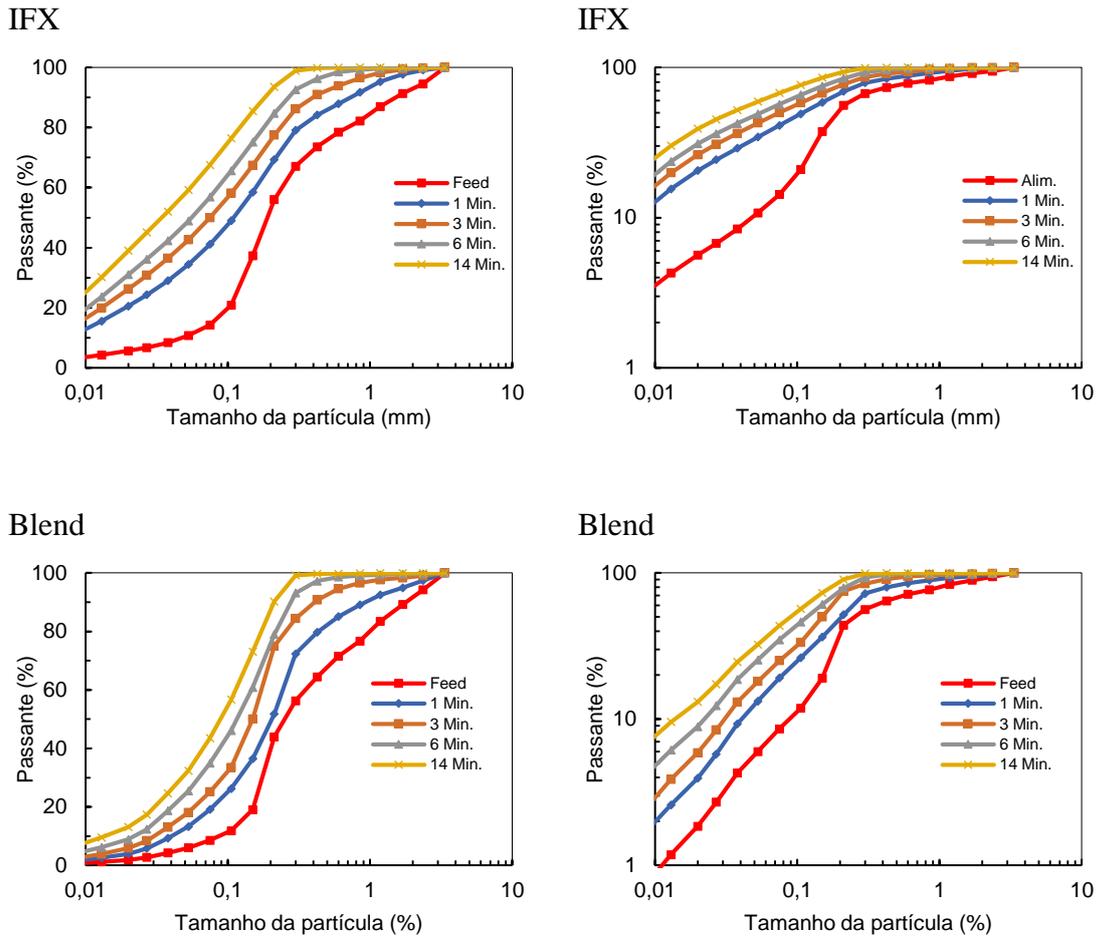


Figura 76. Distribuições granulométricas dos quatro tempos de moagem, à esquerda em escala log-linear, à direita em escala log-log.

Outros dados que são relevantes na moagem e que servem de comparação quantitativa entre as tipologias são a moabilidade e a geração de finos. A moabilidade e a geração de finos podem ser definidas como o percentual de passante numa certa faixa de tamanho, aqui considerado de 106 μm para a moabilidade e 13 μm para a geração de ultrafinos, em função do tempo de moagem ou da energia específica consumida.

Na Figura 77a é apresentada a evolução da produção de material na faixa desejada, definido aqui como “moabilidade”. Na Figura 77b é apresentada a geração de finos em função da energia específica. Nos quatro tempos do ensaio, IFX e Canga tiveram boa produção de material na faixa desejada. A geração de ultrafinos, que é um problema altamente relevante, é demasiadamente produzida pela Canga e IFX, que por sua vez apresentam altos teores de minerais de ferro. A moabilidade, assim como a taxa de

geração de ultrafinos, se aproximam de um valor máximo com o aumento do tempo e energia de moagem.

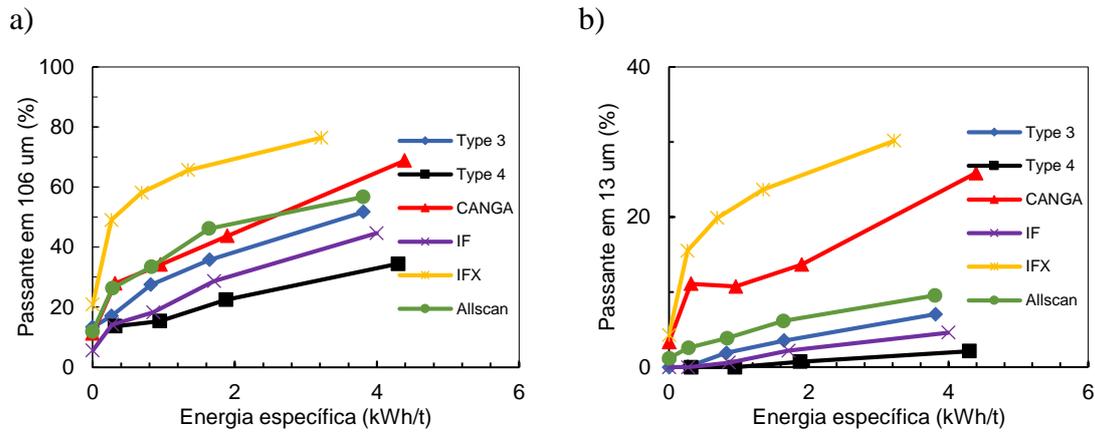


Figura 77. Produção de passante em 106 µm em função da energia específica (a), e geração de ultrafinos em função da energia específica (b).

Uma medida de competência de cada tipologia pode ser quantificada a partir dos dados das distribuições resultantes. Traçando-se os valores de 80% passante (P_{80}) dos quatro tempos e os lançando em gráfico em função da energia específica de moagem, pode-se quantificar um valor referente à competência de cada tipologia (Figura 78), baseado no modelo empírico de Bond (Equação 7).

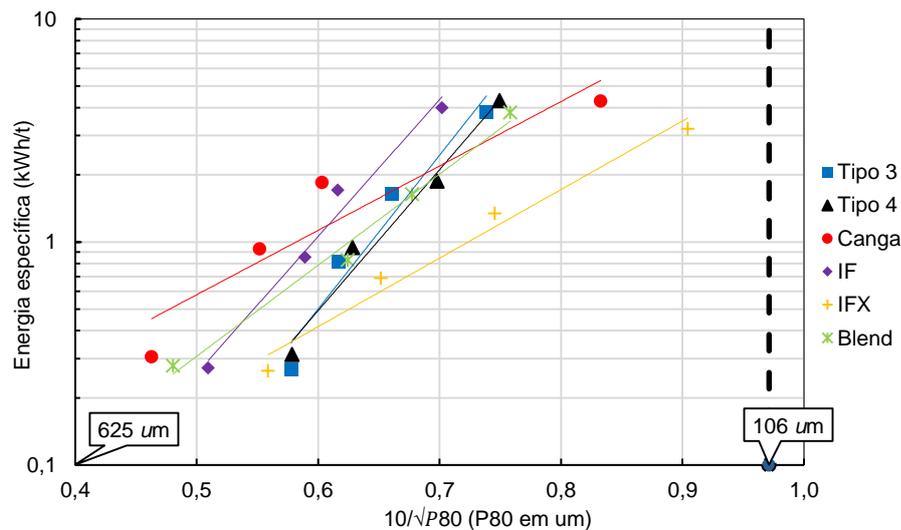


Figura 78. Energia específica em função do inverso da raiz do P_{80} gerado nos tempos de moagem das tipologias.

A Tabela 23 apresenta os valores dos coeficientes angulares das curvas da Figura 78 em ordem decrescente, que representa a competência na moagem. Apesar de ser baseado num modelo empírico essa competência mostra uma boa relação da evolução do P_{80} com a energia específica de moagem. A tipologia Tipo 4, contrário do que se mostrou nos outros ensaios, não se apresenta predominantemente a mais competente na moagem. Seu resultado mostrou-se semelhante ao IF e inferior ao Tipo 3. Ferreira (2013) e Mazzinghy *et al.* (2014) obtiveram resultados semelhantes em relação à moagem de minérios de ferro compacto e friáveis. A tipologia Canga também apresentou essa inversão de comportamento.

Tabela 23. Valores de competência das tipologias, baseado no modelo empírico de Bond obtidos a partir dos ensaios de moagem descontínua

<i>Tipologias</i>	<i>Competência na moagem (Esc)</i>	<i>Coefficiente de determinação R²</i>
Tipo 3	15,9	0,946
Tipo 4	14,6	0,977
IF	14,1	0,978
Blend	9,4	0,987
IFX	7,1	0,977
Canga	6,7	0,882

4.4.3 ANÁLISES QUÍMICAS DAS GRANULOMETRIAS DA MOAGEM

Os resultados das análises químicas da alimentação, bem como aquelas relativas ao segundo e quarto tempo de moagem são lançadas em gráfico em conjunto na Figura 79, a partir da qual pode-se analisar a evolução dos minerais de ganga e de ferro nas faixas granulométricas em função dos tempos de moagem. À esquerda da Figura 79 é apresentada a porcentagem de minerais de ganga, predominantemente de sílica (SiO_2) na forma de quartzo e à direita são apresentados os teores dos minerais de ferro, predominantemente hematita.

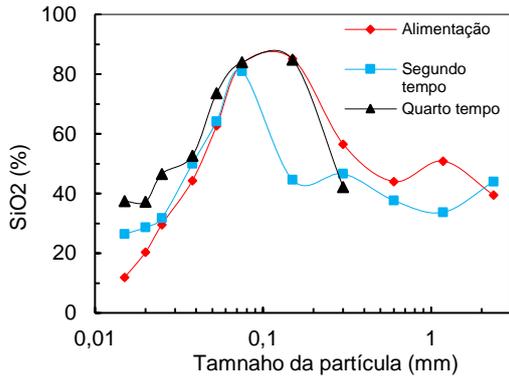
Pode-se identificar dois comportamentos distintos dos minerais em função do tempo de moagem. Os minerais da Canga se mantêm praticamente constantes com os tempos de moagem. Por outro lado, os minerais das tipologias Tipo 3 e 4 variam conforme vão sendo moídas, principalmente nas faixas abaixo de 300 μm , como já havia sido reportado.

Nas Tipologias Tipo 3 e 4 o SiO_2 se encontra concentrado nas faixas entre 300 μm e 53 μm , enquanto que os minerais de ferro estão concentrados nas faixas abaixo de 53 μm . Conforme o tempo de moagem aumenta os minerais de SiO_2 são cominuídos e passam a povoar as faixas abaixo de 53 μm , as quais apresentavam-se inicialmente com elevados teores de ferro (Figura 79).

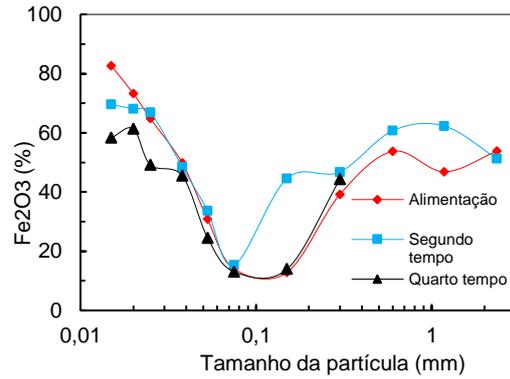
Um efeito importante e prejudicial para a recuperação mineral notado nessas análises química é que os minerais de ferro, inicialmente concentrados nas faixas abaixo de 53 μm , passam a povoar as faixas de tamanhos ainda mais finas e, provavelmente, serão perdidos nas faixas abaixo de 20 μm nos processos subsequentes de concentração. Diferentemente, as partículas de quartzo continuam povoando as faixas acima de 20 μm . Exceto a Canga, tal fato descrito pode ser notado pelo teor médio de Fe_2O_3 e de SiO_2 nas faixas granulométricas recuperáveis acima de 20 μm com exceção dos finos, abaixo de 20 μm , nos tempos de moagem (Figura 80a e 80b).

O aumento do teor de ferro nas frações mais finas, partículas irrecuperáveis, que ocorre nos tempos maiores de moagem acontece devido ao fato que os minerais de ferro tendem a ser mais facilmente moídos do que os minerais de quartzo. Isso é explicado tanto pela maior resistência mecânica das partículas de quartzo (Ribas et al., 2014) como também pelo formato predominantemente granular quando comparado às partículas majoritariamente tabulares da hematita.

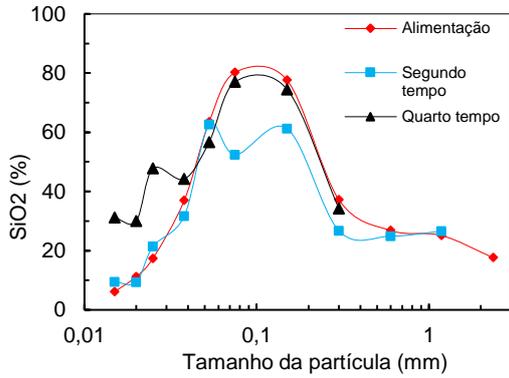
Tipo 4



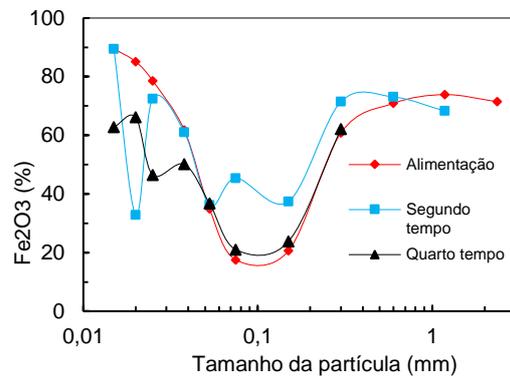
Tipo 4



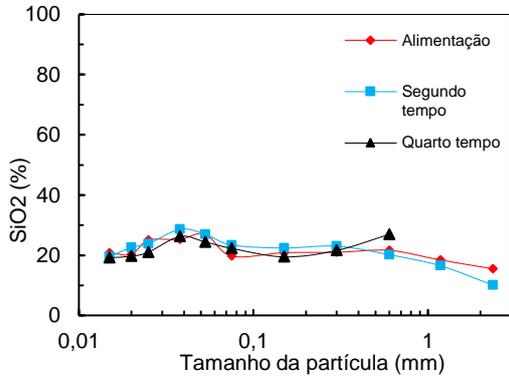
Tipo 3



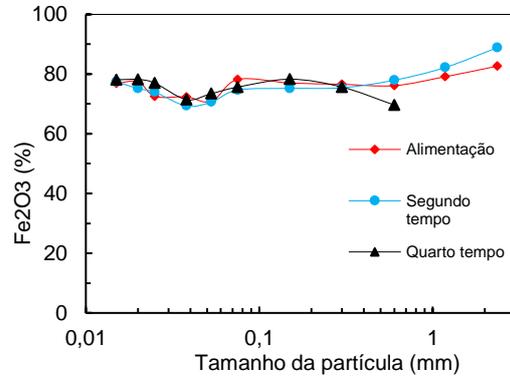
Tipo 3



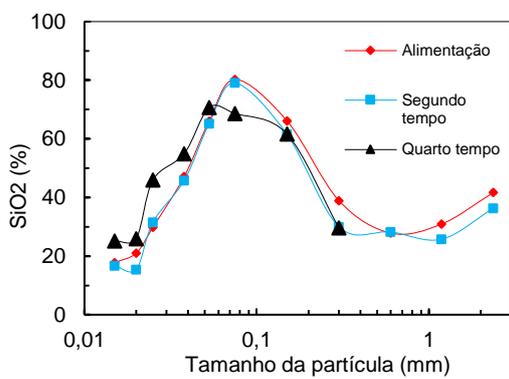
Canga



Canga



Blend



Blend

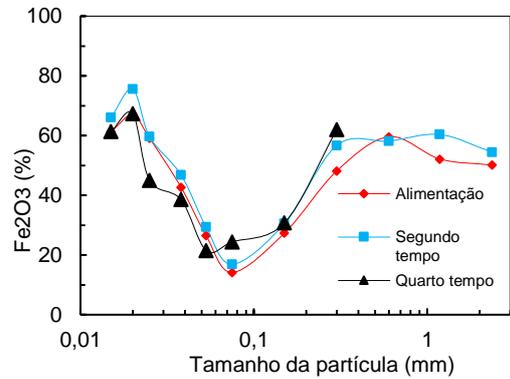


Figura 79. Análises granuloquímicas nos diferentes tempos de moagem.

Esta observação foi notada por Bérubé e Marchand (1984) em minério de ferro de Carroll Lake (Newfoundland, Canadá) o qual apresenta características semelhantes aos deste trabalho, com minerais de ganga silicosa granular e minerais de ferro formados predominantemente por hematita tabular e especular.

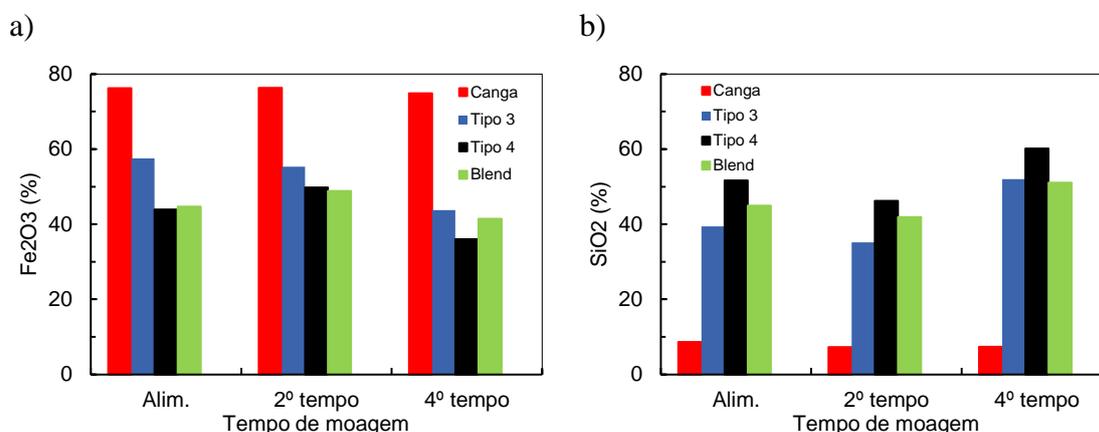


Figura 80. Teor médio de Fe₂O₃ (a) e teor médio de SiO₂ (b) das faixas acima de 20 μm em função do tempo de moagem.

4.4.4 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DAS FUNÇÕES SELEÇÃO E QUEBRA POR RETROCÁLCULO

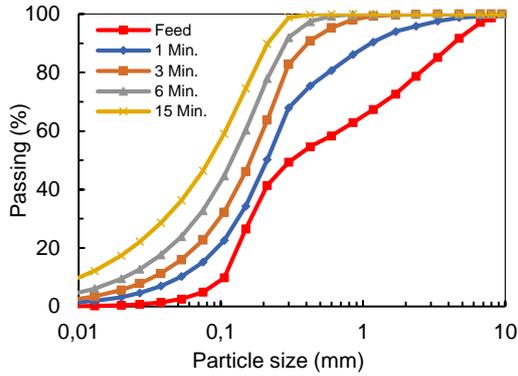
A simulação da distribuição de tamanhos dos tempos de moagem foi realizada a partir dos resultados dos ensaios realizados no moinho 58 x 24 cm. Realizou-se também o retrocálculo da função seleção e quebra das tipologias. No ensaio, a moagem foi realizada aplicando-se as condições similares à utilizada pela usina. Tais condições foram detalhadamente descritas no item 3.4.6. Analisou-se também a resistência à moagem das tipologias nesse moinho, na qual as energias envolvidas nos impactos são significativamente mais altas que aquelas atingidas no moinho de 30 x 30 cm.

4.4.4.1 Distribuições Granulométricas dos Tempos da Moagem

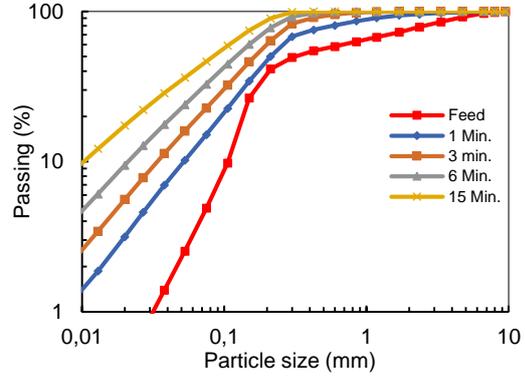
A Figura 81 apresenta as distribuições granulométricas dos quatro tempos de moagem. As partículas das faixas de tamanho maiores do que 1,18 mm de todas as tipologias foram moídas facilmente em 6 minutos de moagem. Tal fato é reflexo dos níveis maiores de energia do moinho de 58 x 24 cm, mesmo com o *top size* de 9,5 mm

das partículas. Destes resultados não se pode observar grandes diferenças no resultado de moagem, exceto no caso da Canga e do IFX, os quais foram mais cominuídos mais intensamente.

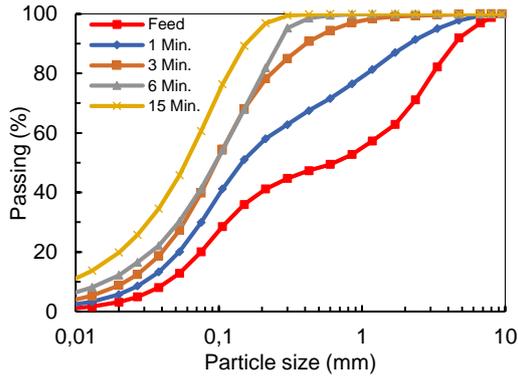
Tipo 3



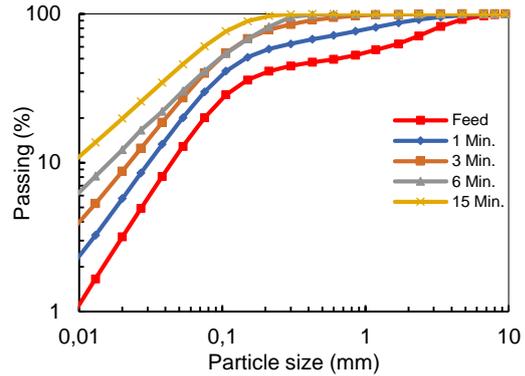
Tipo 3



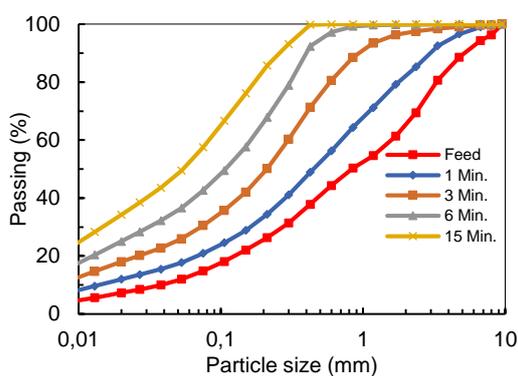
Tipo 4



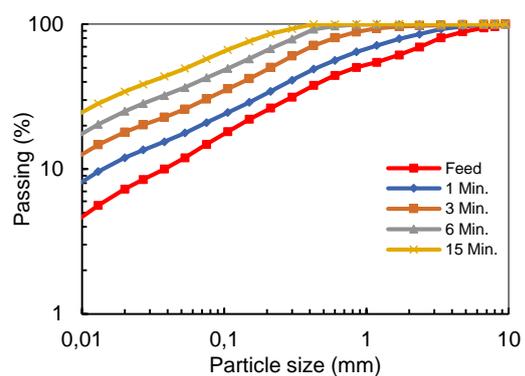
Tipo 4



Canga



Canga



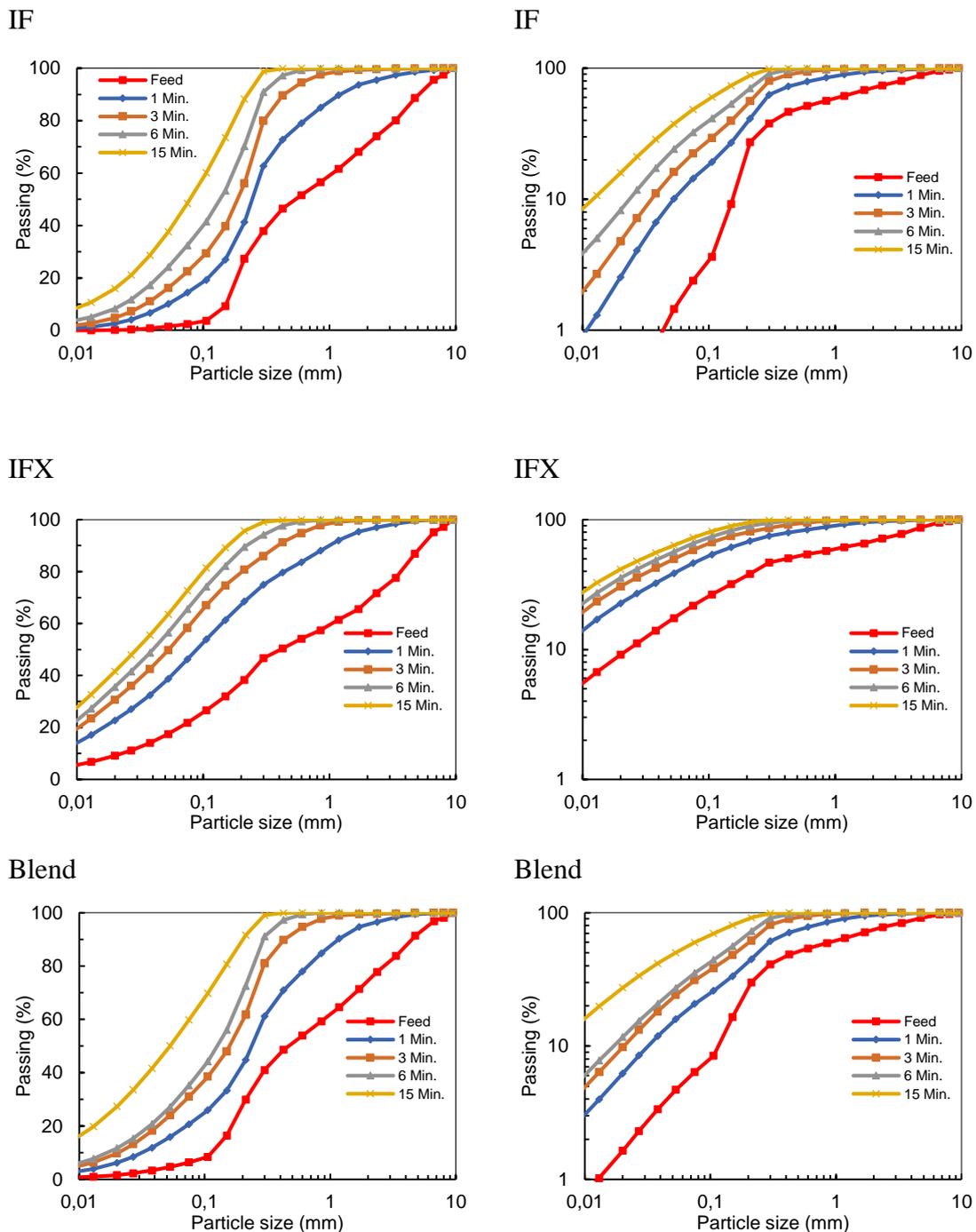


Figura 81. Distribuições granulométricas dos quatro tempos de moagem: à esquerda em escala log-linear e à direita em log-log, para o moinho de 58 x 24 cm.

Traçando-se os valores de P_{80} em função da energia específica dos quatro tempos, semelhante ao realizado no moinho 30 x 30 cm, obtém-se um valor referente à competência das tipologias (Figura 82).

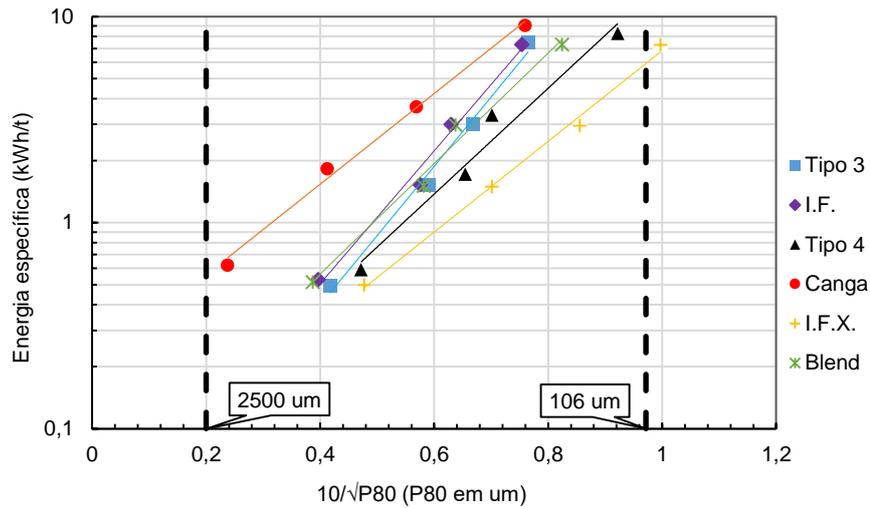


Figura 82. Energia específica em função do inverso da raiz do P80 gerado nos tempos de moagem das tipologias no moinho de 58 x 24 cm.

A Tabela 24 apresenta os valores dos coeficientes angulares das curvas da Figura 82 em ordem decrescente. As tipologias Tipo 3 e IF mostraram-se significativamente mais competentes do que as demais amostras, embora nos ensaios de caracterização de quebra estas se mostraram como intermediárias a menos competentes.

Tabela 24. Valores de competência das tipologias, baseado no modelo empírico de Bond.

<i>Tipologias</i>	<i>Competência na moagem (Esc)</i>	<i>Coefficiente de determinação R²</i>
Tipo 3	7,74	0,990
IF	7,42	0,986
Blend	6,17	0,984
Tipo 4	5,91	0,970
IFX	5,07	0,995
Canga	5,06	0,995

Comparando os resultados da competência na moagem do moinho de 30 x 30 cm com estes, os valores desta moagem são aproximadamente a metade. Tal fato é explicado pelos maiores diâmetros do moinho e dos corpos moedores e pode ser determinado por técnicas de escalonamento, porém foge ao escopo deste trabalho.

Também é apresentada a moabilidade e a geração de finos em função do tempo ou da energia específica consumida no moinho 58 x 24 cm com condições análogas à da usina. A Figura 83 ilustra a evolução da produção de material na faixa desejada (moabilidade), bem como a geração de ultrafinos. Nos quatro tempos do ensaio, as amostras IFX, Tipo 4 e Canga tiveram boa produção de material na faixa desejada. A geração de finos, que é um problema relevante na usina, é demasiadamente produzida pela Canga e IFX.

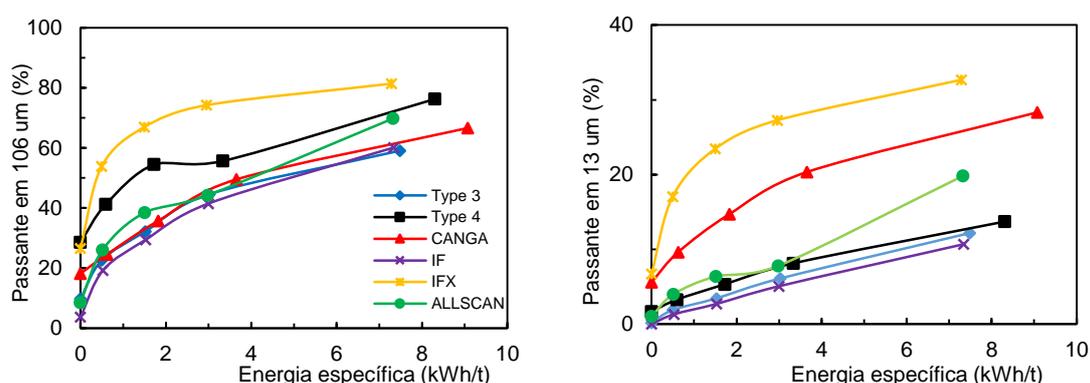


Figura 83. Produção de passante em 106 µm em função da energia específica (esquerda) e geração de ultrafinos em função da energia específica (direita).

4.4.4.2 Retrocálculo das Funções Seleção e Quebra

O retrocálculo das funções quebra e seleção é basicamente realizado a partir da solução do modelo de balanço de populacional a partir das distribuições granulométricas de diferentes tempos de ensaios de moagem (equação 14).

A partir das distribuições granulométricas dos quatro tempos, observa-se algumas semelhanças, mas também importantes diferenças no comportamento das tipologias na moagem. Pode-se notar a tendência de gerar dois padrões de curvas. Em um desses padrões o ponto de inflexão adicional vai desaparecendo conforme cresce o tempo de

moagem e a distribuição passa a ter uma reta abaixo de 300 μm . As tipologias IFX e Canga, como observado na Figura 81 apresentam esse padrão. No segundo padrão, o ponto de inflexão adicional se mantém, sendo esse o caso das tipologias Tipo 3, 4 e IF.

Essas tendências descritas são compatíveis com o observado nos testes de quebra de partículas individuais e em leite relatados nos tópicos anteriores. Tal fato é relevante para um bom resultado na estimação dos parâmetros da função seleção e quebra, visto que a função quebra não normalizável é modelada com dois parâmetros adicionais.

Uma rotina escrita em Matlab foi utilizada para a realização do retrocálculo baseada na solução de Reid (1965) da equação do modelo de balanço populacional. A Figura 84 apresenta as funções quebra e seleção que melhor se ajustaram à solução da equação da moagem com os dados do ensaio.

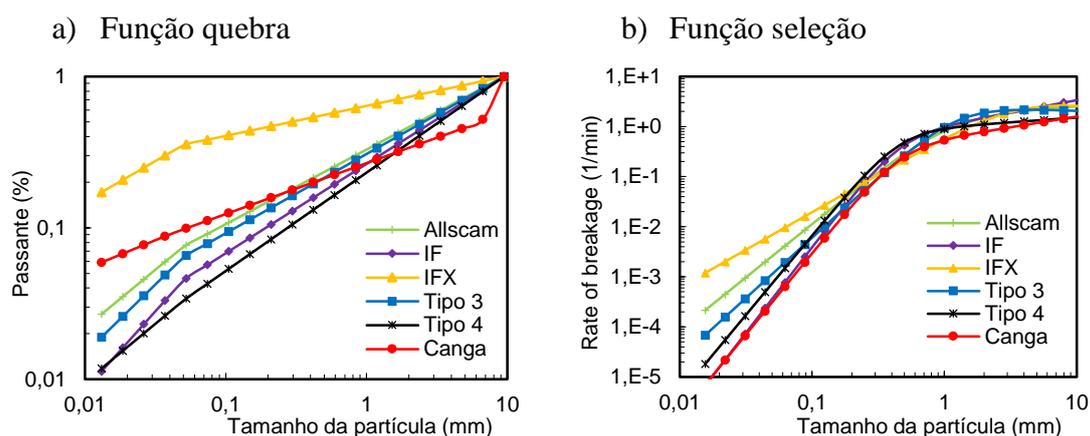
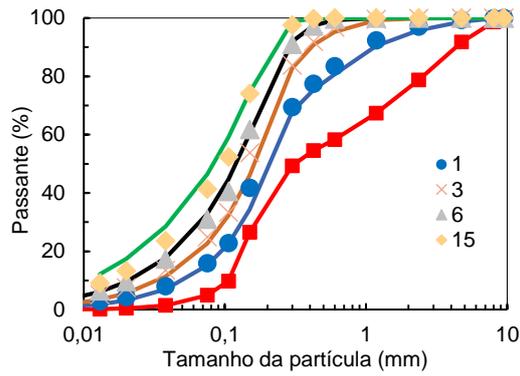


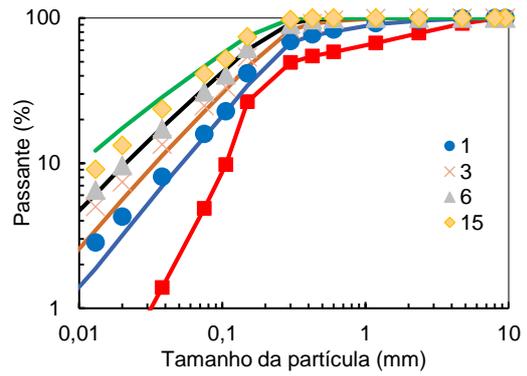
Figura 84. Função quebra (a) e função seleção (b) retrocalculadas a partir dos dados dos ensaios no moinho de 58 x 24 cm.

A solução da equação 14 com as funções quebra e seleção ajustadas pelo retrocálculo são apresentadas na Figura 85 juntamente com as distribuições resultantes do ensaio de moagem. Como pode ser observado, as partículas grossas foram bem ajustadas, enquanto que os finos apresentaram maior erro no ajuste.

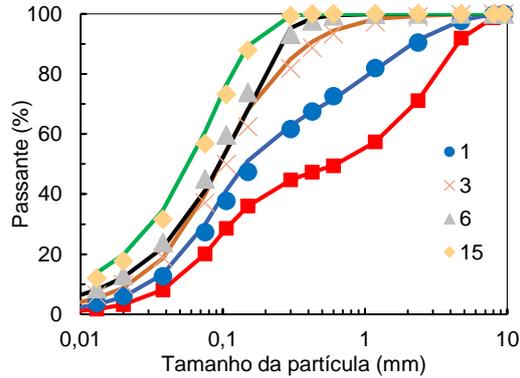
Tipo 3



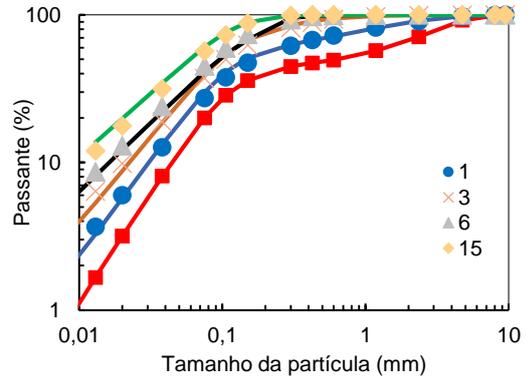
Tipo 3



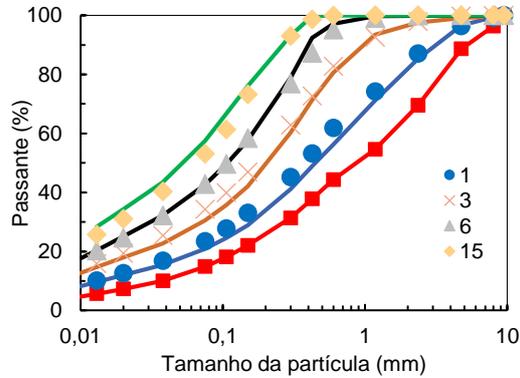
Tipo 4



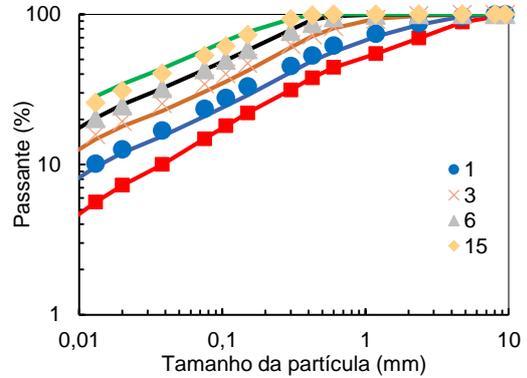
Tipo 4



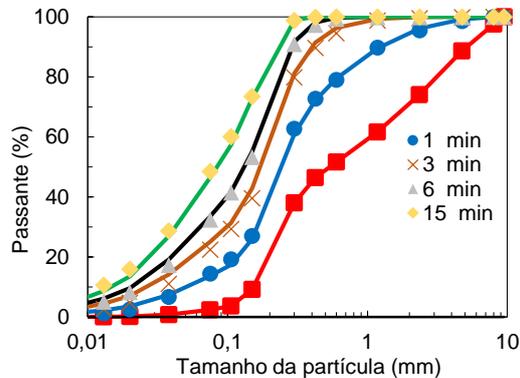
Canga



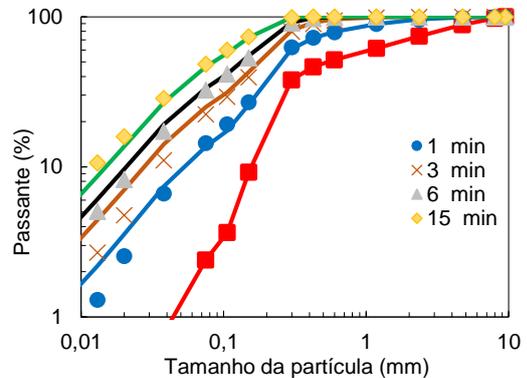
Canga



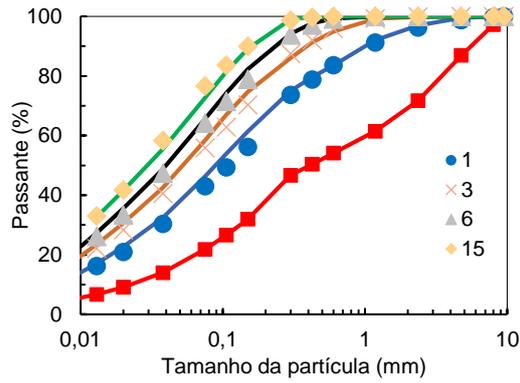
IF



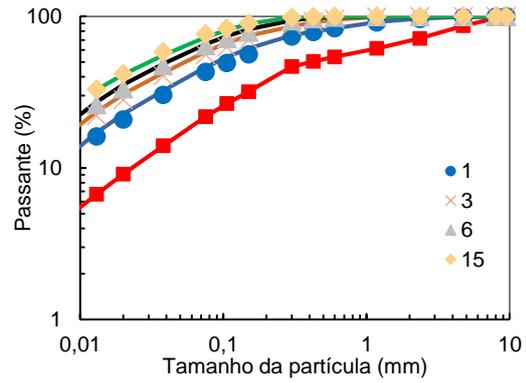
IF



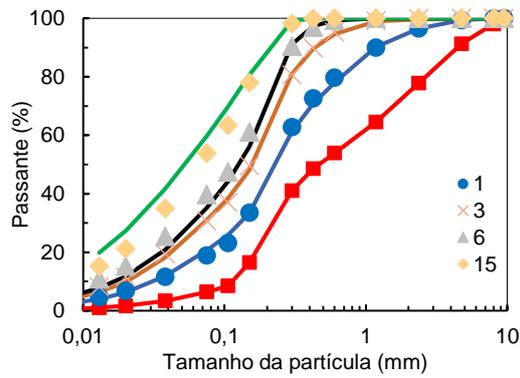
IFX



IFX



Blend



Blend

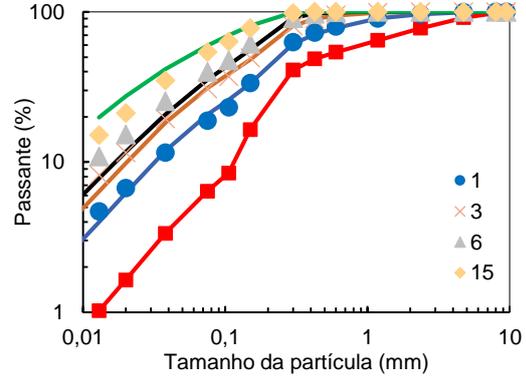


Figura 85. Distribuições granulométricas dos ensaios (símbolos), juntamente com as distribuições retrocalculadas a partir das funções quebra e seleção obtidas (linhas).

A Tabela 25 apresenta os parâmetros das funções seleção e quebra melhor ajustados pelo método dos mínimos quadrados aos dados experimentais do ensaio de moagem a úmido no moinho 58 x 24 cm.

Tabela 25. Sumário dos parâmetros ajustados das funções seleção e quebra da moagem em batelada no moinho 58 x 24 cm

Característica da fragmentação	Parâmetros	Tipologias de minério de ferro					
		Tipo 3	Tipo 4	IF	IFX	Blend	Canga
Função seleção	S_1	1,54	10	10,30	0,9	1,53	5,27
	α	2,41	3,18	3,42	1,52	2,13	3,25
	μ	1,23	0,46	0,46	3,2	1,05	0,46
	Λ	2,51	2,99	2,93	2,02	1,96	2,83
Função quebra	ϕ	1	1	1	1	1	0,56
	n_1	0,52	0,65	0,59	0,2	0,49	0,34
	n_2	2,32	1	3,86	9,86	1,73	10
	d_0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04
	n_3	0,39	0,12	0,45	0,34	0,27	0,05

4.5 LIBERAÇÃO MINERAL

Para as análises de liberação mineral neste trabalho, a faixa em porcentagem presumida como liberada foi de 95 a 100%. Essa faixa corresponde a teor de ferro total superior a 66% das partículas, teor esse considerado ótimo para os produtos finais dos processos de concentração. As medidas de liberação dos minerais, hematita englobando todos minerais portadores de ferro e quartzo englobando os não portadores, foram medidas por meio do Qemscan. Vale ressaltar novamente que essas análises foram realizadas apenas nas amostras da alimentação dos ensaios de moagem de 58 x 24 cm, visto que o grau de liberação dos minerais nas faixas de tamanho é invariável, como apresentado na seção 2.5.3.2.

4.5.1 ESPECTRO DE LIBERAÇÃO DOS MINERAIS

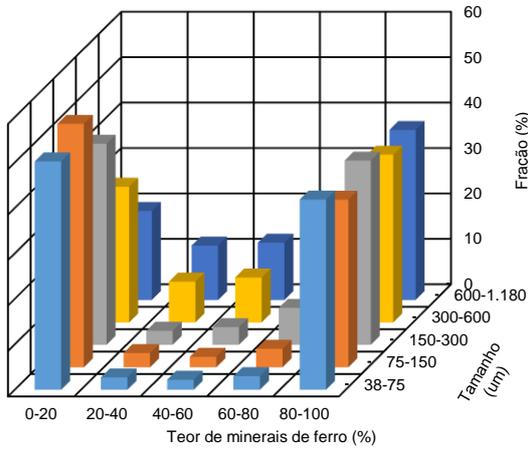
A Figura 86 apresenta os espectros de liberação dos principais minerais portadores de ferro, hematita, magnetita e goethita. Estes minerais foram englobados para facilitar a análise e a representação da liberação, visto que as tipologias apresentam diferentes mineralogias. As tipologias IF e IFX não apresentaram material suficiente nas faixas

acima de 300 μm para realizar as análises, mesmo tendo sido preparadas, provavelmente devido à degradação durante o manuseio.

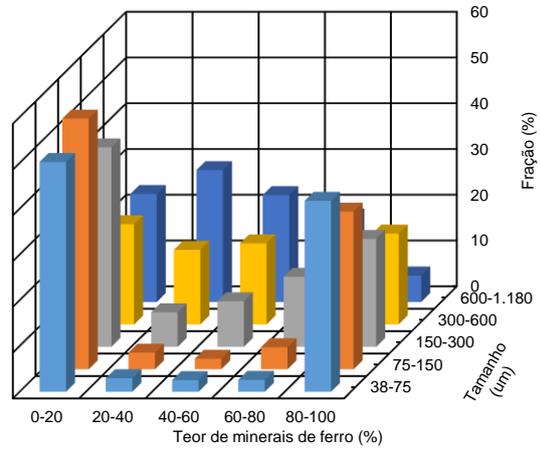
Observando-se os espectros de liberação da Figura 86 percebe-se que em tamanhos menores do que 300 μm os minerais não portadores de ferro se apresentam com frações acima de 80% liberados em todas as amostras, exceto no caso do Tipo 4 com 72%. Como pode ser observado, a tipologia Tipo 4 se apresentou com menores valores de liberação de minerais de ganga em todas as faixas de tamanho, principalmente nos tamanhos maiores

Os espectros de liberação da hematita em relação aos do quartzo mostram que, em geral, a hematita apresenta menor liberação do que o quartzo. Na amostra Tipo 3, mais de 64% das partículas se encontram com o grau de liberação entre 80 e 100% enquanto que na amostra Tipo 4 apenas as faixas mais finas (150 – 38 μm), apresentam frações razoáveis nesse grau de liberação da hematita. IF e IFX apresentam altas frações de grau de liberação 95 – 100% nas faixas analisadas.

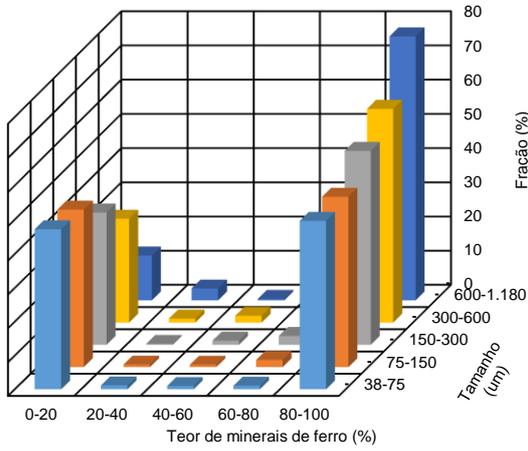
Tipo 3



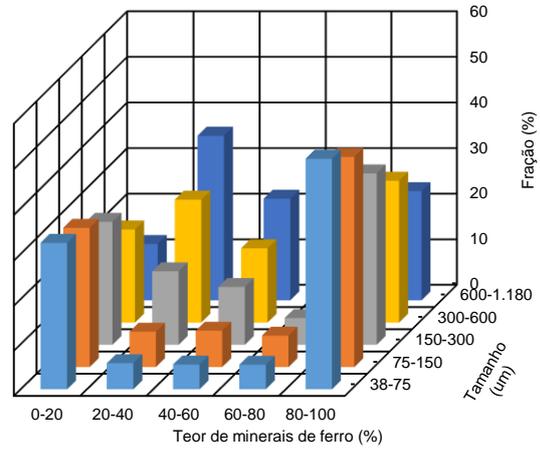
Tipo 4



IF



IFX



Canga

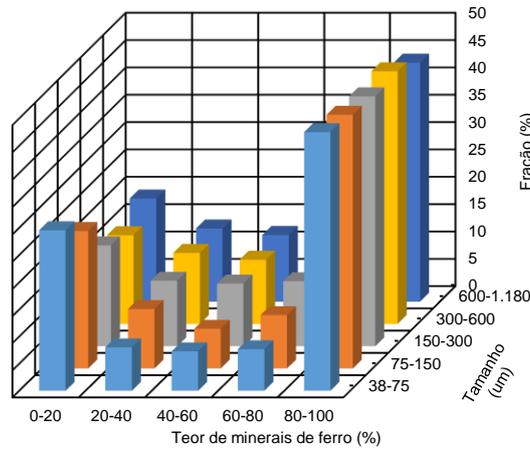


Figura 86. Espectro de liberação dos principais minerais portadores de ferro.

4.5.1 GRAU DE LIBERAÇÃO E FRAÇÃO CUMULATIVA DA LIBERAÇÃO

Os gráficos que mostram o grau de liberação dos minerais de quartzo e de hematita 95 a 100% liberados em função do tamanho da partícula são apresentados na Figura 87. No geral, fica novamente evidenciado que a hematita apresenta liberação mais fina do que o quartzo. Esta observação é explicada pelo fato da hematita apresentar menores tamanhos de grãos, como também pela sua forma majoritariamente tabular com interfaces mais complexas, como descrito na seção 4.1.2.1.

Outra característica microestrutural analisada e que influi na liberação mineral é a associação mineral onde os minerais de ganga estão finamente disseminados em uma matriz, neste caso de hematita. A matriz de hematita da tipologia Tipo 4 apresentou maiores índices de associações finamente disseminadas de quartzo, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.** da seção 4.1.2.1. Isso reflete diretamente na baixa liberação de hematita da tipologia Tipo 4, Figura 87 (direita).

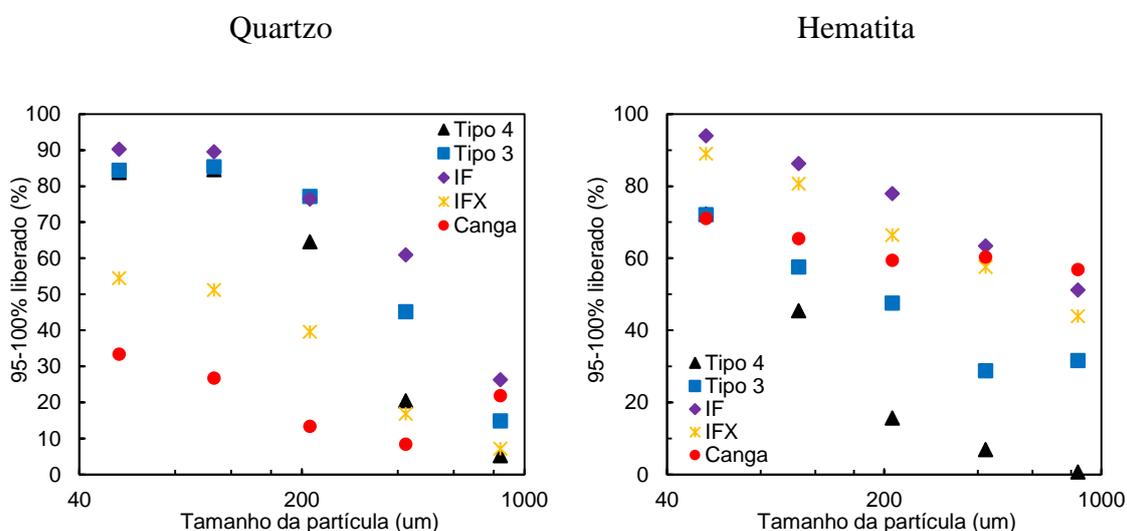


Figura 87. Grau de liberação dos minerais, quartzo à esquerda e hematita à direita, em função do tamanho da partícula, para as diferentes tipologias.

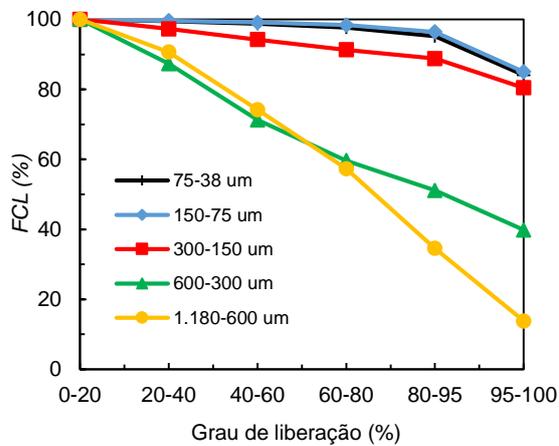
A fração cumulativa de liberação (FCL) é calculada a partir dos espectros de liberação, de acordo com Miller *et al.* (1982) pela equação:

$$FCL_k (\%) = \frac{\sum_i^k f_i}{\sum_i^n f_i}$$

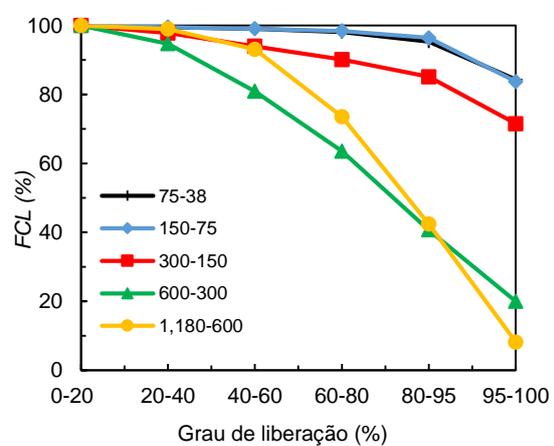
eq. 27

na qual f_i corresponde à i -ésima fração do grau de liberação, n é o número total de graus de liberação e k é o número correspondente ao grau de liberação. A FCL das faixas granulométricas é, então, lançada em gráfico em função do grau de liberação. Esse tipo de gráfico apresenta informações condensadas da liberação mineral e que são úteis para o processamento mineral (Miller *et al.*, 1982).

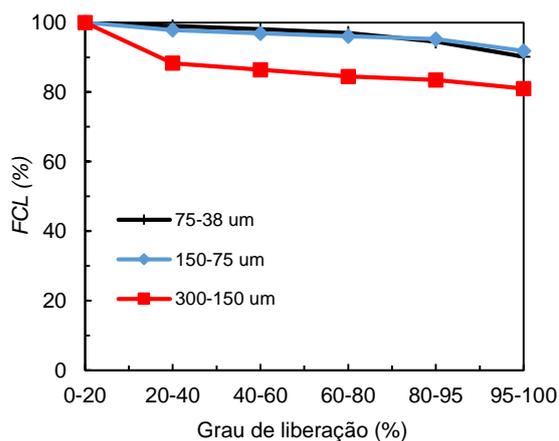
Tipo 3 - Quartzo



Tipo 4 - Quartzo



IF - Quartzo



IFX - Quartzo

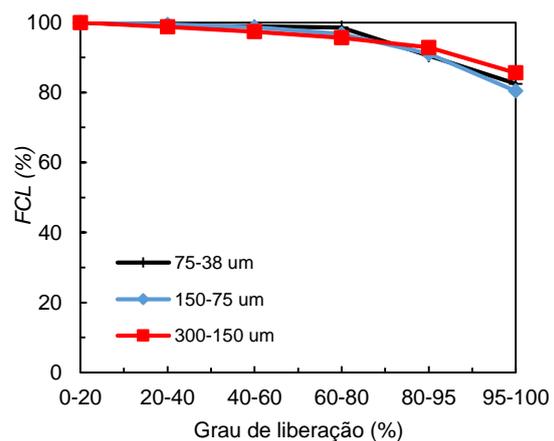


Figura 88. Fração cumulativa de liberação de quartzo das tipologias em função do grau de liberação em diferentes intervalos de tamanhos.

Observando-se a Figura 88, nos tamanhos menores que 300 μm a liberação do quartzo já se apresenta com valores adequados, com exceção para a amostra Tipo 4. Fazendo-se um paralelo com o modelo de liberação mineral de Wiegel (1975) onde a liberação é função e proporcional ao tamanho dos grãos dos minerais no minério, a *FCL* é dependente do tamanho dos grãos de minerais de quartzo, neste caso. Isso corrobora com o fato já apresentado na seção 4.1.2.1 de que o tamanho de grão médio de quartzo da tipologia Tipo 4 é mais fino do que as demais amostras.

A alta liberação do quartzo em tamanhos não tão finos se mostra propícia à aplicação de técnicas de pré-concentração, ou seja, remoção do quartzo livre, em estágios anteriores à moagem, como sugerido recentemente por Hesse *et al.* (2017). Aliada a isso está a predisposição do quartzo em reportar preferencialmente às frações entre 300 μm e 106 μm quando partículas do minério são fraturadas, como apresentado nos resultados de ensaios de quebra (responsável pela função quebra não normalizável) e nas análises químicas das faixas granulométricas. Neste caso, a pré-concentração poderia ser possível por meio de uma simples etapa de classificação pré-moagem para a remoção dessas faixas predominantemente composta por quartzo liberado e deficitária de hematita. Assim, poderia reduzir significativamente o consumo específico de energia na etapa da moagem, visto que o quartzo, como apresentado acima, é extremamente competente, como já observado por Hesse *et al.* (2017).

5 DISCUSSÕES

As diferentes características macro e microscópicas das tipologias que refletem diretamente e indiretamente no comportamento de quebra e que condiciona a liberação são discutidas.

5.1 EFEITO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA/MINERALÓGICA E MICROESTRUTURA NA FUNÇÃO QUEBRA

A composição química/mineralógica das tipologias de minério de ferro de modo genérico apresentaram diferenças notadamente nos minerais de ganga. Os minerais de ganga das amostras Tipo 3, 4 e IF são constituída de SiO_2 em teores entre 45 a 55%, (Tabelas 15 e 16). Estas tipologias apresentaram padrões peculiares das análises

granuloquímicas. Como mostrado nas Figuras 74 e 75, o teor de quartzo entre as faixas de tamanho 53 e 300 μm é bastante superior em relação ao teor médio da amostra, enquanto que, nas faixas menores do que 53 μm o teor de quartzo é inferior ao teor médio. As outras amostras, IFX e Canga, apresentaram Al_2O_3 e em menor quantidade SiO_2 de minerais não portadores de ferro, num total variando entre 20 e 25% (Tabelas 15 e 16). Diferentemente, estas tipologias apresentaram teores de minerais portadores de ferro e não portadores constantes nas faixas de tamanho analisadas, Figura 79.

Nos ensaios de quebra, por sua vez, a distribuição granulométrica resultante da quebra de partículas também apresentou diferenças nítidas entre as amostras. As tipologias Tipo 3, 4 e Blend (composta majoritariamente por IF) apresentaram em suas distribuições granulométricas um ponto de inflexão adicional, como destacado nas Figuras 63 e 68, o qual denota um acúmulo de material nas faixas de tamanho inferiores a esse ponto. Essa característica da distribuição granulométrica dessas amostras se mostrou ser independente da forma de aplicação da carga e da taxa de carregamento usada nos diversos ensaios de quebra, mas intrínseco ao material. Como destacado por Gao e Forssber (1989) e Tavares e Neves (2008) esse aspecto está associado às características microestruturais dos materiais geológicos como tamanho de grão, falhas e trincas preexistentes nos contornos de grãos.

De fato, como foi observado anteriormente na seção de análise microestrutural, a ganga das tipologias Tipo 3, 4 e IF é constituída de quartzo. Essa ganga forma uma matriz constituída de quartzo sacaroidal (aspecto de grânulos de açúcar compactado) com tamanho de grãos mediano variando entre 130 a 170 μm (Tabela 13). A microestrutura sacaroidal, por sua vez, é definida pela presença de grãos de quartzo agregados com pouco empacotamento (Ramdhor, 1969; Dong *et al.*, 1995), embora os grãos de quartzo por si só apresentem elevada resistência (Ribas *et al.*, 2014).

Fenomenologicamente, nessa conjuntura apresentada, a fragmentação das tipologias Tipo 3, 4 e IF ocorre sobretudo por intenso fraturamento nos contornos de grãos na matriz da ganga (quartzo sacaroidal). Assim, as partículas de quartzo povoam preferencialmente as faixas granulométricas próximas ao seu tamanho de grãos mediano estimado (Tabela 13). Quando o teor de quartzo é considerável como no caso dessas tipologias, esse fenômeno causa o ponto de inflexão adicional na função quebra dessas tipologias.

5.2 EFEITO DA ESCALA DE TAMANHO DAS PARTÍCULAS NOS TESTES DE COMINUIÇÃO

As características macroscópicas e microscópicas das tipologias foram descritas na seção 4.1. Algumas destas características são determinantes nas respostas das tipologias nos testes de cominuição e algumas já foram destacadas pontualmente ao longo do texto. No entanto, observando-se genericamente os testes de cominuição, como sumarizado na Tabela 26, uma discussão mais detalhada das características macro e microscópicas é apresentada para compreender a mudança da hierarquia de competência entre as amostras quando a dimensão das partículas é mais fina, mais especificamente nas moagens. Na Tabela 26 é apresentada a resposta dos testes de cominuição em relação à dimensão de tamanho em níveis relativos de 1 (menor) a 5 (maior) das tipologias.

Tabela 26. Sumário das respostas aos ensaios de quebra das diferente tipologias de minério de ferro

Dimensão de tamanho	Teste	Característica	Tipologias de minério de ferro				
			T3	T4	IF	IFX	Cg
Grossa	Britabilidade	Resistência ao impacto	3	5	2	1	4
	PLT	Resistência à carga pontual	4	5	3	1	2
Intermediária	Ai de Bond	Abrasividade	4	5	3	2	1
	Los Angeles	Fragmentação por abrasão	3	1	4	5	2
	DWT	Fragmentação por impacto	3	1	4	5	2
	CLP	Fragmentação por compressão	3	2	4	5	1
Intermediária a fina	Moagens	Competência na moagem	5	3	4	2	1
		Moabilidade (<106 µm)	1	4	2	5	3

5 – maior; 3 – intermediário; 1 – menor.

Macroscopicamente, as características estruturais como a formação bandada ou a porosidade influenciem mais diretamente nas características de quebra das partículas mais grossas. Para as partículas mais finas, tais características já não influenciam tanto e o que

se torna relevante são, dentre outros, os tamanhos de grãos, o arranjo entre os diferentes grãos de minerais, suas formas e suas resistências. Análises semelhantes já foram realizadas com outros minérios por Doll e Barrat (2009).

A região entre os grãos é geralmente mais fraca do que a região ordenada no interior dos grãos (Wills e Atkinson, 1993; Middlemiss e King, 1996). Dependendo da forma dos grãos e do contorno intergranular estes podem facilitar ou dificultar a propagação de trincas. Essas características quando mais complexas aumentam a resistência do minério (Tavares e Neves, 2008).

Tanto macroscopicamente como microscopicamente a microestrutura da amostra Tipo 4 se apresenta mais complexa com pouca ou nenhuma estrutura bandada. Nesta tipologia, os minerais de ganga estão finamente dispersos de modo aleatoriamente e entrelaçados pela matriz de minérios de ferro (Figuras 44 e 49b). Além disso, essa tipologia apresenta um tamanho de grão médio menor do que as outras amostras, o que reflete numa maior resistência mecânica em materiais geológicos (Sun *et al.*, 2017).

Diferentemente, nas amostras com estruturas bandadas, Tipo 3 e IF, apresentam uma microestrutura menos complexa. Nessas tipologias os minerais de ganga e de ferro estão dispostos em camadas (Figuras 44, 45, 49a e 49c). Além disso, essas tipologias apresentam um tamanho de grão médio maior do que a amostra Tipo 4. Essas características conferem baixa resistência mecânica em materiais geológicos (Sun *et al.*, 2017).

No entanto, quando se trata de dimensões mais finas, tamanho próximo ao tamanho dos grãos, as características macroscópicas não atuam predominantemente como nas partículas de dimensões grandes e intermediárias. Em tamanho da ordem do tamanho dos grãos as principais características que influem na resistência do material é a resistência interna dos grãos dos minerais e o tamanho de grão (Tavares e Neves, 2008; Doll e Barrat, 2009).

Desta forma, a mudança da hierarquia de competência na dimensão mais fina (Tabela 26), onde a tipologia Tipo 4 se mostrou intermediária a pouca competência nos ensaios de moagem, é explicada pelo fato do seu menor tamanho de grão média do que as tipologias Tipo 3 e IF.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foram investigadas as características mineralógicas, de quebra e de liberação de diferentes tipologias de minério de ferro da mina da Anglo American em CMD. No processamento mineral essa variabilidade de minérios de ferro influi significativamente no desempenho da usina como um todo. Assim, diversos ensaios de quebra e análises dos minérios foram realizados para identificar e responder a causa da variabilidade no desempenho da usina na etapa de cominuição, bem como para propor alternativas para mitigar a variação de desempenho.

Os resultados das análises química e mineralógica de amostras representativas das tipologias mostrou a existência de dois grupos bem distintos de minérios de ferro. Um grupo com baixo teor de quartzo (4 – 10%) e alto teor de minerais portadores de ferro (70 – 80%) representado pelas amostras Canga e IFX. O outro grupo com alto teor de quartzo (45 – 55%) e menor teor de minerais portadores de ferro (42 – 53%). No entanto, estas análises sozinhas não respondem a todos os comportamentos das amostras na cominuição.

As análises macro e microestrutural das amostras mostraram diferenças nas estruturas e microestruturas. A estrutura bandada (laminada) composicional de minérios de ferro e de quartzo se apresenta dominante. No entanto, a intensidade de foliação varia entre as amostras progredindo de pouca ou nenhuma laminação Tipo 4 à intensamente laminada, ou xistosa, IFX. Conseqüentemente, a estrutura pouco laminada se apresenta com associação e interface entre os minerais mais complexa.

Os ensaios de quebra de partículas individuais que medem a resistência à fratura, pêndulo duplo de Bond e PLT, apresentaram a mesma tendência de resistência das tipologias e em escalas de tamanho grande e média, respectivamente. A amostra Tipo 4, mostrou-se notoriamente mais competente que as demais, seguido por Tipo 3, Blend, IF, Canga e IFX.

Outro aspecto dos ensaios de quebra está relacionado à fragmentação das partículas, DWT e CLP. Os índices A^*b obtidos pelo ensaio de DWT quanto pelo ensaio CLP mostraram que a fragmentação em pré-determinadas energias e forças das tipologias Tipo 4 e Canga são menores. A forma da curva da distribuição das progênies, função quebra, geradas se mostraram independentes da forma ou taxa de aplicação da carga, impacto no DWT e compressão lenta no CLP. No entanto, a forma da função quebra se mostrou diferente entre as tipologias. Nas tipologias Tipo 4, Tipo 3, IF e Blend a função

quebra se apresenta com um ponto de inflexão adicional e são ditas não normalizáveis, enquanto que Canga e IFX são normalizáveis.

As análises granulométricas das progênes das tipologias não normalizáveis, ou seja, Tipo 4, Tipo 3, IF e Blend, revelaram concentração de quartzo nas faixas de tamanho ligeiramente inferiores ao ponto de inflexão, mostrando uma tendência dos minerais de quartzo em reportar preferencialmente a esses tamanhos. A presença de quartzo sacaroidal compactado com tamanho de grãos médio ligeiramente abaixo do ponto de inflexão e seu alto teor de quartzo (45 – 55%) nessas amostras se mostram decisivos no comportamento da função quebra destes minérios. Diferentemente das amostras com função quebra normalizável onde o teor de quartzo é significativamente inferior (4 – 10%) e invariável nas faixas granulométricas.

Nos ensaios de partículas de dimensões de intermediárias a pequena, principalmente no moinho de 58 x 24 cm, ocorreu uma mudança na ordem de competência das amostras. Diferentemente dos ensaios onde o tamanho das partículas são maiores, a amostra Tipo 4 se mostrou menos competente do que as amostras Tipo 3, IF e Blend. Interessantemente, a microestrutura da amostra Tipo 4 apresenta tamanhos de grãos menores e tal característica é sinônimo de maior resistência em materiais geológicos. No entanto, na moagem tal característica representa menor competência. No aspecto geração de finos, mesmo em baixas energias ou tempos de moagem, as amostras Canga e IFX produzem finos acentuadamente.

Na simulação dos produtos dos tempos de moagem e recálculo das funções quebra e seleção, a utilização da função quebra não normalizável se mostrou uma ótima rota para simular, principalmente para uma melhor estimação da parte fina da distribuição de tamanho do produto.

Assim como as características de quebra e fragmentação, a liberação também é condicionada pelas características mineralógicas e microestruturais. Nas faixas de tamanho analisadas, a hematita apresentou menores graus de liberação do que os minerais de quartzo. Isso se deve principalmente ao seu menor tamanho médio de grão. O alto índice de associação mineral complexa ou finamente disseminados juntamente com os tamanhos dos grãos dos minerais menores refletem diretamente na baixa liberação mineral da amostra Tipo 4.

Por fim, é sugerido um estudo mais detalhado da influência das partículas de quartzo, principalmente na moagem onde seu efeito se mostrou mais significativo. Também, devido ao fato da boa liberação do quartzo em malhas bem maiores do que a malha de moagem, é sugerido avaliar a aplicabilidade de técnicas de pré-concentração visando melhorar a eficiência da moagem.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA-ABREU, P.A. & RENGER, F.E., (2007). Stratigraphy and facies of the southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil. *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 158(1), 9–29.
- ALRUIZ, O.M., MORREL, S., SUAZO, C.J., NARANJO, A., (2009). A novel approach to the geometallurgical modelling of the Collahuasi grinding circuit. *Minerals Engineering*, v. 22, p. 1060-1067.
- ARAUJO, A.C., AMARANTE, S.C., SOUZA, C.C., SILVA, R.R.R., (2003). Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores. *Miner. Process. Ext. Metall.* (Trans. Inst. Min. Metall. Sect. C) 112, C54-C64.
- AUSTIN, L. G., CONCHA, F., (1994). *Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación*. CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Red de Fragmentacion XIII-A.
- AUSTIN, L.G., KLIMPEL, R.R., LUCKIE, P.T., (1984). The process engineering of size reduction: ball milling, *SME-AIME*, p. 84– 86.
- AUSTIN, L.G., LUCKIE, P.T., (1972). The estimation of non-normalized breakage distribution parameters from batch grinding tests. *Powder Technology*, v. 5, p. 267-271.
- BARBERY, G., (1992). Liberation 1, 2, 3: theoretical analysis of the effect of space dimension on mineral liberation by size reduction. *Miner. Eng.*, 5, 123–141.
- BEARMAN, R.A., BRIGGS, C.A., KOJOVIC, T., (1997). The application of rock mechanics parameters to the prediction of comminution behavior. *Minerals Engineering*, v. 10, p. 255 – 264.
- BENZER, H., DUNDAR, H., ALTUN, O., TAVARES, L.M.M., POWELL, M. et. al., (2017). HPGR simulation from piston-die tests with an itabirite ore. *Int. Eng. J., Ouro Preto*, v. 70, p. 99-107.
- BERGSTROM, B.H., IN: N.L. WEISS, (1985). *SME Mineral Processing Handbook*, SME, Littleton, p. 30.

- BÉRUBÉ, M. A., MARCHAND, J. C. (1984). Evolution of the mineral liberation characteristics of an iron ore undergoing grinding. *International Journal of Mineral Processing*, 13, 223-237.
- BOND, F.C. (1947). Crushing tests by pressure and impact. *Trans. AIME*, v. 169, p. 58–66.
- BOND, F.C. (1952). The third theory of comminution. *Transactions of AIME*, v. 193, p. 484-494.
- BOURGEOIS F.S., LIPPIATT N.R., POWELL M.S. (2015). Introducing the concept of mechanical texture in comminution: The case of concrete recycling. *International Journal of Mineral Processing*, v. 136, p. 7–14.
- CARRASCO, C., KEENEY, L., NAPIER-MUNN, T.J. (2016). Methodology to develop a coarse liberation model based on preferential grade by size responses. *Miner. Eng.*, v. 86, p. 149–155.
- CARVALHO, R.M. (2009). *Desenvolvimento de modelo matemático generalizado da cominuição*. UFRJ/COPPE.
- CLARKE, A.J., WILLS, B.A. (1989). Enhancement of cassiterite liberation by high-pressure roller comminution. *Minerals Engineering*, 2 (2), 259–262.
- CLOUT, J.M.F. (2002). Upgrading processes in BIF-derived iron ore deposits—implications for ore genesis and downstream processing. *In: Proceedings of Iron Ore 2002 Conference*, Perth, Western Australia, AusIMM, 7/2002, pp. 237-242.
- CLOUT, J.M.F. (2005). Iron formation-hosted iron ores in the Hamersley Province of Western Australia. *In: Proceedings of Iron Ore 2005 Conference*, Perth, Western Australia, AusIMM 8, pp. 9–19.
- CORNELL, R. M., SCHWERTMANN, U. (2003). *The Iron Oxides, Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses*, 2 ed., Weinheim, New York, Wiley-VCH.
- CRIDDLE, A.J., STANLEY, C.J. (1993). *Quantitative Data File for Ore Minerals*, third ed. Chapman & Hall, London. 635 pp.

- DAS, P. K., KHAN, A. A., & PITCHUMANI, B. (1995). Solution of the batch grinding equation. *Powder Technology*, v. 85, p. 189-192.
- DELBEM, E., GALÉRY, R., BRANDÃO, P.R.G., PERES, A.E.C. (2015). Semi-automated iron ore characterisation based on optical microscope analysis: Quartz/resin classification. *Minerals Engineering*, v. 82, p. 2–13.
- DEVASAHAYAM, S. (2013). Abrasion characteristics of ores. *Mineral Processing e Extractive Metall.*, v. 34, p. 114-129.
- DOLL, A., BARRATT, D. (2009). Case studies on the effect of sample dimensions on comminution testwork results. *ProceMin*, Santiago, Chile.
- DONSKOI, E., MANUEL, J.R., CLOUT, J.M.F., ZHANG, Y. (2007). Mathematical modeling and optimization of iron ore sinter properties. *Israel Journal of Chemistry*, 47, 373-379.
- DONSKOI, E., MANUEL, J.R., HOLMES, R.J., POLIAKOV, A., RAYNLYN T. (2009). Advances in mathematical modelling of sintering performance of iron ore fines. *In: Iron Ore Conference 2009, July 27-29, 2009, Perth, WR, Australia*, 341-349.
- DONSKOI, E., POLIAKOV, A., HOLMES, R., SUTHERS, S., WARE, N., MANUEL, J., CLOUT, J. (2016). Iron ore textural information is the key for prediction of downstream process performance *Minerals Engineering*, v. 86, p. 10–23.
- DONSKOI, E., POLIAKOV, A., MANUEL, J., PETERSON, M., HAPUGODA, S. (2013). Industrial strength optical image analysis system–Mineral4/Recognition4. *In: Iron Ore Conference 2013, August 12-14, 2013, Perth, WA, Australia*, pp. 227-241.
- DONSKOI, E., SUTHERS, S.P., CAMPBELL, J.J., RAYNLYN, T. (2008). Modelling and optimization of hydrocyclone for iron ore fines beneficiation using optical image analysis and iron ore texture classification. *Int. J. Miner. Process.* 87, 106-119.
- DORR, J.V.N. (1964). Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, v. 59, p. 1203-1240.

- DUNDAR, H., BENZER, H., AYDOGAN, N. (2013). Application of population balance model to HPGR crushing. *Mineral Engineering*, v. 50-51, 114-120.
- EPSTEIN, B. (1948). Logarithmico-normal distributions in breakage of solids, *Ind.Eng.Chem.*, v. 40, p. 2289-2291.
- FANDRICH, R. G., BEARMAN, R. A., BOLAND, J., LIM, W. (1997). Mineral liberation by particle bed breakage. *Minerals Engineering*, 10, 175-187.
- FANDRICH, R., GU, Y., BURROWS, D., MOELLER, K. (2007). Modern SEM-based mineral liberation analysis. *International Journal of Mineral Processing*, v. 84 (1-4), 310-320.
- FERREIRA, R.F. (2013). *Estudo de liberação das fases minerais em minérios de ferro*. Tese de M.Sc., PPGEM/UFOP, Minas Gerais, MG, Brasil.
- GAO, M.W., FORSSBERG, E. (1989). The effect of powder filling on selection and breakage functions in batch grinding. *Powder Technology*, v. 59, p. 275 – 283.
- GAUDIN, A. M. (1939). *Principles of mineral dressing*, New York, London, McGraw-Hill Book Co.
- GOTTLIEB, P. (2008). The revolutionary impact of automated mineralogy on mining and mineral processing. *Conference Paper*, 165-174.
- GOTTLIEB, P., WILKIE, G., SUTHERLAND, D., HO-TUN, E., SUTHERS, S., PERERA, K., JENKINS, B., SPENCER, S., BUTCHER, A., RAYNER J. (2000). Using Quantitative Electron Microscopy for Process Mineralogy Applications. *Microtextural Mineralogy Testing & Analysis*, 24-25.
- GRIBBLE, C.D., HALL, A.J. (1985). *A Practical Introduction to Optical Mineralogy*. 1 ed. London, Springer.
- GRIFFITH, A.A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. R Soc.* 221, 163-198.
- GUPTA, V.K., HODOUIN, D., BERUBE, M.A. EVERELL, M.D. (1981). The estimation of rate and breakage distribution parameters from batch grinding data for a complex pyritic ore using a back-calculation method. *Powder Technology*, v. 28, p. 97-106.

- HAFFEZ, G.S.A. (2012). Correlation between bond work index and mechanical properties of some saudi ores. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*, v. 40, p.271-280.
- HARTLEY, J.N., PRISBREY, K.A., WICK, O.J. (1978). Chemical additives for ore grinding: how effective are they? *Eng. Min. J.*, vol. 179, n°:10, 105-111.
- HERBST, J.A., FUERSTENAU, D.W. (1980). Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models. *Int. J. Miner. Process.*, v. 7, p. 1-31.
- HESSE, M., POPOV, O., LIEBERWIRTH, H. (2017). Increasing efficiency by selective comminution. *Min. Eng.*, v. 103-104, p. 112–126.
- HIRAMATSU, Y., OKA, Y. (1966). Determination of the tensile strength of rock by compression test of an irregular test piece. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* v. 3, p. 89–99.
- HOSTEN, C. (2005). An alternative solution to the grinding equation in cumulative size distribution form. *Minerals Engineering*, v. 18, p. 489-493.
- HOSTEN, C., CIMILLI, H. (2009). The effects of feed size distribution on confined-bed comminution of quartz and calcite in piston-die press. *Int. J. Miner. Process.*, v. 91, p. 81-87.
- HOSTEN, C., OZBAY, C. (1998). A comparison of particle bed breakage and rod mill grinding with regard to mineral liberation and particle shape effects. *Miner. Eng.*, 11, 871–874.
- INGLIS, C.E. (1913). Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Trans. Royal Inst. Naval Arch.* 60, p. 219-241.
- KASLING, H., THURO, K. (2010). Determining rock abrasivity in the laboratory. In: *ISRM International Symposium - EUROCK 2010*, 15-18.
- KELLERWESSEL, H. (1996). High pressure particle bed comminution, state of the art, application, recent developments. *Eng. Min.*, p. 45–52.
- KELLY, E.G., SPOTTISWOOD, D.J. (1990). The breakage function; What is it really? *Miner. Eng.*, v. 3, p. 405–414.

- KICK, F. (1885). *Des gesetz der proportionalem wider-stand und seine anwendung*. Felix, Leipzig.
- KING, R.P. (2002). *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Butterworth-Heinemann, 2ed., Boston.
- KING, R.P., BOURGEOIS, F. (1993). Measurement of Fracture Energy during Single-Particle Fracture, *Minerals Engineering*, 6 (1993) 4, pp. 353 – 367.
- KING, R.P., SCHNEIDER, C. (1993). An effective SEM-based image analysis system for quantitative mineralogy. *Kona* 11.
- KING, R.P., SCHNEIDER, C. (1998). Stereological correction of linear grade distributions for mineral liberation. *Powder Technol.*, 98-1, 21–37.
- KLEIN, C., DUTROW, B. (2001). *Manual of Mineral Science*. 22 ed., New York, Wiley.
- KLIMPEL R.R. (1982). Chemical additives for wet grinding of minerals. *Powder Technology*, 31, 239 – 253.
- KLIMPEL, R.R., AUSTIN, L.G. (1977). The back-calculation of specific rates of breakage and non-normalized breakage distribution parameters from batch grinding data. *International Journal of Mineral Processing*, v. 4, p. 7-32.
- KROGH, S.R. (1980). Crushing characteristics. *Powder Technol.*, v. 27, p. 171–181.
- KRUSKAL, W.H., WALLIS, W.A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, v. 47, p. 583-621.
- KUMAR, D.R., SRINIVAS, R.D., RAM, R.P.S. (2013). Magnetic separation studies for a low grade siliceous iron ore sample. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23, 1–5.
- LASCELLES, D.F. (2012). Banded iron formation to high-grade iron ore: a critical review of supergene enrichment models. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 59, 1105–1125.
- LÄTTI, D., ADAIR, B.J.I. (2001). An assessment of stereological adjustment procedures. *Miner. Eng.*, 14, 1579–1587.
- LEIßNER, T., HOANG, D.H., RUDOLPH, M., HEINIG, T., BACHMANN, K., GUTZMER, J., SCHUBERT, H., PEUKER, U.A. (2016). A mineral liberation

- study of grain boundary fracture based on measurements of the surface exposure after milling. *International Journal of Mineral Processing*, v. 156, p. 3–13.
- LIMA, R.M.F., LOPES, G.M., GONTIJO, C.F. (2011). Aspectos mineralógicos, físicos e químicos na flotação catiônica inversa de minérios de ferro de baixos teores, do quadrilátero ferrífero-MG. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 126-131.
- LIN, C.L., MILLER, J.D. (2002). Cone beam X-ray microtomography - a new facility for three-dimensional analysis of multiphase materials. *Minerals & Metallurgical Processing*, 19, 65-71.
- LINDQVIST, J. E., ÅKESSON, U., MALAGA, K. (2007). Microstructure and functional properties of rock materials. *Materials Characterization*, v. 58, n. 11-12 SPEC. ISS., p. 1183–1188.
- LITTLE, L., MAINZA, A.N., BECKER, M., WIESE, J.G. (2016). Using mineralogical and particle shape analysis to investigate enhanced mineral liberation through phase boundary fracture. *Powder Technol.*, 301, 794–804.
- LIU, L., TAN, Q., LIU, L., CAO, J. (2018). Comparison of different comminution flowsheets in terms of minerals liberation and separation properties. *Minerals Engineering*, 125, 26–33.
- LOVEDAY, B.K. (1967). An analysis of comminution kinetics in terms of size distribution parameters. *J. of South African Inst. Min. Metall.*, v. 68, p.111-131.
- LYNCH, A.J. (1977), *Mineral crushing and grinding circuits; their simulation, optimisation, design and control*. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam, Netherlands.
- MARIANO, R.A., EVANS, C.L., MANLAPIG, E. (2016). Definition of random and non-random breakage in mineral liberation - A review. *Miner. Eng.*, 94, 51–60.
- MARQUES, R.S. (2016). *Metodologia para controle de qualidade de minério e destinação de blocos de lavra usando raios-x*. PPGTM/UNIPAMPA, Caçapava do Sul, RS, Brasil.

- MARTINS, M., LIMA, N.P., FILHO, L.S.L. (2012). Depressão de minerais de ferro: influência da mineralogia, morfologia e pH de condicionamento. *Rem: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 65(3), 393-399.
- MAZZINGHY, D.B., TURRER, H.D.G., RUSSO, J.F.C., TAVARES, L.M. (2014). Influence of the mineralogical structure in grinding specific energy consumption of itabirite iron ores. In: *9th International Comminution Symposium*. Cape Town.
- MERKUS, H.G. (2009). *Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality*. Springer Science & Business Media.
- MILIN, L. (1994). *Modeling the $t_{10} \times t_n$ relationship by the incomplete beta function*. University of Utah.
- MILLER, P.R., REID A.F., ZUIDERWYK, M.A. (1982). QEMSEM image analysis in the determination of modal assays, mineral associations and mineral liberation. In: *Proceedings XIV International Mineral Processing Congress*, Toronto, Canada.
- MONTGOMERY, D.C. (2013). *Design and analysis of experiments*. 8 ed., New York, John Wiley & Sons.
- MORRELL, S. (2004). An alternative energy-size relationship to that proposed by Bond for the design and optimization of grinding circuits. *International Journal of Mineral Processing*, v. 74, p. 133-141.
- MORRELL, S., LIM, W., SHI, F., TONDO, L. (1997). Modelling of the HPGR crusher. In Kawatra, S. K., editor, *Comminution Practices*.
- MOURÃO, J. M., STEGMILLER, L. (1990). Influência da estrutura dos minérios de ferro na sua moabilidade. In: *Encontro nacional de tratamento de minérios e hidrometalurgia*, 14., São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1990. v. 1, p. 221-243.
- NAPIER-MUNN, T.J., MORRELL, S., MORRISON, R.D. (1996). *Mineral Comminution Circuits: Their operation and optimization*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, Brisbane.
- NARAYANAN, S.S., WHITEN, W.J. (1983). Breakage characteristics of ore ball mill modelling. In: *Proceedings AusIMM*, v. 286, p. 31-39.

- NEUMANN, R., SCHNEIDER, C.L., NETO, A.A. (2010). Caracterização tecnológica de minérios parte II. In: *tratamento de minérios, centro de tecnologia mineral – CETEM*, 5ª Edição, capítulo 3, p. 85-139. Rio de Janeiro.
- NOURI, A., SOLA, A. (2018). Metal particle shape: A practical perspective. *Metal Powder Report*, v. 73(5), p. 276-282.
- OKA, Y., MAJIMA, W. (1970). A theory of size reduction involving fracture mechanics. *Can. Metall.*, v. 9, p. 429-439.
- OZCAN, O., BENZER, K. (2013). Comparison of different breakage mechanisms in terms of product particle size distribution and mineral liberation. *Miner. Eng.*, 49, 103–108.
- PALM, N.A., SHACKLETON, N.J., MALYSIAK, V., O’CONNOR, C.T. (2010). The effect of using different comminution procedures on the flotation of sphalerite. *Miner. Eng.* 23, 1053–1057.
- PIRAJNO, F. (2009). *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. 1 ed. Berlin, Springer.
- PIRARD, E. (2004). Multispectral imaging of ore minerals in optical microscopy. *Mineral. Mag.* 68, 323–333.
- PIRARD, E., LEBICHOT, S., KRIER, W. (2007). Particle Texture Analysis Using Polarized Light Imaging and Grey Level Intercepts, *Int. J. of Mineral Processing*, v.84, p. 299 – 309.
- PIRES E SOUZA, A.A., FIGUEIREDO E SILVA, R.C., ROSIÈRE, C.A., DIAS G.S., MORAIS F.P. (2015). Estudos geoquímicos de itabiritos da Serra do Sapo, Espinhaço meridional, Minas Gerais. *Genomos*, 22, 1-17.
- PORPHÍRIO, N.H., BARBOSA, M.I., BERTOLINO, L.C. (2010). Caracterização Tecnológica de Minérios Parte I. In: *Tratamento de Minérios, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM*, 5ª Edição, capítulo 3, p. 57-84. Rio de Janeiro, 2010.
- POWELL, M.S., GOVENDER, I., MCBRIDE, A.T. (2008). Applying DEM outputs to the unified comminution model. *Minerals Engineering*, 21, 744–750.

- QUARESMA, L.F. (2015). *Perfil da mineração de ferro*. Ministério e Minas e Energia – MME.
- RADZISZEWSKI, P. (2013). Energy recovery potential in comminution processes. *Miner. Eng.* 46-47, 83-88.
- RAJAMANI, R.K., HERBST, J.A. (1984). Simultaneous estimation of selection and breakage functions from batch and continuous grinding data. *Trans. Instn. Min. Metall.*, Sec. C 93, p. 74–85.
- RAMKRISHNA, D. (2000). *Population balances - Theory and applications to particulate systems in engineering*. San Diego, Academic Press.
- REID, K.J. (1965). A solution to the batch grinding equation. *Chem. Eng. Sci.*, v. 20, p. 953-963.
- REYES, F., LIN, Q., CILLIERS, J.J., NEETHLING, S.J. (2018). Quantifying mineral liberation by particle grade and surface exposure using X-ray microCT. *Minerals Engineering*, 125, 75–82.
- RIBAS, L.F., CORDEIRO, G.C., TOLEDO FILHO, R.D., TAVARES, L.M. (2014). Measuring the strength of irregularly-shaped fine particles in a microcompression testes, *Minerals Engineering*, v. 65, p. 149-165.
- RODRÍGUEZ, V.A., CARVALHO, R.M., TAVARES, L.M. (2018). Insights into advanced ball mill modelling through discrete element simulations. *Mineral Engineering*, v. 127, p. 48-60.
- ROLIM, V.K. (2016). *As formações ferríferas da região de Conceição do Mato Dentro - MG: posicionamento estratigráfico, evolução tectônica, geocronologia, características geoquímicas e gênese dos minérios*. Tese de Doutorado, UFMG, Minas Gerais, MG, Brasil.
- ROLIM, V.K., ROSIÈRE, C.A., SANTOS, J.O.S., MCNAUGHTON, N.J. (2016). The orosirian-statherian banded iron formation-bearing sequences of the southern border of the espinhaço range, Southeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 65, 43-66.

- ROSIÈRE, C.A., CHEMALE JR., GUIMARÃES, M.L.V. (1993). Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I e II, *Geonomos*, v.1 e v. 4, n. 1, p. 65–84 e 61-75.
- ROSIÈRE, C.A., CHEMALE, J.R.F. (2000). Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão. *Geonomos*, 8(2), 27-43.
- ROSIÈRE, C.A., RIOS, F.J. (2004). The origin of hematite in high-grade iron ores based on infrared microscopy and fluid inclusion studies: the example of the Conceição mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Economic Geology*, v. 99, p. 611–624.
- ROSIÈRE, C.A., SIEMES, H., QUADE, H., BROKMEIER, H.G., JANSEN, E.M. (2001). Microstructures, textures and deformation mechanics in hematite. *Journal of Structural Geology*, v. 23, p. 1429-1440.
- ROSIÈRE, C.A., SPIER, C.A., RIOS, F.J., SUCKAU, V.E. (2008). The itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ore deposits: An overview. *Reviews in Economic Geology*, v. 15, p. 223–254.
- ROZENBLAT, Y., GRANT, E., LEVY, A., KALMAN, H., TOMAS, J. (2012). Selection and breakage functions of particles under impact loads. *Chemical Engineering Science*, v. 71, p. 56-66.
- SAEIDI, F., YAHYAEI, M., POWELL M., TAVARES, L.M. (2017). Investigating the effect of applied strain rate in a single breakage event. *Minerals Engineering*, v. 100, p. 211-222.
- SANDMAN, D. (2015). *Method Development in Automated Mineralogy*. Universität Bergakademie Freiberg, Germany, 176p.
- SANTOS, L.D., BRANDÃO, P.R.G. (2003). Morphological varieties of goethite in iron ores from Minas Gerais, Brazil, *Minerals Engineering*, 16, p.1285-1289.
- SCHENA, G., CHIARUTTINI, C. (2000). A stereological posed mass balance for calculating the distributed efficiency of particle separation systems. *International Journal of Mineral Processing*, v. 59 (2), p. 149–162.
- SCHENA, G., SANTORO, L., FAVRETTO, S. (2007). Conceiving a high resolution and fast X-ray CT system for imaging fine multi-phase mineral particles and retrieving mineral liberation spectra. *Int. J. Miner. Process.*, 84, 327–336.

- SCHNEIDER, C.L. (1995). *Measurement and calculation of liberation in continuous milling circuits*. Dissertation/Thesis, ProQuest.
- SCHONERT, K. (1979). Aspects of physics of breakage relevant to comminution. In: *Proceedings of the 4^o Tewksbury Symposium*, Melbourne, p. 1-9
- SCHONERT, K. (1996). The influence of particle bed configurations and confinements on particle breakage. *International Journal of Mineral Processing*, v. 44–45, p. 1–16.
- SCHOPFER, M.P.J., ABE, S., CHILDS, C., WALSH, J.J. (2009). The impact of porosity and crack density on the elasticity, strength and friction of cohesive granular materials: Insights from DEM modelling. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v. 46, p. 250– 261.
- SHI, F., KOJOVIC, T. (2007). Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect. *International Journal of Mineral Processing*, v. 82, p. 156–163.
- SILVA, C.C. (2003). *A influência das características micro-estruturais de minérios de ferro em suas moagens*. Tese de D.Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- SILVA, N.V. (2018). *Método de determinação de resistência à tração e modulo de elasticidade de partículas de agregados graúdos naturais*. Tese de M.Sc. PPGEC/USP, São Paulo, SP, Brasil.
- SILVEIRA BRAGA, F.C., ROSIÈRE, C.A., QUEIROGA, G.N., ROLIM, V.K., SANTOS, J.O.S., MCNAUGHTON, N.J. (2015). The Statherian itabirite-bearing sequence from the Morro Escuro Ridge, Santa Maria de Itabira, Minas Gerais, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 58, 33-53.
- SOLOMON, N., BECKER, M., MAINZA, A., PETERSEN, J., FRANZIDIS, JP. (2011). Understanding the influence of HPGR on PGM flotation behavior using mineralogy, *Miner. Eng.*, v. 24, p. 1370–1377.
- SPENCER, S., SUTHERLAND, D. (2000). Stereological correction of mineral liberation grade distributions estimated by single sectioning of particles, *Image Anal. Stereol.*, v. 19, p. 175-182.

- SPIER, C.A., OLIVEIRA, S.M.B., ROSIÈRE, C.A. (2003). Geology and geochemistry of the Águas Claras and Pico Iron Mines, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 751-774.
- SUAZO, C.J., KRACHT, W., ALRUIZ, O.M. (2010). Geometallurgical modelling of the Collahuasi flotation circuit. *Minerals Engineering*, v. 23(2), p. 137–142.
- TAVARES, L. M. (2000). Role of particle microstructure in comminution. *Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress, Elsevier*.
- TAVARES, L.M. (2004). Optimum routes for particle breakage by impact. *Powder Technology*, v. 142, p. 81–91.
- TAVARES, L. M. (2017). A review of advanced ball mill modeling. *KONA Powder and Particle Journal*, v. 34, p. 106-124.
- TAVARES, L.M., NEVES, P.B. (2008). Microstructure of quarry rocks and relationships to particle breakage and crushing. *International Journal of Mineral Processing*, v. 87, p. 28–41.
- TAVARES, L.M. (1999). Energy Absorbed in Breakage of Single Particles in Drop Weight Testing, *Minerals Engineering*, 12, pp. 43 – 50.
- TAVARES, L.M. (1997). *Microscale Investigation of Particle Breakage applied to the Study of Thermal and Mechanical Predamage*. Ph.D. dissertation, Univ. of Utah, Salt Lake City.
- TAVARES, L.M. (2005). Particle weakening in high-pressure roll grinding. *Miner. Eng.*, 18, 651–657.
- TAVARES, L.M. (2007). Chapter 1: *Breakage of Single Particles: Quasi-Static*. *Handbook of Powder Technology*, V. 12, N. 21, p. 3-68.
- TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M. (2009). Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills. *Minerals Engineering*, 22(7-8), pp.650–659.
- TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M., ALVES, V.K., LIMA, N. (2012). On Design of Ball Mills for Grinding Itabirite Ores, *In: Anais, 13o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro*, 2012, Rio de Janeiro.

- TAVARES, L.M., KING, R.P. (1998). Single-particle fracture under impact loading, *Int. Journal of Mineral Processing*, 54 (1998), pp. 1 – 28.
- TAVARES, L.M., KING, R.P. (2002). Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics. *Powder Technology*, v. 123, n. 2-3, p. 138–146.
- TAVARES, L.M., SILVEIRA, M.A.C.W. (2008). Comparison of measures of rock crushability. In: *Yekeler, M. (Ed.), Fine Particle Technology and Characterization*. Research Signpost, pp. 1–20.
- TROMANS, D. (2008). Mineral comminution: energy efficiency considerations. *Minerals Engineering*, 21 (8), 613–620.
- UPADHYAY, R.K, ROY, S., VENKATESH, A.S., RAO, M.V.S., BANERJEE, P.K. (2009). Relevance of geological aspects and ore mineralogy in selecting beneficiation methods for processing of eastern Indian iron ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, vol. 118, 49 – 59.
- VIZCARRA, T.G., WIGHTMAN, E.M., JOHNSON, N.W., MANLAPIG, E.V. (2010). The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores. *Miner. Eng.* 23, 1013–1022.
- VOGEL, L., PEUKERT, W. (2003). Breakage behaviour of different materials — construction of a mastercurve for the breakage probability. *Powder Technology*, v. 129, p. 101–110.
- VON RITTINGER, P.R. (1867). *Lehrbuch der aufbereitungs kunde*. Ernst and Korn, Berlin.
- WEERASEKARA, N.S. POWELL, M.S., CLEARY, P.W., TAVARES, L.M., EVERTSON, M., CARVALHO, R.M. (2013). The contribution of DEM to the science of comminution. *Powder Technology*, v. 248, p. 3–24.
- WEIBULL, W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of applied mechanics*, v. 18, p. 293–297.
- WHITEN, W.J. (1974). A matrix theory of comminution machines. *Chem. Eng. Sci.* v. 29, p. 585-599.

- WIEGEL, R.L. (1975). Liberation in Magnetite iron formations, *Trans. AIME/SME*, Vol. 258, pp. 247-256.
- WILLS, B.A., ATKINSON, K. (1993). Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies. *Minerals Engineering*, v. 6, p. 697-706.
- WILLS, B.A., FINCH, J.A. (2016). *Mineral Processing Technology*. Butterworth-Heinemann, 8th ed. 496p.
- YASHIMA, S., KANDA, Y., SANO, S. (1987). Relationship between particle size and fracture as estimated from single particle crushing. *Powder Technol.*, v. 51, p. 277–282.
- YU, P. (2016). *A generic dynamic model structure for tumbling mills*. Ph.D. Dissertation. The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- ZACCHI, E.N.P. (2010). *Integração de dados aerogeofísicos, estruturais e geoquímicos para a caracterização de formações ferríferas bandadas na região de Itapanhoacanga, MG*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, p. 102.