



MODELAGEM DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO
DURANTE O MANUSEIO E TRANSPORTE

Marcus Alexandre de Carvalho Winitzkowski da Silveira

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

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Rio de Janeiro

Abril de 2012

MODELAGEM DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO
DURANTE O MANUSEIO E TRANSPORTE

Marcus Alexandre de Carvalho Winitkowski da Silveira

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.

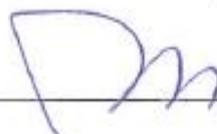
Examinada por:



Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.



Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph.D.



Prof. José Adilson de Castro Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2012

Silveira, Marcus Alexandre de Carvalho Winitkowski da
Modelagem da Degradação de Pelotas de Minério de
Ferro Durante o Manuseio e Transporte/ Marcus
Alexandre de Carvalho Winitkowski da Silveira. – Rio de
Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XXI, 145 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

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

Referencias Bibliográficas: p. 135-139.

1. Pelotas. 2. Degradação. 3. Modelagem matemática.
I. Tavares, Luís Marcelo Marques. II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

*À minha querida mãe Eliane Maria, meu pai Sergio Alberto (in memoriam), minha
irmã Ana Beatriz, minha avó Emma, meus tios e primos e ao meu amor, Alice.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado oportunidade e me cercado de pessoas que contribuíram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Agradeço em especial ao meu orientador, Professor Luís Marcelo Marques Tavares, por toda atenção, tempo, apoio, conhecimento, experiência e paciência disponibilizados, mesmo com todas suas atribulações diárias. Sua dedicação dispensa comentários, pois sei que sem a sua imensurável e muito importante orientação não seria possível realizar a conclusão de minha dissertação de mestrado.

Agradeço ao apoio da equipe da Samarco: Otaviano, Plínio, Bruno e a todos envolvidos.

Agradeço à Universidade Federal do Rio de Janeiro, ao Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais e ao Laboratório de Tecnologia Mineral, por terem acreditado e dado oportunidade de aprimorar e aprender muitos conhecimentos acadêmicos importantes para o desenvolvimento de minha formação profissional.

Agradeço à minha família, minha mãe Eliane, minha avó Emma, e a todos meus familiares que se fizeram presentes durante este período de minha vida.

Agradeço ao meu amigo e colega de trabalho Rodrigo que disponibilizou por diversas vezes seu tempo me dando suporte nas rotinas e simulações em Matlab[®].

Agradeço aos meus colegas de laboratório usuários do *software* EDEM[®] que contribuíram de forma objetiva no entendimento e uso deste programa.

Agradeço a todos meus colegas de laboratório: os técnicos Rangler, Gláucio, Daniel, e a todos os técnicos estagiários. Aos meus colegas de pós-graduação, Gabriel, Emerson, Alessandro, Yemcy, Yanneth, Raquel, Guilherme, Bruno e aos da graduação Mariana, Kayro, Evandro, Anderson e tantos outros que de alguma forma me ajudaram.

Agradeço ao CNPq e à COPPETEC pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

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

MODELAGEM DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO DURANTE O MANUSEIO E TRANSPORTE

Marcus Alexandre de Carvalho Winitkowski da Silveira

Abril/2012

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

As pelotas de minério de ferro são um insumo nobre na produção de ferro primário. No entanto há a necessidade de um controle rigoroso da qualidade e do tamanho das pelotas na alimentação de fornos de redução, uma vez que a presença de finos é prejudicial. Sabe-se que as pelotas sofrem inadvertidamente degradação mecânica devido aos impactos provocados pelos sistemas de manuseio. Como resultado, muitos carregamentos de pelotas chegam ao cliente com uma proporção significativa de finos, provocando prejuízos financeiros, para as empresas envolvidas. O presente trabalho inicialmente aplicou o modelo matemático desenvolvido em laboratório na COPPE de degradação durante o manuseio a pelotas de minério de ferro produzidas em uma usina brasileira. Entretanto, a aplicação do modelo demonstrou a necessidade do seu aprimoramento para a aplicação a pelotas de minério de ferro. Após introdução das modificações necessárias o modelo foi 99% aderente na previsão de pelotas remanescentes aos resultados de ensaio de manuseio realizado em laboratório.

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

MODELING IRON ORE PELLETS DEGRADATION DURING HANDLING
AND TRANSPORT PROCESS

Marcus Alexandre de Carvalho Winitkowski da Silveira

April/2012

Advisor: Luís Marcelo Marques Tavares

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Several steelmaking industries use iron ore pellets as a noble raw material on the ironmaking process. However there is a need for tight control of the quality and the size distribution of the pellets on the reduction furnaces feed, since the presence of fine material is harmful to the processes. It is known that pellets inadvertently suffer mechanical degradation due to successive impacts applied by the handling systems. As a result, pellet shipments can reach the customer with a significant proportion of fine material, resulting into financial losses for pelletizing plants and its customers. The present work initially applied to pellets produced in a Brazilian plant the mathematical model developed at Laboratory of Mineral Technology at COPPE, to predict degradation during handling process. However, the application of the model demonstrated the need for its upgrading. After implementing the necessary changes, the model reached around 99% adherent on remaining iron ore pellet prediction compared to laboratory handling test results.

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas	xxi
I. INTRODUÇÃO	1
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
II.1 Processo de Pelotização	5
II.1.1 Preparação das matérias-primas	7
II.1.2 Formação de pelotas cruas (verdes).....	11
II.1.3 Endurecimento das pelotas (tratamento térmico)	14
II.1.4 Classificação, manuseio e embarque/estocagem das pelotas queimadas	18
II.1.5 Avaliação da qualidade das pelotas queimadas	19
II.2 Fratura de partículas	20
II.2.1 Mecânica da fratura	20
II.2.2 Mecanismos de fragmentação de partículas	23
II.2.3 Estudos da quebra volumétrica de partículas	25
II.2.3.1 Modelos de quebra volumétrica de partícula.....	27
II.2.3.1.1 Fragmentação volumétrica por impacto duplo.....	27
II.2.3.1.2 Efeito de escala na resistência de partículas	32
II.2.3.1.3 Função quebra dependente da energia.....	34
II.2.3.2 Modelos de quebra de partícula por impactos repetidos	35
II.2.3.2.1 Modelo da mecânica do dano (Tavares e King, 2002)	36
II.2.4 Quebra superficial de partículas (abrasão e lascamento)	37
II.2.4.1 Modelo de abrasão e lascamento de Dukino <i>et al.</i> (2000)	38
II.2.4.2 Modelo de quebra superficial de Kim e Cho (2010).....	39
II.3 Degradação de materiais particulados	39
II.3.1 Degradação de minérios em equipamentos de manuseio e transporte.....	41
II.3.2 Influência de variáveis na degradação de minérios	43
II.3.2.1 Influência do número de impactos e da altura total de queda	43

II.3.2.2	Efeito de amortecimento na presença prévia de finos	44
II.3.2.3	Efeito da superfície de impacto	45
II.3.2.4	Efeito do tamanho de partícula	45
II.3.2.5	Efeito de estabilização e ordem dos eventos de impacto	46
II.3.2.6	Influência da composição mineralógica	46
II.3.2.7	Influência do tempo de envelhecimento	47
II.4	Modelagem da degradação devido ao manuseio e transporte	48
II.4.1	Modelo de Degradação de Weedon e Wilson	48
II.4.2	Modelo de Degradação de Sahoo	50
II.4.3	Modelo de Degradação de Tavares e Carvalho (2011)	52
III.	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS USANDO O	
	MODELO DE TAVARES E CARVALHO (2011)	58
III.1	Metodologia	58
III.1.1	Amostra de pelota queimada	58
III.1.2	Caracterização física das pelotas queimadas	58
III.1.2.1	Medida de distribuição granulométrica	59
III.1.2.2	Ensaio de tamboramento de pelotas (ISO 3271)	59
III.1.2.3	Ensaio de resistência à compressão individual de pelotas (ISO 4700)	60
III.1.2.4	Medida de massa específica por picnometria e por densidade hidrostática (LTM/COPPE/UFRJ)	60
III.1.3	Caracterização da fragmentação das pelotas	62
III.1.3.1	Ensaio de fragmentação por queda de peso	62
III.1.3.2	Ensaio de fratura por impactos repetidos	67
III.1.3.3	Ensaio de energia de fratura por impacto	68
III.1.3.4	Ensaio de fragmentação por abrasão (tamboramento)	69
III.1.4	Ensaio de simulação de manuseio em laboratório	71
III.2	Resultados e discussão	75
III.2.1	Caracterização física das pelotas	75
III.2.2	Caracterização da fragmentação volumétrica	77
III.2.3	Caracterização da fragmentação superficial	86
III.2.3.1	Investigação dos finos gerados pela quebra superficial	88
III.2.3.2	Análise estrutural da pelota pós quebra superficial	88

III.2.4 Aplicação do modelo à previsão do manuseio em laboratório.....	90
IV. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS USANDO O	
MODELO MODIFICADO	94
IV.1 Discriminação entre pelotas e cacos	94
IV.2 Correção das análises granulométricas via modelagem da degradação no	
peneirador Ro-Tap[®]	100
IV.3 Função quebra para pelotas e cacos (corrigidas para o efeito do Ro-Tap[®])	103
IV.4 Modelagem da quebra superficial de pelotas e cacos a partir de ensaios de	
autofratura	120
IV.5 Modelagem do ambiente mecânico utilizando o DEM.....	124
IV.6 Modelo modificado para pelotas e cacos	127
IV.7 Aplicação do modelo modificado à previsão do manuseio em laboratório	129
V. CONCLUSÕES	133
V.1 Recomendações para trabalhos futuros	134
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
VII. APÊNDICE.....	140
VII.1 Modelo matemático da degradação por peneiramento no Ro-Tap[®]	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II-1 – Principais processos na rota de produção do aço.	6
Figura II-2 – Influência da adição de água na formação de pelotas cruas (modificado de Meyer, 1980).	12
Figura II-3. Influência das forças de coesão no mecanismo de aglomeração a frio (modificado de Meyer, 1980).	12
Figura II-4 – Diagrama esquemático de um disco de pelotização (modificado de Fonseca, 2003).	14
Figura II-5 – Esquema de transporte e classificação das pelotas cruas (modificado de Fonseca, 2003).	14
Figura II-6 – Esquema do Forno de Grelha Móvel (modificado de Gariglio e Klein, 1996).	16
Figura II-7 – Curvas tensão-deformação uniaxial de quartzito (esquerda) e arenito (direita) (modificado de Tavares 2004 <i>apud</i> Jaeger e Cook, 1979).	21
Figura II-8 – Concentração de esforços na extremidade de uma trinca.	22
Figura II-9 – Etapas de fragmentação de partículas individuais por impacto (Tavares, 1997). ...	23
Figura II-10 – Diferentes mecanismos de quebra na degradação de minérios de acordo com o nível de energia de impacto aplicada (modificado de Téo <i>et al.</i> , 1994 – Reproduzida com autorização da editora).	25
Figura II-11 – Diferentes tipos de ensaios de fratura de partículas individuais (modificado de Tavares, 2007).	26
Figura II-12 - Esquema da célula de carga de impacto (COPPE/UFRJ) (Tavares e Lima, 2006).	28
Figura II-13 – Curva força versus tempo resultante de um evento de fratura de uma pelota na Célula de Carga de Impacto (COPPE/UFRJ).	29
Figura II-14 – Distribuições log-normal de energias de fratura de diferentes tamanhos de uma amostra de rocha da Pedreira Vigné (RJ), com um intervalo de confiança de 90% (linhas pontilhadas (Tavares e Lima, 2006)).	32

Figura II-15 – Comparação entre medidas de resistência à compressão de pelota para diferentes tamanhos de pelota (dados obtidos de Dwarapudi et al., 2008) e de medida de resistência mediana de fratura de minério de ferro na Célula de Carga de Impacto (COPPE/UFRJ).	33
Figura II-16 - Efeito do enfraquecimento devido ao acúmulo de dano durante repetidos ciclos de carregamento (Tavares e Carvalho, 2008).	36
Figura II-17 - Circuito de manuseio e transporte de minério de ferro desde a mina até o alto-forno (modificado de Sahoo, 2007 <i>apud</i> Fagerberg e Sandberg, 1973 – Reproduzida com autorização da editora).	40
Figura II-18 – Proposta de utilização de defletores em um chute de transferência (Sahoo, 2007 <i>apud</i> Fagerberg e Sandberg, 1973 – Reproduzida com autorização da editora).	42
Figura II-19 – Proposta de design com perfil em espiral para um chute de transferência (Sahoo, 2007 <i>apud</i> The British National Coal Board, 1964 – Reproduzida com autorização da editora).	43
Figura II-20 - Porcentagem acumulada de finos (- 16 mm) vs. número de quedas de carvão de South Blackwater (modificado de Sahoo, 2007 <i>apud</i> Sahoo <i>et al.</i> , 2002 – Reproduzida com autorização da editora).	44
Figura II-21 - Porcentagem acumulada de finos vs. número de quedas de carvão de South Blackwater (modificado de Sahoo <i>apud</i> Sahoo <i>et al.</i> , 2003 – Reproduzida com autorização da editora).	45
Figura II-22 - Efeito do teor (% em peso) da hematita especular na resistência à compressão média de pelotas (dados obtidos de Sá <i>et al.</i> , 2004 <i>apud</i> Sá, 2003).	47
Figura II-23 - Comparação entre o modelo de degradação (Equação II-14) e resultados experimentais de Vince <i>et al.</i> (1987) para testes de queda a 1,8 metros de altura (modificado de Weedon e Wilson, 2000 – Reproduzida com autorização da editora).	50
Figura II-24 - Comparação entre dados experimentais e simulados pelo modelo para o carvão de South Blackwater envelhecido por um mês com a presença inicial de 30% de finos (modificado de Sahoo, 2007 <i>apud</i> Sahoo <i>et al.</i> , 2003 – Reproduzida com autorização da editora).	51

Figura II-25 – Resultados experimentais (pontos) e simulados (linhas) apresentando a proporção de finos (-6.4mm) após impactos repetidos para duas diferentes alturas de queda de minério de ferro contido no intervalo de 125-63mm contra uma superfície de aço (Tavares e Carvalho, 2008).....	57
Figura II-26 – Simulações apresentando a proporção de finos (-6.4mm) após impactos repetidos de diferentes minérios a uma altura de queda de 2 metros para diferentes superfícies (Tavares e Carvalho, 2008).....	57
Figura III-1 – Picnômetro preenchido com uma amostra de material particulado (LTM/COPPE/UFRJ).....	61
Figura III-2 – Célula de carga de impacto de 100 mm (LTM/COPPE).....	66
Figura III-3 – Célula de carga de impacto de 63 mm (LTM/COPPE).....	66
Figura III-4 – Cálculo do parâmetro t_{10} a partir de análises granulométricas de produtos de ensaios de fragmentação e sua relação com a energia específica de impacto – também chamada de energia específica de cominuição (Ecs).	67
Figura III-5 – Fluxograma dos ensaios de fratura por impactos repetidos combinados aos ensaios de fragmentação por queda de peso.	68
Figura III-6 – Célula de carga de impacto de 19 mm (LTM/COPPE/UFRJ).....	69
Figura III-7 – Moinho tubular de 30 cm x 30 cm, usado nos ensaios de abrasão adaptados do padrão JKMRC (LTM/COPPE).....	71
Figura III-8 – Diagrama esquemático do sistema de transferência montado no LTM (COPPE/UFRJ) para simulação de uma etapa de manuseio.....	73
Figura III-9 – Fotos ilustrativas do sistema de queda livre montado no LTM (COPPE/UFRJ) para simulação de uma etapa de manuseio.	73
Figura III-10 – Resultados de ensaios de impactos repetidos (IR) e de energia de fratura (E Fratura) de pelotas da amostra AM11 (pontos) com o modelo (Equação II-7) da distribuição log-normal (linhas).....	78
Figura III-11 – Resultados de variação da energia mediana de fratura com o tamanho de partícula para pelotas de minério de ferro, comparados com o modelo do efeito de escala (Equação II-8).....	79

Figura III-12 - Distribuições granulométricas da amostra de pelota AM 11 para o intervalo de tamanho 16 x 14 mm, em função da energia específica de impacto.	80
Figura III-13 - Distribuições granulométricas da amostra de pelota AM 11 para o intervalo de tamanho 14 x 12,5 mm, em função da energia específica de impacto.	80
Figura III-14 - Distribuições granulométricas da amostra de pelota AM 11 para o intervalo de tamanho 12,5 x 9,0 mm, em função da energia específica de impacto.	81
Figura III-15 - Distribuições granulométricas da amostra de pelota AM 11 para o intervalo de tamanho 9,0 x 8,0 mm, em função da energia específica de impacto.	81
Figura III-16 – Curvas de distribuição de quebra na modelagem da fragmentação das pelotas da amostra AM 11. Dados experimentais (pontos) e curvas modeladas (linhas).	82
Figura III-17 – Resultados sintetizados dos ensaios de fragmentação de pelotas (pontos) e modelo (linha) com base no modelo da seção II.2.3.1.3.	83
Figura III-18 – Resultados experimentais de fratura por impactos repetidos (pontos) comparados aos ajustados (linha), seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002) para pelotas de 16 x 14 mm, para uma energia de impacto de 90 J/kg.	84
Figura III-19 – Resultados experimentais de fratura por impactos repetidos (pontos) comparados aos ajustados (linhas) seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002) para pelotas de 14 x 12,5 mm, para energias de impacto de 180 e 90 J/kg.	85
Figura III-20 – Resultados experimentais de fratura por impactos repetidos (pontos) comparados aos ajustados (linhas) seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002) para pelotas de 12,5 x 9,0 mm, para energias de impacto de 180 e 90 J/kg.	85
Figura III-21 – Resultados experimentais de fratura por impactos repetidos (pontos) comparados aos ajustados (linhas) seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002) para pelotas de 9,0 x 8,0 mm, para energias de impacto de 360 e 180 J/kg.	86
Figura III-22 – Distribuições granulométrica do material resultante dos diferentes tempos de tamboramento (AM 11).	87
Figura III-23 – Relação entre a percentagem de finos gerados por fragmentação superficial (abrasão) e o tempo de tamboramento, mostrando a taxa de abrasão estimada segundo a metodologia adotada (seção III.1.2.2).	87

Figura III-24 – Distribuição granulométrica dos finos (< 0,106 mm) resultantes do ensaio de tamboramento adaptado do padrão JKMRC (seção III.1.3.4) para o tempo de 4 minutos de tamboramento.	89
Figura III-25 – Distribuição granulométrica realizada utilizando o Malvern para os finos (< 0,106 mm) resultantes do ensaio de tamboramento adaptado do padrão JKMRC para o tempo de 4 minutos de tamboramento.	89
Figura III-26 – Micrografias de microscopia eletrônica de varredura de uma pelota após o ensaio de tamboramento em corte com um aumento de 70 vezes (Figura a) e com um aumento de 300 vezes (Figura b) (COPPE/UFRJ).	90
Figura III-27 - Resultado experimental do ensaio de manuseio do LTM/COPPE, realizado à altura de queda de 8,4 m.	91
Figura III-28 – Comparação entre resultados de simulação (linhas) e dados experimentais (pontos) do ensaio de manuseio.	92
Figura IV-1 – Classificação de pelotas (esquerda) e cacos (direita) da amostra AM11.	94
Figura IV-2 – Análises granulométricas do produto de ensaio de fragmentação por queda de peso (seção III.1.3.1) de pelotas e cacos da amostra AM11 sob uma energia de impacto de 180 J/kg.	95
Figura IV-3 – Curvas de proporção quebrada de ensaio de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de pelotas e cacos de 12,5 x 9,0mm, da amostra AM11, sob diferentes energias de impacto.	95
Figura IV-4 – Curvas de taxa de fragmentação por abrasão segundo a metodologia adotada (seção III.1.3.4) para pelotas e cacos de 12,5 x 9,0 mm.	96
Figura IV-5 – Proporção de cacos/pelotas por faixa de tamanho da amostra AM11.	97
Figura IV-6 – Comparação entre o peneiramento manual e o peneiramento no Ro-Tap [®] de amostras resultantes de ensaio de fragmentação da amostra AM11 contida na faixa de 19x16mm a uma energia de impacto de 90 J/kg.	101
Figura IV-7 – Comparação entre o peneiramento manual e o peneiramento no Ro-Tap [®] de amostras resultantes de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 contida na faixa de 12,5x9mm a uma energia de impacto de 180 J/kg.	101

Figura IV-8 – Comparação entre o peneiramento manual e o peneiramento no Ro-Tap [®] de amostras resultantes de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 contida na faixa de 12,5x9mm a uma energia de impacto de 90 J/kg.	102
Figura IV-9 – Comparação entre as previsões usando o modelo de degradação do Ro-Tap [®] sobre o peneiramento manual e o peneiramento no Ro-Tap [®] de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 de 12,5x9mm a uma energia de impacto de 180 J/kg.	103
Figura IV-10 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX no intervalo de tamanho 14 x 12,5 mm, em função da energia específica de impacto.	104
Figura IV-11 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX no intervalo de tamanho 12,5 x 9,0 mm, em função da energia específica de impacto.	104
Figura IV-12 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX no intervalo de tamanho 9,0 x 8,0 mm, em função da energia específica de impacto.	105
Figura IV-13 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX no intervalo de tamanho 5,6 x 4,75 mm, em função da energia específica de impacto.	105
Figura IV-14 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX no intervalo de tamanho 2,83 x 2,36 mm, em função da energia específica de impacto.	106
Figura IV-15 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap [®] , para o intervalo de tamanho 14 x 12,5 mm, em função da energia específica de impacto.	106
Figura IV-16 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap [®] , para o intervalo de tamanho 12,5 x 9,0 mm, em função da energia específica de impacto.	107
Figura IV-17 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap [®] , para o intervalo de tamanho 9,0 x 8,0 mm, em função da energia específica de impacto.	107
Figura IV-18 – Distribuições granulométricas de pelotas da amostra AM 11 corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap [®] , para o intervalo de tamanho 16 x 14 mm, em função da energia específica de impacto.	108

Figura IV-19 – Distribuições granulométricas de pelotas da amostra AM 11 corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap [®] , para o intervalo de tamanho 14 x 12,5 mm, em função da energia específica de impacto.	108
Figura IV-20 – Distribuições granulométricas de pelotas da amostra AM 11 corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap [®] , para o intervalo de tamanho 12,5 x 9,0 mm, em função da energia específica de impacto.	109
Figura IV-21 – Distribuições granulométricas de pelotas da amostra AM 11 corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap [®] , para o intervalo de tamanho 9,0 x 8,0 mm, em função da energia específica de impacto.	109
Figura IV-22 – Curvas de distribuição de quebra na modelagem da fragmentação de pelotas após correção das análises granulométricas. Dados experimentais (pontos) e resultados ajustados (linhas).	110
Figura IV-23 – Curvas de distribuição de quebra na modelagem da fragmentação de cacos após correção das análises granulométricas. Dados experimentais (pontos) e resultados ajustados (linhas).	110
Figura IV-24 – Resultados de ensaios de impactos repetidos (IR) (pontos) de cacos da amostra AM MIX com o modelo (Equação II-7) da distribuição log-normal (linhas).	111
Figura IV-25 – Comparação de dados experimentais de probabilidade de fratura e dados modelados a partir de ensaios de fratura por impactos repetidos para pelotas.	112
Figura IV-26 – Comparação de dados experimentais de probabilidade de fratura e dados modelados a partir de ensaios de fratura por impactos repetidos para cacos.	112
Figura IV-27 – Ilustração do efeito de escala modelado para pelotas e cacos da amostra AM 11.	113
Figura IV-28 – Síntese dos resultados dos ensaios de fragmentação corrigidos de pelotas (pontos) e ajuste do modelo (linha) com base na metodologia da seção II.2.3.1.3. .	113
Figura IV-29 – Síntese dos resultados dos ensaios de fragmentação corrigidos de cacos (pontos) e ajuste do modelo (linha) com base na metodologia da seção II.2.3.1.3.	114
Figura IV-30 – Comparação entre metodologias de avaliação de susceptibilidade à fratura de pelotas para diferentes modos de impacto sob as mesmas condições de energia de impacto (90 J/kg).	115

Figura IV-31 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos simples e duplos (pontos) versus os resultados ajustados (linhas), seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002) para pelotas de 12,5 x 9,0 mm, sob diferentes energias de impacto..	116
Figura IV-32 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com um valor de gama independente do tamanho de partícula, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (360 J/kg).....	117
Figura IV-33 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com um valor de gama independente do tamanho de partícula, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (180 J/kg).....	117
Figura IV-34 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com um valor de gama independente do tamanho de partícula, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (90 J/kg).....	118
Figura IV-35 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com valores de gama variáveis com o tamanho, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (360 J/kg).....	119
Figura IV-36 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com valores de gama variáveis com o tamanho, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (180 J/kg).....	119
Figura IV-37 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com valores de gama variáveis com o tamanho, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (90 J/kg).....	120

Figura IV-38 – Valores experimentais de taxas de perda mássica após diferentes números de impactos para os diferentes ensaios de autofratura de pelotas.....	122
Figura IV-39 - Modelo de quebra de pelotas por abrasão desenvolvido a partir de dados experimentais de impacto simples.	123
Figura IV-40 – Análise granulométrica dos finos (material < 0,106 mm) em Malvern referente ao ensaio de autofratura de 0,5 metros da amostra AM MIX.	124
Figura IV-41 - Interface do software EDEM [®] mostrando à esquerda a entrada de parâmetros do material e de contato físico para simulação.	126
Figura IV-42 – Interface do software EDEM [®] mostrando a simulação do ensaio de manuseio realizado no LTM/COPPE (seção III.1.4).	127
Figura IV-43 – Diagrama esquemático da versão original do modelo de degradação de minérios durante o manuseio de Tavares e Carvalho, 2011.....	128
Figura IV-44 – Diagrama esquemático da versão modificada do modelo de degradação durante o manuseio para pelotas de minério de ferro.	128
Figura IV-45 – Comparação entre distribuição granulométrica medidas (símbolos) e simuladas (linhas) com a versão do modelo já modificado em função do número de impactos no ensaio de manuseio LTM/COPPE.	130
Figura IV-46 – Evolução da proporção de pelotas e cacos por faixas de tamanho a partir de dados experimentais do ensaio de manuseio LTM/COPPE.	131
Figura IV-47 – Evolução da proporção de pelotas e cacos por faixa de tamanho obtida a partir de dados simulados do ensaio de manuseio LTM/COPPE.....	131
Figura IV-48 – Comparação entre previsões usando o modelo modificado (linha) e resultados experimentais (símbolos) da porcentagem de pelotas remanescentes em função do número de impactos no ensaio de manuseio LTM/COPPE.....	132
Figura VII-1 – Função quebra dos cacos de pelotas Ro-Tap [®] determinada a partir da metodologia descrita.	142
Figura VII-2 – Função classificação dos cacos de pelotas no Ro-Tap [®] determinada a partir da metodologia descrita.	143

Figura VII-3 – Comparação entre as previsões usando o modelo de degradação do Ro-Tap® sobre o peneiramento manual e comparando ao peneiramento no Ro-Tap® de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 de 19x16mm a uma energia de impacto de 90 J/kg.	144
Figura VII-4 – Comparação entre as previsões usando o modelo de degradação do Ro-Tap® sobre o peneiramento manual e comparando ao peneiramento no Ro-Tap® de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 de 12,5x9mm a uma energia de impacto de 180 J/kg.....	144
Figura VII-5 – Comparação entre as previsões usando o modelo de degradação do Ro-Tap® sobre o peneiramento manual e comparando ao peneiramento no Ro-Tap® de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 de 12,5x9mm a uma energia de impacto de 90 J/kg.....	145

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela II-1 - Principais parâmetros dos ensaios físicos das pelotas (Meyer, 1980)	20
Tabela III-1 – Condições experimentais utilizadas nos ensaios de fragmentação para a amostra de pelota AM11	64
Tabela III-2 – Valores de massa específica para a amostra de pelota AM11	75
Tabela III-3 – Distribuições granulométricas da amostra representativa do carregamento, AM 11 e da média das amostras bi-horárias, AM MIX	76
Tabela III-4 – Resultados com os índices do ensaio de tamboramento de pelotas (ISO 3271) para as amostras AM 11 e AM MIX	76
Tabela III-5 – Valores médios de carga de ruptura do ensaio de resistência à compressão de pelotas (ISO 4700) para as amostras AM 11 e AM MIX	77
Tabela III-6 – Resultados de quebra individual de partículas por impacto na célula de carga no ensaio de energia de fratura (seção III.1.3.3).....	77
Tabela III-7 – Parâmetros do modelo de efeito de escala (Equação II-8)	78
Tabela III-8 – Parâmetros do modelo de quebra volumétrica da amostra de pelota AM11	81
Tabela III-9 – Parâmetros da função distribuição de quebra das pelotas da amostra AM 11	82
Tabela III-10 – Valores de susceptibilidade à fratura para diferentes tamanhos da amostra de pelota representativa AM 11	84
Tabela III-11 – Valores de taxa de abrasão do ensaio de tamboramento da amostra AM 11	88
Tabela IV-1 – Condições experimentais utilizadas nos ensaios de fragmentação de cacos para a amostra AM MIX.....	99
Tabela IV-2 - Parâmetros utilizados nas simulações no EDEM [®]	126
Tabela VII-1 – Parâmetros da função quebra cumulativa do Ro-Tap [®]	142
Tabela VII-2 – Parâmetros da função classificação do Ro-Tap [®]	142

I. INTRODUÇÃO

A pelotização é o processo responsável pela produção de pelotas. Desenvolvido ao final do século XIX, teve inicialmente como principal objetivo o aproveitamento tanto das frações de partículas ultrafinas de minério de ferro encontradas na natureza (finos naturais) quanto os resultantes dos métodos de beneficiamento, na forma de um aglomerado aproximadamente esférico, denominada pelota.

A produção brasileira de pelotas de minério de ferro se destaca no cenário econômico siderúrgico mundial. Prova disso é que o país é o maior exportador de pelotas do mundo, tendo produzido, de janeiro a novembro de 2010, mais de 26 milhões de toneladas de pelotas de minério de ferro (Sinferbase, 2010).

A pelota de minério de ferro é um dos principais insumos na etapa de produção de ferro primário dentro da rota de produção do aço, pois apresenta características físicas, químicas e metalúrgicas mais favoráveis às operações de redução se comparada a outras matérias-primas como o minério de ferro granulado e o sinter. Dentre estas características pode-se citar a distribuição de tamanho mais estreita, a elevada porosidade, a baixa perda por ignição, o teor mais elevado de ferro, entre outras (Meyer, 1980).

Em geral, as pelotas são destinadas a dois processos distintos de redução: a redução em alto-forno, no qual o ferro primário é obtido na forma de uma liga de ferro carbono com alto teor carbono, em torno de 4,5% de carbono, em estado líquido, denominado ferro gusa; e a redução direta, no qual o ferro primário é obtido na forma de um produto sólido poroso denominado ferro esponja, que contém de 90 a 94% de ferro total.

O processo via alto-forno utiliza uma fração de pelota como parte integrante da carga metálica, juntamente com o sinter e o minério de ferro granulado. Já o processo

via redução direta destaca-se por utilizar uma elevada proporção de pelotas como carga metálica, que pode chegar a 100%.

É sabido que, ao final do processo de pelletização, faz-se necessário um controle rigoroso do tamanho e da qualidade das pelotas, pois a presença de partículas finas é indesejável em altos-fornos e principalmente em fornos de redução direta. Isso se deve ao fato que elas exercem um efeito deletério na operação desses reatores, uma vez que, em ambos os processos, a redução dos óxidos é proporcionada pela reação entre o sólido e um gás em escoamento em regime contracorrente, ou seja, enquanto a carga metálica está descendo o gás sobe em sentido oposto. Vale destacar que no processo de redução direta a alimentação deve ser composta rigorosamente por pelotas contidas em uma distribuição estreita e homogênea de tamanhos, uma vez que a presença de finos é muito mais prejudicial que em um alto-forno. Isso se deve ao fato que os finos prejudicam diretamente a permeação dos gases redutores através da carga metálica, podendo ser responsáveis pela formação de barreiras compostas de agregações no leito de pelotas, resultando na perda do controle e na diminuição da produtividade do processo na produção de ferro esponja.

A degradação mecânica é um fenômeno que ocorre desde a usina de produção até as operações de redução das usinas siderúrgicas, através de uma sequência de impactos resultantes de operações de manuseio e transporte por correias transportadoras, vagões ferroviários, chutes de transferência e carregamento de navios. O efeito conjunto dessas operações pode ser responsável pela geração de uma grande quantidade de material fino sem aplicação direta nas operações de redução.

Como consequência disso, muitas vezes os operadores de redução se vêem obrigados a estocar este material fino em pilhas, acarretando num enorme passivo ambiental ou, por exemplo, acabam revendendo o material de granulometria fina para

empresas produtoras de cimento a um preço muito inferior comparado ao de pelotas, resultando em impactos negativos, financeiro e ambiental tanto para as indústrias pelletizadoras como para seus clientes.

A fim de controlar a qualidade de seu produto, as empresas produtoras de pelotas empregam metodologias padronizadas de avaliação das propriedades mecânicas das pelotas, que consistem tipicamente dos ensaios de resistência à compressão e de abrasão por tamboramento. Embora úteis como ferramentas de controle de processo, esses ensaios não permitem prever como a pelota responderá às operações de manuseio e transporte.

Diversos estudos foram realizados por vários pesquisadores ao longo das últimas décadas (Teo e Waters, 1988; Weedon e Wilson, 2000; Sahoo, 2007, entre outros) com o intuito de desenvolver metodologias e modelos matemáticos para a previsão da degradação de minérios durante as operações de manuseio. Além de não terem sido aplicadas a pelotas de minério de ferro, essas metodologias não se mostraram capazes de descrever, com a riqueza demandada de detalhes, o fenômeno da degradação mecânica durante o manuseio e transporte.

Com o intuito de preencher esta lacuna, o presente trabalho tem como objetivo aplicar o modelo matemático da degradação desenvolvido no Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE/UFRJ (Tavares e Carvalho, 2011), o qual se baseia na medida da energia de fratura de partículas e na avaliação da susceptibilidade do material à fratura por impactos sucessivos, descrito usando princípios da mecânica do dano (Tavares e King, 2002). Além disso, o trabalho visa propor modificações e aprimoramentos ao mesmo, visando aumentar a sua fidelidade na previsão da degradação durante o manuseio e transporte de pelotas.

Essa dissertação é composta por cinco capítulos e um apêndice. Após a presente introdução (capítulo 1), é apresentada a revisão da literatura (capítulo 2). O capítulo 3 apresenta a metodologia, bem como os resultados e discussão da aplicação do modelo de degradação, conforme proposto por Tavares e Carvalho (2011), enquanto o capítulo 4 apresenta a metodologia e os resultados e discussão do modelo já com os aprimoramentos propostos no presente estudo. O capítulo 5 encerra o documento, apresentando as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada uma breve revisão conceitual e a abordagem de aspectos importantes, considerados necessários para o entendimento do fenômeno de degradação das pelotas de minério de ferro durante seu manuseio e transporte. Dentre os assuntos abordados estão o processo de pelletização, aspectos sobre a fratura de partículas, bem como as metodologias e modelos de degradação disponíveis na literatura, os quais são apresentados com o objetivo de identificar os aspectos mais relevantes a serem considerados na modelagem da degradação de pelotas de minério de ferro.

II.1 Processo de Pelotização

Os processos de aglomeração, como a sinterização e a pelletização, surgiram ao final do século XIX e início do século XX, respectivamente, com o objetivo inicial de aproveitar o material fino rejeitado agregando-os em tamanhos adequados aos processos de redução.

A motivação para o desenvolvimento do processo de pelletização de finos de minérios de ferro pode ser resumida pela ação simultânea de diversos fatores como:

- A necessidade do aproveitamento das partículas ultrafinas de minério de ferro provenientes de operações de lavra, de beneficiamento e da degradação de granulados durante o transporte;
- A crescente competição entre os fornecedores de minério, exigindo uma matéria-prima de melhor qualidade;
- As perspectivas de exaustão das reservas de minério com alto teor de ferro;
- A demanda pela melhora dos índices operacionais dos altos-fornos com a utilização de aglomerados;

- A necessidade do controle mais estreito das características físicas, químicas e metalúrgicas da alimentação nos reatores de redução, objetivando a melhora da qualidade do aço;
- As perspectivas de aumento da demanda de aço em todo o mundo.

A pelotização é um dos principais processos envolvidos na rota de fabricação do aço (Figura II-1). Este processo destaca-se por contribuir com uma parcela nobre de matéria-prima que alimenta processos subsequentes, influenciando diretamente na qualidade final do aço produzido.

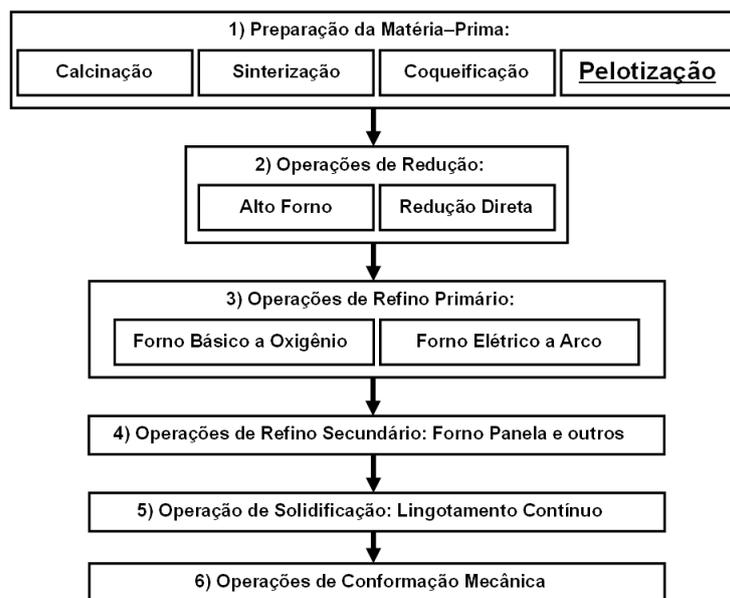


Figura II-1 – Principais processos na rota de produção do aço.

Sendo um insumo de alto valor agregado para a produção de aço, as pelotas podem ser definidas como aglomerados aproximadamente esféricos produzidos a partir de concentrados e partículas ultrafinas de minérios de ferro, podendo apresentar diferentes composições químicas e mineralógicas (Meyer, 1980). Assim, as pelotas, como produto final da pelotização, se distinguem basicamente entre dois processos de

redução na rota de fabricação do aço: o processo via alto forno e o processo via redução direta.

Segundo Meyer (1980), as pelotas, como matérias-primas para a fabricação do aço, se diferenciam em relação ao minério granulado e ao sinter por meio de diversas características:

- Distribuição de tamanhos estreita, aproximadamente contida na faixa de 8 a 16 milímetros;
- Porosidade alta e uniforme (25 a 30%);
- Alto teor de ferro (63 a 64%);
- Alta resistência mecânica;
- Baixa tendência à fragmentação por abrasão e bom comportamento durante o transporte.

O processo de pelletização pode ser resumido como uma sequência de três principais estágios: preparação das matérias-primas, formação de pelotas cruas (verdes) e endurecimento das pelotas (formação da pelota queimada), no qual o perfeito encadeamento destas influencia diretamente na eficiência e na qualidade do produto ao final de cada um destes estágios (Meyer, 1980).

II.1.1 Preparação das matérias-primas

Basicamente as pelotas são constituídas por dois grandes grupos de matérias-primas. O primeiro grupo caracteriza-se por agrupar os concentrados oriundos de diferentes minérios de ferro que formam a base do *pellet feed*, constituindo a matriz da pelota. Estes minérios de ferro, quando concentrados, normalmente apresentam teores de ferro em torno de 64%, podendo alcançar valores superiores a 65%, dependendo do

tipo de mistura destes diferentes concentrados de minérios de ferro, tais como: Fe_2O_3 (hematita), Fe_3O_4 (magnetita), $\text{FeO}(\text{OH})$ (goethita), FeCO_3 (siderita) e FeS_2 (pirita).

Além dos concentrados de minérios de ferro, existem outras fontes de minério de ferro, que ocasionalmente podem ser usadas. Essas fontes normalmente são obtidas a partir de resíduos e subprodutos de outras indústrias e processos que podem servir como insumo à composição do *pellet feed* por conter finos de minério de ferro (Meyer, 1980).

O segundo grupo de matérias-primas para o processo de pelotização engloba os materiais aglomerantes e os aditivos. Este grupo compreende materiais com pouco ou nenhum teor de ferro que são utilizados exclusivamente para facilitar a formação das pelotas cruas (aglomerantes), para aumentar a qualidade físico-mecânica (aglomerantes e aditivos) e para adequar as propriedades metalúrgicas das pelotas (aditivos), tendo o objetivo principal de aumentar o poder de aglomeração a frio das partículas da mistura (Figueira *et al.*, 1985).

Dentre os materiais mais comumente utilizados como aglomerantes e aditivos pode-se citar:

- Bentonita: é utilizada como aglomerante por sua capacidade de absorver grandes quantidades de água devido a sua estrutura de camadas. Através dessa propriedade consegue promover a aglomeração a frio das partículas finas de minério de ferro, favorecendo o processo de formação das pelotas cruas, além de aperfeiçoar a resistência mecânica a seco e a úmido. Sua composição química consiste de alumina, sílica e água ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4(\text{SiO}_2) \cdot \text{H}_2\text{O}$);
- Compostos de Cal: o calcário (CaCO_3), o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e a dolomita ($(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$) são aditivos que contribuem diretamente para o endurecimento da pelota durante e, principalmente, ao final do processo de tratamento térmico. A presença do óxido de cálcio (CaO) irá favorecer o

endurecimento através da formação de uma escória que irá fortalecer a ligação entre os grãos de minério. Já o óxido de magnésio (MgO) irá contribuir com o aumento da resistência mecânica, melhorando as propriedades metalúrgicas durante os processos de redução (Fonseca, 2003);

- Combustível Sólido (coque de petróleo / antracito / carvão mineral): fornece uma energia térmica adicional, diminuindo o consumo de óleo/gás na queima das pelotas e proporcionando uma distribuição mais homogênea do calor das reações durante o processo de queima da pelota na etapa de tratamento térmico, com implicações positivas em termos de redutibilidade e inchamento da pelota (Pena, 2011).

Sendo o primeiro estágio do processo de pelletização, a preparação das matérias-primas tem como principal objetivo adequar as características dos minérios de ferro (*pellet feed*) às exigidas pelo estágio de formação de pelotas cruas, bem como adequar e misturar importantes elementos já citados como aglomerantes e aditivos, para que as pelotas adquiram características físicas, químicas e metalúrgicas necessárias aos processos subsequentes.

Neste sentido, tanto os minérios de ferro, quanto os aditivos e aglomerantes passam por uma série de processos que visam adequar suas características físicas no intuito de:

- Aumentar o teor de ferro, para o caso de minérios de ferro de baixo teor;
- Separar os constituintes indesejados (ganga);
- Ajustar a granulometria dos materiais em faixas de distribuição de tamanhos e de superfícies específicas adequadas ao processo de pelletização.

Durante o estágio de preparação são realizados alguns processos de beneficiamento para a adequação das matérias-primas ao *pellet feed*:

1. Concentração: tem como principal objetivo de recuperar a fração de minerais de ferro ultrafina (tipicamente <150 micrometros) dos diferentes minérios, removendo parte da ganga presente que contém sílica, alumina, fósforo enxofre, etc. É realizada através de diversos métodos de beneficiamento, dependendo das propriedades do minério a ser tratado, os quais são responsáveis pela elevação do teor de ferro da faixa de 50 a 53% para, em torno de, 64% e até a acima de 65% de ferro, dependendo do tipo de pelota a ser produzida;
2. Homogeneização das matérias-primas: os concentrados são misturados e é realizada uma homogeneização da mistura devido à grande variabilidade das propriedades físicas e químicas dos diferentes tipos de minérios de ferro e aditivos contidos na alimentação no processo de pelotização.
3. Moagem e Classificação: a mistura que possui granulometria tipicamente menor que 150 micrometros é adequada ao exigido para a formação das pelotas cruas, que é inferior a 45 micrometros, por meio de processos de moagem a úmido ou a seco, proporcionando um aumento significativo da área superficial específica do material fino, seguido de classificação.
4. Espessamento e Homogeneização da polpa: quando a moagem é efetuada a úmido, há a necessidade desta etapa para a recuperação da água para a operação de moagem, deixando a polpa com, aproximadamente, 70% de sólidos em peso. Após

a operação de espessamento, esta polpa é homogeneizada, a fim de minimizar a variabilidade das características físicas e químicas do material, tendo ainda como opção a adição de carvão à polpa de minério.

5. Filtração: assim como na etapa anterior, quando a etapa de moagem é realizada a úmido, há ainda a necessidade da utilização de uma etapa de filtração da mistura a fim de reduzir a umidade da polpa até a faixa de 8 a 10% em peso, a qual é considerada adequada para seguir para a unidade de pelotamento.

II.1.2 Formação de pelotas cruas (verdes)

A formação das pelotas cruas, ou pelotamento, é o estágio no qual ocorre a operação de aglomeração a frio das partículas de minério do *pellet feed*. Ela é crucial para a continuidade de todo o processo de pelotização, exercendo influência direta na qualidade física da pelota como produto final após seu endurecimento por tratamento térmico.

Este estágio tem as finalidades de gerar aglomerados esféricos (pelotas) de minério de ferro contidos numa faixa estreita de tamanho e conferir a resistência mecânica necessária para o transporte entre a unidade de pelotamento e os fornos de endurecimento por tratamento térmico.

A água é um agente de extrema importância no processo de aglomeração a frio. Ela influencia diretamente a formação das pelotas cruas através do recobrimento das partículas de minério por um filme d'água que proporciona ligações através de pontes líquidas entre as partículas (Figura II-2).

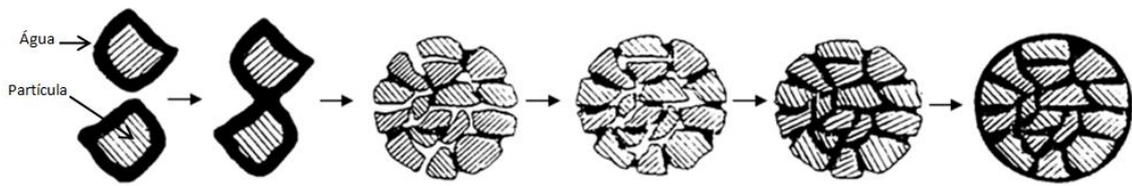


Figura II-2 – Influência da adição de água na formação de pelotas cruas (modificado de Meyer, 1980).

A fim de compreender como ocorre o processo de formação de pelotas cruas por aglomeração a frio, é necessário entender o mecanismo de aglomeração entre as partículas de minério do *pellet feed*.

O mecanismo de aglomeração a frio pode ser descrito como a interação das forças coesivas envolvidas nas interfaces entre as três fases presentes: sólido ou *pellet feed* (mistura de partículas de minério de ferro, aditivo e aglomerante), líquido (água) e o ar. Estas forças consistem na tensão superficial do líquido e das forças capilares atuantes nas pontes líquidas entre as partículas (Figura II-3).

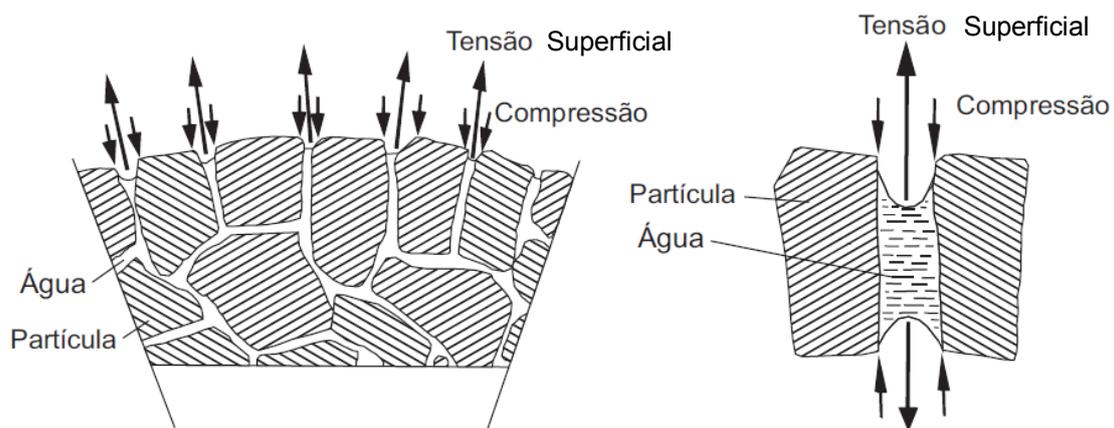


Figura II-3. Influência das forças de coesão no mecanismo de aglomeração a frio (modificado de Meyer, 1980).

Dentre os fatores que influenciam diretamente na formação e nas propriedades das pelotas cruas citam-se o teor de umidade, a forma, a distribuição granulométrica, a composição mineralógica das partículas, a sua molhabilidade, a porosidade das partículas, o tipo de aglomerante, o tipo de equipamento de pelotamento, as condições operacionais, etc (Meyer, 1980).

Dentre os equipamentos disponíveis para a operação de pelotamento existem tambores, cones ou discos de pelotização (Figura II-4), sendo que os últimos são os mais comumente utilizados na indústria, pois têm a vantagem de fornecer condições operacionais mais favoráveis à formação das pelotas com maior esfericidade como resultado do efeito do movimento de rolamento das partículas. Esses discos são conjugados a sistemas de classificação das pelotas cruas (Figura II-5) compostos por mesas de rolos vibratórias, as quais selecionam as que possuem os tamanhos adequados para o estágio de endurecimento das pelotas por tratamento térmico. É importante destacar que, nesta etapa de classificação, as pelotas que se encontram fora da faixa de tamanhos determinada pelas aberturas dos rolos, são diretamente recirculadas no processo, retornando à mistura, seguida de desagregação, antes de alimentar o disco de pelotização.

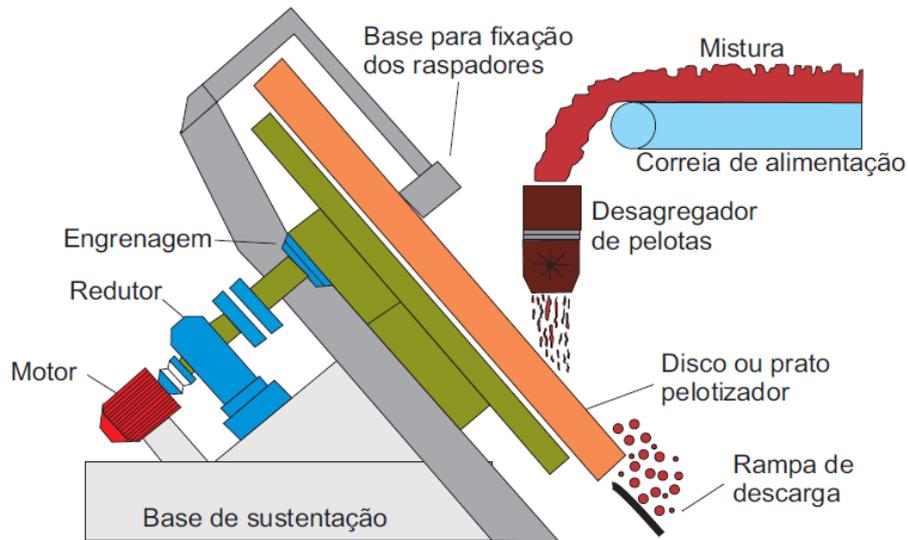


Figura II-4 – Diagrama esquemático de um disco de pelotização (modificado de Fonseca, 2003).

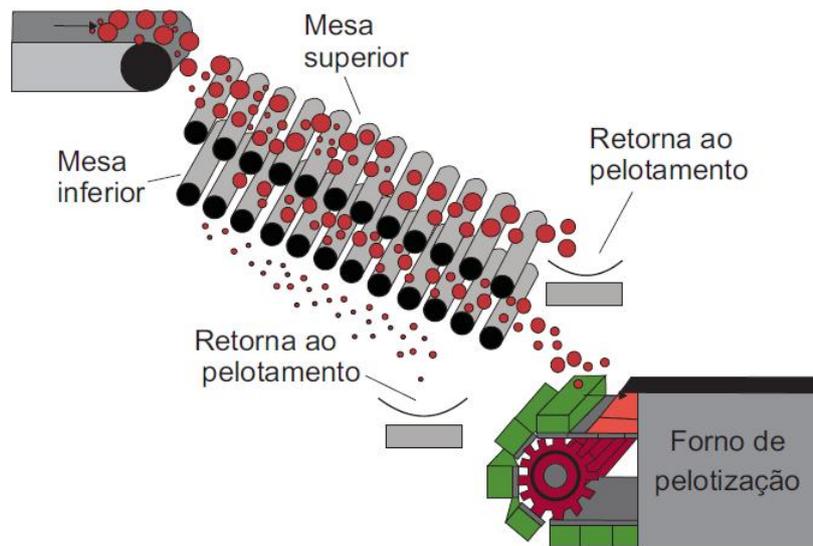


Figura II-5 – Esquema de transporte e classificação das pelotas cruas (modificado de Fonseca, 2003).

II.1.3 Endurecimento das pelotas (tratamento térmico)

Sendo este o último estágio no processo de pelotização, as pelotas cruas são submetidas a um tratamento térmico, o qual tem o objetivo de conferir maior resistência mecânica às pelotas (Figueira *et al.*, 1985). Esta resistência mecânica deve ser

consideravelmente alta a fim de permiti-las suportar tanto os esforços que ocorrem durante o transporte e manuseio, quanto às solicitações mecânicas durante as operações de redução (Meyer, 1980).

O tratamento térmico durante o estágio de endurecimento das pelotas é realizado a temperaturas abaixo do ponto de fusão do minério de ferro. Ele ocorre a temperaturas em torno de 1300 a 1350 graus Celsius, dependendo do tipo de minério de ferro e composição química da pelota que está sendo produzida sob uma atmosfera oxidante.

Contudo, estas temperaturas são suficientemente altas para que ocorram reações que proporcionem alterações na estrutura cristalina dos minérios de ferro que compõem a matriz da pelota e a formação de uma escória através da reação entre os compostos ácidos oriundos da ganga contida nos minérios de ferro e os aditivos que são compostos básicos. Estas reações geram ligações térmicas que são determinantes na qualidade física, química e metalúrgica das pelotas endurecidas, que passam a serem denominadas pelotas queimadas.

Existem três tipos de equipamentos para a formação de pelotas queimadas: forno de cuba, forno rotativo e forno de grelha móvel (Figura II-6), sendo o último utilizado atualmente pela maioria das indústrias pelletizadoras no mundo.

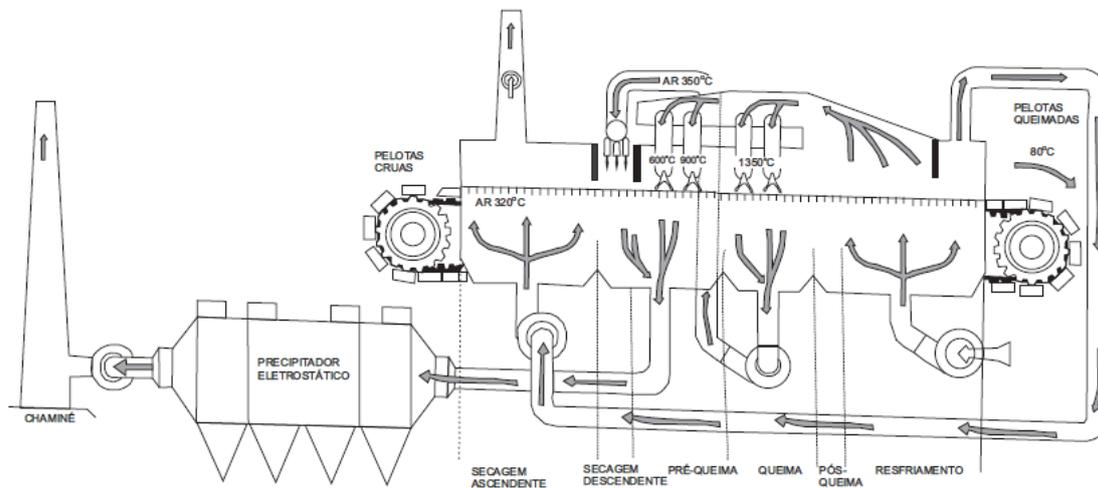


Figura II-6 – Esquema do Forno de Grelha Móvel (modificado de Gariglio e Klein, 1996).

O processo de endurecimento inicia-se pela alimentação de pelotas cruas na grelha do forno. A fim de minimizar o impacto térmico sobre a grelha, esta recebe uma camada de pelotas já endurecidas que retornam da descarga do forno, denominada de camada de forramento (Fonseca, 2003).

O tratamento térmico no forno se dá apenas por uma única passagem das pelotas cruas por diversas regiões que determinam as etapas do processo, com o tempo de residência das pelotas no forno podendo variar de acordo com o tipo de pelota a ser produzida.

De modo geral, este tratamento térmico se subdivide nas seguintes fases: secagem (ascendente e descendente), pré-queima, queima, pós-queima e resfriamento.

As pelotas cruas alimentadas na grelha do forno chegam com uma alta umidade (em torno de 8 a 10%), sendo sua presença associada a uma variedade de possíveis combinações entre os componentes, como: água localizada nos interstícios (poros e capilaridades) entre as partículas de minério e nos poros das partículas, hidróxidos combinados aos minérios de ferro, hidróxidos de cálcio (Ca(OH)_2) e de magnésio (Mg(OH)_2), incorporada aos compostos aglomerantes como a bentonita e, em alguns

casos, presente como componente cristalino em sais (Meyer, 1980). Devido a estas inúmeras combinações, as pelotas cruas são aquecidas através de um fluxo de gás quente ascendente e em seguida descendente, a uma faixa de temperatura entre 320 a 350 graus Celsius, com o objetivo de evaporar o excesso de água contida, controlando a temperatura a fim de evitar danificar a integridade física das pelotas devido às pressões internas que os gases quentes geram. Essa etapa é chamada de **secagem**.

No estágio de **pré-queima**, as pelotas já secas são aquecidas a uma temperatura em torno de 900 graus Celsius por um período de tempo suficiente que permita evitar choque térmico, o qual poderia ocasionar o aparecimento de fissuras, trincas ou até mesmo a desintegração da pelota, colocando em risco a produtividade do processo. Nesta região do forno ocorrem em paralelo diversas reações importantes, como a evaporação da água nos cristais, a decomposição de hidratos, carbonatos e sulfatos, a ustulação do enxofre através da reação de calcinação dos sulfetos e a oxidação dos minérios de ferro para o seu estado mais oxidado, a hematita (Fe_2O_3). Estas reações influenciam diretamente no processo de endurecimento das pelotas na etapa subsequente.

Na fase de **queima**, as pelotas atingem a temperatura máxima de exposição na faixa de 1300 a 1350 graus Celsius com o auxílio de óleo combustível que é queimado para gerar o calor necessário, conferindo propriedades mecânicas e metalúrgicas adequadas para sua utilização nos reatores siderúrgicos. Essas propriedades são atingidas através do endurecimento da pelota que, por sua vez, ocorre devido às reações em estado sólido como a transformação e crescimento da estrutura cristalina dos minérios de ferro e a formação de uma escória como consequência da reação entre os compostos ácidos (SiO_2 e Al_2O_3) presentes nos minérios de ferro e os compostos básicos (CaO e MgO). É importante destacar que a reação entre os compostos ácidos e

básicos gera uma fase fundida que contribui para a sinterização das ligações na estrutura da pelota através de pontes de óxido de ferro. O monóxido de cálcio (CaO) reage com a hematita (Fe_2O_3), formando diferentes ferritas de cálcio, as quais contribuem consideravelmente para a aceleração do crescimento dos cristais de minério de ferro a temperaturas acima de 1250 graus Celsius (Meyer, 1980).

A região de **pós-queima** do forno é definida como uma zona de transição, a qual se caracteriza por um curto tempo de residência com o objetivo de homogeneizar termicamente o leito de pelotas através da transferência de calor, contribuindo com as condições de queima das camadas inferiores.

O **resfriamento** é uma etapa crítica do processo de endurecimento, pois diversos testes mostraram que, quando resfriada rapidamente, a pelota pode até vir a desintegrar (Meyer, 1980). Para isso as pelotas queimadas são resfriadas pela injeção ascendente de ar, removendo o calor contido nelas até atingir temperaturas em torno de 300 graus Celsius.

II.1.4 Classificação, manuseio e embarque/estocagem das pelotas queimadas

Não menos importante, esta etapa também é crucial para a chegada de uma pelota de boa qualidade ao cliente, de maneira que as indústrias pelletizadoras buscam minimizar a ação da degradação devido ao ambiente mecânico em que as pelotas são transportadas nos respectivos sistemas de manuseio e transporte.

Após serem resfriadas, as pelotas queimadas são transportadas para uma estação de peneiramento, sendo separadas da fração de finos que se situam fora das especificações, retornando ao processo de moagem, o qual ocorre durante a preparação das matérias-primas. Em seguida, passam por um circuito de manuseio, podendo ser estocadas em pilhas em pátios para posterior embarque, ou direcionadas diretamente por

correias transportadoras até os porões de navios de grande porte para serem transportadas para seu destino final.

II.1.5 Avaliação da qualidade das pelotas queimadas

Após o tratamento térmico, é normalmente realizada uma amostragem para avaliar a qualidade química, metalúrgica e física das pelotas queimadas. Esta avaliação é feita por meio de um conjunto de ensaios de laboratório padronizados por instituições regulamentadoras como ISO (International Standard Organization), ASTM (American Society for Testing and Materials) e JIS (Japanese Industrial Standard).

As análises químicas buscam principalmente identificar a presença e medir a percentagem de elementos e compostos químicos presentes na estrutura das pelotas, tais como: os teores de ferro total, FeO, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, P, S, Na₂O e K₂O.

Os testes metalúrgicos visam fornecer subsídios para avaliar o comportamento esperado das pelotas durante as operações de redução, seja no alto forno ou em fornos de redução direta. Para isso são utilizados equipamentos em escala de laboratório para simular as condições de operação dos reatores com o objetivo de avaliar a redutibilidade das pelotas e o grau de expansão volumétrica (índice de inchamento) associados à transformação da hematita (Fe₂O₃) em magnetita (Fe₃O₄) durante a redução do minério de ferro.

Os ensaios físicos visam fornecer subsídios para avaliar a resposta potencial das pelotas durante a sua estocagem, manuseio e transporte. Dentre estes pode-se citar o ensaio de tamboramento e abrasão (ISO 3271) e o ensaio de resistência à compressão (ISO 4700). Estes testes físicos, entretanto, não têm a pretensão de avaliar a susceptibilidade de pelotas degradarem-se durante o manuseio.

A Tabela II-1 lista os principais parâmetros dos ensaios físicos das pelotas.

Tabela II-1 - Principais parâmetros dos ensaios físicos das pelotas (Meyer, 1980)

Ensaio	Norma	ISO	ASTM	JIS
Tamboramento	Massa da Amostra (kg)	15,0	11,3	23,0
e	Índice de Tamboramento (%)	+ 6,3 mm	+ 6,35 mm	+ 5,0 mm
abrasão	Índice de Abrasão (%)	- 0,5 mm	- 0,595 mm	- 1 mm
	Granulometria (mm)	10 – 12,5	9,5 – 12,5	8 – 18
Resistência à				
compressão	Nº de pelotas	+ 60	100 x 2	250
(kgf/pelota)				

II.2 Fratura de partículas

Na siderurgia, as pelotas, assim como os granulados e sinter, são manipuladas na forma particulada. Ainda que seja um material resultante de um processo industrial, pelotas apresentam alguma variabilidade na sua distribuição de tamanhos e de microestrutura, resultando numa variação de seu comportamento mecânico. Com isso, a análise do comportamento mecânico de pelotas durante os diversos eventos de impacto decorrentes dos sistemas de manuseio representa uma importante ferramenta na avaliação de sua resistência à fragmentação.

II.2.1 Mecânica da fratura

A resposta de um sólido quando submetido à ação de qualquer tipo de esforço é expressa sob a forma de deformação. Esta deformação pode se apresentar de forma elástica, através da qual o material reage somente em relação ao esforço atuante, recuperando totalmente a energia oriunda da deformação após o seu descarregamento, ou quanto inelástica, através da qual o material sofre uma deformação permanente, recuperando apenas parcialmente a energia de deformação, tendo a outra parcela desta

energia sido transformada em mecanismos de rearranjos internos de sua estrutura e, com isso, não sendo recuperável (Tavares, 2004).

Em geral, os minérios se deformam predominantemente de maneira elástica até muito próximo do instante quando ocorre a sua fratura. Porém, existem alguns materiais que apresentam um comportamento inelástico, ilustrado na Figura II-7.

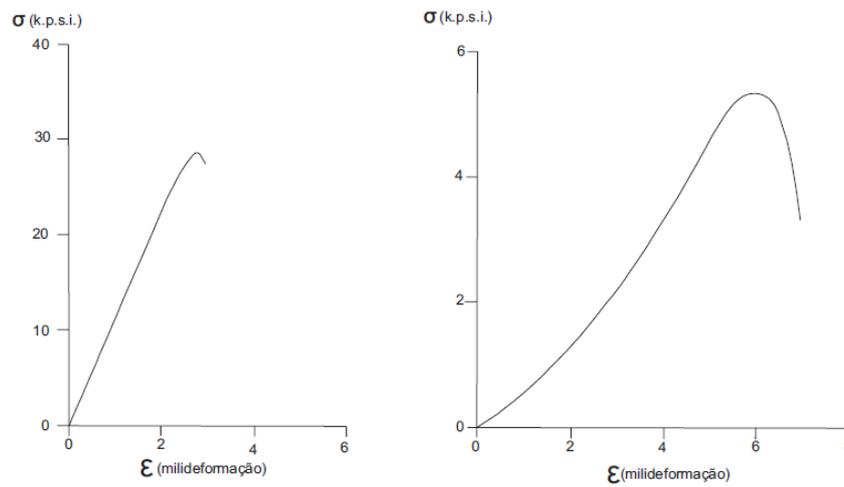


Figura II-7 – Curvas tensão-deformação uniaxial de quartzito (esquerda) e arenito (direita) (modificado de Tavares 2004 *apud* Jaeger e Cook, 1979).

Diferentemente do que é observado nos materiais metálicos, nos quais as deformações são decorrentes predominantemente do acúmulo de discordâncias, o comportamento elastoplástico associado à deformação de minérios pode ser interpretado pela evolução de seu fraturamento, ou dano, até a sua ruptura (Tavares, 2004).

A razão pela qual os minérios apresentam baixa tenacidade pode ser explicada pela presença de micro e macro defeitos em sua microestrutura, que incluem trincas, poros, contornos de grão entre diferentes minerais e discordâncias, os quais governam todo o processo de fratura.

Na mecânica da fratura clássica, o modelo baseado na teoria de Griffith (1920) descreve um balanço energético do aumento do tamanho de um defeito presente num sólido elástico durante seu carregamento. Quando um material que contém uma trinca (defeito) é tensionado, esta trinca age como um concentrador de esforços em sua extremidade (Figura II-8) resultando em sua propagação através da criação de novas superfícies.

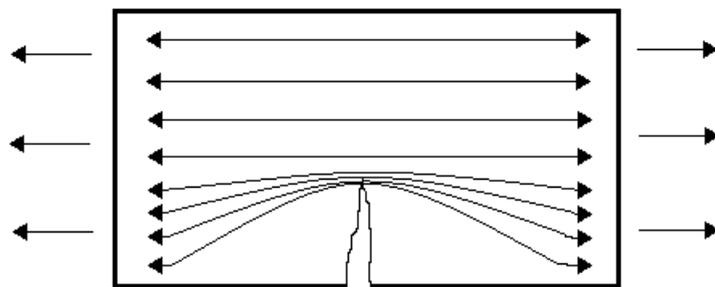


Figura II-8 – Concentração de esforços na extremidade de uma trinca.

Segundo Griffith, uma trinca irá propagar se a liberação de energia elástica de deformação for maior que a energia necessária para gerar duas novas superfícies.

Como citado anteriormente, contornos de grãos, poros, inclusões e trincas, podem dissipar a energia de deformação, interrompendo o crescimento da trinca responsável pela ruptura do sólido. Neste caso, a fratura só irá ocorrer quando essas trincas coalescerem, produzindo uma trinca que irá aflorar à superfície, criando uma fratura macroscópica.

Entretanto, o processo da fratura de partículas não termina após a primeira trinca chegar à superfície. As partículas geradas pela fratura primária podem apresentar uma energia cinética considerável, que pode ser dissipada durante um segundo estágio do processo através da projeção das mesmas.

Portanto, como pode ser observado na Figura II-9, a fragmentação de uma partícula submetida ao impacto de um peso em queda a uma velocidade v_0 apresenta três estágios distintos (Tavares, 1997): o primeiro (1) é a deformação da partícula, o segundo (2) a fratura primária da partícula e o terceiro (3) são os eventos sucessivos de quebra, produzindo nas partículas filhas.

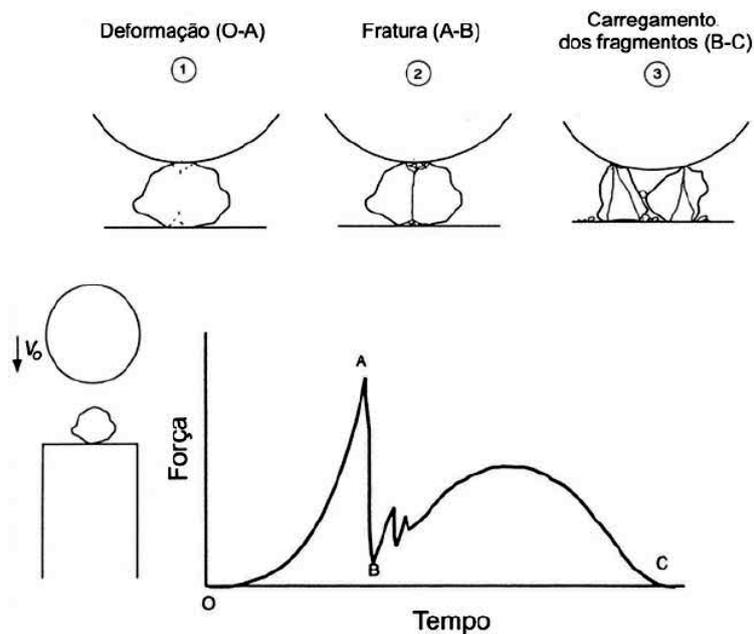


Figura II-9 – Etapas de fragmentação de partículas individuais por impacto (Tavares, 1997).

II.2.2 Mecanismos de fragmentação de partículas

Sabe-se que as pelotas são materiais aglomerados sinterizados formados por partículas ultrafinas, sendo estas partículas ligadas física e quimicamente uma as outras. Essas ligações podem ser rompidas como resultado da aplicação de esforços normais ou tangenciais sobre a superfície. Os esforços tangenciais são decorrentes dos carregamentos de cisalhamento, enquanto que os esforços normais correspondem aos carregamentos por compressão, sejam eles aplicados lentamente ou rapidamente (impacto).

Durante os processos de cominuição pode ser observado que a fragmentação ocorre por forças de contato. Estas são responsáveis pela deformação das partículas, gerando um campo de tensões, no qual o material responde a estas solicitações mecânicas através da geração de trincas ou da deformação inelástica. Esse processo é caracterizado pelos mecanismos de abrasão, estilhaçamento ou clivagem, os quais dependem do nível de energia aplicada sobre as partículas (King, 2001).

A fratura superficial, seja ela correspondente à abrasão ou ao lascamento, se caracteriza pela aplicação de esforços normais insuficientes para ruptura ou pela aplicação de esforços predominantemente cisalhantes na superfície da partícula, causando quebra superficial. O resultado é uma redução muito limitada do tamanho original da partícula, acompanhada da geração de um grande número de partículas finas.

A fratura volumétrica corresponde ao estilhaçamento e à clivagem. A fratura por estilhaçamento, ou desintegrativa, se caracteriza por elevadas taxas e intensidades de aplicação de energia, sob ação de esforços compressivos. Nesse caso, tem-se intensa fragmentação da partícula original, o que resulta em um amplo intervalo de tamanhos de fragmentos. Por fim, a fratura por clivagem ocorre quando a intensidade de aplicação de energia é baixa, de maneira que são formados alguns fragmentos grossos, bem como partículas finas próximo aos pontos de aplicação dos esforços.

De maneira análoga, os mesmos mecanismos de quebra de materiais particulados observados na cominuição também são observados no processo de degradação de minérios (Figura II-10) (Teo e Waters, 1988).

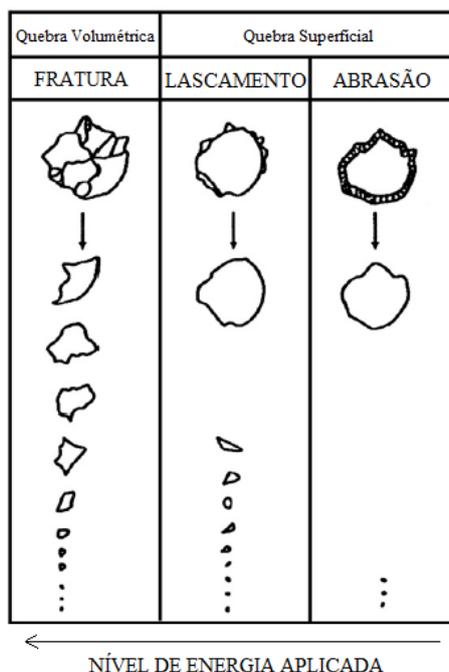


Figura II-10 – Diferentes mecanismos de quebra na degradação de minérios de acordo com o nível de energia de impacto aplicada (modificado de Téó *et al.*, 1994 – Reproduzida com autorização da editora).

II.2.3 Estudos da quebra volumétrica de partículas

Devido à grande heterogeneidade de materiais particulados fragmentados nos mais variados processos de cominuição no setor mineral, estudos sobre a caracterização do comportamento mecânico de minérios têm sido realizados por meio de diversos ensaios de laboratório. Estes ensaios podem ser classificados de acordo com o número de pontos de contato entre a partícula e a superfície; e a velocidade (taxa) de carregamento: impacto simples (ou individual), impacto duplo, ou compressão lenta (Figura II-11).

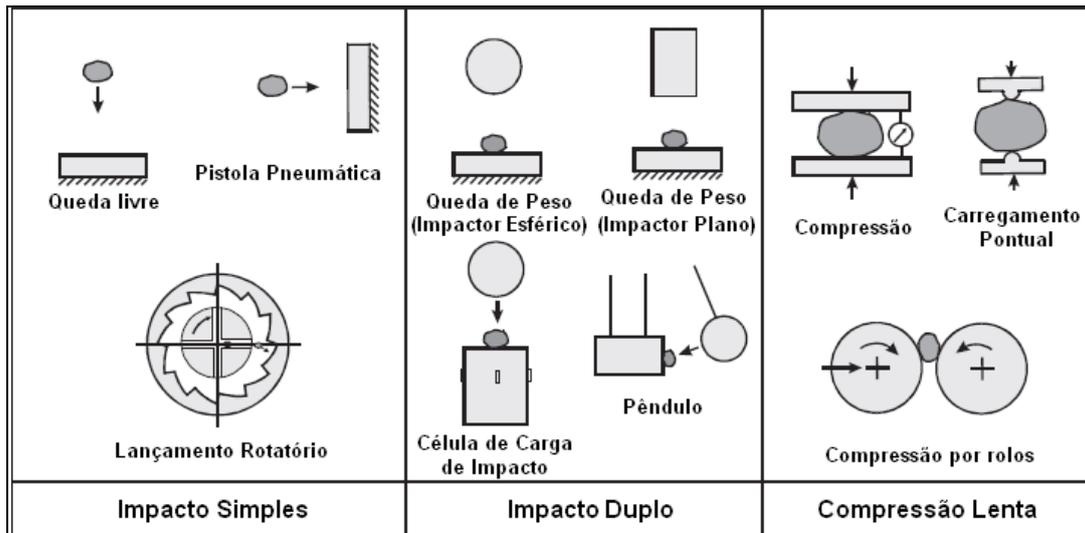


Figura II-11 – Diferentes tipos de ensaios de fratura de partículas individuais (modificado de Tavares, 2007).

Nos ensaios de impacto simples, a fratura da partícula é avaliada a partir de testes de queda livre ou pelo lançamento da partícula contra uma superfície rígida. No teste de queda livre, a energia específica de quebra da partícula é tomada como a energia potencial calculada a partir da altura de queda da mesma. Nos testes de lançamento, as partículas podem ser lançadas com o auxílio de uma pistola pneumática ou por um mecanismo rotativo. Neste caso a energia específica de impacto corresponde à energia cinética da partícula imediatamente antes de colidir contra a superfície de impacto.

Nos ensaios de impacto duplo, a fratura da partícula ocorre como resultado das forças de compressão exercidas por duas superfícies com uma taxa de deformação moderada das partículas. Os ensaios de impacto duplo podem ser realizados de diferentes maneiras: queda de peso sobre a partícula, com impactor esférico ou plano, pêndulo, e a célula de carga de impacto.

Nos ensaios de compressão as partículas são fraturadas por meio de carregamento lento e controlado. Os equipamentos mais usados são a prensa de

compressão uniaxial, podendo ser de carregamento pontual, e um equipamento semelhante ao moinho de rolos pressurizado (*HPGR*).

II.2.3.1 Modelos de quebra volumétrica de partícula

A partir de testes de laboratório, foram desenvolvidos por diversos pesquisadores ao longo de várias décadas, diferentes modelos matemáticos com o intuito de descrever quantitativamente o comportamento da quebra de minérios para a modelagem de processos de cominuição.

II.2.3.1.1 Fragmentação volumétrica por impacto duplo

Um dos principais aparelhos usados em ensaios de quebra é a célula de carga de impacto (CCI) (Figura II-12) (Tavares e King, 1998), o qual simula o evento mais elementar que ocorre na maior parte dos processos de cominuição, que é a aplicação rápida de esforços mecânicos sobre partículas individuais.

O experimento consiste na quebra de partículas individuais como resultado da simulação da queda de uma esfera de aço sobre a partícula descrevendo um processo de fragmentação, como já apresentado na Figura II-9. Cada experimento completo normalmente demanda de 50 a 100 partículas contidas em um intervalo estreito de tamanhos.

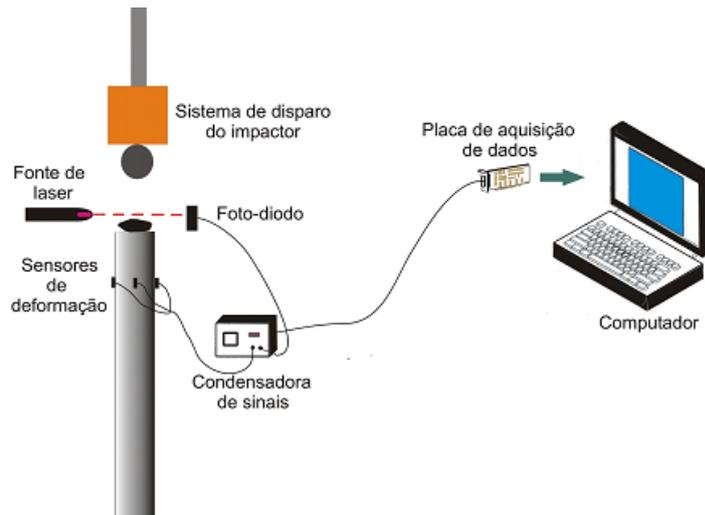


Figura II-12 - Esquema da célula de carga de impacto (COPPE/UFRJ) (Tavares e Lima, 2006).

O equipamento consiste numa barra de aço, verticalmente orientada, instrumentada com sensores de deformação (*strain gauges*), posicionados a uma dada distância da extremidade superior. O sistema de disparo é composto por um eletroímã que sustenta a esfera de aço (impactor) com um determinado peso até o momento de início da queda-livre. Ao cruzar o feixe de laser que excita o foto-diodo, a esfera inicia o seu carregamento sobre a partícula, gerando deformações progressivas até a fratura da mesma, ao mesmo tempo em que ocorre a propagação da onda mecânica compressiva, oriunda do carregamento, através da barra de aço. A magnitude da onda que propaga através da barra é baixa, porém suficientemente alta para a detecção pelos sensores de deformação, os quais se representam como resistências num circuito de Wheatstone, gerando microvoltagens com o auxílio de uma condensadora de sinais (Tavares e Lima, 2006). Em seguida, as deformações são capturadas com o auxílio de uma placa de aquisição de dados e ficam armazenadas na forma de uma curva “deformação versus tempo” no computador. Então, os dados são analisados, gerando uma curva força-tempo (Figura II-13) a partir da qual se pode calcular a carga e a energia necessárias para a fratura primária da partícula (primeiro evento de fratura).

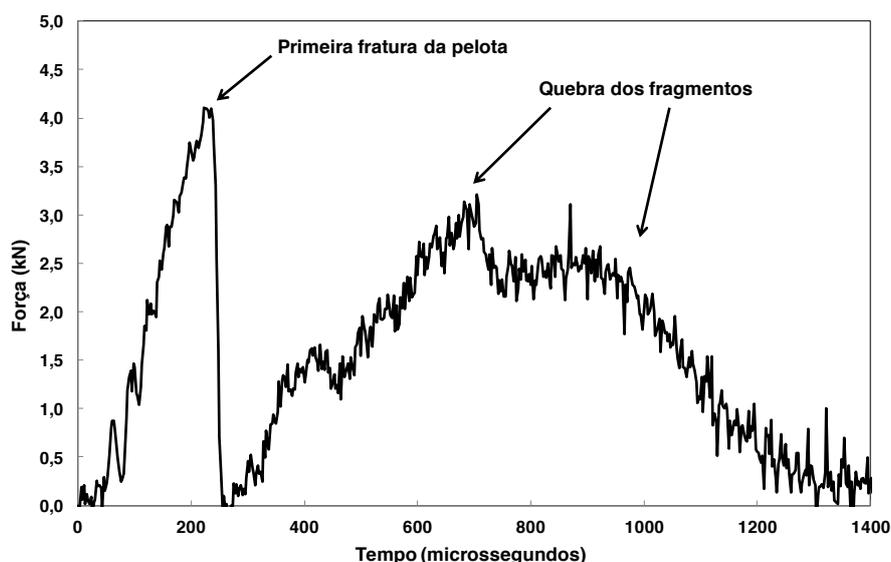


Figura II-13 – Curva força versus tempo resultante de um evento de fratura de uma pelota na Célula de Carga de Impacto (COPPE/UFRJ).

As informações obtidas a partir desse ensaio incluem a resistência de partícula (tensão de ruptura), a rigidez de partícula, a energia específica de fratura da partícula (Tavares e King, 1998) e a energia total absorvida pela partícula durante todo o evento de impacto (Tavares, 1999).

A energia de fratura é estimada com o auxílio da equação de um balanço energético (Tavares, 1999)

$$E = v_0 \int_0^{t_f} F(t) dt + g \int_0^{t_f} F(t) t dt - \frac{1}{2m_e} \left(\int_0^{t_f} F(t) dt \right)^2 - \frac{1}{\rho_b A_b C_b} \int_0^{t_f} F^2(t) dt, \quad \text{Equação II-1}$$

na qual t_f é o tempo onde ocorre a primeira fratura da partícula, m_e é a massa da esfera, $v_0 = \sqrt{2gh}$ é a velocidade da esfera de aço (em queda livre) no momento do contato, ρ_b é a massa específica da barra, A_b é a área da seção transversal da barra, C_b é a

velocidade de propagação da onda de deformação compressiva na barra e $F(t)$ são as forças aplicadas durante o carregamento da partícula (Tavares e Lima, 2006).

Com isso, pode-se calcular a energia específica de fratura da partícula simplesmente fazendo a razão do valor da energia de fratura pela massa da partícula, m_p .

$$E_m = \frac{E}{m_p} \quad \text{Equação II-2}$$

A resistência da partícula, σ_p é calculada pela equação:

$$\sigma_p = \frac{2,8F_f}{\pi D^2} , \quad \text{Equação II-3}$$

na qual F_f é a força responsável à fratura e D é a distância entre os pontos de carregamento da partícula, que, no caso é estimada pelo tamanho representativo da partícula (média geométrica entre as peneiras do intervalo nas quais a amostra ensaiada é retida e passante).

A rigidez da partícula, k_p é obtida com base na “Lei do contato de Hertz” (Tavares e King, 1998) pela equação:

$$k_p = \frac{Kk}{k - K} , \quad \text{Equação II-4}$$

onde k é a rigidez da esfera e da barra, a qual é dada por: $k = Y/(1 - \mu^2)$, em que Y é o módulo de elasticidade de Young e μ é o coeficiente de Poisson. K pode ser calculado pela equação:

$$K = \left(0,576 \frac{F_f^5}{dE^3} \right)^{1/2}$$

Equação II-5

É importante observar que a rigidez é uma grandeza bastante influenciada pela forma das partículas de minério, pois as mesmas não possuem formatos esféricos (Tavares e Silveira, 2008).

Por apresentarem grande variabilidade devido às características de fratura de partículas individuais, os resultados devem ser representados usando uma distribuição estatística adequada da grandeza de interesse para cada partícula individual. O procedimento adotado consiste da ordenação dos resultados experimentais de forma ascendente, atribuindo os índices $i = 1, 2, \dots, N$ a cada uma das observações, na qual N é o número total de partículas ensaiadas. Para a distribuição de energias específicas de fratura, os percentis são geralmente estimados por

$$P(E_{m,i}) = (i - 0,5) / N$$

Equação II-6

Em seguida, os pares resultantes $[E_{m,i}; P(E_{m,i})]$ são ajustados a uma distribuição estatística apropriada, a fim de permitir a extração dos parâmetros estatísticos relevantes da amostra, tais como a média e a variância. A distribuição de probabilidade que apresenta os melhores resultados na descrição de resultados de testes com a CCI é a log-normal (Tavares e King, 1998) que, no caso da distribuição de energias específicas de fratura, é dada por

$$P(E_m) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln E_m - \ln E_{m,50}}{\sqrt{2} \sigma_E} \right) \right],$$

Equação II-7

na qual $\ln E_{m,50}$ e σ_E^2 representam a média e a variância da distribuição, respectivamente. Um exemplo de distribuição de energia de fratura é apresentado na Figura II-14.

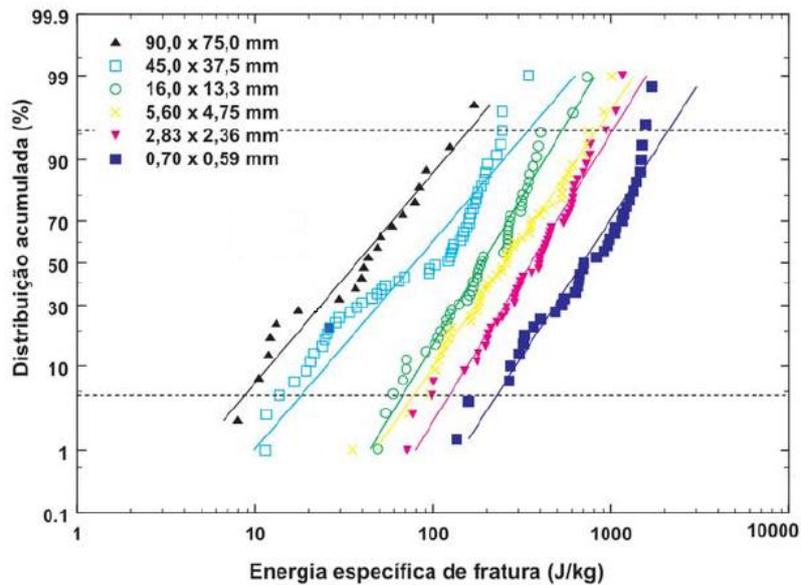


Figura II-14 – Distribuições log-normal de energias de fratura de diferentes tamanhos de uma amostra de rocha da Pedreira Vigné (RJ), com um intervalo de confiança de 90% (linhas pontilhadas (Tavares e Lima, 2006)).

Na Figura II-14 cada ponto representa uma partícula ensaiada. A variabilidade observada nas grandezas físicas que caracterizam a fratura das partículas é decorrente de uma série de fatores, tais como a influência da distribuição interna de defeitos, da microestrutura, da forma da partícula, entre outros, justificando a necessidade de serem descritas estatisticamente.

II.2.3.1.2 Efeito de escala na resistência de partículas

Um aspecto importante a ser levado em consideração na análise da fratura de materiais particulados é a variação de sua resistência com o tamanho de partícula, tanto

observado na célula de carga de impacto para partículas de minérios (Figura II-14) quanto também em testes de resistência a compressão de pelotas de minério de ferro (Figura II-15). Pode-se observar que o efeito de escala em pelotas é muito mais significativo do que aquele observado em partículas de minérios, mostrando a importância da avaliação desse efeito na investigação do comportamento mecânico das pelotas.

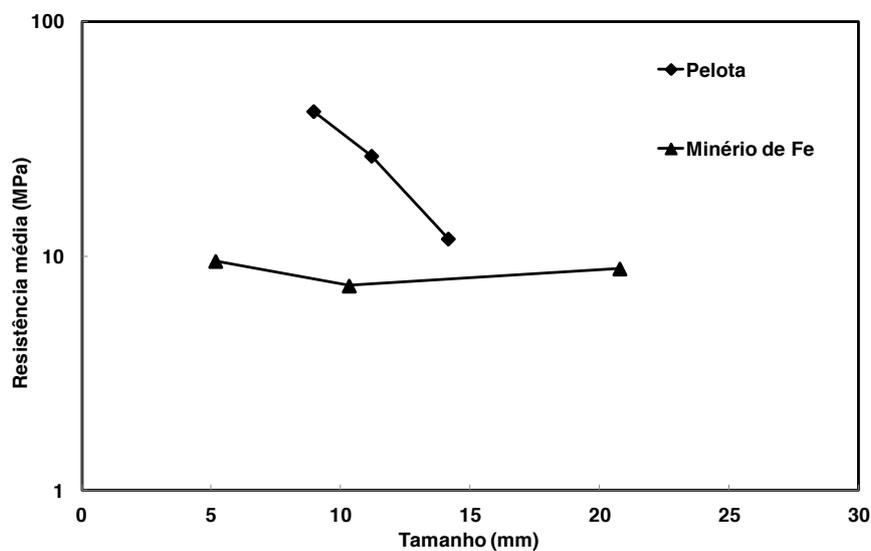


Figura II-15 – Comparação entre medidas de resistência à compressão de pelota para diferentes tamanhos de pelota (dados obtidos de Dwarapudi et al., 2008) e de medida de resistência mediana de fratura de minério de ferro na Célula de Carga de Impacto (COPPE/UFRJ).

A variação da energia mediana de fratura com o tamanho de partícula pode ser descrita por meio da expressão

$$E_{50i} = E_{\infty} \left[1 + \left(\frac{d_o}{d_i} \right)^{\phi} \right] \quad \text{Equação II-8}$$

na qual d_i é o tamanho representativo das partículas pertencentes a i -ésima classe, σ_i^2 é a variância da distribuição e E_∞ , d_o e ϕ são parâmetros do modelo que devem ser ajustados aos dados experimentais.

II.2.3.1.3 Função quebra dependente da energia

A quebra de partículas pode ser representada por meio de uma função que descreve a distribuição de tamanhos do produto de quebra de partículas inicialmente contidas em uma faixa estreita de tamanhos.

Diversas metodologias foram desenvolvidas com o objetivo de descrever esta função. Um exemplo é o ensaio de queda de peso (DWT – *Drop Weight Test*) (Figura II-11), através do qual, partículas individuais são submetidas ao impacto de um peso esférico ou uma bigorna (impacto duplo) de massa conhecida, a partir de uma determinada altura de queda que, por sua vez, definem a energia de impacto. Após o ensaio os fragmentos são coletados e é realizada a análise granulométrica do material fraturado. Com isso pode-se correlacionar a energia aplicada com a intensidade da quebra do material, com o auxílio da equação (Napier-Munn *et al.*, 1996)

$$t_{10} = A[1 - \exp(-bE)] \quad \text{Equação II-9}$$

na qual A e b são parâmetros de ajuste do modelo que variam com o tipo de material, E a energia de impacto e t_{10} é a porcentagem de material fragmentado que é menor que um décimo do tamanho de partícula original.

Tavares (2009) propôs uma modificação na estimação da função quebra, fazendo com que a Equação II-9 fosse modificada para

$$t_{10} = A \left[1 - \exp \left(- \frac{b' E}{E_{50b}} \right) \right]$$

Equação II-10

na qual A e b' são parâmetros de ajuste do modelo, E a energia de impacto e E_{50b} é a mediana das energias de fratura de partícula que foram quebradas, estimada a partir de resultados do ensaio realizado na célula de carga de impacto (seção II.2.3.1.1). A análise granulométrica do produto de um ensaio pode, em seguida, ser reconstituída a partir dos diferentes marcadores t_n s, descritos por Tavares e Carvalho (2011) usando a função beta incompleta.

II.2.3.2 Modelos de quebra de partícula por impactos repetidos

Um aspecto importante a ser considerado na previsão de resultados de impactos é o caso em que partículas não sofrem fragmentação volumétrica no primeiro evento de aplicação de esforços, apenas quando são impactadas sucessivamente.

Alguns pesquisadores como Tavares e King (2002), Middlemiss (2007) e Kim e Cho (2010) observaram que nem sempre uma partícula de um determinado material irá fraturar num único estágio de impacto. Muitas vezes a energia do impacto pode ser parcialmente acumulada na forma de dano interno, como uma ou mais trincas. Algumas tentativas têm sido realizadas no sentido de descrever quantitativamente esse fenômeno.

II.2.3.2.1 Modelo da mecânica do dano (Tavares e King, 2002)

Assim como em diversos processos de cominuição, felizmente operações de manuseio muitas vezes aplicam uma quantidade de energia de impacto insuficiente para realizar a quebra de determinadas partículas. A fim de descrever esse fenômeno, Tavares e King (2002) propuseram um modelo que parte da hipótese de que, quando uma partícula sofre um impacto e não quebra, ela absorve parte da energia na forma de dano que, por sua vez, se traduz na sua perda progressiva de rigidez.

Este modelo baseia-se na idéia de que quando uma partícula esférica sofre um impacto, sua resposta de comportamento mecânico, retratado por uma curva de força versus deformação, pode ser descrita pela combinação da mecânica do dano contínuo e da teoria de Hertz dos contatos elásticos (Tavares e King, 2002). A partir desta teoria, é possível prever as curvas de força versus deformação para cada ciclo de carregamento até a fratura catastrófica da partícula (Figura II-16).

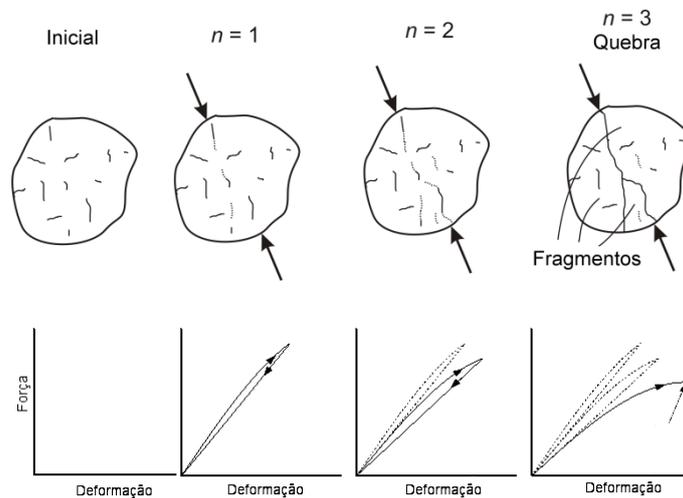


Figura II-16 - Efeito do enfraquecimento devido ao acúmulo de dano durante repetidos ciclos de carregamento (Tavares e Carvalho, 2008).

Tavares e King (2002) propuseram expressões que permitem calcular como as energias de fratura de partículas variam como resultado da aplicação de impactos de magnitude $E_{k,n}$:

$$E_{n-1} = E_n(1 - D_n^*)$$

sendo que o dano deve ser calculado usando um método numérico iterativo a partir da equação

$$D_n^* = \left[\frac{2\gamma}{2\gamma - 5D_n^* + 5} \frac{E_{k,n}}{E_{n-1}} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad \text{Equação II-11}$$

sendo γ o único parâmetro de ajuste do modelo.

II.2.4 Quebra superficial de partículas (abrasão e lascamento)

Como consequência do grande número de contatos entre as superfícies das partículas e das superfícies das partículas com equipamentos, como correias transportadoras, chutes de transferência, vagões e etc, a quebra superficial pode contribuir de forma significativa para a degradação do material durante o manuseio, por meio da geração de finos.

Como analisado na seção II.2.2, a quebra superficial de uma partícula gera uma grande quantidade de partículas finas acompanhadas de uma partícula de tamanho pouco inferior ao original (Figura II-10).

Alguns modelos têm sido propostos (Dukino *et al.*, 2000; Middlemiss, 2007 e Kim e Cho, 2010), com o objetivo de quantificar a contribuição de finos gerados pela quebra superficial.

II.2.4.1 Modelo de abrasão e lascamento de Dukino *et al.* (2000)

O modelo propõe uma combinação do impacto por contato simples e uma aproximação da mecânica da fratura na tentativa de construir uma função quebra de minérios de ferro durante o ensaio físico de tamboramento ISO 3271 (Tabela II-1) para medir a quantidade de finos gerados durante um processo de manuseio e transporte.

A função quebra deste modelo parte da teoria de Hertz do contato colinear elástico entre dois corpos: o minério e carcaça de aço do tambor; e considera a tenacidade à fratura do material como uma propriedade importante, considerando a validade de algumas hipóteses, tais como: a constância da geometria do minério(cúbica); que a quebra do material só ocorre quando o cubo colide na aresta com o ponto de contato verticalmente alinhado com o centróide; e que os finos são gerados a partir de trincas cônicas na superfície do material (Dukino *et al.*, 2000).

A validação do modelo partiu da comparação entre a quantidade de massa de finos gerada medida experimentalmente e a simulada em um ciclo de tamboramento pela equação (Dukino *et al.*, 2000)

$$m_{total} = 3,6Y\rho\left(\frac{P}{K_c}\right)^2 \quad \text{Equação II-12}$$

na qual m_{total} é a massa de finos gerada, Y é o número de revoluções do tambor no primeiro ciclo de tamboramento, ρ é a massa específica do material, P é a força de contato do minério com a carcaça de aço do tambor e K_c é a tenacidade à fratura do minério em questão.

Embora o modelo tenha sido capaz de descrever qualitativamente os resultados experimentais, a necessidade da medida da tenacidade à fratura do material pode representar um desafio. Além disso, ele não leva em consideração a variabilidade da geometria das partículas do material.

II.2.4.2 Modelo de quebra superficial de Kim e Cho (2010)

Kim e Cho (2010) investigaram a quebra de agregados de concreto por queda livre (Figura II-11) para diferentes condições de altura de queda. Inevitavelmente as partículas que não fraturaram, sofreram abrasão e lascamento quando sujeitas a sucessivos impactos por queda livre. A fim de descrever esse fenômeno foi proposto um modelo que descrevesse a contribuição da quebra superficial.

Estes pesquisadores consideraram a hipótese de que a perda superficial de massa por impacto na partícula ocorre em locais aleatórios sem uma alteração sistemática da geometria da partícula. O modelo proposto é baseado na expressão

$$u_i = -\frac{1}{3} x_i (\phi_{1i} A_i + \phi_{2i} C_i) \quad \text{Equação II-13}$$

sendo x_i o local geométrico do impacto na partícula, ϕ_{1i} e ϕ_{2i} as frações mássicas que sofrem, respectivamente, abrasão e lascamento. A_i e C_i são parâmetros de abrasão e lascamento, respectivamente, os quais podem ser estimados a partir de gráficos de perda mássica por número de impactos por meio de testes de queda livre (Kim e Cho, 2010).

II.3 Degradação de materiais particulados

A degradação de materiais particulados, como minérios e pelotas, é decorrente da ação mecânica durante o transporte através de ferramentas e equipamentos que se encontram disponíveis durante todo o percurso de manuseio até a chegada do material aos usuários finais (Figura II-17).

Segundo Goodwin e Ramos (1985 e 1987) e Teo *et al.* (1990), a degradação pode ser definida como a redução de uma dada fração de tamanho para uma fração de tamanho inferior através de uma faixa do produto expressa como uma porcentagem.

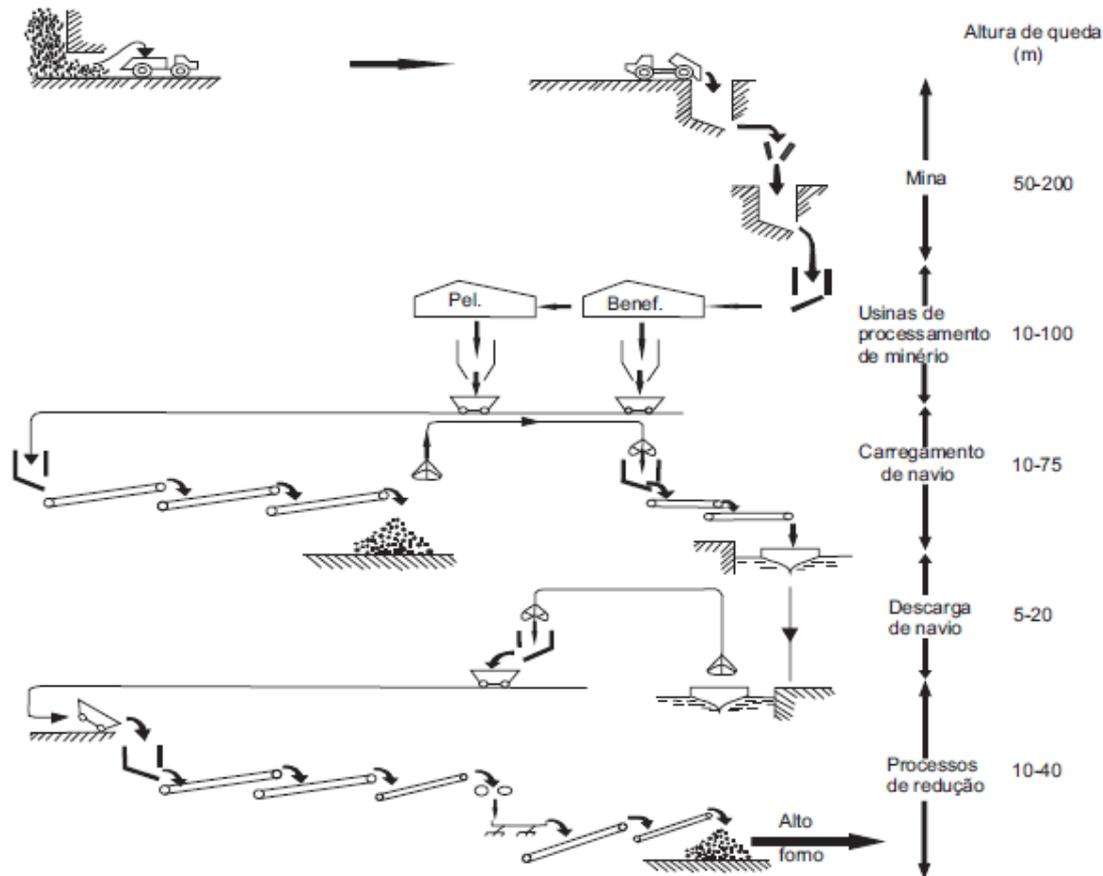


Figura II-17 - Circuito de manuseio e transporte de minério de ferro desde a mina até o alto-forno (modificado de Sahoo, 2007 *apud* Fagerberg e Sandberg, 1973 – Reproduzida com autorização da editora).

Sahoo (2007) fez uma revisão de importantes características do comportamento de materiais particulados na degradação através de diversos trabalhos de pesquisadores, sendo que todos buscaram identificar as suas causas, bem como medidas que possam ser tomadas para a sua prevenção. Assim, tomando esta revisão da literatura como referência, serão discutidos alguns importantes aspectos envolvidos na degradação de minérios e aglomerados, com o objetivo de entender melhor os possíveis fatores que resultam na degradação das pelotas de minério de ferro.

II.3.1 Degradação de minérios em equipamentos de manuseio e transporte

O carvão, por ser um material friável, motivou diversos pesquisadores a lhe investigarem devido à grande magnitude da sua degradação durante o manuseio, bem como a sua importância econômica. Com isso, muitos autores preocupados em compreender o comportamento do material nos equipamentos industriais utilizados no manuseio, conduziram testes em pontos de transferência, tais como chutes e descarregadores, com o intuito de simular este processo.

Goodwin e Ramos (1985) perceberam, a partir de ensaios com amostra de um carvão mineral, que dentre os diversos perfis de equipamentos de transferência utilizados na indústria, os que possuíam perfis curvos introduziam menor degradação durante o manuseio de materiais.

Dentro da mesma linha de pensamento, Ooshima *et al.* (1981) observaram que a degradação ocorre devido:

- a impactos em correias transportadoras e chutes;
- à fricção pelo rolamento entre os particulados dentro de silos e peneiras vibratórias;
- ao carregamento por compressão e
- à ação intempérica decorrente de condições climáticas locais, como a umidade oriunda de chuvas, levando o material a sofrer um processo de envelhecimento, durante a sua estocagem em pilhas.

Como resultado, Ooshima *et al.* (1981) propuseram a utilização de chutes com degraus, pressupondo uma diminuição na geração de finos durante o carregamento de um navio como uma forma de diminuição da intensidade do impacto na queda do material.

De maneira análoga a estudos anteriores com carvões, Fagerberg e Sandberg (1973) perceberam que a degradação de minérios de ferro diminui à medida que aumenta o volume de material que se encontra previamente dentro de um silo, caracterizando um efeito de amortecimento. Como conclusão, estes autores sugeriram a utilização de chutes de transferência com defletores (Figura II-18) para que fosse possível diminuir a velocidade e a altura de queda por impacto das partículas de minério, e, assim, a sua degradação. Este efeito de redução na produção de finos pelo alívio na altura de queda também pôde ser notado por outros autores, como no caso do uso de um chute em espiral na alimentação de silos (Figura II-19).

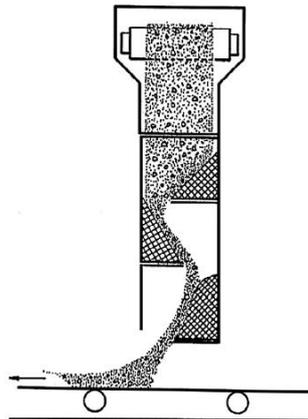


Figura II-18 – Proposta de utilização de defletores em um chute de transferência (Sahoo, 2007 *apud* Fagerberg e Sandberg, 1973 – Reproduzida com autorização da editora).

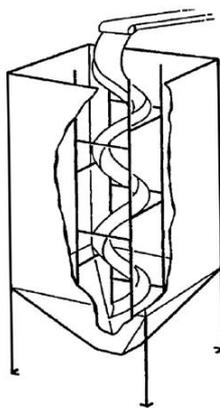


Figura II-19 – Proposta de design com perfil em espiral para um chute de transferência (Sahoo, 2007 *apud* The British National Coal Board, 1964 – Reproduzida com autorização da editora).

II.3.2 Influência de variáveis na degradação de minérios

O ambiente mecânico no qual os materiais granulados são manuseados proporciona um grande número de variáveis características que, de alguma forma, contribuem para a degradação mecânica. Essas características foram estudadas em condições de laboratório a partir de testes realizados com o objetivo de observar o comportamento mecânico dos materiais, visando qualificar alguns dos principais fatores que influenciam na degradação (Sahoo, 2007). Dentre eles estão: o número de impactos e a altura total de queda, a presença de finos na superfície de impacto, o tipo de superfície de impacto, o tamanho da partícula, a seletividade de partículas mais resistentes (fenômeno de estabilização), a ordem com que ocorrem os eventos de impacto, a composição mineralógica e o tempo de envelhecimento.

II.3.2.1 Influência do número de impactos e da altura total de queda

Fagerberg e Sandberg (1973) mostraram, a partir de ensaios de queda livre de carvão, que a substituição de um evento de impacto por n eventos de impacto com alturas mais baixas, de maneira que a soma destas fosse equivalente à altura total para

um único impacto, produziria a mesma proporção de finos. Porém, estudos realizados por Sahoo *et al.* (2002) e Sahoo (2004) demonstram que a proporção de finos gerados aumenta com a diminuição do número de impactos para uma mesma altura total de queda.

II.3.2.2 Efeito de amortecimento na presença prévia de finos

Sahoo *et al.* (2002) investigaram este efeito a partir de ensaios de impacto por queda livre com carvão variando a proporção inicial de finos. Foi verificado que, à medida que aumenta a quantidade de finos presentes antes do impacto, diminui a geração de novos finos por degradação (Figura II-20), caracterizando o efeito de amortecimento.

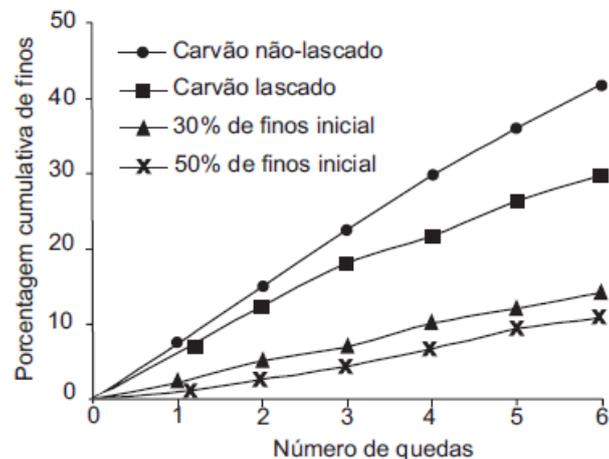


Figura II-20 - Porcentagem acumulada de finos (- 16 mm) vs. número de quedas de carvão de South Blackwater (modificado de Sahoo, 2007 *apud* Sahoo *et al.*, 2002 – Reproduzida com autorização da editora).

II.3.2.3 Efeito da superfície de impacto

Assim como Ooshima *et al.* (1981), Sahoo *et al.* (2003) verificaram a diferença da degradação resultante do uso de diferentes superfícies de impacto (Figura II-21), verificando-se que a geração de finos por impacto aumentava mais rapidamente para superfícies mais rígidas, como o aço.

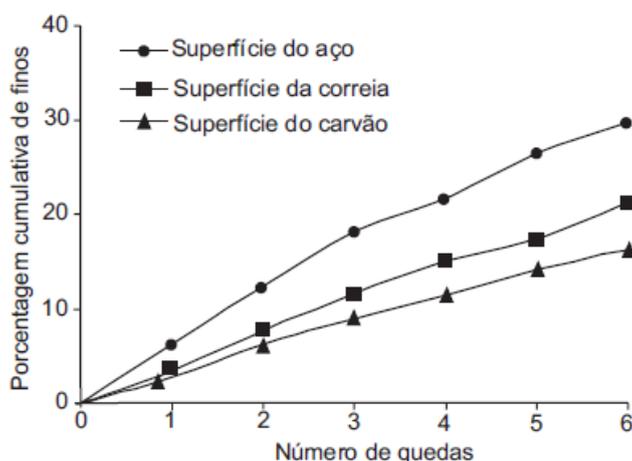


Figura II-21 - Porcentagem acumulada de finos vs. número de quedas de carvão de South Blackwater (modificado de Sahoo *apud* Sahoo *et al.*, 2003 – Reproduzida com autorização da editora).

II.3.2.4 Efeito do tamanho de partícula

Como já citado anteriormente na seção II.2.3.1.2, no trabalho de Tavares e Lima (2006) foi visto que, assim como para outros materiais, existe uma tendência de aumento da resistência de minérios à quebra com a diminuição do tamanho de uma partícula. Sahoo e Roach (2005) demonstraram que a geração de finos como resultado de impactos sucessivos de partículas de carvão mineral australiano a uma altura de 5 m diminuía com a redução do tamanho de partícula.

II.3.2.5 Efeito de estabilização e ordem dos eventos de impacto

Tavares e Carvalho (2008) verificaram que, quando uma população de partículas de minério é submetida a repetidas quedas de baixa energia, há a tendência que as partículas mais frágeis deste grupo sejam rapidamente desintegradas já nos primeiros impactos, enquanto que as partículas remanescentes conseguem resistir a um maior número de eventos de impacto, mesmo com a diminuição de sua resistência como resultado do acúmulo de dano (seção II.2.3.2.1).

Norgate *et al.* (1986) verificaram que a quantidade de finos gerada pela degradação depende da ordem dos eventos de impacto. Foi observado que, para uma dada altura total de queda, a degradação será maior nas primeiras operações de um circuito de manuseio do que nas últimas, devido ao fenômeno seletivo de estabilização anteriormente descrito, pois as partículas mais frágeis irão desaparecendo da referida faixa de tamanho manipulada.

II.3.2.6 Influência da composição mineralógica

O comportamento mecânico de qualquer material está associado à sua microestrutura que, no caso de pelotas de minério de ferro, envolve também a composição mineralógica. Sá *et al.* (2004) verificaram em pelotas para operação de redução direta que a presença de um tipo de hematita, denominada especular, favorece o aumento da resistência à compressão (Figura II-22), quando comparada à goethita, magnetita e martita (hematita porosa). Entretanto esta correlação ainda não é totalmente evidente ao ponto de se tornar unânime, uma vez que a microestrutura de uma pelota de minério de ferro apresenta influência da presença de outros materiais.

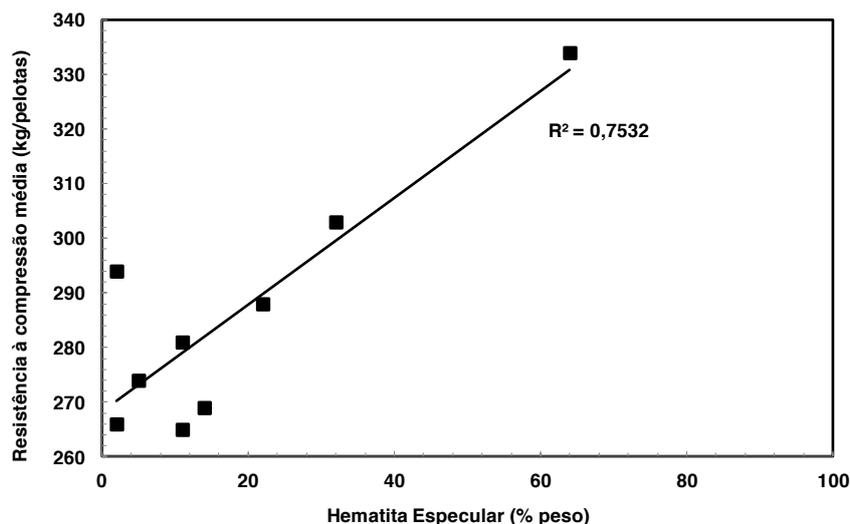


Figura II-22 - Efeito do teor (% em peso) da hematita especular na resistência à compressão média de pelotas (dados obtidos de Sá *et al.*, 2004 *apud* Sá, 2003) .

II.3.2.7 Influência do tempo de envelhecimento

A condição climática é um fator que exerce uma influência significativa na mudança do comportamento mecânico para diversos materiais como pelotas, sobretudo quando estas são armazenadas em pátios de estocagem formando pilhas. De fato, a contribuição na degradação da fragilização de pelotas por envelhecimento é um problema recorrente nas pelotizadoras.

No caso de minérios esse fenômeno também ocorre, pois o efeito do intemperismo pode causar a fragilização das partículas resultando no aumento significativo na geração de finos durante o manuseio. O estudo de Sahoo e Roach (2003) mostra que a porcentagem de finos gerados na simulação de manuseio, que consistiu de testes de repetidos impactos por queda livre de carvão de diferentes tempos de exposição ao intemperismo, aumentou progressivamente durante um ano de exposição, praticamente dobrando em relação à proporção inicial.

II.4 Modelagem da degradação devido ao manuseio e transporte

Diversos modelos matemáticos de degradação de minérios têm sido desenvolvidos baseados em ensaios de impacto em queda livre, tamboramento, entre outros, em escala de laboratório, realizados com o objetivo de fornecer subsídios para a previsão da proporção de finos gerados durante eventos de manuseio na indústria.

A seguir são revisados alguns dos modelos que têm sido propostos e que se encontram publicados na literatura.

II.4.1 Modelo de Degradação de Weedon e Wilson

Weedon e Wilson (2000) propuseram um modelo semi-empírico, o qual se baseia no parâmetro t_{50} , que representa a porcentagem de material fragmentado menor que 1/50 avos do tamanho de partícula original, obtida por ensaios de impacto em um aparato denominado pêndulo duplo de quebra (Figura II-11).

Este aparelho permite a quebra de partículas sob condições controladas de energia de impacto, através de uma altura de queda pré-estabelecida do pêndulo. A energia consumida é calculada a partir de um balanço energético, no qual uma parte da energia potencial aplicada pelo pêndulo de queda é consumida pelo evento de quebra partícula enquanto a outra é consumida pelas oscilações subsequentes do pêndulo de rebote, o qual possui uma aleta, que interrompe o detector de laser a cada período de oscilação.

O modelo pode ser expresso através da relação:

$$F = \sum_j^D \left[\sum_i^N \{w_{ij} \phi_{ij} (m_{ij} + h_{ij})\} \right]$$

Equação II-14

na qual F é a porcentagem total de finos produzida; w_{ij} é a porcentagem de massa de cada fração de tamanho i da alimentação para cada tipo de minério j ; ϕ_{ij} é a porcentagem de massa de cada tipo de minério j para cada fração de tamanho i da alimentação; m_{ij} é a porcentagem de finos de cada fração de tamanho i que pode aparecer a partir de uma determinada altura de queda para cada tipo de minério j ; h_{ij} é a porcentagem de finos produzida pelo manuseio de cada fração de tamanho i para cada tipo de minério j ; N é o número faixas de tamanho da alimentação; e D é o número de tipos de minérios.

A fim de validar o modelo, Weedon e Wilson (2000) simularam, por meio de ensaios de impactos repetidos, diferentes alturas de queda: 1,8; 5 e 10 metros, ensaios realizados anteriormente por Vince *et al.* (1987), para o mesmo minério. A Figura II-23 ilustra resultados típicos de aplicação do modelo. De um modo geral, pôde ser verificado que, apesar do modelo apresentar uma razoável correspondência com os dados experimentais, a produção de finos foi subestimada para a condição de baixa energia de impacto (altura de 1,8 metros), provavelmente devido à baixa sensibilidade do modelo aos efeitos de quebra superficial. Em todas as condições de altura de queda simuladas, o modelo não foi capaz de prever o efeito de estabilização para um elevado número de impactos (seção II.3.2.5).

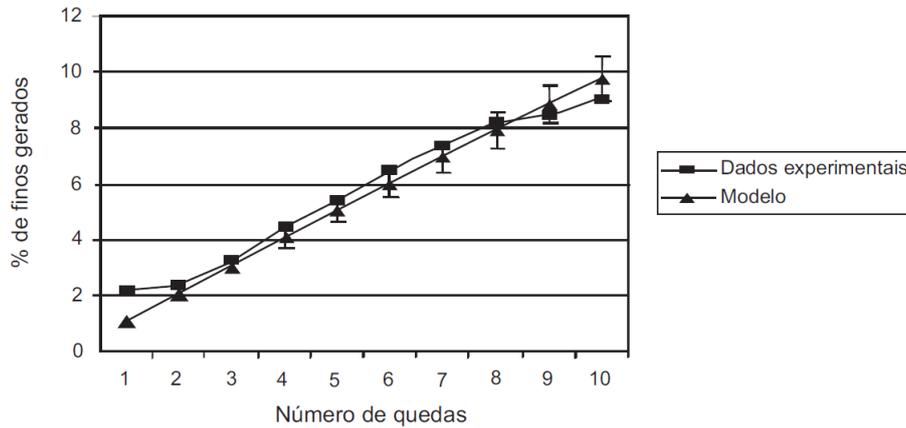


Figura II-23 - Comparação entre o modelo de degradação (Equação II-14) e resultados experimentais de Vince *et al.* (1987) para testes de queda a 1,8 metros de altura (modificado de Weedon e Wilson, 2000 – Reproduzida com autorização da editora).

II.4.2 Modelo de Degradação de Sahoo

O modelo de degradação de Sahoo (2003) propõe uma forma simplificada de prever a proporção total de finos gerados durante as operações de manuseio, baseado num balanço de massa que considera fatores que são característicos da degradação do determinado minério (seção II.3.2). Esses fatores são representados por parâmetros adimensionais obtidos por diversos ensaios realizados em laboratório.

De acordo com o modelo, a proporção total de finos gerados é prevista pela relação:

$$F = \sum_j^D \left[\sum_i^N \left\{ \lambda_{ij} \varphi_{ij} (m_{ij} + h_{ij} + w_{ij} - c_{ij} - s_{ij} - st_{ij}) \right\} \right] \quad \text{Equação II-15}$$

na qual F é a porcentagem total de finos produzida, λ_{ij} é a porcentagem em massa de cada fração de tamanho i da alimentação para cada tipo de minério j , φ_{ij} é a porcentagem em massa de cada tipo de minério j para cada fração de tamanho i da

alimentação, m_{ij} é a porcentagem de finos de cada fração de tamanho i que pode aparecer a partir de uma determinada altura de queda para cada tipo de minério j , h_{ij} é a porcentagem de finos produzida durante o manuseio de cada fração de tamanho i para cada tipo de minério j , w_{ij} é a porcentagem de finos produzida devido ao efeito de envelhecimento para cada fração de tamanho i para cada tipo de minério j , c_{ij} é a porcentagem de finos que é reduzida devido aos efeitos de amortecimento para cada fração de tamanho i para cada tipo de minério j , s_{ij} é a porcentagem de finos que é reduzida devido ao tipo de superfície de impacto para cada fração de tamanho i para cada tipo de minério j , st_{ij} é a porcentagem de finos que é reduzida devido ao efeito de estabilização para cada fração de tamanho i para cada tipo de minério j , N é o número frações de tamanho da alimentação a serem testados, D é o número de tipos de minérios a serem testados.

O modelo obteve sucesso em sua única validação (Figura II-24) na previsão da geração de proporção de finos por degradação. Porém o modelo demanda o ajuste de um grande número de parâmetros, o que o torna de difícil aplicação prática.

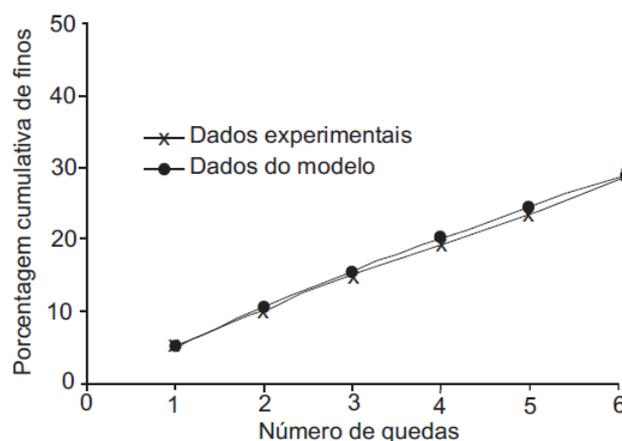


Figura II-24 - Comparação entre dados experimentais e simulados pelo modelo para o carvão de South Blackwater envelhecido por um mês com a presença inicial de 30% de finos (modificado de Sahoo, 2007 *apud* Sahoo *et al.*, 2003 – Reproduzida com autorização da editora).

II.4.3 Modelo de Degradação de Tavares e Carvalho (2011)

O modelo parte do princípio de que nem sempre uma partícula fratura após um evento de queda durante o seu manuseio e transporte. Quando isso ocorre, a partícula sofre um dano, que diminuirá a energia necessária para a sua fratura em um evento seguinte de impacto.

A degradação pode ser interpretada, à luz de uma abordagem mecanicista, como sendo o enfraquecimento progressivo da partícula, mediante os impactos repetidos que podem gerar eventos de quebra volumétrica (fratura) ou apenas dano superficial na forma de uma abrasão ou lascamento (Figura II-10), durante o seu processo de manuseio.

O modelo de degradação de Tavares e Carvalho (2011) é inicialmente baseado na combinação da mecânica do dano contínuo com a teoria do contato de Hertz (seção II.2.3.1.1, Tavares e King, 2002).

O modelo também se baseia na descrição da distribuição de probabilidade de fratura do material original, a qual pode ser medida a partir de experimentos realizados na célula de carga de impacto (Figura II-12) do Laboratório de Tecnologia Mineral (COPPE/UFRJ).

A partir disso, o modelo permite calcular como a distribuição de energias de fratura varia com o número de impactos de energia E_k , resultando na distribuição de energias de fratura dada por

$$F_{n+1}(E) = \left[\frac{F_n[E/(1-D)] - F_n(E_k)}{1 - F_n(E_k)} \right] \quad \text{Equação II-16}$$

sendo

$$D = \left[\frac{2\gamma(1-D)}{(2\gamma - 5D + 5)} \frac{E_k}{E} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad \text{Equação II-17}$$

sendo que $F_n(E_k)$ é a proporção de partículas quebradas no n -ésimo impacto a partir de uma energia específica de impacto E_k . Neste caso, assim como na equação do dano (Equação II-11) D na Equação II-17 não se apresenta numa forma explícita, demandando um método numérico para resolvê-la.

O modelo simula a degradação considerando toda a distribuição de tamanhos do material, por meio de um balanço de massa de cada fração de tamanho individual para cada impacto de partículas pela expressão:

$$w_{i,n+1} = w_{i,n} [1 - F_{i,n}(eE_{k,n})] (1 - \kappa_i) + \sum_{j=1}^i w_{j,n} [F_{j,n}(eE_{k,n}) b_{ij}(eE_{k,n}) + \kappa_j [1 - F_{j,n}(eE_{k,n})] a_{ij}]$$

Equação II-18

sendo $w_{i,n}$ e $w_{i,n+1}$ a fração em peso do material contido na classe de tamanho i antes e depois do n -ésimo impacto, respectivamente, e a fração da energia de impacto absorvida pelas partículas individuais durante o evento de carregamento e $F_{i,n}(eE_k)$ a probabilidade de que uma particular pertencente a classe de tamanho i irá quebrar quando absorver uma energia eE_k de um impacto.

O termo κ_i é a proporção de produtos gerados por abrasão em cada impacto em partículas pertencentes à classe de tamanho i , a qual é considerada independente da altura de queda, sendo estimada a partir do ensaio de tamboramento padrão do JKMRC. Nesse ensaio é considerado que, em 10 minutos de teste, ocorrem 863 impactos por partícula, em média, que resulta na expressão

$$\kappa_i = \kappa = \frac{t_a}{863} \quad \text{Equação II-19}$$

sendo t_a a proporção de partículas finas durante 10 minutos, resultantes do ensaio de abrasão, com tamanho menor que 1/10 do tamanho representativo das partículas alimentadas ao ensaio de abrasão.

$a_{i,j}$ é a função quebra superficial, dada em sua forma cumulativa por (King, 2001)

$$A_{i,j} = A_i = \left(\frac{d_i}{d_A} \right)^\lambda, \text{ para } d_i < d_A \quad \text{Equação II-20}$$

sendo que d_A e λ são parâmetros do material, na qual $a_i = A_i - A_{i-1}$

E_k é a energia específica de impacto, a qual, considerando queda livre, é dada por

$$E_k = g h \quad \text{Equação II-21}$$

sendo g a aceleração da gravidade e h a altura de queda.

O efeito do tipo de superfície de impacto é considerado a partir da fração de energia de impacto e que é absorvida pela partícula na queda. Ela pode ser estimada com base na teoria de contatos de Hertz (Tavares, 2004) que leva em consideração tanto as características da partícula quanto da superfície,

$$e = \left(\frac{k_{\text{superfície}}}{k_{\text{superfície}} + k} \right) \left(\frac{k_{\text{aço}} + k}{k_{\text{aço}}} \right) \quad \text{Equação II-22}$$

na qual $k_{aço}$ é a rigidez do aço (aproximadamente 230 GPa) e k a rigidez da partícula. Esse parâmetro permite a simulação de impactos de partículas contra diferentes tipos de superfícies. No caso de um leito de partículas do mesmo material, a Equação II-22 torna-se: $e = 0,5(k_{aço} + k)/k_{aço}$.

A função quebra $b_{i,j}$ é calculada a partir do parâmetro t_{10} , o qual é calculado pela relação (Tavares, 2009)

$$t_{10i} = A \left[1 - \exp \left(- \frac{b' e E_{k,n}}{E_{50bi}} \right) \right] \quad \text{Equação II-23}$$

sendo $E_{k,n}$ a energia de impacto e E_{50bi} a energia de fratura mediana das partículas que quebraram, a qual é dada por (Tavares, 2009)

$$E_{50bi} = F_{i,n}^{-1} \left[\frac{1}{2} F_{i,n}(E) \right] \quad \text{Equação II-24}$$

A função quebra total é, então, calculada com base na interpolação dos dados de t_{10} versus os valores dos $t_{n,s}$ usando as funções beta incompleta.

A distribuição inicial de energias de fratura de partícula pode ser normalmente bem descrita usando a distribuição log-normal (Tavares and King, 1998), dada pela Equação II-7.

Após cada impacto, a distribuição de energias de fratura das partículas pertencentes à classe de tamanho i é transformada pela expressão

$$F_{i,n+1}(E) = \frac{\left[F_{i,n+1}^*(E) w_{i,n} (1 - F_{i,n}(E_{k,n})) (1 - \kappa_i) + F_{i,0}(E) \sum_{j=1}^i w_{j,n} [F_{j,n}(E_{k,n}) b_{ij} + (1 - F_{j,n}(E_{k,n})) \kappa_j a_{ij}] \right]}{w_{i,n+1}}$$

Equação II-25

na qual a distribuição de energias de fratura de partícula das partículas que foram danificadas é dada reescrevendo as Equações II-16 e II-17,

$$F_{i,n+1}^*(E) = \left[\frac{F_{i,n}[E/(1-D)] - F_{i,n}(eE_k)}{1 - F_{i,n}(eE_k)} \right] \quad \text{Equação II-26}$$

$$D = \left[\frac{2\gamma(1-D)}{(2\gamma - 5D + 5)} \frac{eE_k}{E} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad \text{Equação II-27}$$

Em sua validação para minérios, o modelo demonstrou ser capaz de descrever, ainda que de forma qualitativa, diversos efeitos observados na literatura e descritos na seção II.3.2. Esse modelo, entretanto, ainda não havia sido aplicado ou testado para pelotas de minérios de ferro.

Uma comparação entre os resultados medidos e calculados pelo modelo é apresentada na Figura II-25, que mostra a boa aderência do modelo. Adicionalmente, a Figura II-26 mostra previsões para diferentes superfícies de impacto usando o modelo proposto.

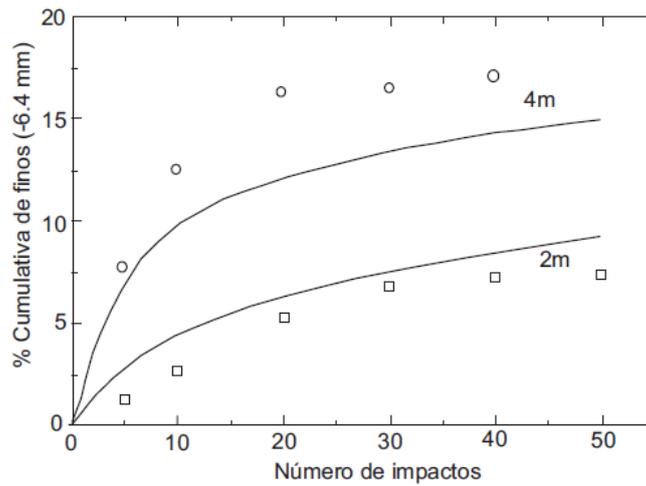


Figura II-25 – Resultados experimentais (pontos) e simulados (linhas) apresentando a proporção de finos (-6.4mm) após impactos repetidos para duas diferentes alturas de queda de minério de ferro contido no intervalo de 125-63mm contra uma superfície de aço (Tavares e Carvalho, 2008).

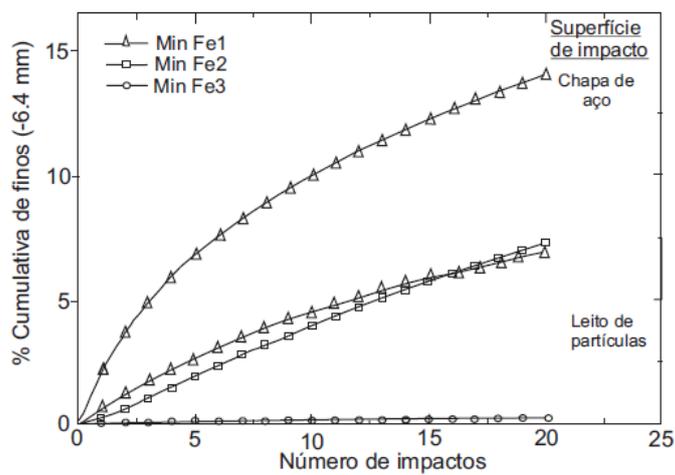


Figura II-26 – Simulações apresentando a proporção de finos (-6.4mm) após impactos repetidos de diferentes minérios a uma altura de queda de 2 metros para diferentes superfícies (Tavares e Carvalho, 2008).

III. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS USANDO O MODELO DE TAVARES E CARVALHO (2011)

III.1 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho é dividida em duas partes. A primeira trata da caracterização física das pelotas, enquanto a segunda trata da metodologia de calibração do modelo de degradação de minérios de Tavares e Carvalho (2011), obtendo dados de quebra de pelotas individuais, susceptibilidade à quebra por impactos repetidos e de abrasão para posterior simulação e comparação com o resultado experimental de um ensaio de manuseio conduzido em laboratório.

III.1.1 Amostra de pelota queimada

Uma amostra de pelota referente a um mesmo lote de carregamento e produção foi enviada ao laboratório em onze tambores distintos por uma empresa produtora de pelotas, sendo 10 tambores referentes a amostragens bi-horárias da produção (AM1 a AM10) e uma representativa de todo um carregamento (AM11).

III.1.2 Caracterização física das pelotas queimadas

A maior parte da caracterização física foi realizada de acordo com os padrões de avaliação de qualidade ISO (Tabela II-1) pela própria empresa fornecedora das amostras de pelota. Já ensaios de medida de massa específica por picnometria foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia Mineral LTM/COPPE/UFRJ.

III.1.2.1 **Medida de distribuição granulométrica**

Uma das formas de se avaliar a qualidade física das pelotas é determinação da distribuição de tamanhos em que ela se encontra. Para isso foi utilizado o procedimento rotineiro de análise da distribuição granulométrica por peneiramento mecânico a seco, seguindo a norma ISO 4701, com a seguinte série de peneiras: 19,0; 16,0; 14,0; 12,5; 9,0; 8,0 e 6,3 milímetros.

III.1.2.2 **Ensaio de tamboramento de pelotas (ISO 3271)**

O ensaio de tamboramento é um método bastante utilizado para a avaliação da resistência à fragmentação das pelotas queimadas. Este ensaio simula, de maneira simultânea, os mecanismos de abrasão e impacto, que são os dominantes nas operações de manuseio e transporte.

O experimento consiste na alimentação de amostra de pelota seca com aproximadamente 15 kg em um tambor com diâmetro interno de 1000 milímetros e comprimento de 500 milímetros, contendo duas haletas internas de dimensões 500 x 50 x 5 milímetros. Em seguida o tambor é acionado a uma frequência de 25 rotações por minuto até que complete um total de 200 revoluções.

Ao final do ensaio, é realizada uma análise granulométrica manual de acordo com o procedimento descrito na seção III.1.2.1, a fim de se obter o índice de tamboramento, que é a porcentagem de material maior que 6,3 milímetros, e o índice de abrasão, que é a porcentagem de material menor que 0,5 milímetros.

III.1.2.3 **Ensaio de resistência à compressão individual de pelotas (ISO 4700)**

O ensaio de resistência à compressão individual de pelotas é um método utilizado para avaliar a resistência das pelotas quando estas são submetidas à ação mecânica de cargas e impacto por quedas sucessivas provenientes das operações de empilhamento, manuseio e transporte.

O equipamento consiste numa prensa hidráulica, instrumentada com uma célula de carga. Cada experimento utiliza uma amostra com mais de 60 pelotas bem formadas, contidas nas faixas entre 16 e 12,5 milímetros e 12,5 e 10 milímetros, que são armazenadas num silo que alimenta a prensa. Cada pelota é prensada individualmente e um computador registra as curvas de força versus deslocamento, com os valores de carga de ruptura. Ao final, os dados de cada lote ensaiado são tratados de maneira a expressar o resultado estatisticamente por meio de média e desvio padrão.

III.1.2.4 **Medida de massa específica por picnometria e por densidade hidrostática (LTM/COPPE/UFRJ)**

Como procedimentos internos do Laboratório de Tecnologia Mineral (COPPE/UFRJ), foram realizados duas medidas de massa específica da amostra representativa de pelotas, AM11.

A primeira consistiu na aferição da massa específica pelo método de picnometria em água, na qual a massa específica do sólido é obtida a partir do volume de um líquido padrão (água) deslocado quando o picnômetro (Figura III-1) possui o sólido em estudo na forma de pó e seu volume ocupa o volume do líquido que é expulso.



**Figura III-1 – Picnômetro preenchido com uma amostra de material particulado
(LTM/COPPE/UFRJ)**

Para este ensaio foram utilizados fragmentos de pelotas contidos na faixa de 2,83 x 2,36 mm, por serem de tamanho adequado às dimensões do picnômetro disponível.

O cálculo para se obter a massa específica do sólido é realizado pela relação

$$\rho_s = \frac{M2 - M1}{(M4 - M1) - (M3 - M2)} \times \rho_f \quad \text{Equação III-1}$$

na qual $M1$ é o peso do picnômetro vazio e tampado, $M2$ é o peso do picnômetro com amostra do material, $M3$ é o peso do picnômetro com o material e o líquido padrão, $M4$ é o peso do picnômetro completamente cheio com o líquido padrão e ρ_f é a densidade do líquido padrão, que no caso foi água ($\rho_{\text{água}} = 1,0 \text{ g/cm}^3$).

A segunda medida foi realizada utilizando o método da densidade hidrostática. Esta é uma técnica alternativa da picnometria, na qual se compara a massa seca de cada partícula do material com a massa imersa no líquido padrão (água). No caso deste experimento foram utilizadas pelotas bem formadas contidas na faixa de 12,5 x 9,0 mm.

O valor da massa específica do material foi obtido através da média dos valores individuais obtidos para cada pelota, calculados pela relação

$$\rho = \frac{m_{\text{sec}}}{(m_{\text{sec}} - m_{\text{sub}})} \times \rho_f$$

Equação III-2

na qual m_{sec} é a massa da pelota seca, m_{sub} é a massa da pelota submersa e ρ_f é a densidade do líquido padrão, água ($\rho_{\text{água}} = 1,0 \text{ g/cm}^3$).

III.1.3 Caracterização da fragmentação das pelotas

Seguindo a metodologia do modelo de degradação de minérios de Tavares e Carvalho (2010), a amostra de pelota representativa de todo o carregamento, AM11, foi preparada no Laboratório de Tecnologia Mineral (COPPE/UFRJ) para a realização dos seguintes ensaios de caracterização:

- Ensaio de fragmentação por queda de peso (*drop weight test*);
- Ensaio de fratura de partículas por impactos repetidos;
- Ensaio de medida de energia de fratura (célula de carga de impacto);
- Ensaio de fragmentação por abrasão adaptado do padrão do JKMRC.

A preparação desta amostra consistiu de peneiramento manual nas faixas de 16 x 14 mm, 14 x 12,5 mm, 12,5 x 9 mm e 9 x 8 mm, para os diferentes ensaios.

III.1.3.1 Ensaio de fragmentação por queda de peso

Ensaios de fragmentação foram realizados com o objetivo de fornecer resultados que mostrem a relação entre a energia de impacto e a intensidade da fragmentação resultante. Esses ensaios foram conduzidos a partir de uma adaptação do padrão empregado pelo *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre* (JKMRC) na

caracterização de quebra de partículas por impacto (Napier-Munn *et al.*, 1996). Uma das diferenças em relação a esse é o uso da Célula de Carga de Impacto COPPE ao invés do *Drop Weight Tester* (DWT), usado no JKMRC. Contudo, a equivalência entre esses foi estabelecida previamente por meio de ensaios comparativos realizados com um minério de cobre (Tavares, 2003).

O procedimento adotado nos ensaios consiste das seguintes etapas:

- Separação em lotes, cada um dos quais contendo 50 ou 100 partículas para diferentes faixas de tamanhos, conforme mostra a Tabela III-1.
- Determinação do peso médio de cada partícula.

Tabela III-1 – Condições experimentais utilizadas nos ensaios de fragmentação para a amostra de pelota AM11

Intervalo de Tamanho (mm)	Energia Específica de impacto (J/kg)	Número de partículas por lote	Massa do Impactor (kg)	Célula de Carga (mm)
16 x 14	9000	50	15,5	100
	3600	50	3,4	100
	900	50	3,4	100
	360	100	1,0	63
	180	100	1,0	63
	90	100	1,0	63
14 x 12,5	9000	50	15,5	100
	3600	50	3,4	100
	900	50	1,0	63
	360	100	1,0	63
	180	100	1,0	63
	90	100	1,0	63
12,5 x 9	9000	50	3,4	100
	3600	50	3,4	100
	900	50	1,0	63
	360	100	1,0	63
	180	100	0,6	63
	90	100	0,5	63
9 x 8	9000	50	3,4	100
	3600	50	1,0	63
	900	50	1,0	63
	360	100	0,5	63
	180	100	0,5	63

- O cálculo da altura de queda é dado por meio da equação:

$$h_i = h_f + \frac{\bar{m}E_{is}}{0,0272Md}$$

Equação III-3

na qual h_i é a altura de queda (em cm) a partir do qual o peso é solto, h_f é a altura final de repouso do peso (em cm e estimada a partir de resultados anteriores), \bar{m} a massa média das partículas ensaiadas (em g), Md a massa do peso a ser solto (em kg) e E_{is} é a energia específica de impacto aplicada (em J/kg). Presumindo que a restituição do peso após o impacto pode ser ignorada, a energia específica de impacto aplicada é considerada como sendo equivalente à energia específica de cominuição (E_{cs}).

- Quebra de partículas, uma a uma, na respectiva Célula de Carga de Impacto (Tavares e King, 1998) (Figura III-2 e Figura III-3). Coleta dos fragmentos e peneiramento a seco no peneirador Ro-Tap[®] usando peneiras que seguem uma série com razão igual à raiz quadrada de dois.
- Normalização da distribuição granulométrica dos produtos de cada ensaio em relação ao tamanho médio das partículas originais. Cálculo do t_{10} para cada energia específica de impacto a partir de interpolação linear da distribuição granulométrica do material fragmentado (Figura III-4). Estimação dos parâmetros A e b' por meio da Equação II-23.
- Determinação da relação entre t_{10} e os diversos t_n s, a fim de determinar o padrão de fragmentação das pelotas.

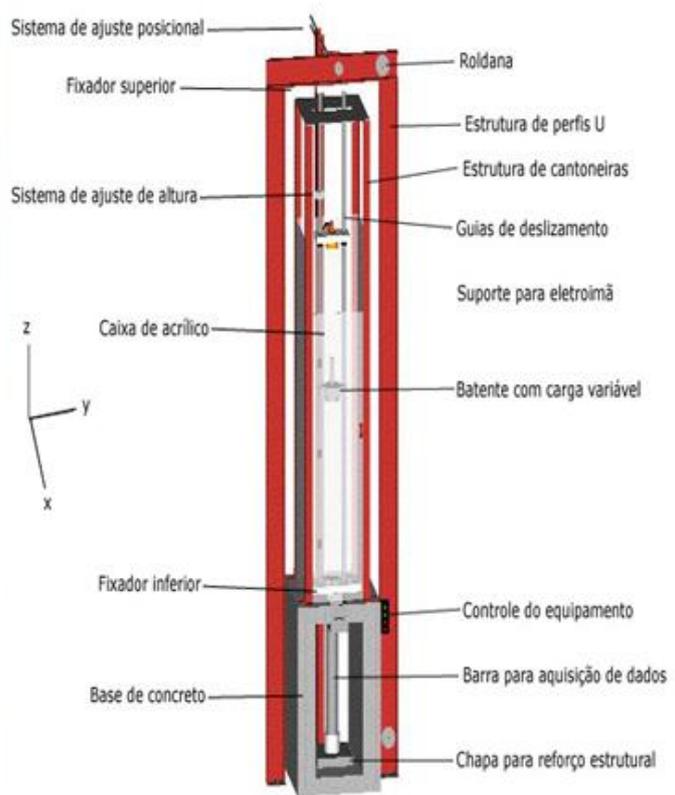


Figura III-2 – Célula de carga de impacto de 100 mm (LTM/COPPE).

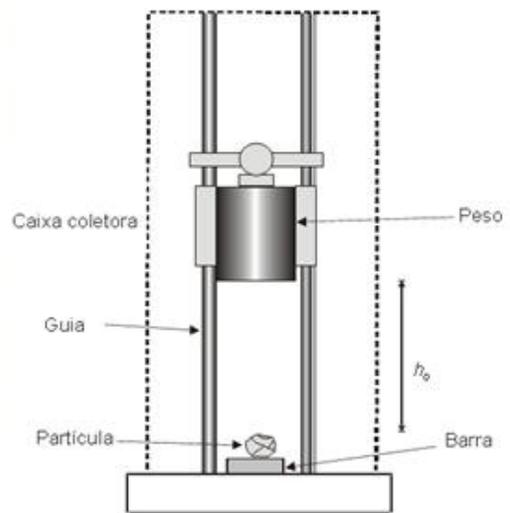


Figura III-3 – Célula de carga de impacto de 63 mm (LTM/COPPE).

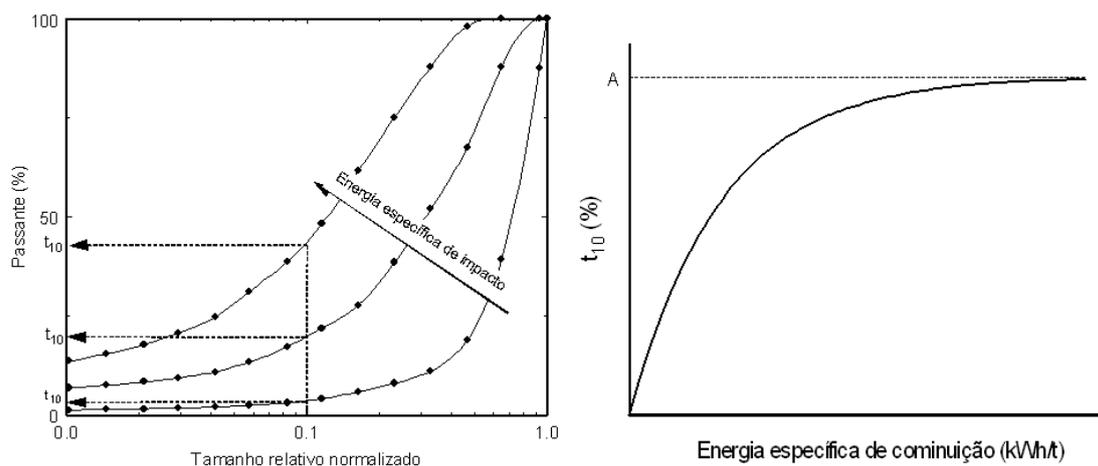


Figura III-4 – Cálculo do parâmetro t_{10} a partir de análises granulométricas de produtos de ensaios de fragmentação e sua relação com a energia específica de impacto – também chamada de energia específica de cominuição (Ecs).

III.1.3.2 Ensaio de fratura por impactos repetidos

Com o objetivo de caracterizar a resistência das pelotas sob a ação de sucessivos eventos de impacto de baixa magnitude que ocorrem durante o manuseio e transporte, foram realizados ensaios de fratura por impactos repetidos seguindo uma metodologia similar à adotada no Laboratório de Tecnologia Mineral (COPPE/UFRJ).

Os ensaios de fratura por impactos repetidos foram realizados conjuntamente aos ensaios de fragmentação por queda de peso (seção III.1.3.1) de baixa energia de impacto (360, 180 e 90 J/kg), de acordo com a Tabela III-1.

As pelotas que não sofressem fragmentação volumétrica, ou seja, pelo critério adotado, perda de, pelo menos, 10% de sua massa após o primeiro impacto, eram separadas e submetidas a repetidos impactos sob as mesmas condições de energia até que se caracterizasse a sua quebra, sendo o ensaio interrompido após 40 impactos (Figura III-5).

Como resultado deste ensaio se obtém a proporção quebrada (porcentagem) em relação ao número de eventos de impacto, a partir da qual foi calculado o parâmetro γ

(Equação II-11), o qual caracteriza a susceptibilidade à quebra do modelo de Tavares e King (2002).

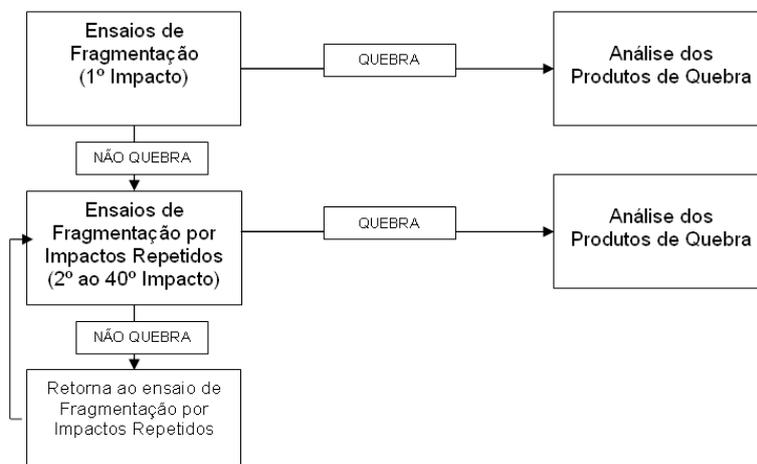


Figura III-5 – Fluxograma dos ensaios de fratura por impactos repetidos combinados aos ensaios de fragmentação por queda de peso.

III.1.3.3 Ensaio de energia de fratura por impacto

Ensaio de quebra de pelotas individuais foram conduzidos na célula de carga de impacto (Figura II-12) com o objetivo de medir a energia necessária para fraturar a pelota seguindo a metodologia anteriormente descrita na seção II.2.3.1.1

Foram separados diferentes lotes da amostra AM 11, se diferenciando pela faixa de tamanho em cada, contendo cada um pelo menos 50 pelotas. As faixas de tamanho preparadas para este ensaio foram 16 x 14; 14 x 12,5; 12,5 x 9,0; e 9,0 x 8,0 mm, porém somente as duas últimas faixas foram ensaiadas, devido a problemas técnicos no equipamento. Assim, para as amostras contidas nas duas faixas mais grossas, cujas distribuições de energias de fratura não puderam ser medidas na célula de carga de impacto, os resultados foram calculados indiretamente a partir de dados de ensaios de impactos repetidos (seção III.1.3.2).

Todos os ensaios foram conduzidos utilizando a célula de carga de impacto de 19 mm (CCI) (Figura III-6).

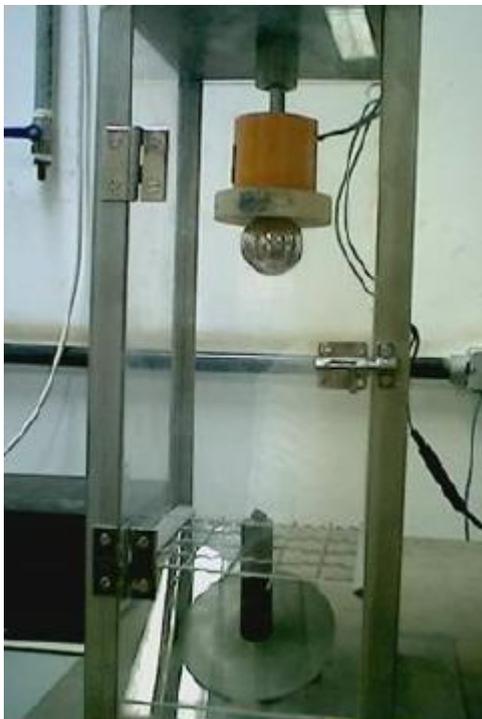


Figura III-6 – Célula de carga de impacto de 19 mm (LTM/COPPE/UFRJ).

III.1.3.4 Ensaios de fragmentação por abrasão (tamboramento)

Sabe-se que o mecanismo de quebra por abrasão é muito importante para o entendimento do comportamento de uma pelota durante o processo de degradação, se apresentando mais evidente para impactos de baixa magnitude. O ensaio de abrasão permite a modelagem de quebra por abrasão (“*surface attrition*”).

Na modelagem da quebra por abrasão no modelo de Tavares e Carvalho (2011), a metodologia proposta usa como ponto de partida o procedimento adotado pelo *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre* (Napier-Munn *et al.*, 1996). Porém o procedimento considera o ensaio para partículas de minério na faixa de 53 x 37,5 mm, o que difere bastante do intervalo de tamanhos típico das pelotas. Assim, foi feita uma

adaptação no ensaio, restringindo-se a faixa de tamanhos para as pelotas na qual se encontrasse uma maior proporção das mesmas, tendo sido selecionada a faixa de 12,5 x 9,0 mm.

A realização do ensaio compreendeu os seguintes passos:

- 1) Preparação de amostra de 3 kg (+/- 2%) do material na faixa 12,5 x 9,0 mm por peneiramento a seco.
- 2) Uso do moinho tubular de 30 cm x 30 cm, com quatro barras de elevação medindo 6,6 mm de altura e 6,6 mm de largura, disponível no LTM (Figura III-7).
- 3) Colocação de amostra de 3 kg do material no moinho e tamboramento por diferentes períodos de tempo (2, 4, 10 e 30 minutos), na ausência de corpos moedores, a 67% da velocidade crítica (53 rpm).
- 4) Retirada do produto do moinho e peneiramento (a seco) nas peneiras com aberturas de 9,0; 6,7; 5,0; 3,35; 2,36; 1,70; 1,18; 0,850; 0,600; 0,425; 0,212 e 0,106 mm, em um peneirador Ro-Tap[®], a cada um dos tempos de tamboramento. Após o peneiramento de cada amostra foi retirado o material fino (< 0,106 mm) e todo o material restante era retornado para o ensaio referente ao tempo seguinte.
- 5) Cálculo da taxa de geração de finos por impacto, a partir da Equação II-19.



Figura III-7 – Moinho tubular de 30 cm x 30 cm, usado nos ensaios de abrasão adaptados do padrão JKMRC (LTM/COPPE)

III.1.4 Ensaio de simulação de manuseio em laboratório

Com o objetivo de demonstrar a aplicação do modelo de degradação, foi realizado um experimento em escala de laboratório simulando uma queda, como aquela que ocorre em um chute de transferência durante o transporte de pelotas. Para isso, foi montado no LTM/COPPE um sistema de transferência guiada (Figura III-8 e Figura III-9) através do acoplamento de duas tubulações de PVC, totalizando uma altura de, aproximadamente, 8,4 metros. O diâmetro do tubo de guia (200 mm), ou tubo de transferência, foi suficientemente grande para garantir um nível limitado de interação entre o mesmo e as partículas durante a queda, enquanto o diâmetro do tubo de confinamento (400 mm) foi escolhido de maneira a garantir que uma parcela significativa dos impactos ocorresse de umas partículas sobre outras que já haviam colidido contra a superfície de aço.

A partir deste experimento foi possível avaliar como as distribuições de tamanhos, bem como a população de pelotas e cacos variam a cada ciclo de impacto com a mesma energia.

Tendo em vista a quantidade limitada da amostra AM 11 disponível, bem como o fato dela já ter sido manipulada anteriormente para a preparação dos ensaios de caracterização da fragmentação (seção III.1.3), neste ensaio foi utilizada uma amostra preparada a partir da composição de frações representativas de 20 kg de cada uma das 10 amostras bi-horárias, com o objetivo de se constituir uma segunda amostra “representativa” de todo o carregamento, que fosse comparável à AM11, para ser fosse utilizada tanto para este ensaio de manuseio, como para as possíveis modificações do modelo matemático de degradação. Esta “nova” amostra representativa do carregamento composta em laboratório foi denominada de AM MIX, tendo sido acondicionada em um novo tambor, contendo aproximadamente 200 kg de pelotas. É importante ressaltar que esta amostra foi considerada representativa, pois foi adotada uma composição sistemática da mesma para garantir uma representatividade que se assemelhasse à amostra AM 11, já representativa de todo o carregamento. Isto é ilustrado pela comparação entre os resultados de caracterização física que são apresentados mais adiante na seção III.2.1.

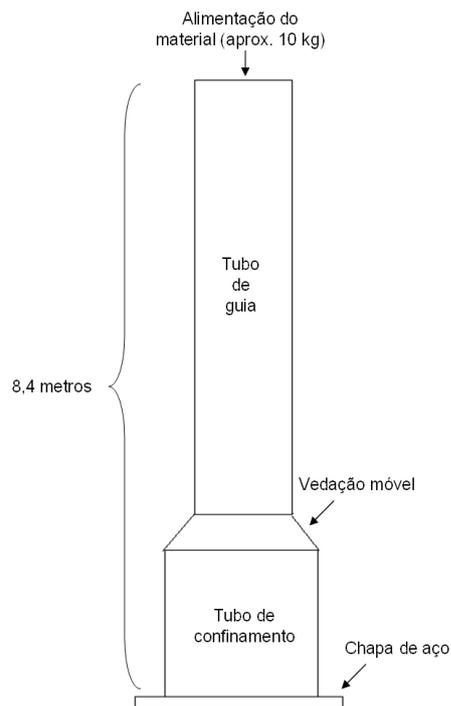


Figura III-8 – Diagrama esquemático do sistema de transferência montado no LTM (COPPE/UFRJ) para simulação de uma etapa de manuseio.



Figura III-9 – Fotos ilustrativas do sistema de queda livre montado no LTM (COPPE/UFRJ) para simulação de uma etapa de manuseio.

A amostra preparada foi submetida a uma sequencia de 20 impactos sucessivos por queda livre contra uma chapa de aço espessa.

A metodologia adotada para o ensaio consistiu nas seguintes etapas:

1. Preparação de uma amostra representativa de aproximadamente 10 kg da amostra AM MIX previamente separada;
2. Peneiramento manual inicial de toda a amostra de 10 kg, contabilizando a quantidade cacos e pelotas, nas faixas de tamanho: 19,0; 16,0; 13,2; 12,5; 9,5; 7,93 e 6,3 mm;
3. Despejo de todo o material maior que 6,3 mm através do “tubo de guia” (tubo de transferência) em queda livre, sendo contido no “tubo de confinamento” após o impacto contra a chapa de aço localizada na base do sistema de transferência (Figura III-8), configurando um evento de impacto;
4. Coleta de todo material depositado no “tubo de confinamento”;
5. Retirada de todo material menor que 6,3 mm por meio de peneiramento manual;
6. Realização de peneiramento manual de todo o material, contabilizando a quantidade cacos e pelotas, nas faixas de tamanho: 19,0; 16,0; 13,2; 12,5; 9,5; 7,93 e 6,3 mm; e peneiramento no Ro-Tap[®] do material menor que 6,3 mm nas faixas de tamanho: 4,75; 3,35; 2,36; 1,70; 1,18; 0,85; 0,60; 0,425; 0,212 e 0,106 mm;
7. Realização das etapas 3 a 5 até o 5º impacto;
8. Realização das etapas 4 a 6;
9. Realização das etapas 3 a 5 até o 10º impacto;
10. Realização das etapas 4 a 6;

11. Realização das etapas 3 a 5 até o 15º impacto;
12. Realização das etapas 4 a 6;
13. Realização das etapas 3 a 5 até o 20º impacto;
14. Realização das etapas 4 a 6.

III.2 Resultados e discussão

III.2.1 Caracterização física das pelotas

Os resultados de caracterização física da amostra AM 11, representativa de todo o carregamento, bem como das amostras bi-horárias, expresso como uma média, pelo fato de esta ser manipulada como uma composição de frações iguais das dez amostras, se encontram sintetizados a seguir na forma de tabelas.

A Tabela III-2 apresenta os valores de massa específica medidos para a amostra representativa de pelota AM 11. A menor massa específica obtida pelo uso da técnica de pesagem hidrostática está associada à maior granulometria das partículas ensaiadas por essa técnica e a maior probabilidade da existência de porosidade não-conectada, a qual resultaria em massa específica aparente mais baixa.

Tabela III-2 – Valores de massa específica para a amostra de pelota AM11

Técnica	Massa Específica (g/cm ³)
Picnometria	4,39 ± 0,01
Densidade Hidrostática	4,13 ± 0,13

A Tabela III-3 apresenta os resultados das análises granulométricas tanto da média das amostras bi-horárias, como da amostra representativa referente ao carregamento de pelota.

Tabela III-3 – Distribuições granulométricas da amostra representativa do carregamento, AM 11 e da média das amostras bi-horárias, AM MIX

Amostra	AM11	AM MIX
Tamanho (mm)	Passante (%)	
19,0	99,3	99,5 ± 0,4
16,0	93,3	92,2 ± 1,4
14,0	87,3	84,1 ± 1,3
12,5	58,0	55,2 ± 9,6
9,0	6,6	5,8 ± 8,9
8,0	3,5	3,5 ± 0,7
6,3	1,7	2,1 ± 0,6

Para os resultados do ensaio de tamboramento de pelotas (III.1.2.2), a Tabela III-4 apresenta os resultados dos índices da amostra AM 11, bem como da amostra composta AM MIX.

Tabela III-4 – Resultados com os índices do ensaio de tamboramento de pelotas (ISO 3271) para as amostras AM 11 e AM MIX

Amostra	AM 11	AM MIX
Índice de Tamboramento (%)	93,2	92,2 ± 1,2
Índice de Abrasão (%)	5,8	6,7 ± 1,0

Para os resultados do ensaio de resistência à compressão média de pelotas (III.1.2.3), a Tabela III-5 apresenta os resultados para pelotas contidas em duas faixas de tamanhos para a amostra AM 11, bem como para a amostra composta AM MIX.

Tabela III-5 – Valores médios de carga de ruptura do ensaio de resistência à compressão de pelotas (ISO 4700) para as amostras AM 11 e AM MIX

Faixa de tamanhos	Média (kgf/pelota)	
	AM 11	AM MIX
16 x 12,5 mm	291,0	280,1 ± 13,8
12,5 x 10 mm	260,0	245,7 ± 21,7

III.2.2 Caracterização da fragmentação volumétrica

A seguir são apresentados resultados selecionados da caracterização da fragmentação volumétrica da amostra representativa de pelota, AM 11, seguindo a metodologia do modelo de Tavares e Carvalho (2011) para minério de ferro.

Como resultado dos ensaios de energia de fratura (seção III.1.3.3) foi possível determinar a distribuição de energias de fratura, bem como modelar (seção II.2.3.1.1) e prever as distribuições de energias de fratura dos diferentes tamanhos de pelota (Figura III-10 e Tabela III-6). A partir desses resultados pode-se ainda analisar por meio da Figura III-11 o efeito de escala, (seção II.2.3.1.2) a partir dos parâmetros obtidos pelo ajuste dos dados experimentais ao modelo.

Tabela III-6 – Resultados de quebra individual de partículas por impacto na célula de carga no ensaio de energia de fratura (seção III.1.3.3).

Tamanho de pelota (mm)	Energia mediana de fratura – E_{50} (J/kg)	Resistência mediana de partícula – σ_{50} (MPa)
12,5 x 9,0	113,56 ± 0,39*	25,19 ± 0,31*
9,0 x 8,0	183,63 ± 0,43*	28,15 ± 0,38*

* Desvios da distribuição log-normal.

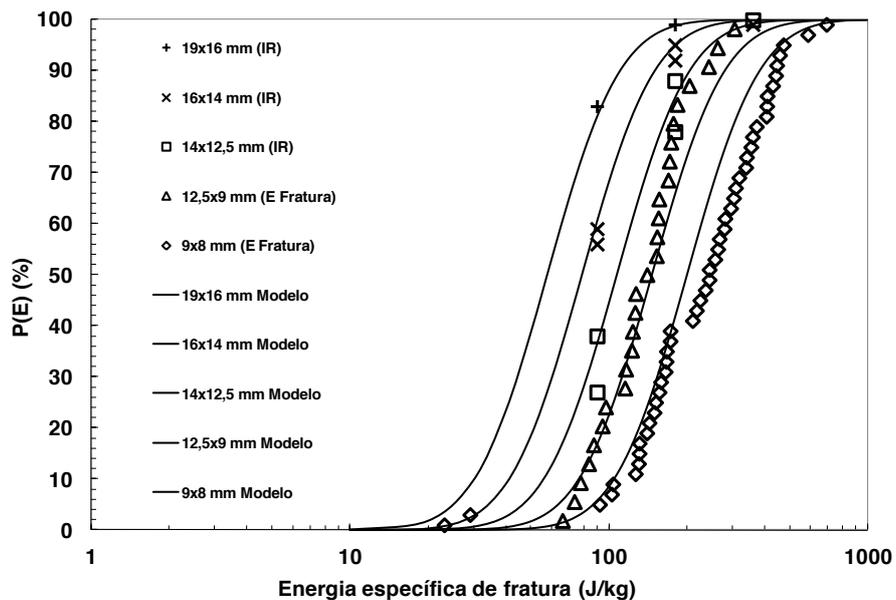


Figura III-10 – Resultados de ensaios de impactos repetidos (IR) e de energia de fratura (E Fratura) de pelotas da amostra AM11 (pontos) com o modelo (Equação II-7) da distribuição log-normal (linhas).

Tabela III-7 – Parâmetros do modelo de efeito de escala (Equação II-8)

Amostra	Parâmetros		
	E_{∞} (J/kg)	d_0 (mm)	ϕ
AM 11	1,273	148,7	1,821

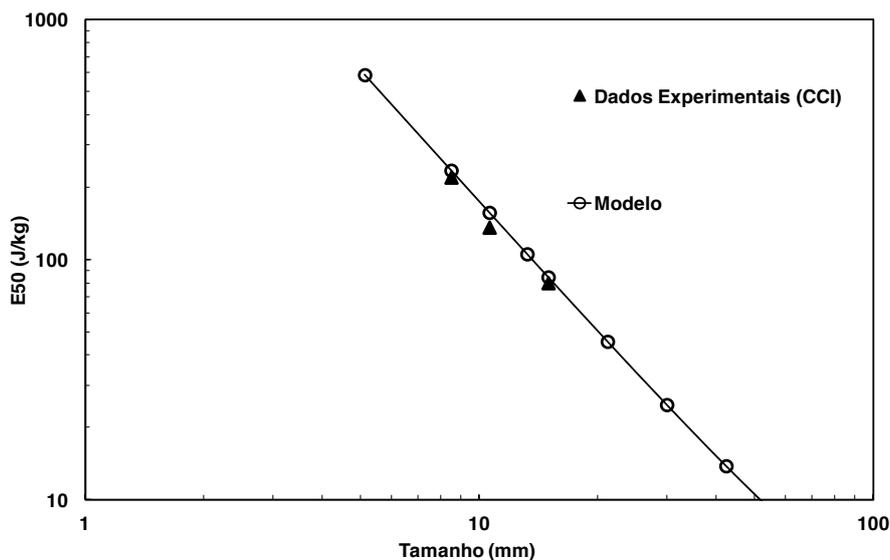


Figura III-11 – Resultados de variação da energia mediana de fratura com o tamanho de partícula para pelotas de minério de ferro, comparados com o modelo do efeito de escala (Equação II-8).

Seguindo a metodologia dos ensaios de fragmentação, com os resultados (Figura III-12, Figura III-13, Figura III-14 e Figura III-15) de diferentes faixas de tamanho de pelotas, foi possível obter os parâmetros da modelagem da quebra volumétrica das pelotas, A e b' da Equação II-23, como apresenta a Tabela III-8, bem como modelar as curvas de distribuição granulométrica da Figura III-16, a partir dos valores dos parâmetros da função de distribuição de quebra mostrados na Tabela III-9.

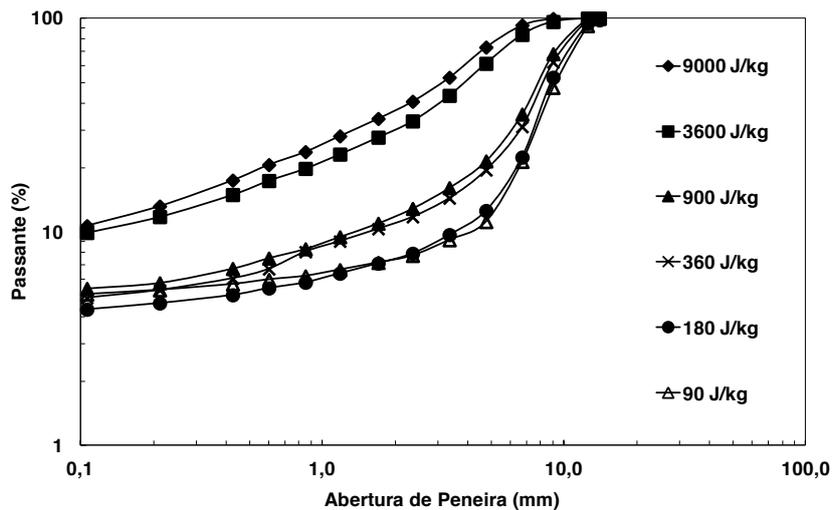


Figura III-12 - Distribuições granulométricas da amostra de pelota AM 11 para o intervalo de tamanho 16 x 14 mm, em função da energia específica de impacto.

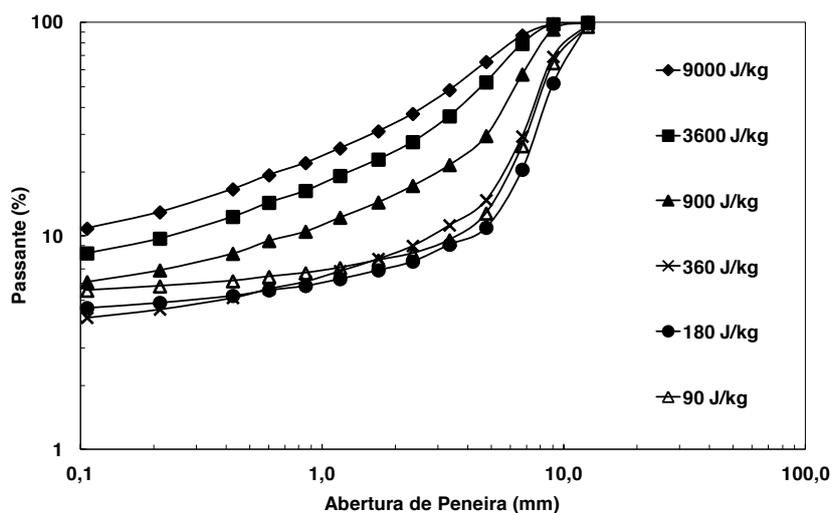


Figura III-13 - Distribuições granulométricas da amostra de pelota AM 11 para o intervalo de tamanho 14 x 12,5 mm, em função da energia específica de impacto.

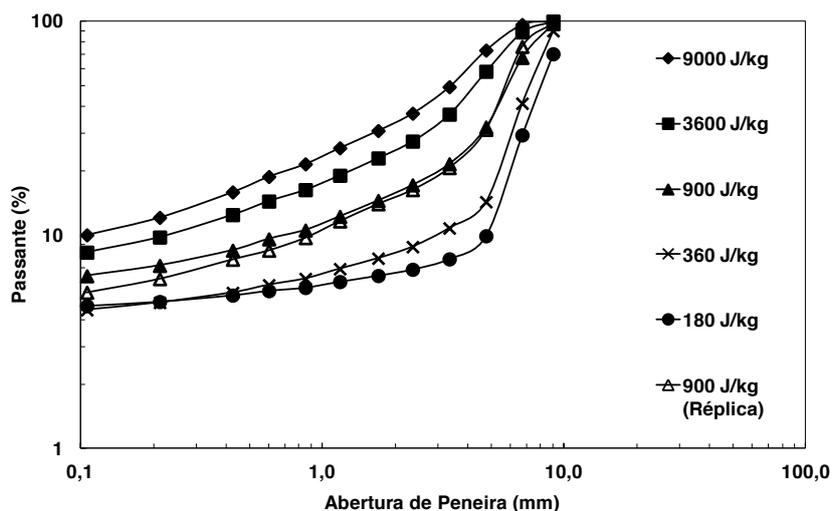


Figura III-14 - Distribuições granulométricas da amostra de pelota AM 11 para o intervalo de tamanho 12,5 x 9,0 mm, em função da energia específica de impacto.

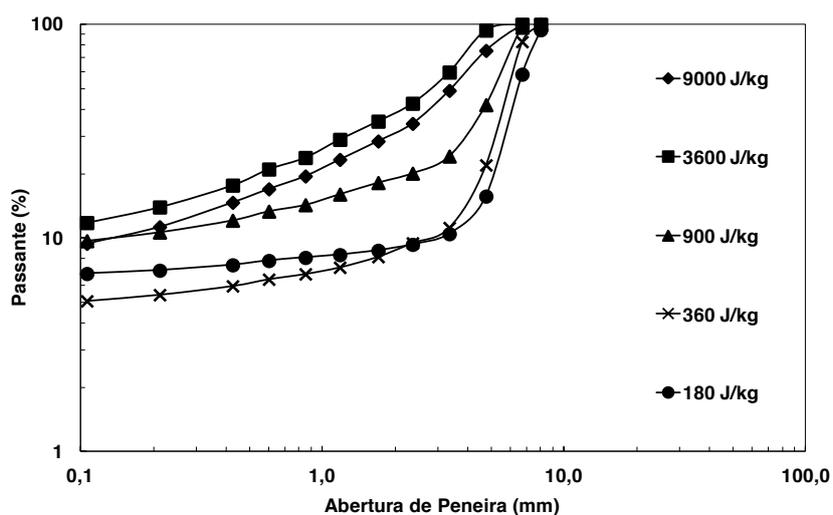


Figura III-15 - Distribuições granulométricas da amostra de pelota AM 11 para o intervalo de tamanho 9,0 x 8,0 mm, em função da energia específica de impacto.

Tabela III-8 – Parâmetros do modelo de quebra volumétrica da amostra de pelota AM11

Amostra	Parâmetros	
	A (%)	b'
AM 11	19,9	0,290

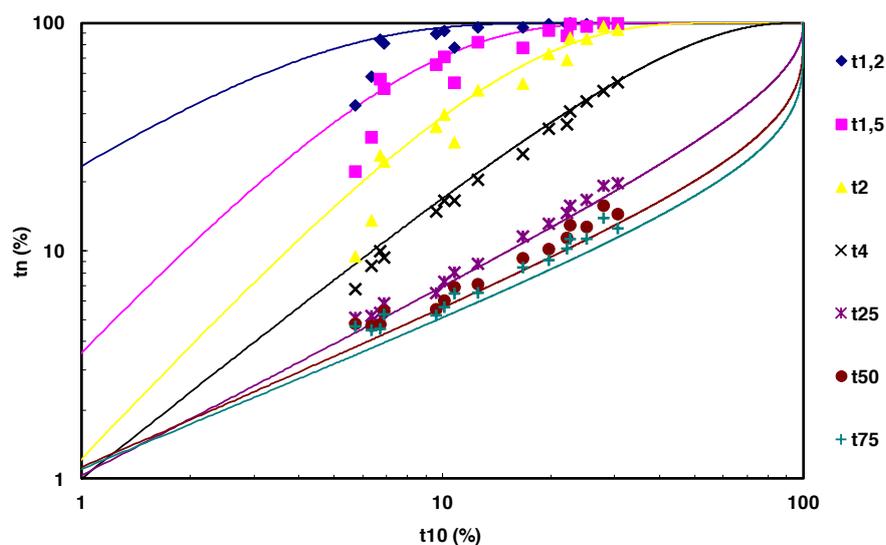


Figura III-16 – Curvas de distribuição de quebra na modelagem da fragmentação das pelotas da amostra AM 11. Dados experimentais (pontos) e curvas modeladas (linhas).

Tabela III-9 – Parâmetros da função distribuição de quebra das pelotas da amostra AM 11

Marcadores t	Parâmetros	
	Alfa	Beta
1,2	1,059	30,008
1,5	1,732	20,020
2	1,718	9,997
4	1,269	2,862
25	0,817	0,404
50	0,686	0,204
75	0,651	0,160

Seguindo a Equação II-10, proposta por Tavares (2009), é possível avaliar o ajuste do modelo de fragmentação volumétrica (Figura III-17). Pode-se verificar que a

curva modelada (linha) apresenta apenas um ajuste marginal aos dados experimentais (pontos).

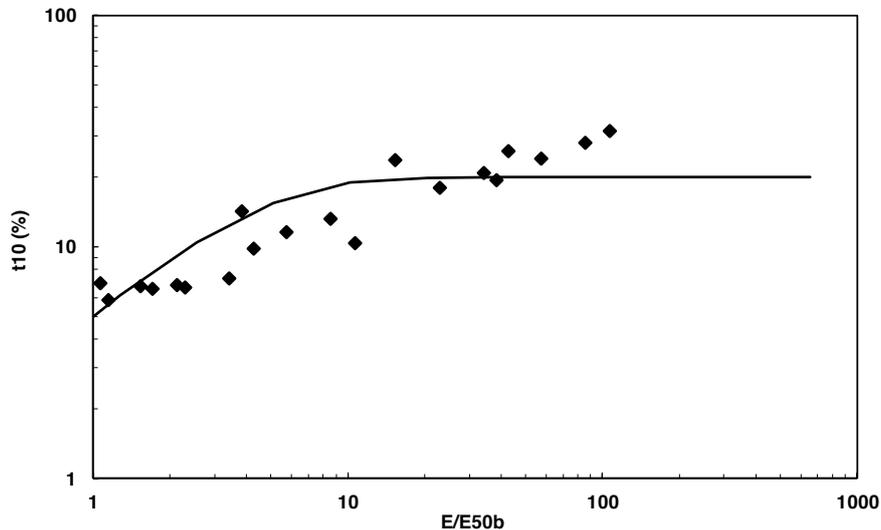


Figura III-17 – Resultados sintetizados dos ensaios de fragmentação de pelotas (pontos) e modelo (linha) com base no modelo da seção II.2.3.1.3.

A partir dos ensaios de fratura por impactos repetidos foram obtidos valores do parâmetro gama (γ) para pelotas contidas em diferentes intervalos de tamanhos (Tabela III-10). A partir desses ensaios, o modelo do dano (seção II.2.3.2.1) foi capaz de prever razoavelmente os resultados experimentais (Figura III-18, Figura III-19, Figura III-20 e Figura III-21). Contudo, diferentemente do que é normalmente observado para minérios (Tavares e King, 2002), observou-se que o valor de gama varia com o tamanho de pelota, representando este um desafio adicional de aprimoramento do modelo.

Tabela III-10 – Valores de susceptibilidade à fratura para diferentes tamanhos da amostra de pelota representativa AM 11

Tamanho (mm)	Gama (γ)
16 x 14	2,0
14 x 12,5	2,9
12,5 x 9,0	10,7
9,0 x 8,0	3,4

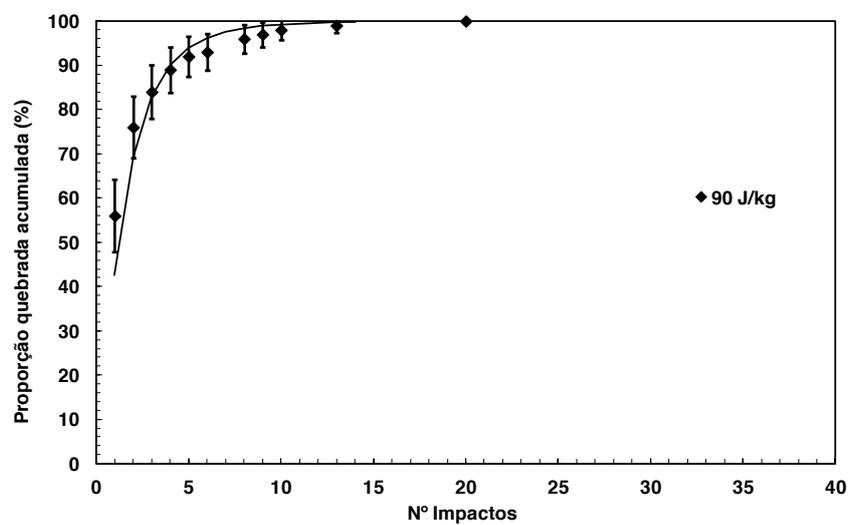


Figura III-18 – Resultados experimentais de fratura por impactos repetidos (pontos) comparados aos ajustados (linha), seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002) para pelotas de 16 x 14 mm, para uma energia de impacto de 90 J/kg.

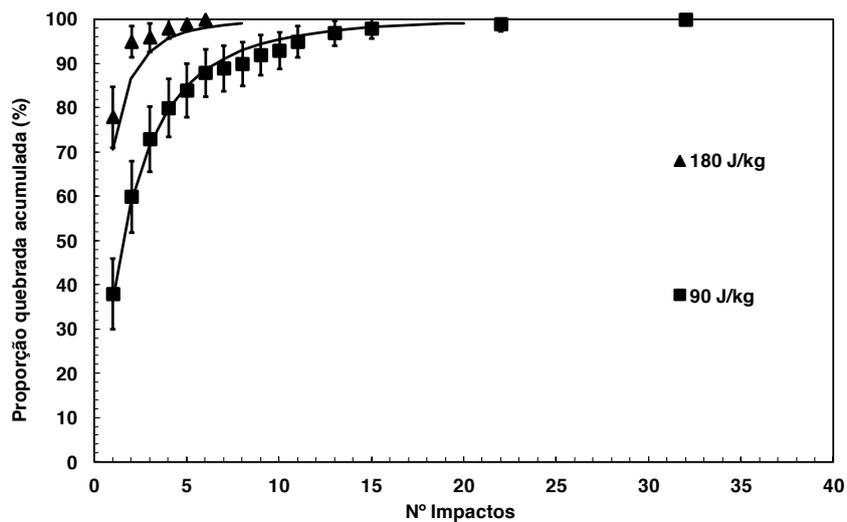


Figura III-19 – Resultados experimentais de fratura por impactos repetidos (pontos) comparados aos ajustados (linhas) seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002) para pelotas de 14 x 12,5 mm, para energias de impacto de 180 e 90 J/kg.

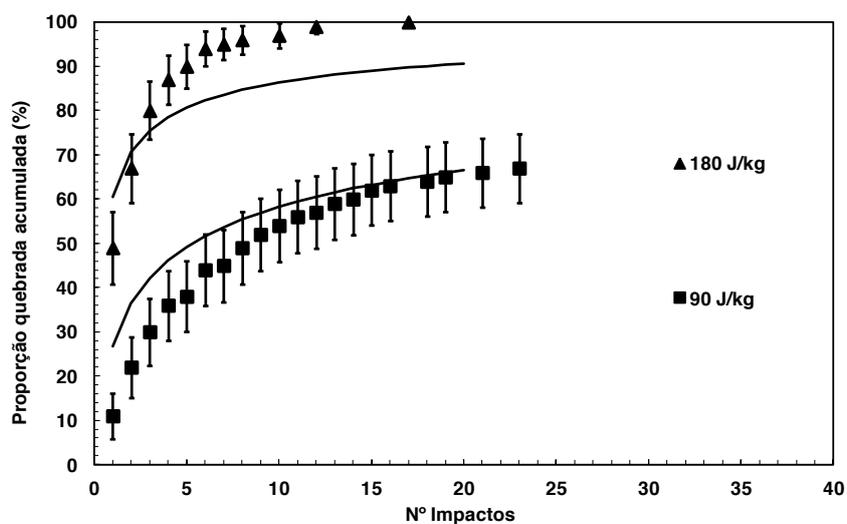


Figura III-20 – Resultados experimentais de fratura por impactos repetidos (pontos) comparados aos ajustados (linhas) seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002) para pelotas de 12,5 x 9,0 mm, para energias de impacto de 180 e 90 J/kg.

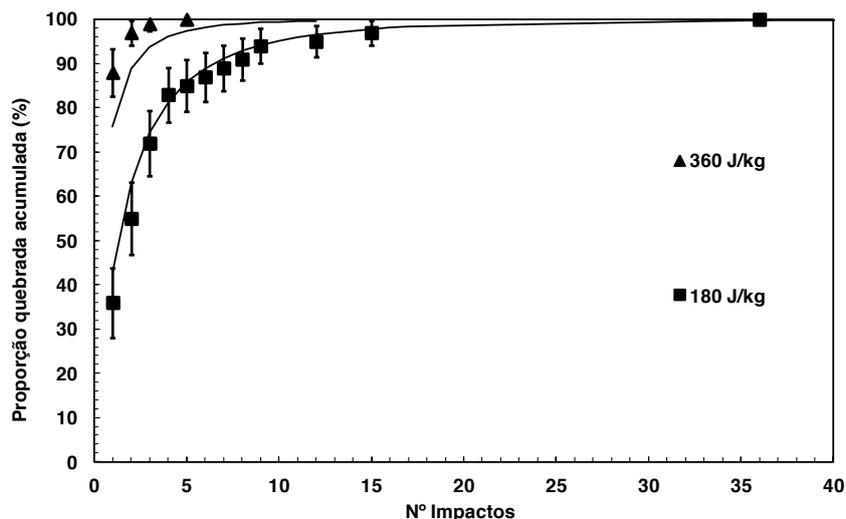


Figura III-21 – Resultados experimentais de fratura por impactos repetidos (pontos) comparados aos ajustados (linhas) seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002) para pelotas de 9,0 x 8,0 mm, para energias de impacto de 360 e 180 J/kg.

III.2.3 Caracterização da fragmentação superficial

Pode ser observado na Figura III-22 que, em cada uma das curvas de distribuição granulométrica para os diferentes tempos de tamboramento, os produtos de abrasão apresentam distribuições granulométricas característica do mecanismo de abrasão, ou seja, praticamente com ausência de material na faixa de tamanhos intermediária e com acúmulo na faixa fina.

Em seguida os resultados foram compilados (Tabela III-11) com o objetivo de se obter uma taxa de abrasão a partir da Figura III-23, a qual permite estimar a taxa de geração de finos por abrasão por minuto pela inclinação da reta em destaque, a qual descreve a variação da perda mássica pelo tempo de tamboramento.

Contudo, como o modelo demanda o valor da taxa de abrasão por impactos de baixa magnitude, a taxa de abrasão por minuto foi transformada em taxa de abrasão por impacto, conforme anteriormente descrito pela Equação II-19.

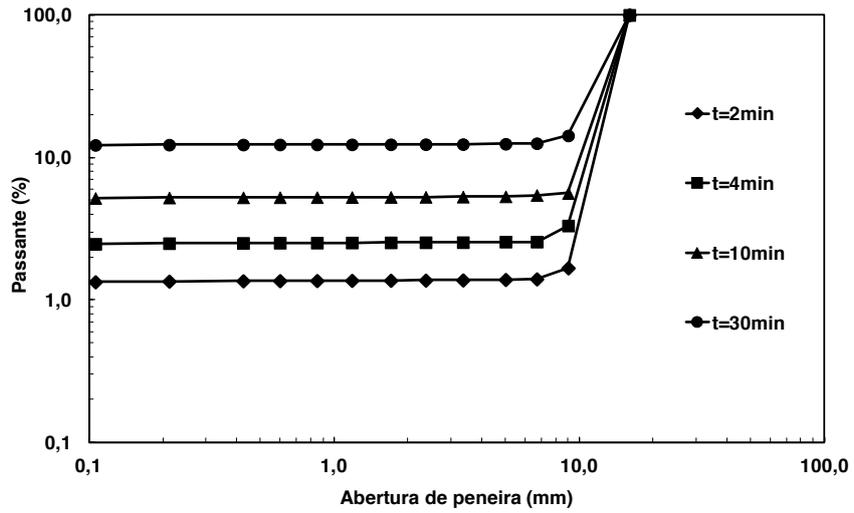


Figura III-22 – Distribuições granulométrica do material resultante dos diferentes tempos de tamboramento (AM 11).

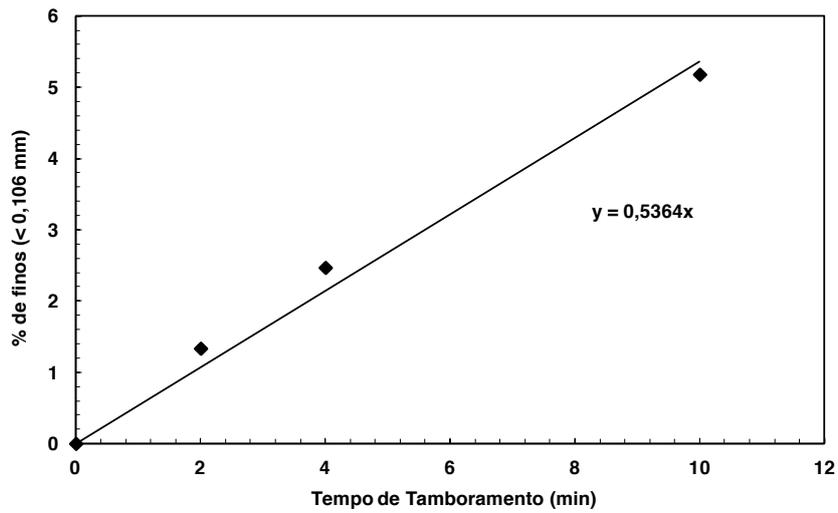


Figura III-23 – Relação entre a percentagem de finos gerados por fragmentação superficial (abrasão) e o tempo de tamboramento, mostrando a taxa de abrasão estimada segundo a metodologia adotada (seção III.1.2.2).

Tabela III-11 – Valores de taxa de abrasão do ensaio de tamboramento da amostra AM 11

Amostra	Taxas de Abrasão	
	t_a (% < 0,106 mm/minuto)	κ (% < 0,106 mm/impacto)
AM 11	0,5364	0,0062

III.2.3.1 **Investigação dos finos gerados pela quebra superficial**

Adicionalmente, com o objetivo de compreender melhor o mecanismo de fragmentação superficial das pelotas foram realizadas análises dos finos gerados por abrasão, representados pela fração de material menor que 0,106 mm obtida por peneiramento. A Figura III-24 mostra o resultado do peneiramento a úmido, enquanto a Figura III-25 apresenta a análise com o auxílio do granulômetro Malvern[®].

Essas análises foram realizadas porque havia a suspeita de que o mecanismo de quebra por abrasão estaria associado ao rompimento das pontes de ligação entre as partículas de minério de ferro. Com isso, foi investigada a hipótese de que a granulometria dos finos de abrasão se assemelhassem muito à granulometria do *pellet feed*.

III.2.3.2 **Análise estrutural da pelota pós quebra superficial**

Com o objetivo de compreender o mecanismo de geração de partículas finas pela quebra superficial, foi proposto realizar uma análise da microestrutura das pelotas após submetidas a este processo para saber se haveria alguma evidência que fosse correlacionável.

A Figura III-26 apresenta duas imagens de uma mesma seção de uma pelota após o ensaio de abrasão (seção III.1.3.4), obtida através da técnica de microscopia eletrônica de varredura. Pode ser observado que é evidente a presença de micro-trincas na estrutura da pelota, contudo essas evidências ainda não são suficientes para afirmar

que somente este mecanismo seria responsável pela geração de finos de abrasão. A presença de trincas constata apenas o dano gerado na estrutura, mas não é possível relacioná-las diretamente à geração de finos pelos impactos de baixa magnitude.

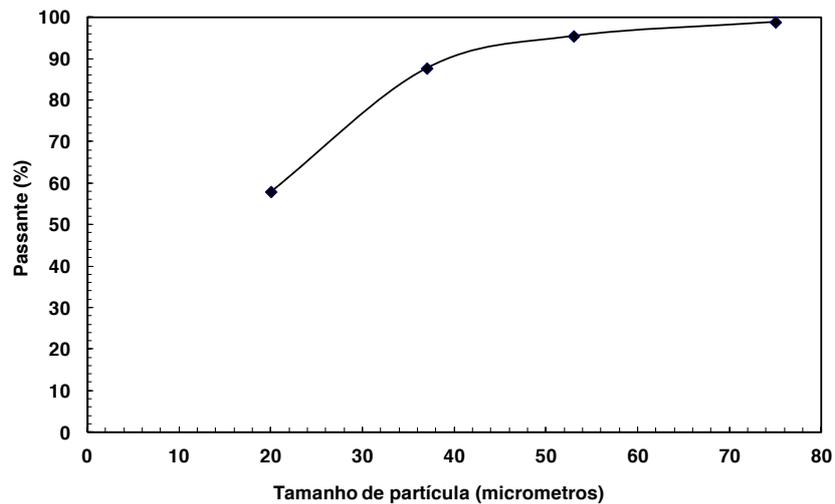


Figura III-24 – Distribuição granulométrica dos finos (< 0,106 mm) resultantes do ensaio de tamboramento adaptado do padrão JKMRC (seção III.1.3.4) para o tempo de 4 minutos de tamboramento.

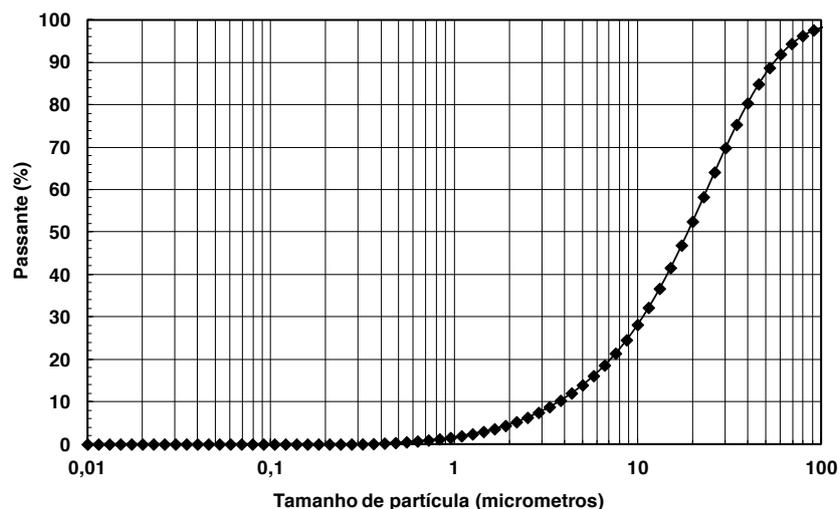


Figura III-25 – Distribuição granulométrica realizada utilizando o Malvern para os finos (< 0,106 mm) resultantes do ensaio de tamboramento adaptado do padrão JKMRC para o tempo de 4 minutos de tamboramento.

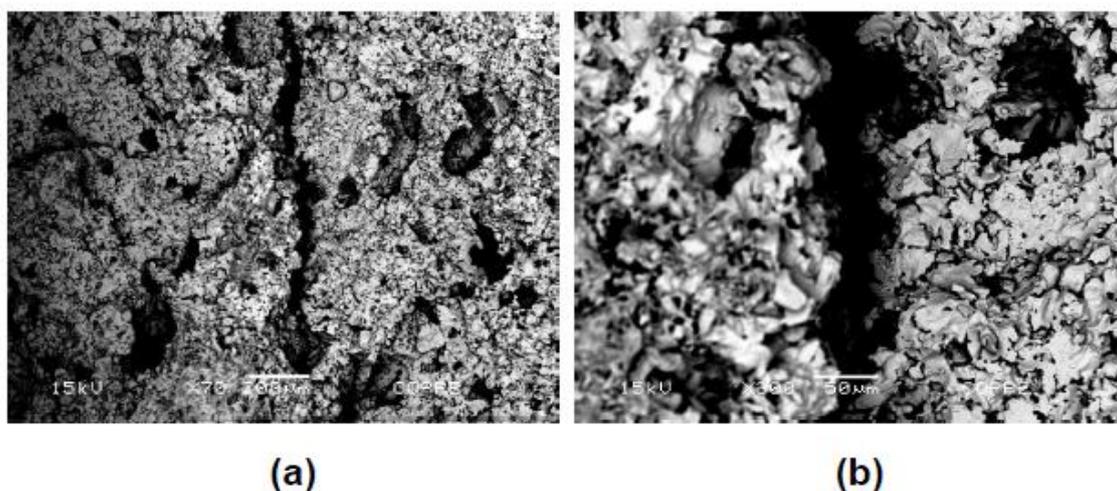


Figura III-26 – Micrografias de microscopia eletrônica de varredura de uma pelota após o ensaio de tamboramento em corte com um aumento de 70 vezes (Figura a) e com um aumento de 300 vezes (Figura b) (COPPE/UFRJ).

III.2.4 Aplicação do modelo à previsão do manuseio em laboratório

Tendo em vista a equivalência entre as amostras representativas, AM 11 e AM MIX, foi possível comparar os resultados experimentais do ensaio de manuseio realizado em laboratório no qual foi utilizada a amostra AM MIX com os resultados da simulação deste ensaio a partir dos parâmetros obtidos pela caracterização da fragmentação da amostra AM 11.

A Figura III-27 mostra o resultado experimental do ensaio de manuseio, enquanto a Figura III-28 apresenta a sua comparação com dados simulados na versão original do modelo de degradação de Tavares e Carvalho (2011). Pode ser observado que o modelo subestimou significativamente a proporção de material fino gerado pela fragmentação a cada impacto. Este fato pode ser atribuído a diversos fatores, como a estimação da quantidade de impactos na chapa de aço e entre as pelotas. Na ausência de uma ferramenta que permita uma avaliação mais precisa, foi estimado que,

aproximadamente, 30% das pelotas colidiram contra a chapa de aço e o restante teria correspondido a impacto autógeno, ou seja, de pelotas umas contra as outras. Assim, se torna evidente a necessidade de avaliar de forma mais objetiva a questão da repartição de energia envolvida durante o impacto das pelotas neste ensaio.

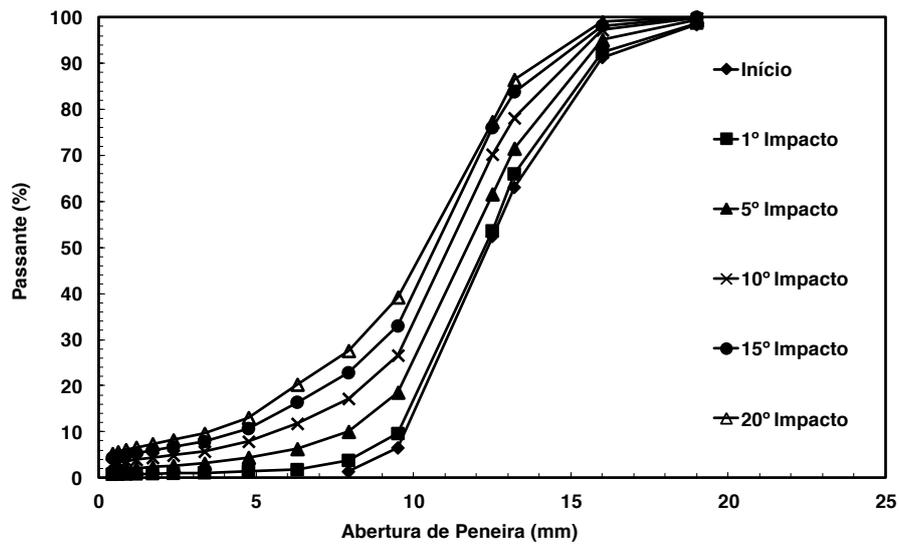


Figura III-27 - Resultado experimental do ensaio de manuseio do LTM/COPPE, realizado à altura de queda de 8,4 m

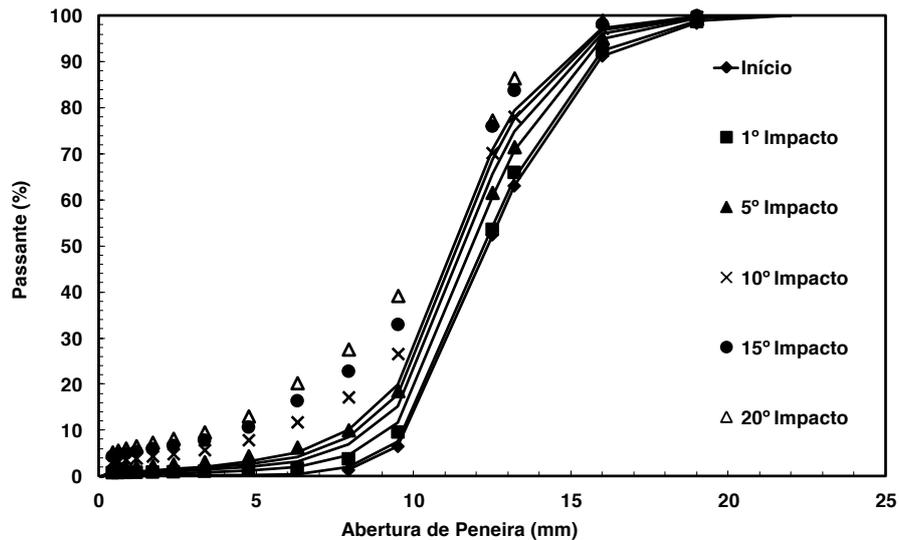


Figura III-28 – Comparação entre resultados de simulação (linhas) e dados experimentais (pontos) do ensaio de manuseio.

Dentre as várias hipóteses levantadas a respeito da inadequação do modelo no caso da sua aplicação a pelotas de minério de ferro, identificou-se que a forma das pelotas estaria influenciando muito no comportamento da fragmentação, uma vez que ficou evidenciada a presença tanto de pelotas bem formadas e com formato aproximadamente esférico, como de fragmentos de pelotas, denominados “cacos”. Como resultado, identificou-se a necessidade de modelar as características fragmentativas desses dois grupos de maneira diferenciada, pois na versão original do modelo de Tavares e Carvalho (2011), desenvolvida para prever a degradação de minérios, não havia distinção entre as características fragmentativas das partículas iniciais submetidas ao manuseio e aquelas fraturadas. Esse é o tratamento natural no caso de partículas minerais, nas quais as partículas mais finas são produzidas, invariavelmente, como resultado da fragmentação das mais grossas, o que não é, necessariamente, o caso de pelotas. Assim, para a previsão da degradação de pelotas, se faz necessária a distinção entre as características de pelotas propriamente formadas e os

cacos produzidos durante o manuseio. Além disso, é também importante reconhecer na simulação que a fragmentação tanto de pelotas quanto de cacos produz como resultado cacos, não ocorrendo o contrário. Assim, tornou-se necessário modelar separadamente as características de fragmentação de pelotas e cacos.

Outra hipótese levantada foi que a evolução da quebra superficial não estaria sendo adequadamente descrita utilizando a metodologia proposta por Tavares e Carvalho (2011), uma vez que o modelo adota um valor constante e independente da energia de impacto para a taxa de abrasão e parte de uma metodologia, na qual o ensaio não é capaz de isolar os mecanismos de impacto e cisalhamento entre as pelotas.

Adicionalmente, durante a execução dos ensaios, foi ainda observado que provavelmente ocorreu uma superestimação da finura das distribuições granulométricas resultantes dos ensaios de fragmentação, uma vez que todo produto de cada ensaio era analisado no peneirador Ro-Tap[®]. Considerou-se que a forte ação mecânica durante o ensaio estaria sendo responsável pela degradação por desgaste físico nos fragmentos analisados nas peneiras, mascarando os resultados devido à geração de finos. Com isso foi concluído que haveria a necessidade de realizar a correção nas distribuições granulométricas dos ensaios de fragmentação por queda de peso.

Foi ainda proposta uma melhora na descrição do ambiente mecânico em que as pelotas eram submetidas aos impactos, uma vez que a quantificação e a distribuição das energias de impacto envolvidas poderiam alterar significativamente os resultados da simulação. Para isso foi proposta a utilização de um *software* que se baseia no Método dos Elementos Discretos (*Discrete Element Method*) e que foi projetado para simulação e análise do movimento de partículas dentro de processos industriais.

IV.MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE PELOTAS USANDO O MODELO MODIFICADO

Nesta etapa do trabalho, foram adotadas metodologias baseadas nas hipóteses e constatações de que o modelo de degradação desenvolvido por Tavares e Carvalho (2011) precisaria ser adaptado no caso de sua aplicação à simulação do manuseio de pelotas de minério de ferro.

IV.1 Discriminação entre pelotas e cacos

Conforme anteriormente discutido (seção III.2.4), foi proposta uma descrição diferenciada no comportamento da fragmentação entre pelotas e cacos, uma vez que foi notada claramente a diferença na forma entre as partículas, e que este poderia ser um aspecto de grande influência na modelagem da quebra deste produto.

A Figura IV-1 ilustra as diferenças de forma entre pelotas e cacos, sugerindo a metodologia adotada na classificação subjetiva do material. Vale ressaltar a necessidade de estabelecer no futuro um critério de distinção entre pelotas e cacos que fuja da subjetividade na análise de suas formas.

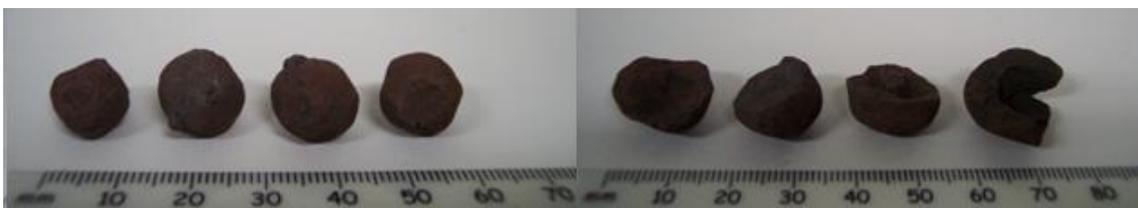


Figura IV-1 – Classificação de pelotas (esquerda) e cacos (direita) da amostra AM11.

Com o objetivo de verificar a suspeita de diferença nas características fragmentativas de pelotas e cacos, foram realizados ensaios preliminares de fragmentação por queda de peso (seção III.1.3.1), fratura por impactos repetidos (seção

III.1.3.2) e fragmentação por abrasão (seção III.1.3.4), analisando as distribuições granulométricas obtidas (Figura IV-2), a proporção de partículas fraturadas por impactos repetidos (Figura IV-3) e a taxa de geração de finos por abrasão (Figura IV-4) tanto de pelotas bem formadas como de cacos da mesma amostra (AM11).

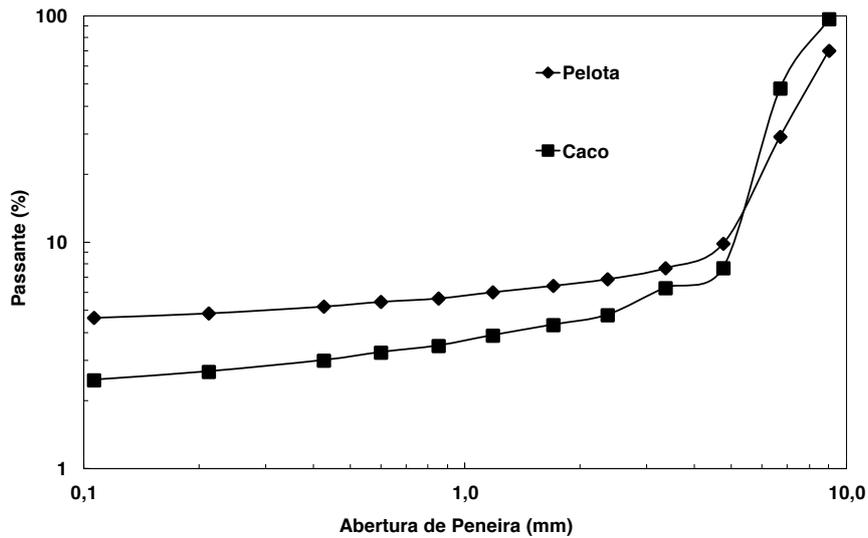


Figura IV-2 – Análises granulométricas do produto de ensaio de fragmentação por queda de peso (seção III.1.3.1) de pelotas e cacos da amostra AM11 sob uma energia de impacto de 180 J/kg.

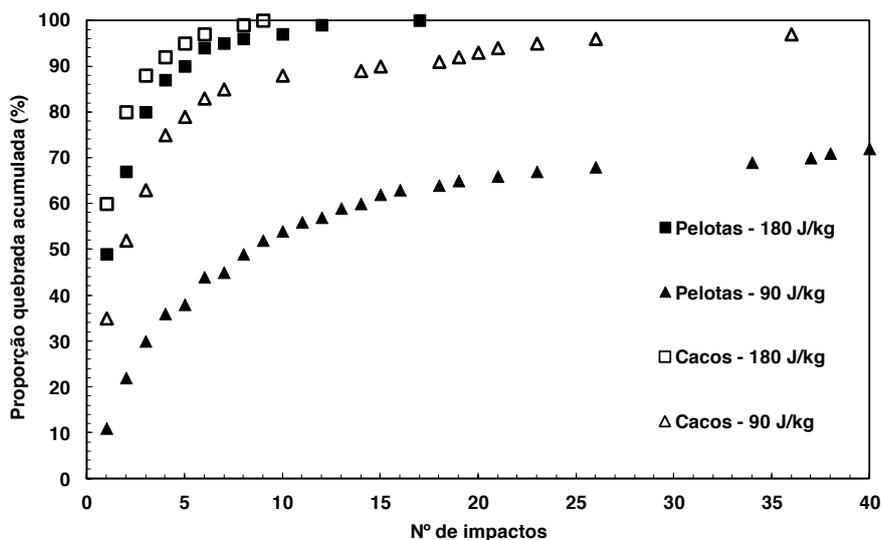


Figura IV-3 – Curvas de proporção quebrada de ensaio de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de pelotas e cacos de 12,5 x 9,0mm, da amostra AM11, sob diferentes energias de impacto.

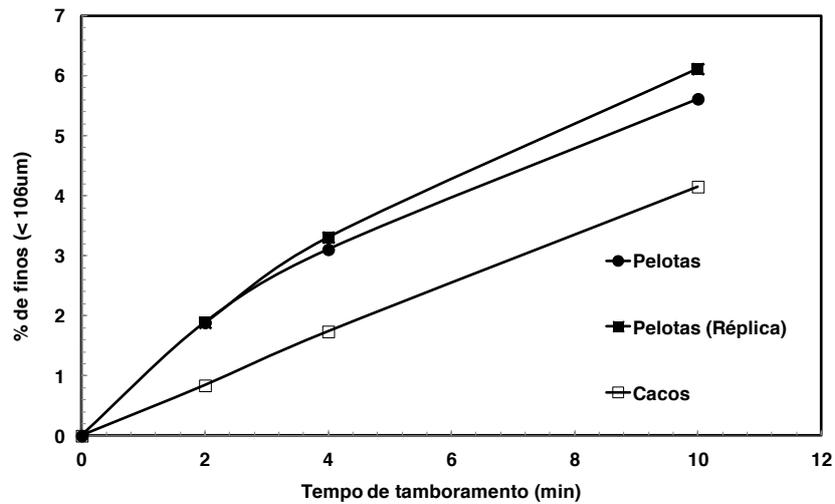


Figura IV-4 – Curvas de taxa de fragmentação por abrasão segundo a metodologia adotada (seção III.1.3.4) para pelotas e cacos de 12,5 x 9,0 mm.

Os resultados de fragmentação por impacto e de abrasão por tamboramento mostram que existe diferença entre a resistência à fragmentação por impacto e abrasão de cacos e pelotas bem formadas. As figuras mostram que um caco é menos resistente do que uma pelota, sendo esta diferença acentuada para energias de impacto mais baixa.

Neste sentido, foi proposta a alteração no modelo de maneira a descrever os mecanismos de quebra em separado para pelotas e cacos. Com isso, tornou-se necessário levar em consideração a proporção inicial de pelotas e cacos por faixa de tamanhos no material que são sujeitas ao processo de manuseio.

Assim, foi realizado um levantamento da proporção de cacos e pelotas da amostra representativa do carregamento (AM 11), sendo os resultados compilados na Figura IV-5. Pode-se observar que a faixa de 9 x 8 mm foi a que apresentou a maior proporção de cacos em comparação a pelotas bem formadas. Embora subjetiva, a análise se mostrou adequada para fornecer subsídios para a simulação do processo.

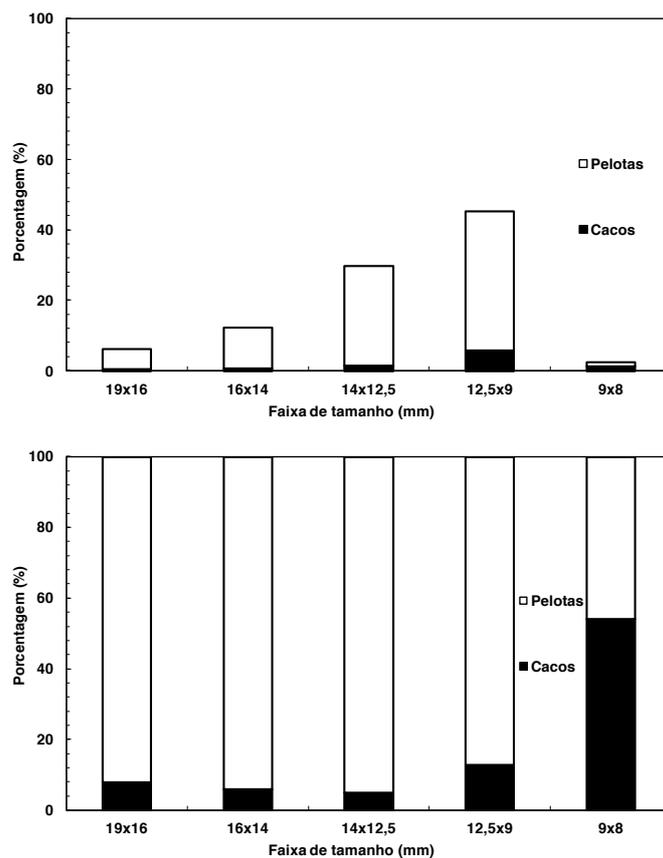


Figura IV-5 – Proporção de cacos/pelotas por faixa de tamanho da amostra AM11.

Em prosseguimento a essa investigação, foram realizados ensaios de caracterização para os cacos seguindo a metodologia do LTM/COPPE (seção III.1.3.1). Para a caracterização de cacos foi utilizada a amostra AM MIX, já anteriormente descrita (seção III.1.4). A partir desta amostra foi realizada a preparação dos cacos a partir de peneiramento manual do material contido nas faixas de 14 x 12,5 mm, 12,5 x 9 mm, 9 x 8 mm, 5,6 x 4,75 mm e 2,83 x 2,36 mm, para os diferentes ensaios de caracterização, segundo a Tabela IV-1.

As análises granulométricas dos fragmentos oriundos dos ensaios realizados com cacos contidos nas faixas de 14 x 12,5 mm, 12,5 x 9 mm e 9 x 8 mm foram realizadas usando o peneirador Ro-Tap[®]. Por outro lado, os ensaios envolvendo as faixas mais finas (5,6 x 4,75 mm e 2,83 x 2,36 mm) foram realizados com o auxílio do peneirador da marca Gilson[®] modelo SS-3 o qual emprega apenas o mecanismo da vibração e não

empregando golpes como no Ro-Tap[®], de maneira que a fragmentação de partículas durante o peneiramento deve ser limitada.

Tabela IV-1 – Condições experimentais utilizadas nos ensaios de fragmentação de cacos para a amostra AM MIX

Intervalo de Tamanho (mm)	Energia Específica de impacto (J/kg)	Número de partículas por lote	Massa do Impactor (kg)	Célula de Carga (mm)
14 x 12,5	9000	50	15,5	100
	3600	50	3,4	100
	900	50	1,0	63
	360	100	1,0	63
	180	100	1,0	63
	90	100	0,6	63
12,5 x 9	9000	50	3,4	100
	3600	50	3,4	100
	900	50	1,0	63
	360	100	1,0	63
	180	100	0,6	63
	90	100	0,5	63
9 x 8	9000	50	3,4	100
	3600	50	1,0	63
	900	50	1,0	63
	360	100	0,5	63
	180	100	0,5	63
	90	100	0,1	63
5,6 x 4,75	9000	50	1,0	63
	3600	50	1,0	63
	900	50	0,5	63
	360	100	0,1	63
	180	100	0,1	63
	90	100	0,1	63
2,83 x 2,36	9000	100	0,5	63
	3600	100	0,1	63
	900	100	0,1	63
	360	100	0,1	63
	180	100	0,1	63
	90	100	0,1	63

IV.2 Correção das análises granulométricas via modelagem da degradação no peneirador Ro-Tap[®]

Baseado na hipótese de que a utilização do peneirador Ro-Tap[®] resultaria na degradação do material, supôs-se que a degradação ocorria preferencialmente dos fragmentos mais grossos e que isso contribuía de forma significativa para a superestimação da geração de finos nas curvas de distribuição granulométrica. A fim de investigar essa suspeita foi proposta a realização de alguns ensaios de fragmentação da amostra AM11, peneirando-se os fragmentos oriundos dos ensaios, inicialmente de forma manual e, em seguida, usando o procedimento padrão no Ro-Tap[®]. A partir de uma comparação entre os resultados das análises, manual e no Ro-Tap[®], seria possível avaliar a magnitude da degradação no peneiramento usando o Ro-Tap[®]. A metodologia utilizada consistiu de:

1. Preparação e realização de réplicas de ensaios selecionados de fragmentação conforme a metodologia na seção III.1.3.1;
2. Realização de peneiramento manual dos fragmentos do material nas aberturas de peneira grossas (16; 14; 12,5; 9 e 6,7 mm) e peneiramento no Ro-Tap[®] dos fragmentos mais finos nas peneiras de aberturas 4,75; 3,35; 2,36; 1,70; 1,18; 0,850; 0,600; 0,425; 0,212 e 0,106 mm, seguido de pesagem de cada uma das alíquotas separadas;
3. Recomposição do material e realização de peneiramento no Ro-Tap[®] do material nas peneiras: 16; 14; 12,5; 9; 6,7; 4,75; 3,35; 2,36; 1,70; 1,18; 0,850; 0,600; 0,425; 0,212 e 0,106 mm, seguido de pesagem de cada uma das alíquotas.

Resultados comparativos entre o peneiramento manual e aquele realizado no Ro-Tap[®] são apresentados na Figura IV-6, Figura IV-7 e Figura IV-8. As diferenças

consistentes entre as diferentes técnicas de análise confirmam a suspeita, demandando uma ação concreta para a sua correção.

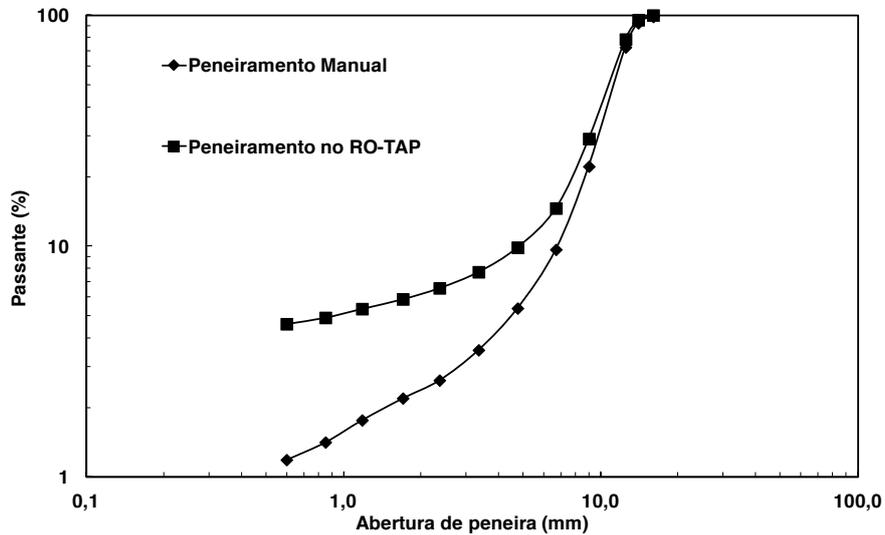


Figura IV-6 – Comparação entre o peneiramento manual e o peneiramento no Ro-Tap[®] de amostras resultantes de ensaio de fragmentação da amostra AM11 contida na faixa de 19x16mm a uma energia de impacto de 90 J/kg.

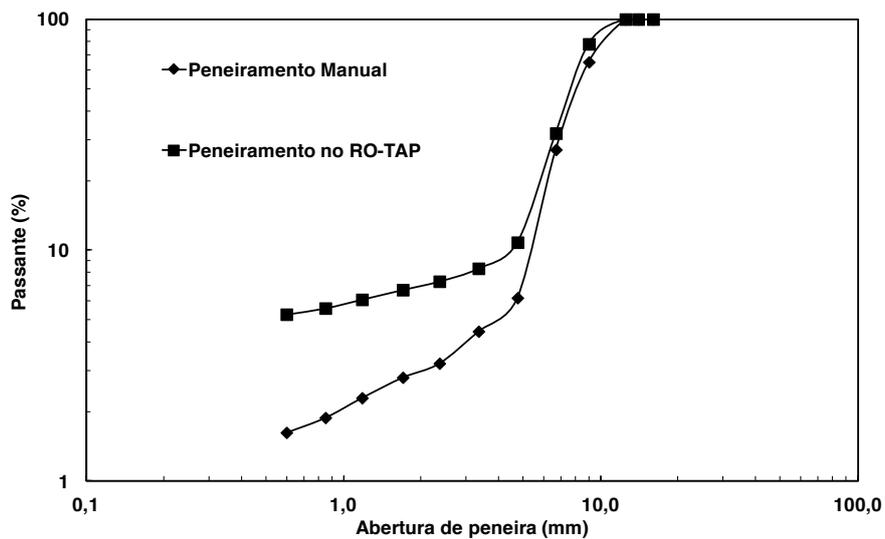


Figura IV-7 – Comparação entre o peneiramento manual e o peneiramento no Ro-Tap[®] de amostras resultantes de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 contida na faixa de 12,5x9mm a uma energia de impacto de 180 J/kg.

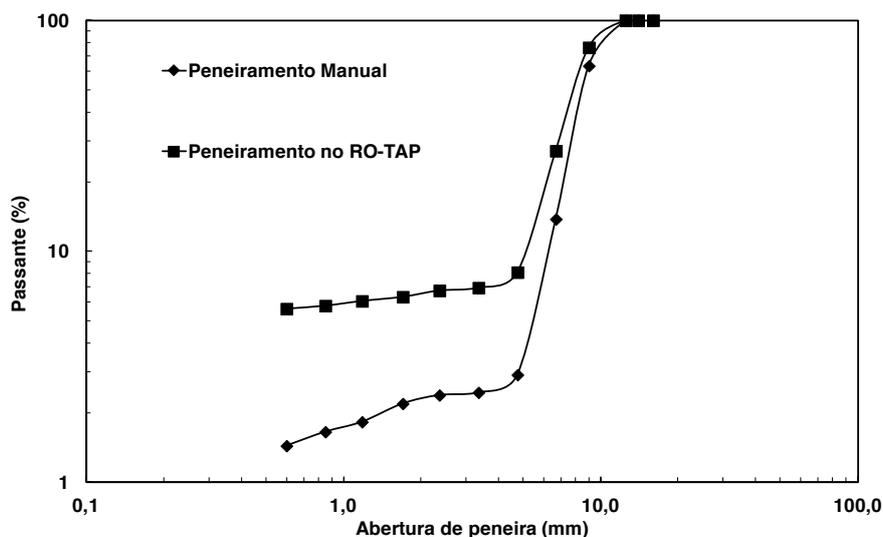


Figura IV-8 – Comparação entre o peneiramento manual e o peneiramento no Ro-Tap® de amostras resultantes de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 contida na faixa de 12,5x9mm a uma energia de impacto de 90 J/kg.

Verificada a suspeita, foi realizada a modelagem matemática da degradação no Ro-Tap® de maneira que esta pudesse ser aplicada à correção das análises anteriormente realizadas, o que permitiria, em seguida, corrigir os modelos de fragmentação. Maiores detalhes da modelagem matemática da degradação do Ro-Tap® podem ser encontradas no apêndice (seção VII.1).

A Figura IV-9 compara as análises granulométricas ajustadas com relação ao efeito de degradação no Ro-Tap® àquelas obtidas experimentalmente. Pode-se notar que o modelo foi capaz de descrever o efeito da degradação no Ro-Tap®, tendo em vista a boa aderência do modelo aos resultados experimentais.

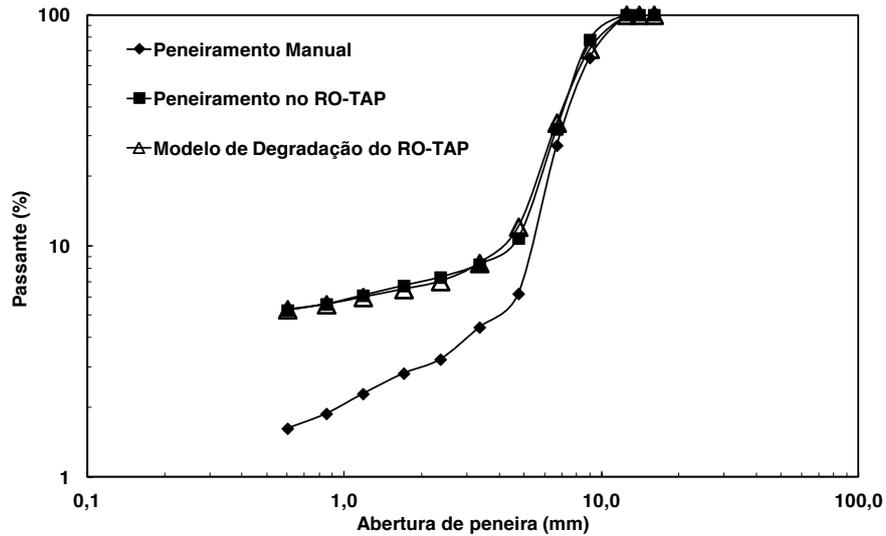


Figura IV-9 – Comparação entre as previsões usando o modelo de degradação do Ro-Tap[®] sobre o peneiramento manual e o peneiramento no Ro-Tap[®] de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 de 12,5x9mm a uma energia de impacto de 180 J/kg.

IV.3 Função quebra para pelotas e cacos (corrigidas para o efeito do Ro-Tap[®])

Com o objetivo de modelar a quebra dos cacos, foram realizados ensaios de fragmentação seguindo a metodologia já citada de acordo com a Tabela IV-1 na seção IV.1.

Na Figura IV-10 a Figura IV-14 são apresentados os resultados brutos das análises granulométricas referentes aos ensaios de fragmentação dos cacos seguindo o procedimento descrito na seção IV.1.

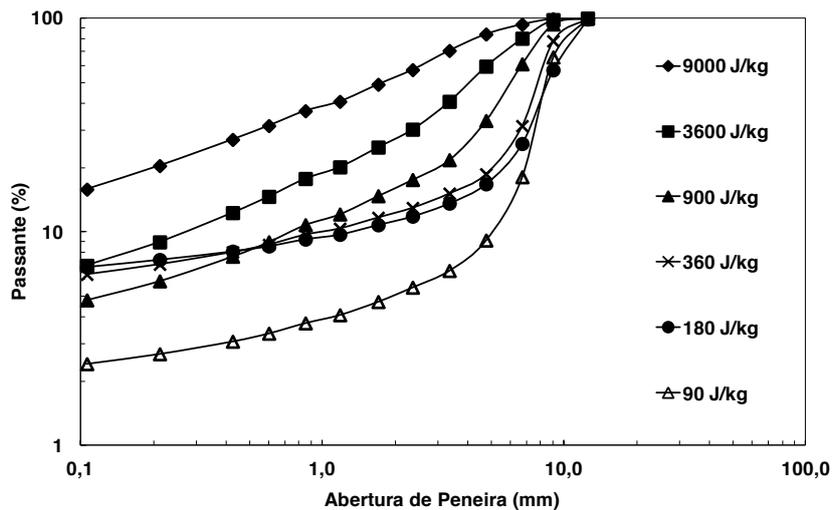


Figura IV-10 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX no intervalo de tamanho 14 x 12,5 mm, em função da energia específica de impacto.

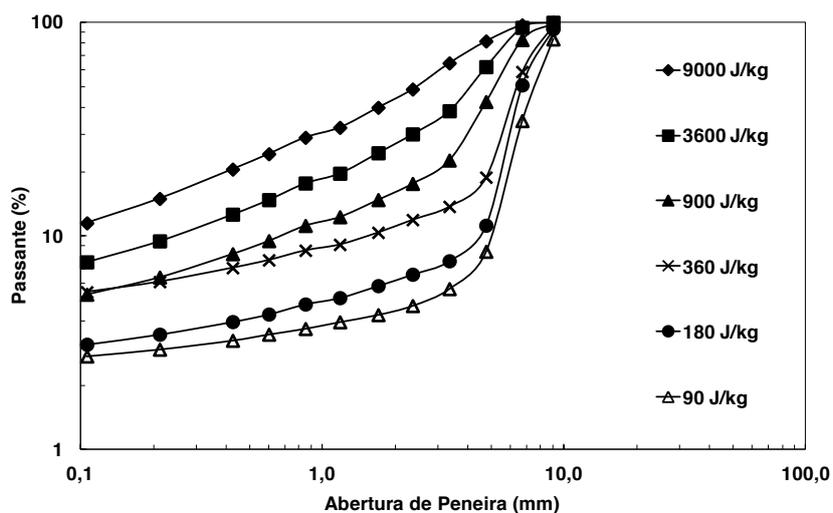


Figura IV-11 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX no intervalo de tamanho 12,5 x 9,0 mm, em função da energia específica de impacto.

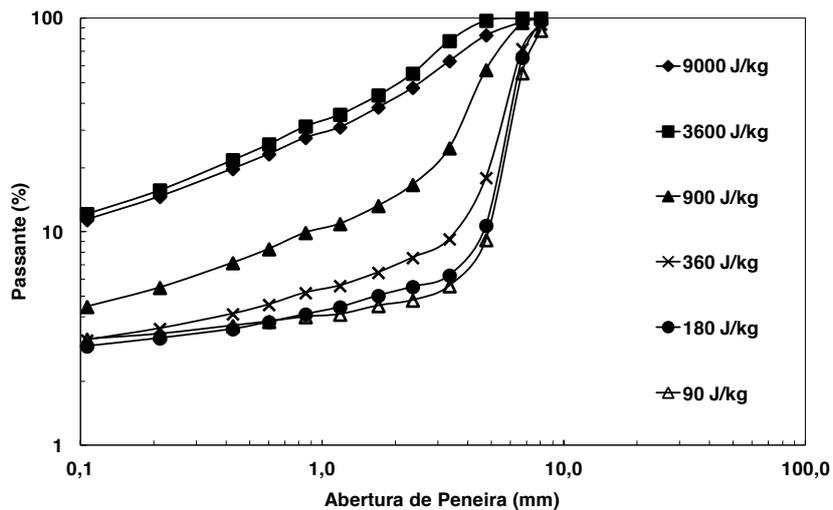


Figura IV-12 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX no intervalo de tamanho 9,0 x 8,0 mm, em função da energia específica de impacto.

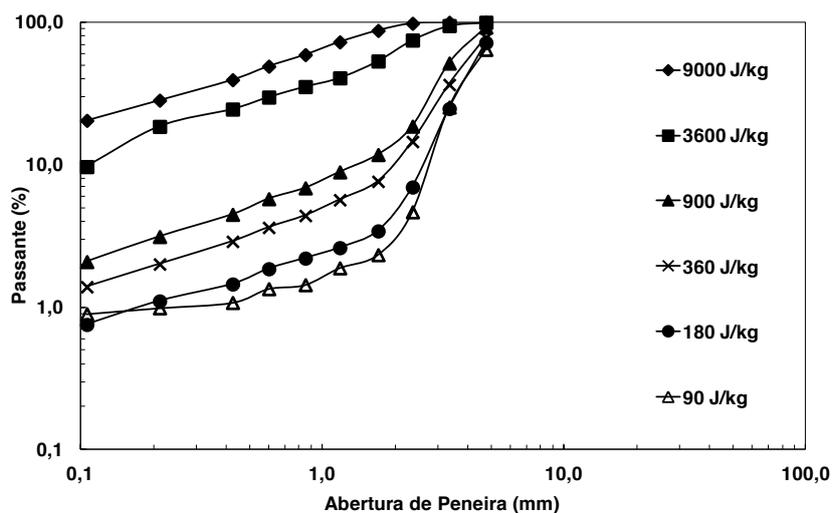


Figura IV-13 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX no intervalo de tamanho 5,6 x 4,75 mm, em função da energia específica de impacto.

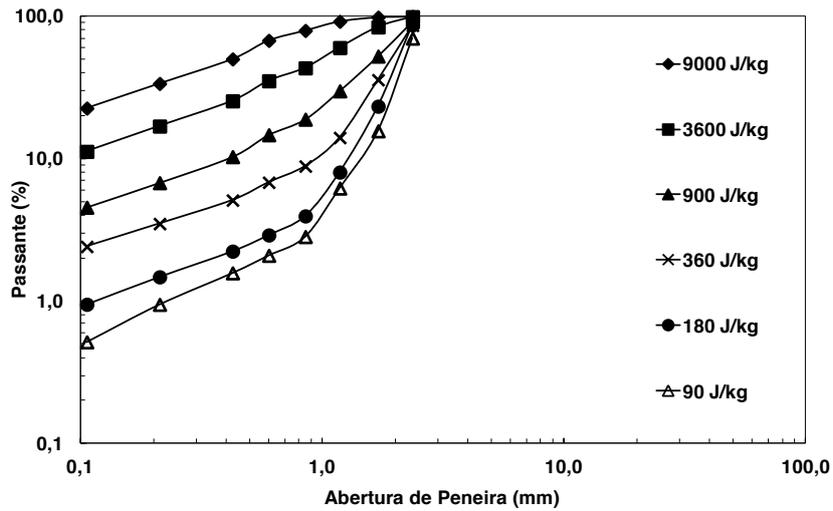


Figura IV-14 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX no intervalo de tamanho 2,83 x 2,36 mm, em função da energia específica de impacto.

Em seguida, as análises granulométricas tanto de cacos quanto de pelotas foram corrigidas (Figura IV-15 a Figura IV-21) para servirem de subsídio ao modelo de quebra de cacos e pelotas, respectivamente.

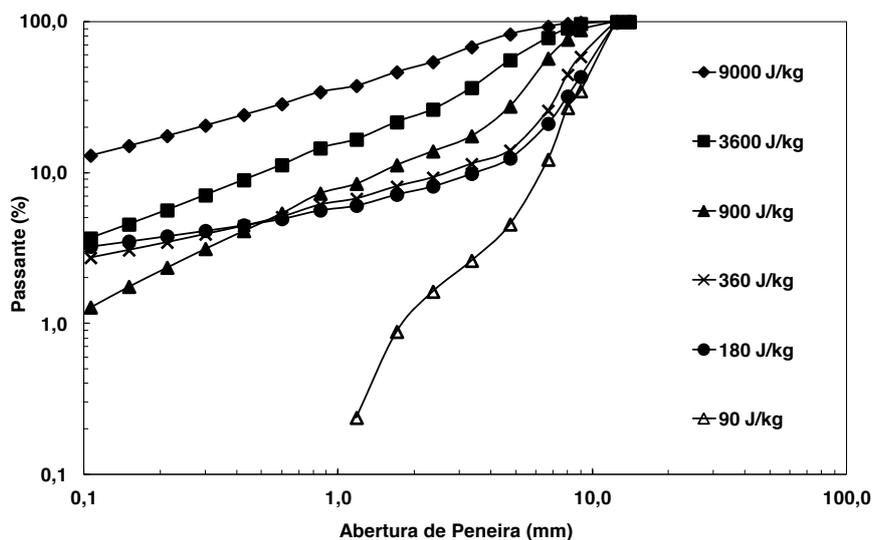


Figura IV-15 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap®, para o intervalo de tamanho 14 x 12,5 mm, em função da energia específica de impacto.

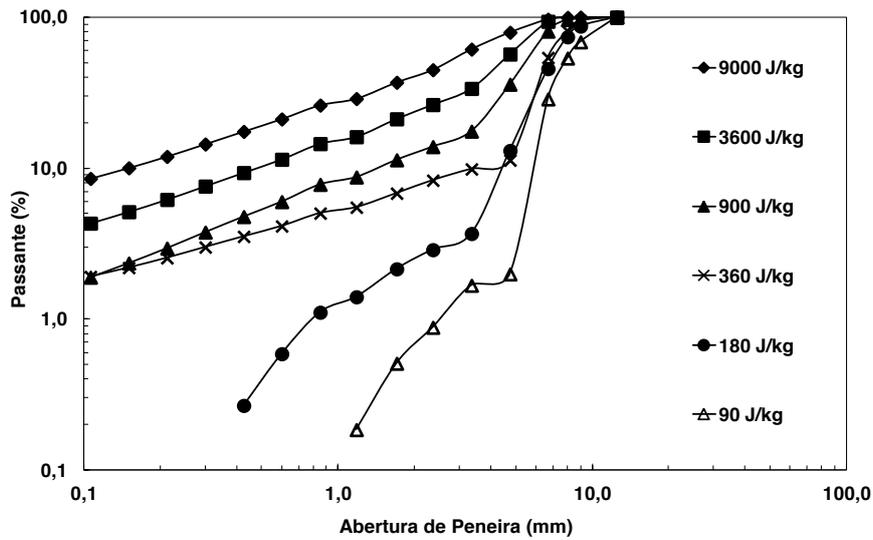


Figura IV-16 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap[®], para o intervalo de tamanho 12,5 x 9,0 mm, em função da energia específica de impacto.

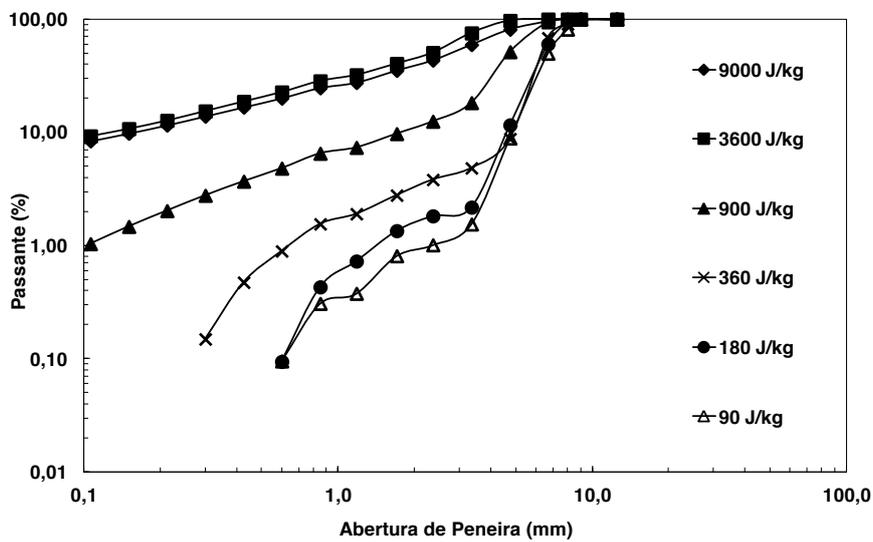


Figura IV-17 – Distribuições granulométricas de cacos da amostra AM MIX corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap[®], para o intervalo de tamanho 9,0 x 8,0 mm, em função da energia específica de impacto.

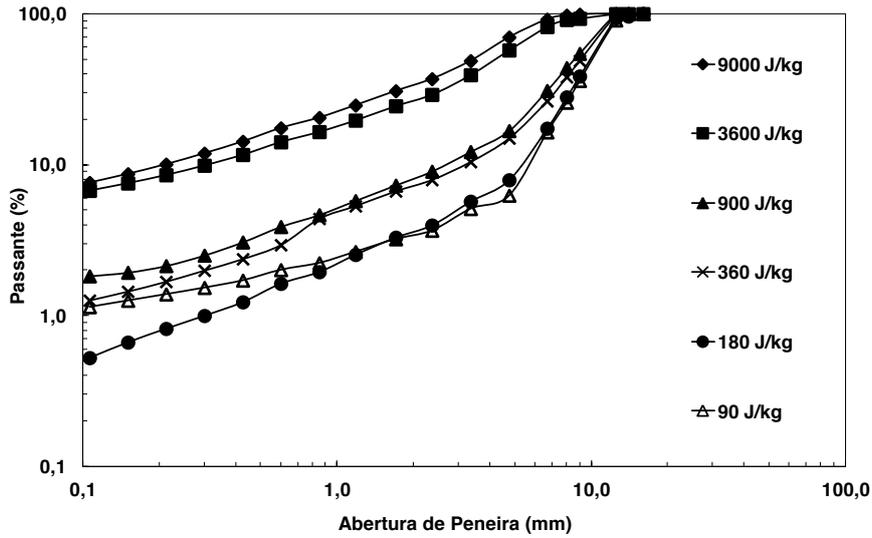


Figura IV-18 – Distribuições granulométricas de pelotas da amostra AM 11 corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap[®], para o intervalo de tamanho 16 x 14 mm, em função da energia específica de impacto.

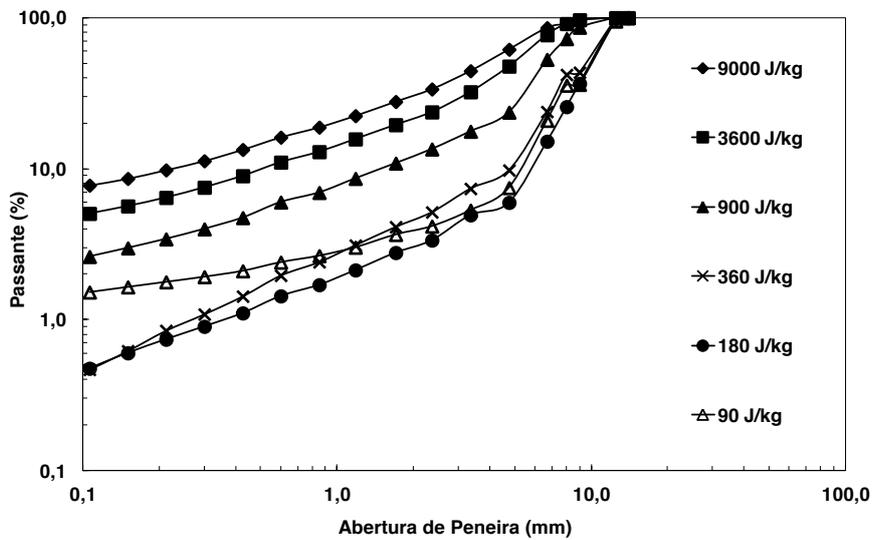


Figura IV-19 – Distribuições granulométricas de pelotas da amostra AM 11 corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap[®], para o intervalo de tamanho 14 x 12,5 mm, em função da energia específica de impacto.

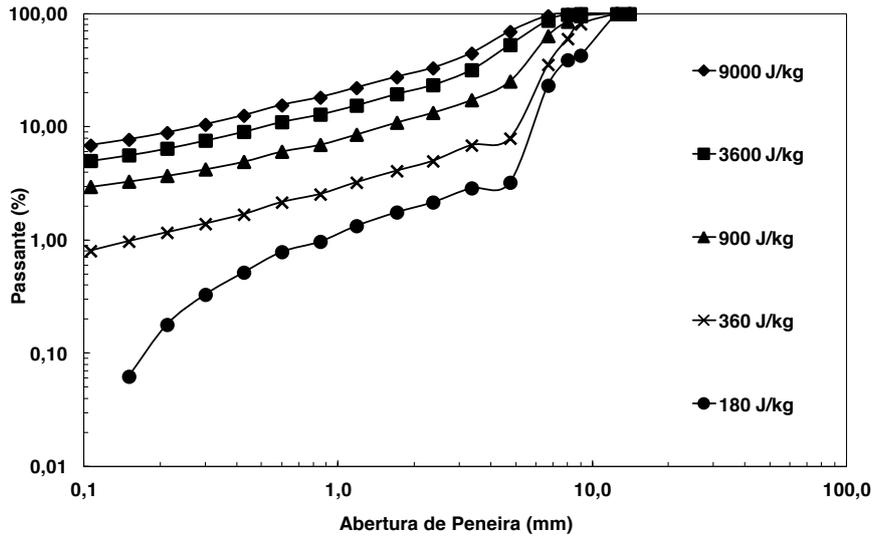


Figura IV-20 – Distribuições granulométricas de pelotas da amostra AM 11 corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap[®], para o intervalo de tamanho 12,5 x 9,0 mm, em função da energia específica de impacto.

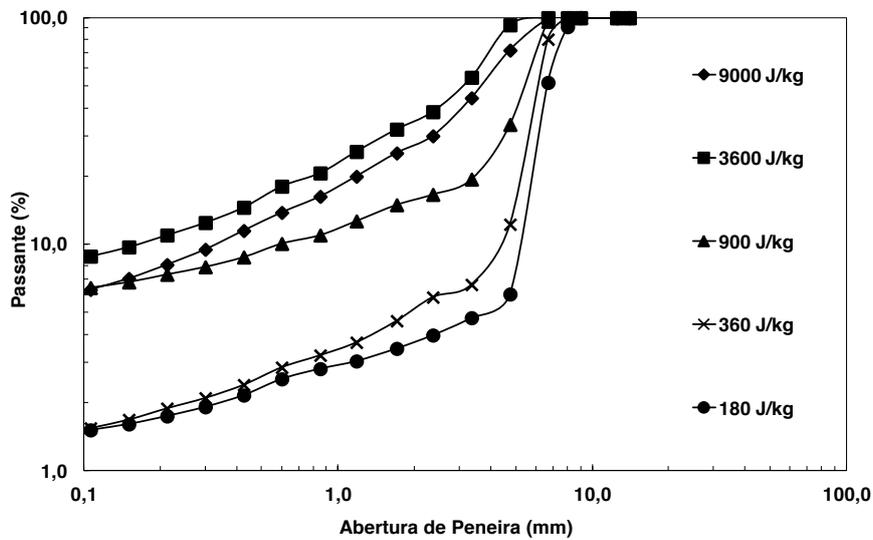


Figura IV-21 – Distribuições granulométricas de pelotas da amostra AM 11 corrigidas pelo modelo de degradação do Ro-Tap[®], para o intervalo de tamanho 9,0 x 8,0 mm, em função da energia específica de impacto.

De forma análoga àquela realizada na seção III.2.2, na aplicação da metodologia dos ensaios de fragmentação, foi possível estimar os parâmetros da modelagem da

quebra volumétrica dos parâmetros de quebra A e b' da Equação II-23, para pelotas e cacos. As distribuições granulométricas são modeladas na Figura IV-22 e na Figura IV-23, mostrando o bom ajuste do modelo da função beta incompleta aos dados experimentais.

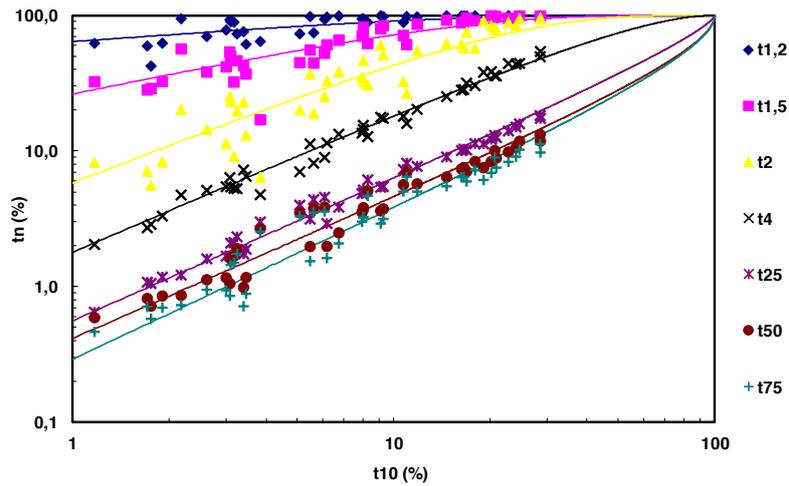


Figura IV-22 – Curvas de distribuição de quebra na modelagem da fragmentação de pelotas após correção das análises granulométricas. Dados experimentais (pontos) e resultados ajustados (linhas).

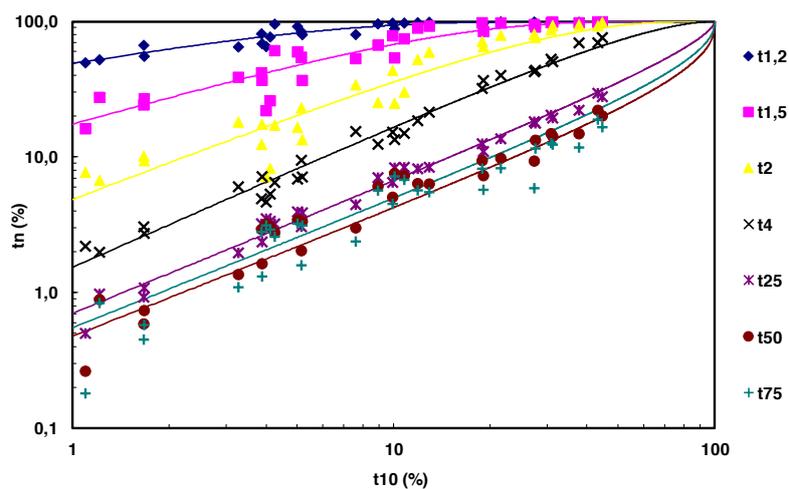


Figura IV-23 – Curvas de distribuição de quebra na modelagem da fragmentação de cacos após correção das análises granulométricas. Dados experimentais (pontos) e resultados ajustados (linhas).

Em sua nova versão, não foi realizada qualquer modificação na metodologia de modelagem da probabilidade de quebra para pelotas, conforme já apresentado na seção III.2.2. Já na caracterização da quebra volumétrica dos cacos, as curvas de probabilidade de quebra (Equação II-7) foram modeladas a partir de resultados de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2). A Figura IV-24 apresenta as curvas de probabilidade de quebra de cacos modeladas a partir dos resultados de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2).

Adicionalmente, foi realizada uma verificação da confiabilidade da metodologia de modelagem das distribuições de probabilidade de quebra de pelotas e de cacos a comparando os dados experimentais aos dados modelados partir dos resultados de ensaios de fratura por impactos repetidos (Figura IV-25 e Figura IV-26). Pode-se perceber que a aderência do modelo aos dados experimentais é muito boa, demonstrando a validade deste recurso adotado para modelagem.

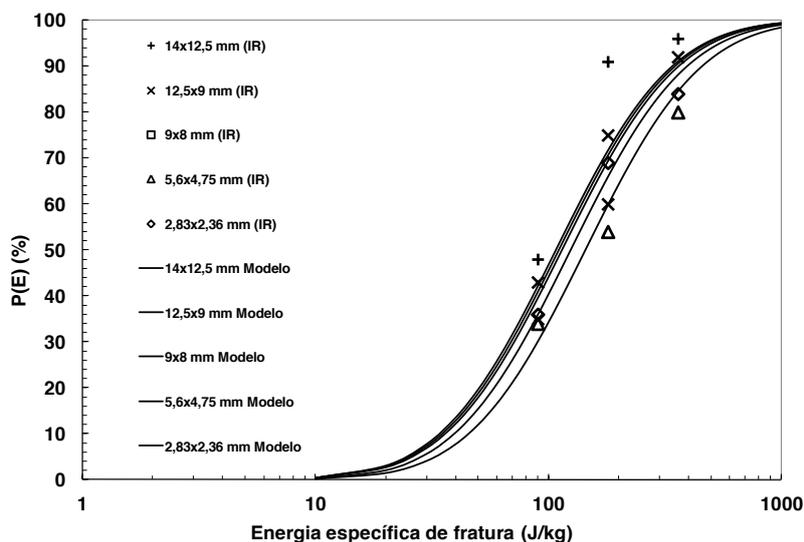


Figura IV-24 – Resultados de ensaios de impactos repetidos (IR) (pontos) de cacos da amostra AM MIX com o modelo (Equação II-7) da distribuição log-normal (linhas).

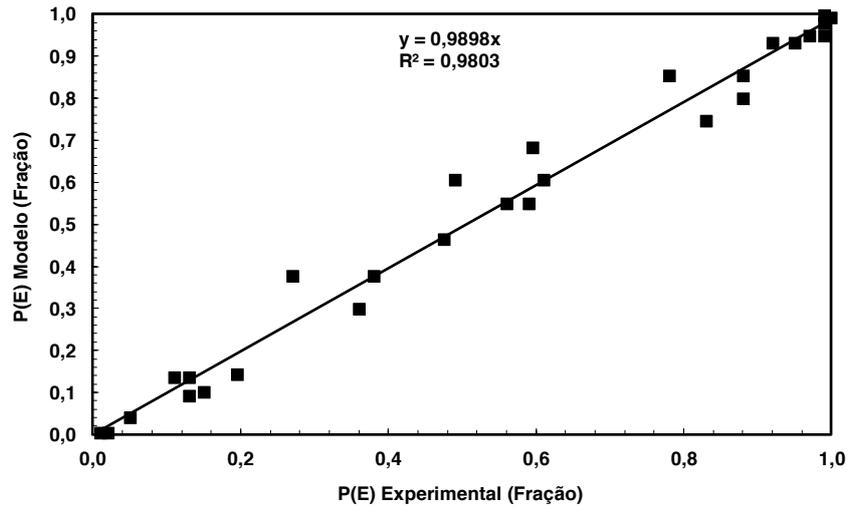


Figura IV-25 – Comparação de dados experimentais de probabilidade de fratura e dados modelados a partir de ensaios de fratura por impactos repetidos para pelotas.

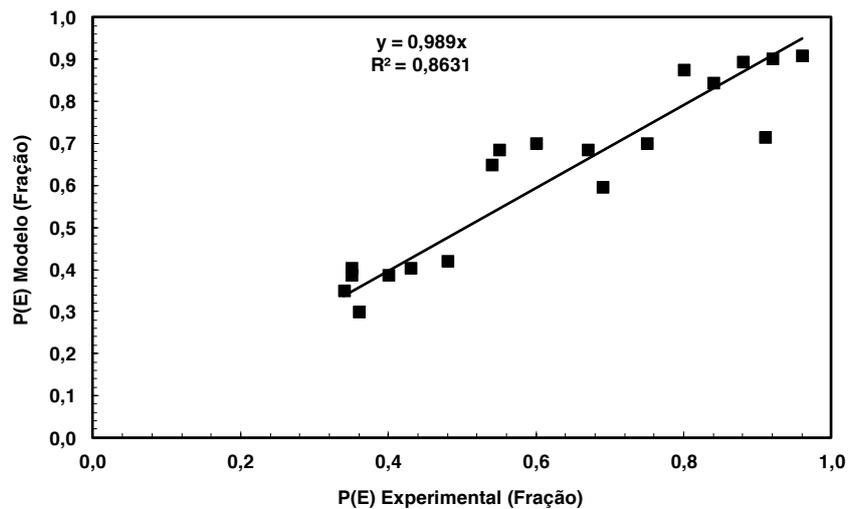


Figura IV-26 – Comparação de dados experimentais de probabilidade de fratura e dados modelados a partir de ensaios de fratura por impactos repetidos para cacos.

A partir dos valores de probabilidade de quebra foi possível modelar o efeito de escala tanto para pelotas quanto cacos (Figura IV-27). Pode-se notar que o efeito do tamanho é muito mais significativo para pelotas bem formadas do que para cacos, enquanto a resistência dos últimos pouco variou com a granulometria.

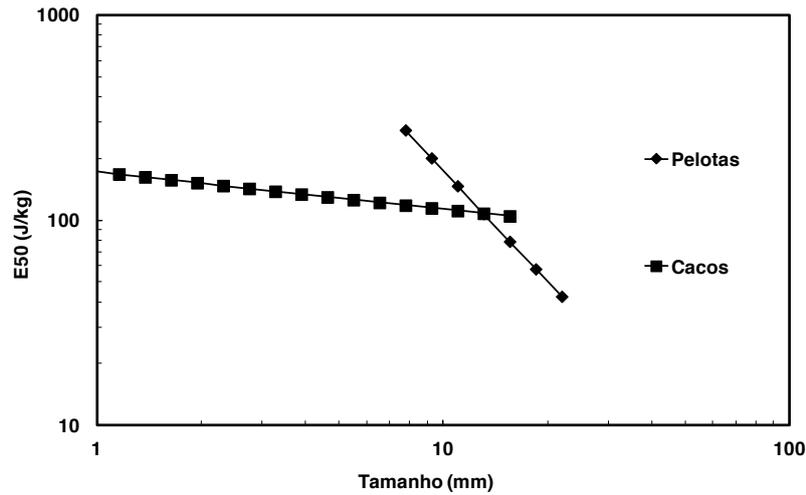


Figura IV-27 – Ilustração do efeito de escala modelado para pelotas e cacos da amostra AM 11.

De maneira análoga ao apresentado na seção III.2.2, seguindo o modelo da Equação II-10, proposta por Tavares (2009), foi possível avaliar o ajuste dos modelos de fragmentação volumétrica a partir dos valores de t_{10} e E_{50} referentes às análises corrigidas, tanto de pelotas (Figura IV-28) quanto de cacos (Figura IV-29).

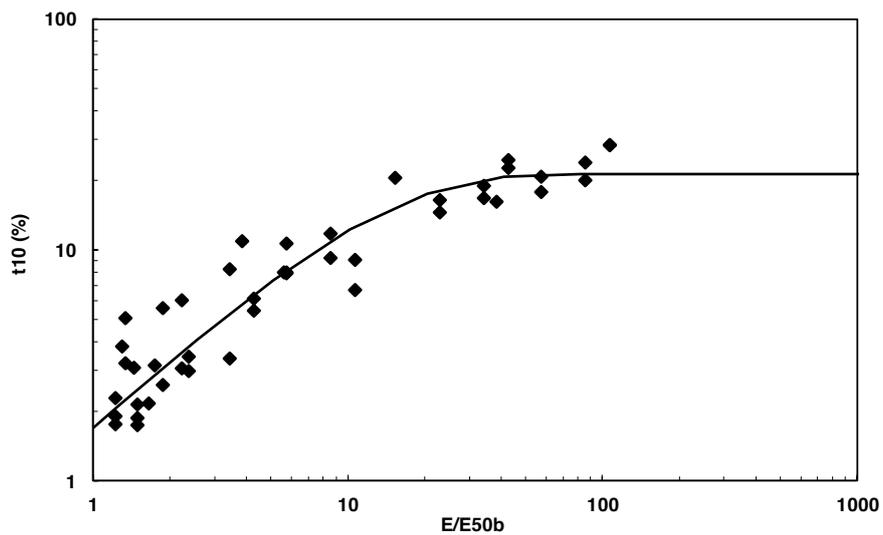


Figura IV-28 – Síntese dos resultados dos ensaios de fragmentação corrigidos de pelotas (pontos) e ajuste do modelo (linha) com base na metodologia da seção II.2.3.1.3.

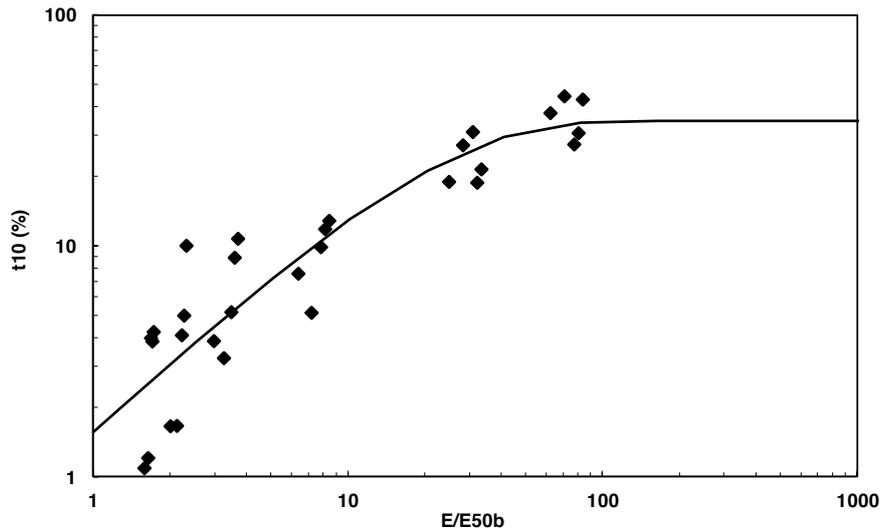


Figura IV-29 – Síntese dos resultados dos ensaios de fragmentação corrigidos de cacos (pontos) e ajuste do modelo (linha) com base na metodologia da seção II.2.3.1.3.

Adicionalmente, como forma de contribuição para a modelagem da quebra por impactos repetidos, foram utilizados resultados de ensaios de impacto simples na avaliação da resposta de pelotas de minério de ferro a diferentes modos de carregamento. Esses ensaios foram realizados segundo duas metodologias distintas:

- Ensaios de queda livre de partículas individuais, usando um sistema análogo àquele mostrado na Figura III-9;
- Ensaios de projeção de partículas individuais, usando o JKRBT (*Rapid Breakage Tester*), desenvolvido na Austrália pelo Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (Shi *et al.*, 2009).

A Figura IV-30 mostra que há certa divergência entre as metodologias. Pode-se notar que, conforme aumenta o número de impactos, a metodologia por impacto duplo tende a prever uma quebra menos intensa em comparação ao método que usa impacto simples. Essa tendência foi observada em diversos dos resultados obtidos, sugerindo a

necessidade do uso exclusivo de dados de impacto simples na modelagem da fragmentação por impactos repetidos.

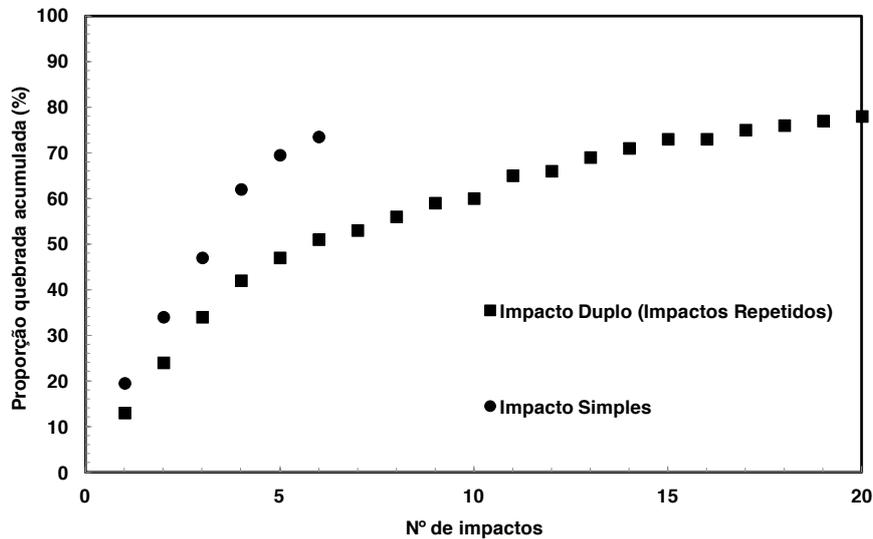


Figura IV-30 – Comparação entre metodologias de avaliação de susceptibilidade à fratura de pelotas para diferentes modos de impacto sob as mesmas condições de energia de impacto (90 J/kg).

A partir desta constatação, o valor do parâmetro gama (γ) da Equação II-11 foi modelado apenas a partir de ensaios de fratura com modo de impacto simples com pelotas de tamanho de 12,5 x 9 mm.

A Figura IV-31 mostra a aderência do modelo aos dados experimentais, tanto de ensaios por impactos simples quanto de impacto duplo.

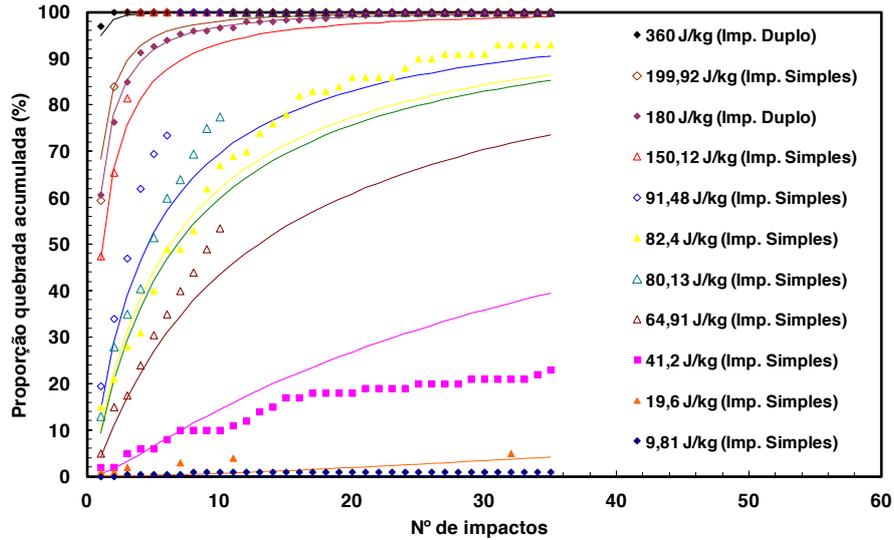


Figura IV-31 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos simples e duplos (pontos) versus os resultados ajustados (linhas), seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002) para pelotas de 12,5 x 9,0 mm, sob diferentes energias de impacto.

Pode-se concluir que as curvas modeladas com um único valor de gama não aderem perfeitamente a todos os dados experimentais. Entretanto como a maioria das curvas se ajustaram aos dados experimentais e também aos modos de impacto simultaneamente, o modelo contempla um único valor de susceptibilidade à fratura para as pelotas.

No caso dos cacos, a susceptibilidade à fratura foi modelada inicialmente para um único valor de gama para os diferentes tamanhos de partícula. Da Figura IV-32 à Figura IV-34 são apresentadas as comparações de aderência do modelo aos dados experimentais. Pode-se afirmar que, no caso dos cacos, um único valor de gama não seria capaz de ajustar o modelo aos dados experimentais.

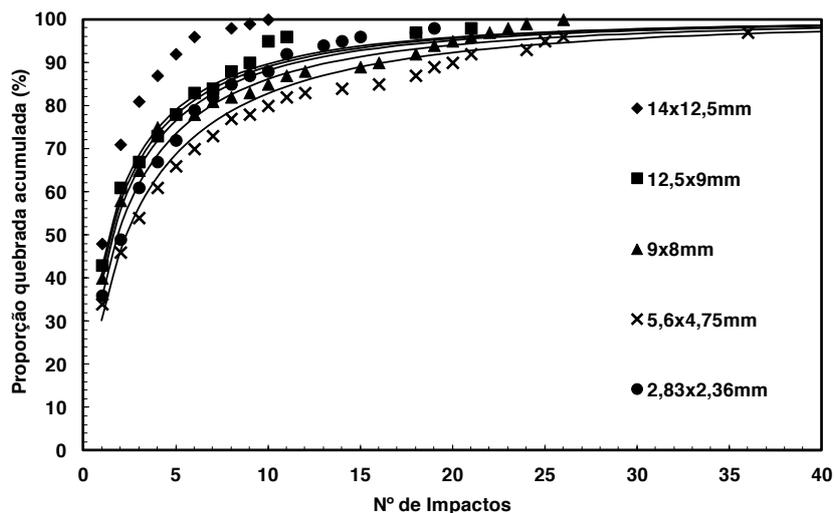


Figura IV-32 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com um valor de gama independente do tamanho de partícula, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (360 J/kg).

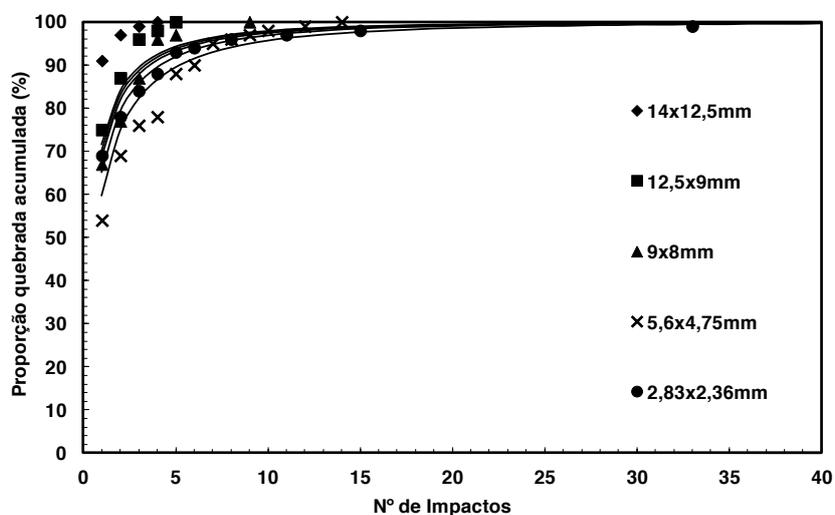


Figura IV-33 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com um valor de gama independente do tamanho de partícula, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (180 J/kg).

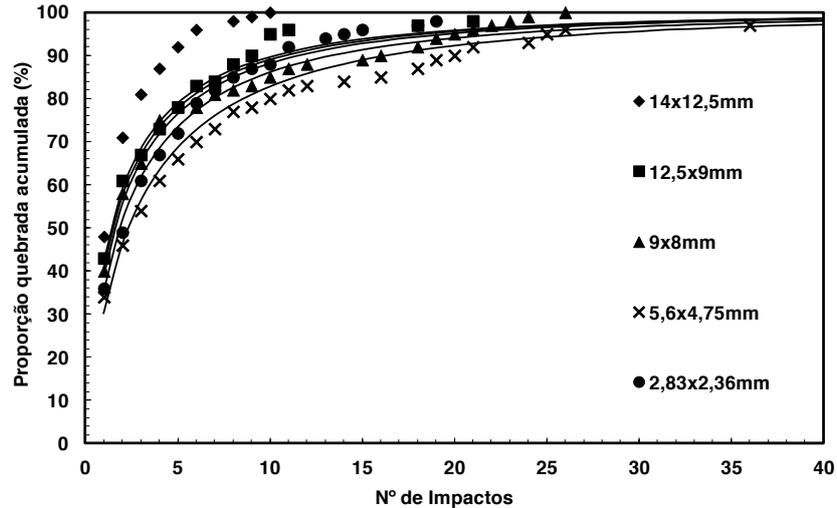


Figura IV-34 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com um valor de gama independente do tamanho de partícula, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (90 J/kg).

Portanto, diferentemente das pelotas, no caso da modelagem da susceptibilidade à quebra dos cacos, como não foi adequado aplicar o modelo com apenas um único valor de gama, houve a necessidade de modelar os valores de gama de acordo com o tamanho dos cacos. Da Figura IV-35 a Figura IV-37 são apresentados os resultados que comparam a aderência deste modelo aos dados experimentais. Pode-se observar que as curvas modeladas se ajustaram adequadamente aos dados experimentais, fazendo com que o modelo de susceptibilidade à fratura para cacos seja influenciado pelo tamanho do caco.

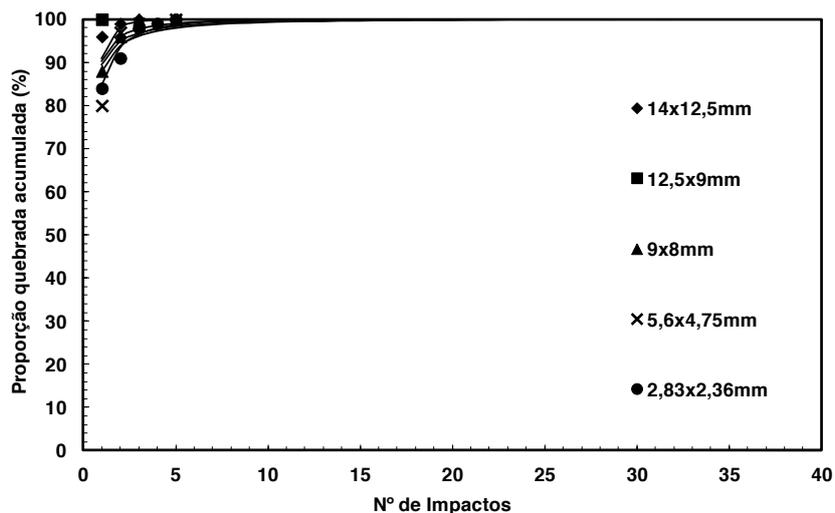


Figura IV-35 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com valores de gama variáveis com o tamanho, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (360 J/kg).

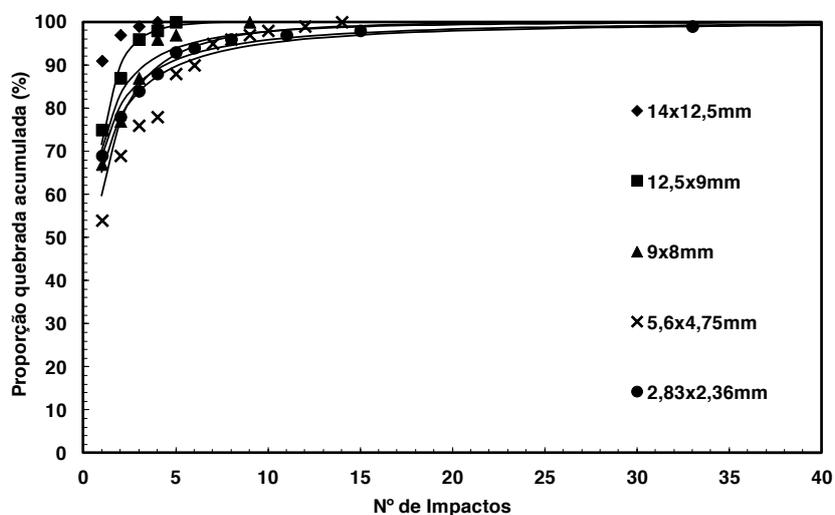


Figura IV-36 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com valores de gama variáveis com o tamanho, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (180 J/kg).

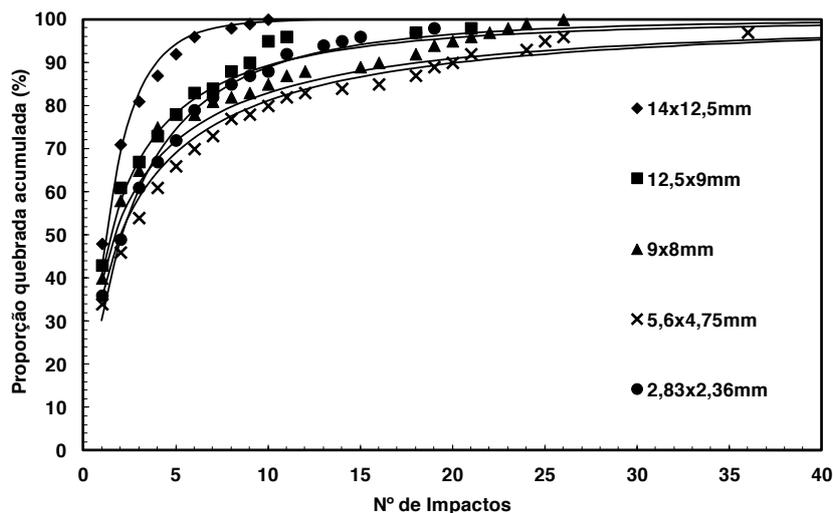


Figura IV-37 – Resultados experimentais de ensaios de fratura por impactos repetidos (seção III.1.3.2) de diferentes tamanhos cacos (pontos) versus curvas ajustadas (linhas), com valores de gama variáveis com o tamanho, seguindo o modelo de dano (Tavares e King, 2002), da amostra AM MIX, sob uma mesma condição de energia de impacto (90 J/kg).

IV.4 Modelagem da quebra superficial de pelotas e cacos a partir de ensaios de autofratura

Baseado na hipótese de que a resistência da pelota varia com a energia de impacto, o modelo de quebra superficial também foi alterado a partir de dados de ensaios de fratura por impactos repetidos, nos quais o modo de impacto fosse simples (ensaios de queda livre) sobre uma superfície de aço.

Estes ensaios, denominados de ensaios de autofratura, foram conduzidos para as amostras de pelota, AM11 e AM MIX, para diferentes alturas de queda, correspondendo a diferentes valores de energia de impacto.

Os ensaios de autofratura de baixa energia foram utilizados para medir a taxa de abrasão por impacto simples a partir da variação de perda mássica por impacto por pelota, pelo fato dele ser um ensaio de baixa complexidade, porém extremamente laborioso. Nestes ensaios foram tomados, como parte do procedimento experimental,

cuidados adicionais para que fosse possível medir de forma mais direta a taxa de geração de finos por impacto. Um destes cuidados foi de identificar individualmente as pelotas, registrando a cada ciclo de impacto em que as pelotas eram submetidas, a variação da massa de cada uma das pelotas que não quebraram por meio da pesagem das mesmas numa balança analítica. Isso permitiu estimar a taxa de perda mássica, ou seja, a proporção de finos gerados por abrasão para cada uma das energias de colisão analisadas, por impacto.

A metodologia dos ensaios consistiu de:

1. Preparação de lote de 100 pelotas contidas na faixa de 12,5 x 9 mm;
2. Pesagem individual de cada pelota em balança analítica com precisão de 1 mg;
3. Realização de um ciclo de impacto por queda livre sobre uma placa de aço a partir de uma determinada altura, de cada uma das 100 pelotas do lote;
4. Pesagem de cada pelota em balança analítica pós o 1º impacto;
5. Realização da etapa 3 seguida da etapa 4 para o 2º, 3º, 4º e 5º impactos;
6. Realização da etapa 3 seguida da etapa 4 para o 10º, 15º, 20º, 25º, 30º, 35º e 40º impactos;
7. Cálculo da taxa de perda mássica por impacto para todos os 40 impactos.

A Figura IV-38 mostra os resultados brutos referente às perdas mássicas por impacto medidas após determinados ciclos de impacto, como descrito na metodologia. Pode-se notar que a taxa de perda mássica é mais alta nos primeiros impactos, tendendo a estabilizar após o 10º impacto.

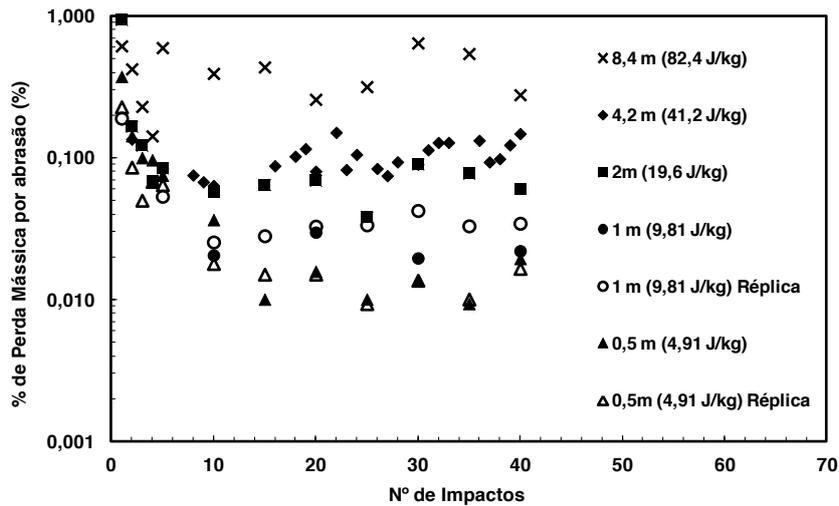


Figura IV-38 – Valores experimentais de taxas de perda mássica após diferentes números de impactos para os diferentes ensaios de autofratura de pelotas.

Como discutido na seção IV.1, houve também necessidade de desenvolver paralelamente um modelo de quebra superficial para cacos da mesma maneira que a metodologia adotada para pelotas.

Pelo fato da disponibilidade de cacos para a realização dos ensaios de autofratura ser limitada, o modelo de abrasão para cacos baseou-se em um número pequeno de ensaios, porém cuidadosamente conduzidos.

Por fim, a Figura IV-39 mostra o ajuste de uma equação do tipo potência aos resultados experimentais das taxas de abrasão de pelotas e cacos obtidos a cada uma das energias de impacto dos ensaios.

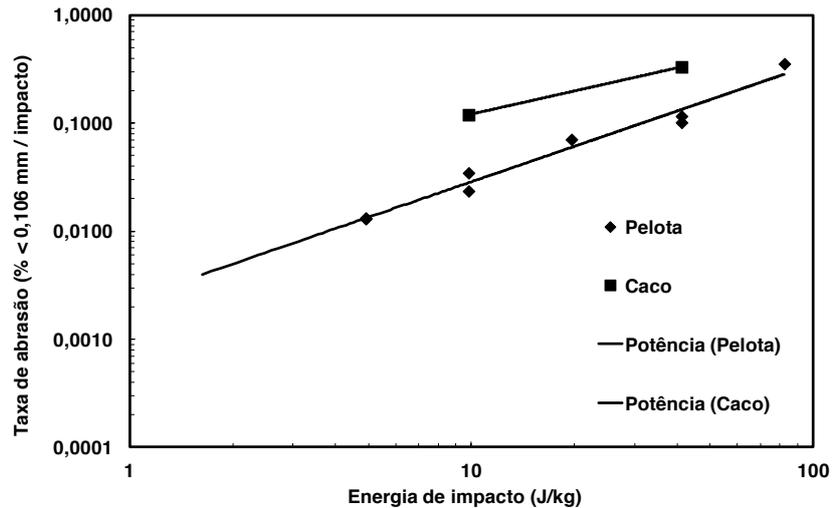


Figura IV-39 - Modelo de quebra de pelotas por abrasão desenvolvido a partir de dados experimentais de impacto simples.

Um aspecto interessante do modelo é que ele permite identificar uma transição suave entre o mecanismo da fragmentação por abrasão e a fratura, pois, à medida que aumenta a energia de impacto, aumenta a taxa de abrasão até o ponto que partículas passam a sofrer fratura (perda de 10% de massa em um impacto).

De maneira semelhante ao que foi investigado na seção III.2.3, o produto de abrasão correspondente ao ensaio de autofratura de pelotas a uma altura de 0,5 metros também foi analisado em Malvern (Figura IV-40).

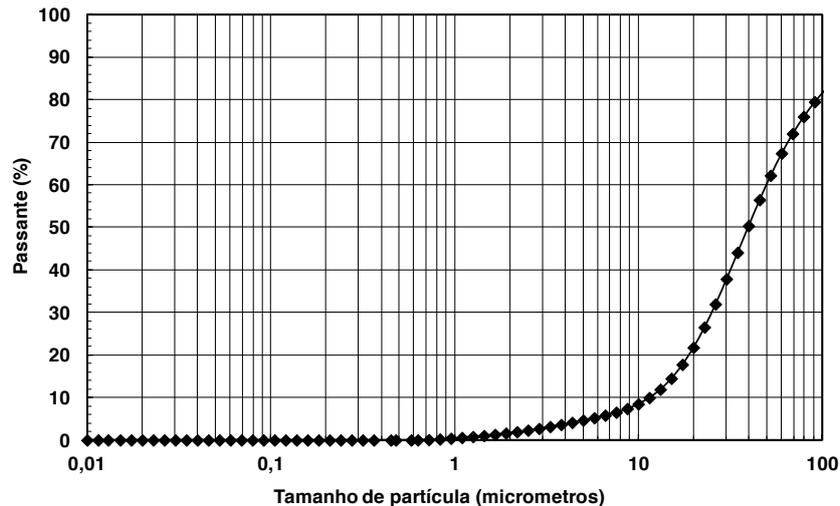


Figura IV-40 – Análise granulométrica dos finos (material < 0,106 mm) em Malvern referente ao ensaio de autofratura de 0,5 metros da amostra AM MIX.

Pela semelhança entre essas distribuições e aquela referente ao “*pellet feed*”, pode-se presumir que a fragmentação por abrasão é responsável essencialmente à quebra das ligações das pontes líquidas (mecanismo de desagregação). Com isso, diferentes suscetibilidades à fragmentação por abrasão resultariam de diferentes níveis de coesão entre as partículas primárias alimentadas ao disco de pelotamento. Essas hipóteses deverão ser estudadas em maior detalhe no futuro.

IV.5 Modelagem do ambiente mecânico utilizando o DEM

Na formulação e proposta original do modelo, a energia de impacto sobre uma pelota era considerada como equivalente à energia potencial da mesma em queda livre. Embora uma correção tivesse sido incorporada já à versão original do modelo, levando em conta o fato que, em um impacto envolvendo pelotas, a energia cinética é repartida igualmente entre duas pelotas (Tavares e Carvalho, 2011), o modelo não levava em consideração que a energia de impacto seria repartida em um número maior de colisões.

Para isso foi proposto realizar algumas simulações de um evento de queda de uma pelota sobre um leito de pelotas para diferentes alturas de queda utilizando o software EDEM[®]. Este software é baseado no Método dos Elementos Discretos (*Discrete Element Method*), desenvolvido pela *DEM Solutions* (Edimburgo, Escócia), e foi projetado para simular e analisar o movimento de partículas dentro de processos industriais.

Neste software, é possível criar um modelo de sistema de sólidos granulares a partir da calibração de alguns parâmetros relacionados às propriedades físicas do material e aos contatos físicos. A grande vantagem da utilização deste software é que, desde que valores realistas dos parâmetros do material e dos contatos físicos sejam usados, é possível obter valores das energias envolvidas nas colisões muito realistas.

O principal modelo usado para descrever os contatos usados no EDEM[®] é o de Hertz-Mindlin, o qual caracteriza os contatos entre as partículas e as geometrias usando três parâmetros, que são o coeficiente de restituição, o coeficiente de atrito estático e o coeficiente de rolamento (Figura IV-41).

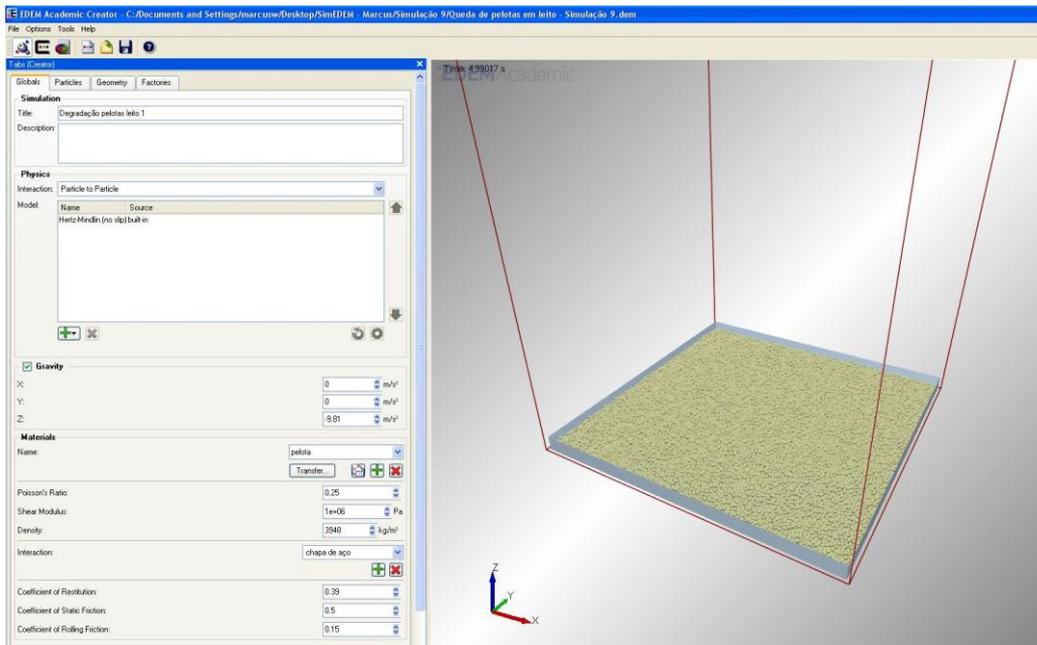


Figura IV-41 - Interface do software EDEM[®] mostrando à esquerda a entrada de parâmetros do material e de contato físico para simulação.

A fim de determinar os parâmetros de contato físico das pelotas para uso no modelo do EDEM[®], foram realizados alguns testes de calibração para determinar o coeficiente de restituição e o coeficiente de atrito estático (Tavares *et al.*, 2012). Os parâmetros utilizados para as simulações são apresentados na Tabela IV-2.

Tabela IV-2 - Parâmetros utilizados nas simulações no EDEM[®]

Parâmetro do Material	Pelota	Aço
Coeficiente de Poisson	0,25	0,3
Módulo de cisalhamento (Pa)	1×10^6	7×10^{10}
Densidade (kg/m^3)	4130	7800
Parâmetro de Contato	Aço/Pelota	Pelota /Pelota
Coeficiente de Restituição	0,39	0,2
Coeficiente de Atrito Estático	0,50	0,6
Coeficiente de Atrito de Rolamento	0,15	0,4

A seguir, foi possível simular o ensaio de manuseio pelo *software* EDEM[®] (Figura IV-42) a fim de estimar os valores de energia de impacto das colisões.

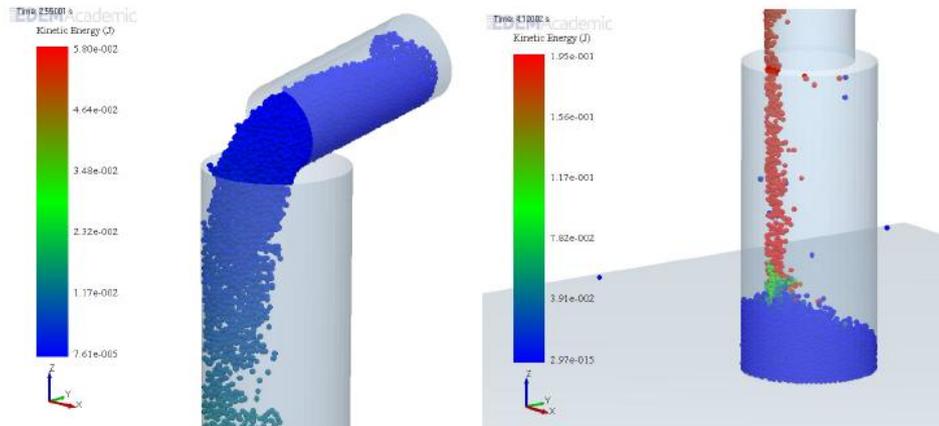


Figura IV-42 – Interface do software EDEM[®] mostrando a simulação do ensaio de manuseio realizado no LTM/COPPE (seção III.1.4).

IV.6 Modelo modificado para pelotas e cacos

Após todas as adequações e observações realizadas a partir da versão original do modelo de degradação (Tavares e Carvalho, 2011) (Figura IV-43), o modelo chegou a sua versão modificada, adaptada às pelotas de minério de ferro, como é demonstrado na Figura IV-44.

É importante ressaltar que, dentre todas as modificações propostas ao modelo adaptado, foi atribuído como observação adicional às restrições deste, que quando uma pelota sofre quebra esta deixa de existir e torna-se um caco, alterando sua característica de fragmentação, ressaltando que o inverso não ocorre.

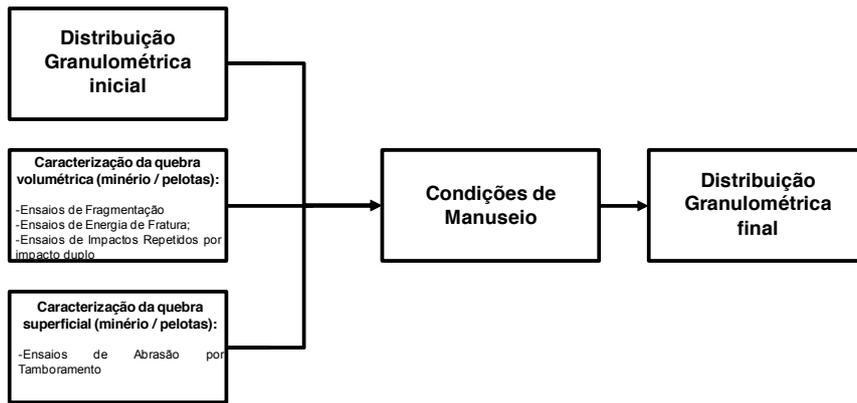


Figura IV-43 – Diagrama esquemático da versão original do modelo de degradação de minérios durante o manuseio de Tavares e Carvalho, 2011.

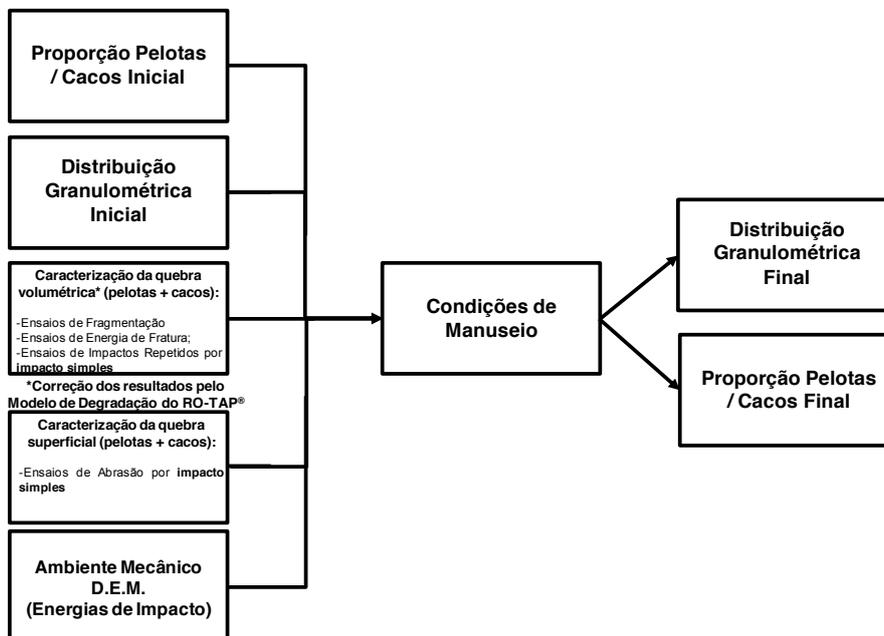


Figura IV-44 – Diagrama esquemático da versão modificada do modelo de degradação durante o manuseio para pelotas de minério de ferro.

Com isso a equação original do modelo de Tavares e Carvalho (2011) (Equação II-18) se transforma em

$$w_{i,n+1} = \left\{ w_{i,n} [1 - F_{i,n}(eE_{k,n})] (1 - \kappa_i(E_{k,n})) + \sum_{j=1}^i w_{j,n} [F_{j,n}(eE_{k,n}) b_{ij}(eE_{k,n}) + \kappa_j(E_{k,n}) [1 - F_{j,n}(eE_{k,n})] a_{ij}] \right\}_{\text{pelota}} + \left\{ w_{i,n} [1 - F_{i,n}(eE_{k,n})] (1 - \kappa_i(E_{k,n})) + \sum_{j=1}^i w_{j,n} [F_{j,n}(eE_{k,n}) b_{ij}(eE_{k,n}) + \kappa_j(E_{k,n}) [1 - F_{j,n}(eE_{k,n})] a_{ij}] \right\}_{\text{caco}}$$

Equação IV-1

na qual, assim como na Equação II-18, $w_{i,n}$ e $w_{i,n+1}$ são a fração retida do material, pelota ou caco, contido na classe de tamanho i antes e depois do n -ésimo impacto, e é a fração da energia de impacto (fornecida pelo *software* EDEM[®]) absorvida pelas pelotas individualmente durante o evento de colisão e $F_{i,n}(eE_k)$ é a probabilidade de que uma pelota ou caco pertencente à classe de tamanho i irá quebrar quando absorver uma energia eE_k de um impacto.

Adicionalmente, é importante lembrar que diferentemente da versão anterior do modelo, o termo κ_i (Equação II-19), que se refere à taxa de geração de finos por abrasão em cada impacto, se distingue em sua aplicação para pelotas e cacos (Figura IV-39), sendo ainda dependente da energia de impacto.

IV.7 Aplicação do modelo modificado à previsão do manuseio em laboratório

A partir dos resultados experimentais do ensaio de manuseio (seção III.1.4) foi possível simular o experimento utilizando as modificações adotadas no modelo aprimorado, com o objetivo de avaliar a sua aderência (Figura IV-45).

Observa-se que o modelo modificado foi capaz de prever muito fielmente as distribuições granulométricas referentes a cada impacto. Isso é particularmente verdadeiro para as faixas grossas.

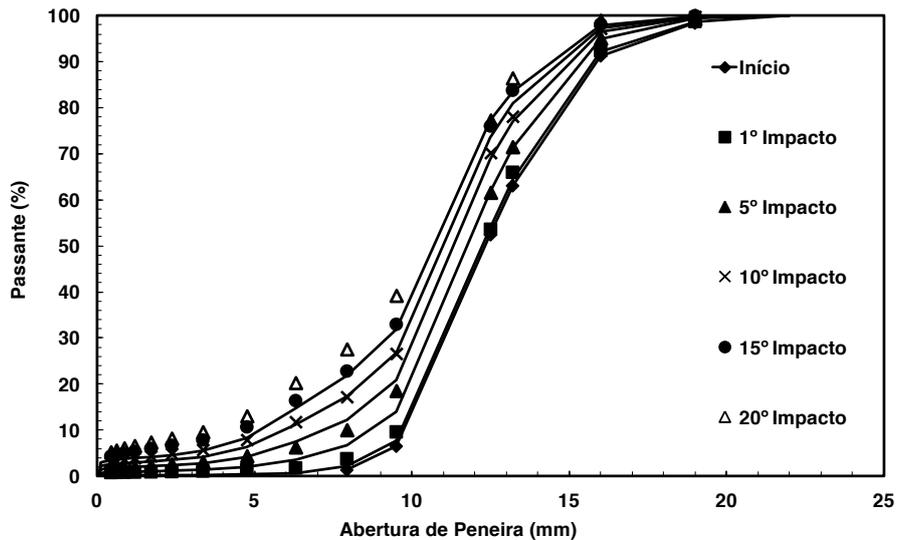


Figura IV-45 – Comparação entre distribuição granulométrica medidas (símbolos) e simuladas (linhas) com a versão do modelo já modificado em função do número de impactos no ensaio de manuseio LTM/COPPE.

Um ponto interessante a ser testado na versão modificada do modelo é a sua capacidade de prever a proporção de cacos e pelotas com o número de quedas. Sendo assim, como método de avaliação, foi realizado o levantamento da evolução da proporção de cacos e pelotas do ensaio de manuseio (Figura IV-46) para posterior simulação com a versão do modelo modificado (Figura IV-47). Observa-se que o modelo conseguiu prever com muita precisão a evolução da proporção de cacos e pelotas ao longo dos sucessivos impactos.

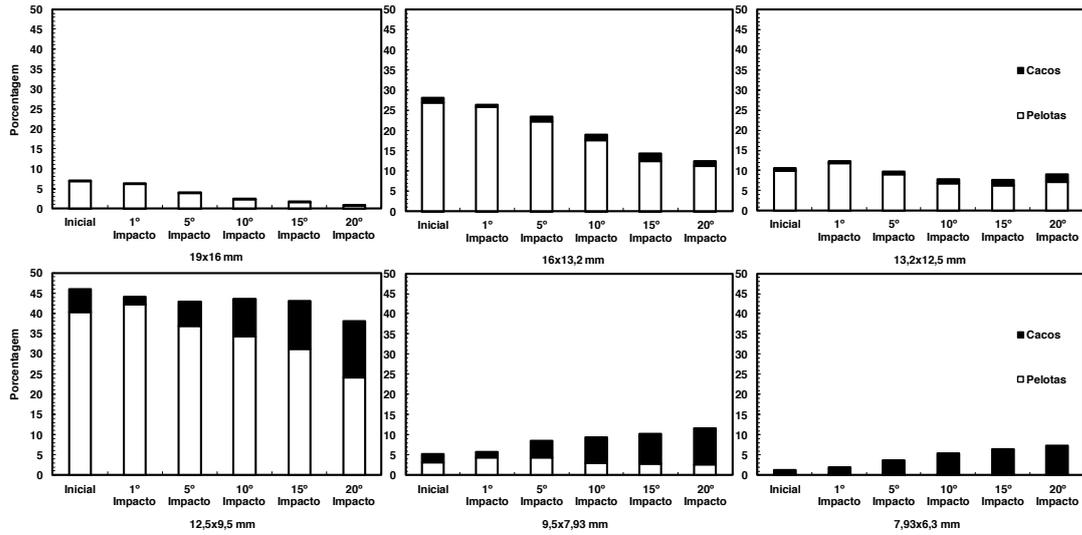


Figura IV-46 – Evolução da proporção de pelotas e cacos por faixas de tamanho a partir de dados experimentais do ensaio de manuseio LTM/COPPE.

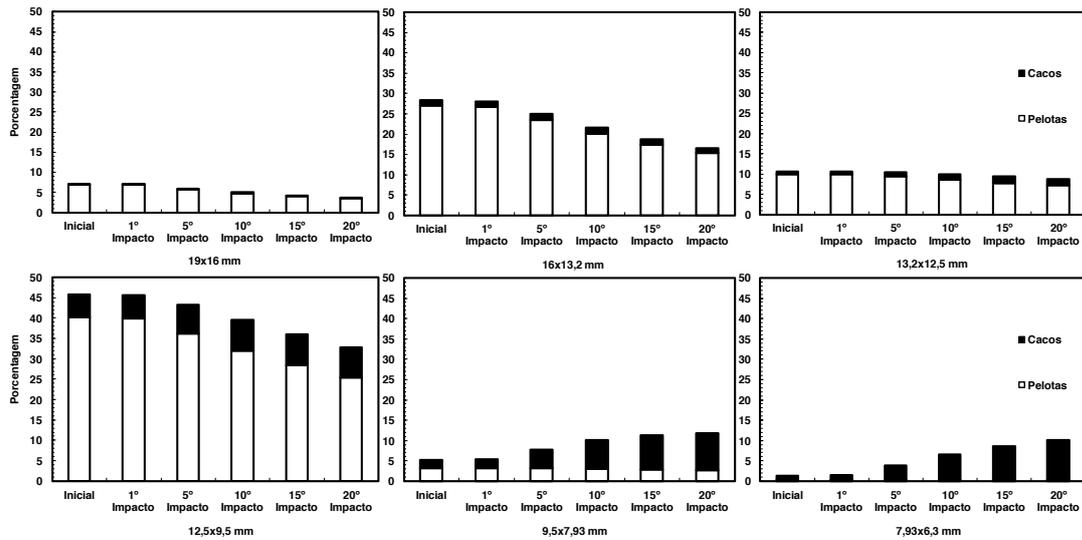


Figura IV-47 – Evolução da proporção de pelotas e cacos por faixa de tamanho obtida a partir de dados simulados do ensaio de manuseio LTM/COPPE.

Adicionalmente, outra forma de interpretação da evolução do fenômeno de degradação sobre as pelotas é através da análise do número de pelotas remanescentes durante todo processo de manuseio. A Figura IV-48 mostra o decréscimo da fração

mássica de pelotas sobreviventes ao longo dos impactos durante o ensaio de manuseio comparado à previsão do modelo modificado com aproximadamente 99% de aderência.

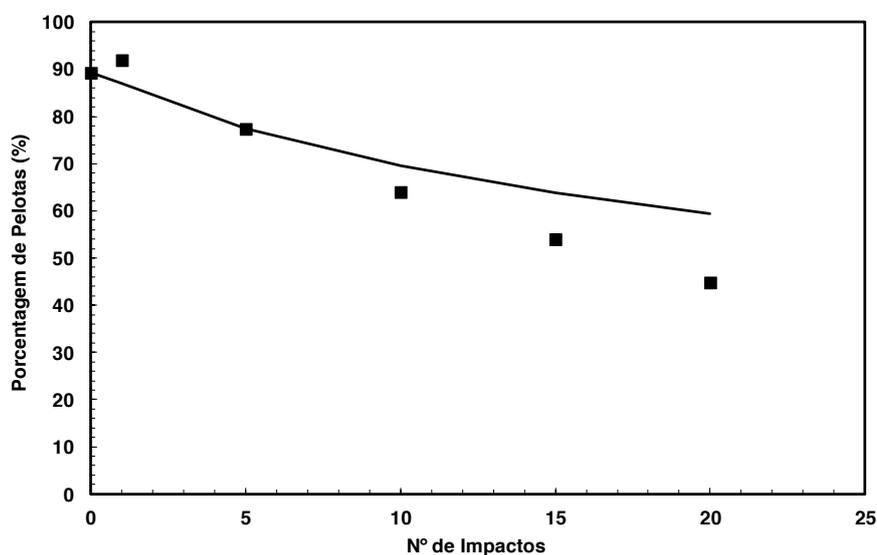


Figura IV-48 – Comparação entre previsões usando o modelo modificado (linha) e resultados experimentais (símbolos) da porcentagem de pelotas remanescentes em função do número de impactos no ensaio de manuseio LTM/COPPE.

É importante ressaltar que o dado experimental referente ao primeiro impacto, estranhamente aponta um ganho de quantidade de pelota, porém este fato pode ser atribuído à subjetividade de interpretação durante a classificação de pelota e caco (seção IV.1) durante o ensaio de manuseio.

Todas estas evidências atestam para um grande potencial do modelo em prever resultados de degradação sob as condições semelhantes àquelas normalmente encontradas durante as operações de manuseio e transporte de pelotas desde a usina produtora até o forno do usuário.

V. CONCLUSÕES

O trabalho primeiramente foi capaz de demonstrar a inadequação do modelo de Tavares e Carvalho (2011) na sua versão original na descrição da degradação de pelotas de minério de ferro, evidenciado pelos grandes desvios entre os resultados de um ensaio de manuseio em laboratório e as previsões obtidas com o modelo.

Não menos importante, também foi observado que a versão original do modelo não contemplava uma avaliação fiel da mecânica envolvida durante o processo de manuseio para a quebra volumétrica. Por exemplo, a calibração do modelo que descreve a susceptibilidade à quebra era realizada através de uma metodologia baseada no impacto duplo e não simples, como é o caso dos impactos que predominam durante o manuseio. Além disso, o ambiente mecânico com que as pelotas interagem, poderia ser melhor descrito com o auxílio de um método de elementos discretos através do *software* EDEM[®].

Uma metodologia foi proposta para a correção dos resultados de análise de fragmentação obtidos pelo uso do peneiramento mecânico no Ro-Tap[®], o qual identificou-se ser responsável por significativa degradação dos fragmentos, com a geração de finos.

Modificações foram ainda realizadas no modelo da quebra superficial (abrasão), com a incorporação da influência da energia de impacto na proporção de finos gerados.

De maneira geral, as hipóteses levantadas quanto à aplicação do modelo original à degradação das pelotas contribuíram significativamente para sua evolução. Assim, observou-se que, em sua versão modificada, o modelo foi capaz de descrever com grande fidelidade os resultados obtidos no ensaio de manuseio em laboratório. Dessa forma, essa versão do modelo tem potencial de se tornar uma importante ferramenta na

tomada de decisão de possíveis modificações para os atuais sistemas de manuseio de pelotas utilizados na indústria.

A capacidade do modelo de distinguir entre pelotas e cacos é de grande relevância na sua aplicação industrial, pois permitirá ao usuário antever possíveis problemas metalúrgicos durante os processos de redução provocados pela alimentação de cacos nos fornos. Isto pode ser afirmado porque, de maneira geral, os cacos são mais susceptíveis à quebra quando carregados durante as operações de redução, devido à suas características fragmentativas. Adicionalmente os cacos são partículas de formato irregular, o que favorece um maior empacotamento da carga, diminuindo a permeabilidade dos gases redutores, que por fim prejudica a operação deste processo.

V.1 Recomendações para trabalhos futuros

Tendo em vista o grande potencial de uso do modelo, este pode ser aplicado a condições industriais de operação de manuseio para futura validação em campo.

O modelo possui um campo a ser explorado no que diz respeito à investigação da influência da composição mineralógica, composição química, metalúrgica e intemperismo nas propriedades fragmentativas de pelotas. Isso permitirá a compreensão do seu efeito na resistência de pelotas às operações de manuseio e transporte.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRIOS, G. K. P., 2010, Estudo da quebra de leitos de partículas aplicado à modelagem generalizada da cominuição. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- DWARAPUDI, S., DEVI, T. U., MOHAN RAO, S., RANJAN, M., 2008, Influence of pellet size on quality and microstructure of iron ore pellets, *ISIJ International*, v. 48, nº 6, 768–776.
- FAGERBERG, F., SANDBERG, N., 1973, Degradation of lump ores in transport, *Proc. of 2nd Int. Symp. On Transportation and Handling of Minerals*, Rotterdam, Netherlands, v. 2, 128–156.
- FIGUEIRA, R.M., CASTRO, L. F. A., TAVARES, R. P., 1985, *Princípios Básicos e Processos de Fabricação do Gusa ao Aço Líquido*, Belo Horizonte: Escola de Engenharia – UFMG.
- FONSECA, V.O., 2003, Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT da Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais.
- FUERSTENAU, M. C., HAN, K. N., 2003, *Principles of mineral processing*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME).
- GARIGLIO, E., KLEIN, M., 1996, *Pelotização de Minérios de Ferro*, CIA Vale do Rio Doce, Brasil.
- GOODWIN, P. J., RAMOS, C. M., 1985, Design of belt conveyors in bulk terminal applications, *Bulk Solids Handling* 5 (6), 1061–1066.
- GOODWIN, P.J., RAMOS, C. M., 1987, Degradation of sized coal at transfer points, *Bulk Solids Handling* 7 (4), 517–534.
- KING, R. P., 2001, *Modeling and simulation of mineral processing systems*, Butterworth-Heinemann.

- MEYER, K., 1980, Pelletizing of Iron Ores, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Germany.
- NAPIER-MUNN, T.J., MORRELL, S., MORRISON, R.D., KOJOVIC, T., 1996, Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization, University of Queensland, Brisbane.
- NORGATE, T.E., TOMPSITT, D.F., BATTERHAM, R.J., 1986, Computer simulation of the degradation of lump ores during transportation and handling, 2nd Int. Conf. of Bulk Material Storage, Handling and Transportation, Wollongong, Australia, pp.89–93.
- OOSHIMA, T., KURIHARA, J., HAYASE, K., SATOO, Y., 1981, Minimization of degradation of sintered ore during transportation, 3rd International Symposium on Agglomeration, Nuremberg, Germany, 1112 – 1124.
- PENA, E. Q., 2011, Operações de Pelotização, In: Curso de Especialização em Sistemas Mínero-Metalúrgicos, Valer/Vale/Fundação Gorceix, Ouro Preto, Minas Gerais.
- SÁ, K. G., COSTA, G. M., VIEIRA, C. B., 2004, Efeito da composição mineralógica na resistência à compressão de pelotas de minério de ferro, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.1, n.2, p. 18–22.
- SAHOO, R. K., WEEDON, D. M., ROACH, D., 2002, Experimental study of several factors effecting Gladstone Port Authority's lump degradation, Bulk Solids Handling, v. 22, 356–361.
- SAHOO, R. K., WEEDON, D. M., ROACH, D., 2003, Effect of different types of impact surface on coal degradation, 4th Int. Conf. for Conveying and Handling of Particle Solids, May 26–31, Budapest, Hungary, v. 1, 8.45–8.50.
- SAHOO, R., 2007, Degradation characteristics of steel making materials during handling, Powder Technology, v. 176, 77–87.
- SAHOO, R., ROACH, D., 2003, Degradation modeling of Central Queensland weathered coal, 12th Int. Conf. on Coal Science, Cairns, Australia, 1–10.

- SAHOO, R., ROACH, D., 2005, Quantification of lump coal breakage during handling operation at the Gladstone port, *Chemical Engineering and Processing*, v. 44, 797–804.
- SHI, F.S., KOJOVIC, T., LARBI-BRAM, S., MANLAPIG, E. 2009. Development of a rapid particle breakage characterization device – the JKRBT, *Minerals Engineering*, v. 22, 602-612.
- SINFERBASE, 2010, Relatório Sinferbase/USGS/DNPM, Novembro 2010, Sindicato Nacional da Indústria da Extração de Ferro e Metais básicos, Brasil. Acessado em 11 de março de 2011, <http://sinferbase.com.br/relatorios.php>.
- TAVARES, L.M., 2004, Optimum routes in particle breakage by impact, *Powder Technology*, v. 142, 81–91.
- TAVARES, L.M., 2009, Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation, *Powder Technology*, v.190, 327–339.
- TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M., 2007, Impact work index prediction from continuum damage modeling of particle fracture, *Minerals Engineering* 20, 1368–1375.
- TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M., 2008, Modeling iron ore degradation during handling, 3rd International International Meeting on Ironmaking and 2nd International Symposium on Iron Ore, September 22–26, São Luís City – Maranhão State – Brazil.
- TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M., 2009, Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills, *Minerals Engineering* 22, 650–659.
- TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M., 2011, Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics, *International Journal of Mineral Processing*, , v. 101, p. 21-27.
- TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M., BARRIOS, G.K.P., KWADÉ, A., 2012, Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling (em preparação).

- TAVARES, L.M., KING, R.P., 1998, "Single particle fracture under impact loading", *International Journal of Mineral Processing*, v. 54, p. 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, 138-146 .
- TAVARES, L.M., LIMA, A.S., 2006, Célula de carga de impacto na caracterização de materiais para a cominuição. Parte 2: Fratura de partículas, *Revista da Escola de Minas de Ouro Preto*, v. 59(2), p. 165-172.
- TAVARES, L. M., SILVEIRA, M.A.C.W., 2008. Comparison of measures of rock crushability. In: Meftuni Yekeler. (Org.). *Fine Particle Technology and Characterization*. Kerala: Research Signpost, p. 1-20.
- TEO, C. S., WATERS, A. G., 1988, The effect of drop height and particle size on the extent of degradation of agglomerates, *CHEMECA'88, Australian Biocentennial Int. Conf. for the Process Industries*, Sydney, 665-670.
- TEO, C. S., WATERS, A. G., NICOL, S. K., 1990, Quantification of the brakeage lump materials during handling operation, *International Journal of Mineral Processing*, v. 30, 159-184.
- THE BRITISH NATIONAL COAL BOARD, 1964, Bunker design to reduce coal degradation, Unpublished report
- VINCE, A., MAHONEY, M., WATERS, A.G., 1987. An evaluation of the factors affecting the degradation of Mt. Newman lump ore, Internal report.
- WAGNER, D. T., ROUCO, H. V., GOMES, O. F. M., PACIORNIK, S., VIEIRA, M. B., 2009, Caracterização de pelotas de minério de ferro por microscopia digital e análise de imagens, *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, v.5, n.4, p. 215-218.

WEEDON, D. M., WILSON, F., 2000, Modeling iron ore degradation using a twin pendulum breakage device, *International Journal of Mineral Processing*, v. 59, 195–213.

VII. APÊNDICE

VII.1 Modelo matemático da degradação por peneiramento no Ro-Tap[®]

A partir de resultados seguindo o procedimento descrito na seção IV.2 foi feita uma modelagem do Ro-Tap[®] baseando-se nas definições de função quebra e função classificação (tradicionalmente utilizadas na modelagem matemática de britadores cônicos), de maneira a prever a influência dessa operação de peneiramento, realizada sob condições padronizadas, na distribuição granulométrica do produto.

O modelo pode ser descrito de forma sintética pela expressão

$$W_i^* = \sum_{j=1}^i W_j b_{ij} (1 - C_j) \quad \text{Equação VII-1}$$

onde W_i^* é a fração de massa retida no tamanho i após peneiramento no Ro-Tap[®], W_i é a fração de massa retida no tamanho i antes do peneiramento (representada pelo peneiramento manual), b_{ij} é a função quebra distribuída relativa à operação do Ro-Tap[®] e C_j é a função classificação do Ro-Tap[®].

A modelagem da função quebra distribuída do Ro-Tap[®] (Equação VII-2) foi realizada através da função quebra cumulativa (Equação VII-3) que utiliza o modelo empírico baseado no princípio em que a população de fragmentos é composta da mistura de duas populações distintas, uma gerada pelos esforços de compressão (primeiro termo da soma) e a outra gerada pelos esforços de tração (segundo termo da soma) (Tavares, 2005).

$$b_{ij} = B(D_{i-1}; D_j) - B(D_i; D_j) \quad \text{Equação VII-2}$$

onde B é a função quebra cumulativa descrita pela equação:

$$B_{ij} = K \left(\frac{x}{y} \right)^{n_1} + (1 - K) \left(\frac{x}{y} \right)^{n_2} \quad \text{Equação VII-3}$$

onde x é o tamanho de partícula em que a proporção de partículas resultantes da quebra de partículas de tamanho representativo y é passante e K , n_1 e n_2 são parâmetros da função quebra cumulativa.

Para a modelagem da função classificação do Ro-Tap[®] (C_j) foi utilizado o modelo de Rosin-Rammler descrito pela seguinte equação (Tavares, 2005):

$$C_j = A \left[1 - \exp \left(-0,693 \left(\frac{x_j}{B} \right)^C \right) \right] \quad \text{Equação VII-4}$$

onde x_j é o tamanho de partícula e A , B e C são parâmetros da função classificação.

Os parâmetros das Equações VII-3 e VII-4 foram estimados simultaneamente para o conjunto de dados, sendo os parâmetros ótimos listados na Tabela VII-1 e na Tabela VII-2. A Figura VII-1 e a Figura VII-2 ilustram as funções quebra e seleção resultantes, respectivamente. A Figura VII-1, com dois segmentos de reta, o último aproximadamente paralelo ao eixo das abscissas, é típico da fragmentação por abrasão, que é certamente o mecanismo de fragmentação predominante na degradação produzida pelo peneirador Ro-Tap[®]. A função classificação, por outro lado, se caracteriza por baixos valores (inferiores a 4% no intervalo de interesse das pelotas), que mostra que

apenas uma pequena proporção dos cacos sofre degradação no Ro-Tap[®]. Além disso, a Figura VII-1 também mostra que cacos com tamanhos maiores são mais suscetíveis à degradação no Ro-Tap[®].

Tabela VII-1 – Parâmetros da função quebra cumulativa do Ro-Tap[®].

Parâmetro	Valor
K	0,9972
n_1	6,7007
n_2	0,0340

Tabela VII-2 – Parâmetros da função classificação do Ro-Tap[®].

Parâmetro	Valor
A	0,0376
B	0,3849
C	0,4704

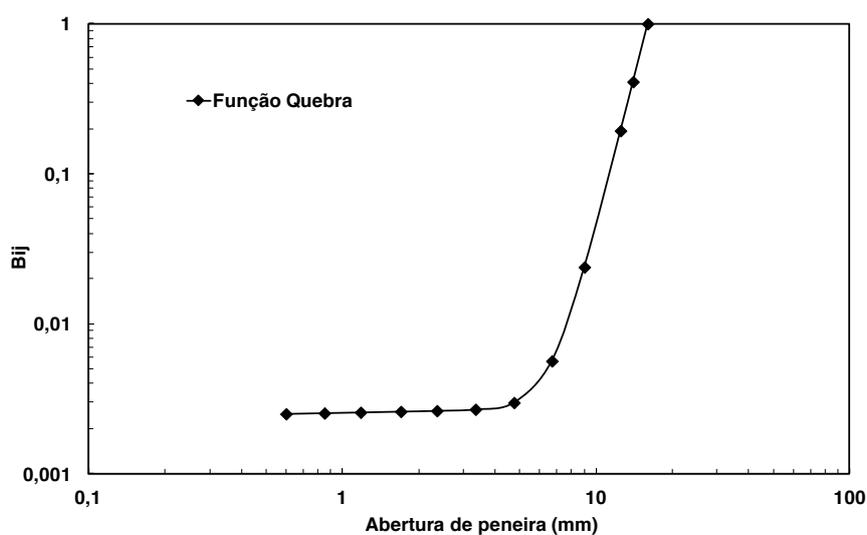


Figura VII-1 – Função quebra dos cacos de pelotas Ro-Tap[®] determinada a partir da metodologia descrita.

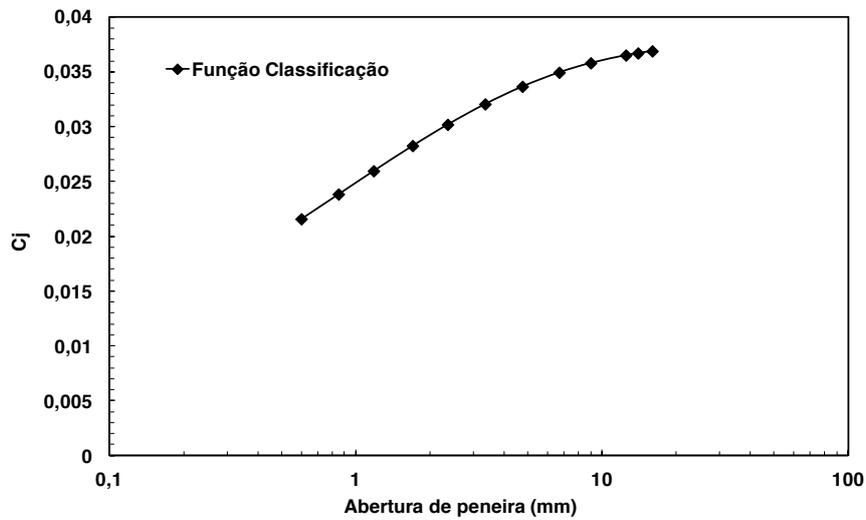


Figura VII-2 – Função classificação dos cacos de pelotas no Ro-Tap[®] determinada a partir da metodologia descrita.

A Figura VII-3, Figura VII-4 e Figura VII-5, apresentam a aplicação do modelo de degradação do Ro-Tap[®]. Todas mostram que há boa aderência do modelo, sendo possível sua utilização para a correção das análises granulométricas oriundas de peneiramento no Ro-Tap[®].

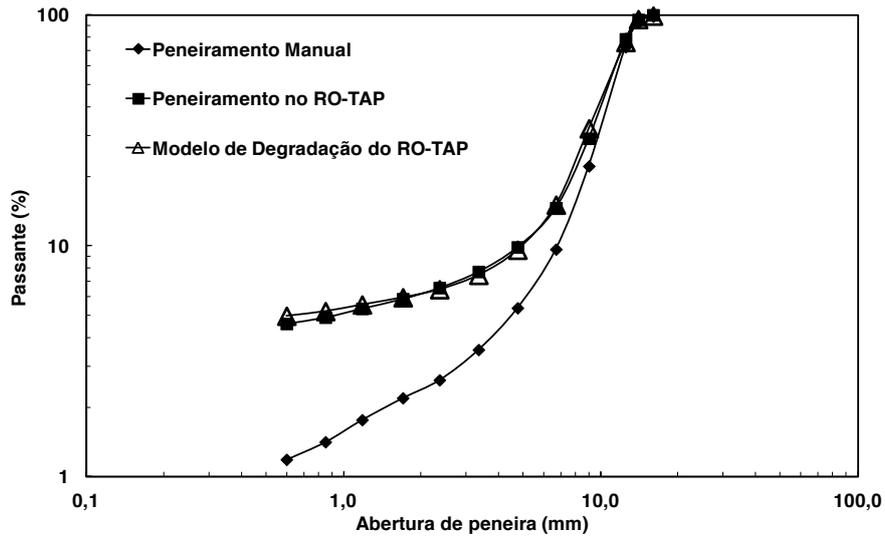


Figura VII-3 – Comparação entre as previsões usando o modelo de degradação do Ro-Tap® sobre o peneiramento manual e comparando ao peneiramento no Ro-Tap® de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 de 19x16mm a uma energia de impacto de 90 J/kg.

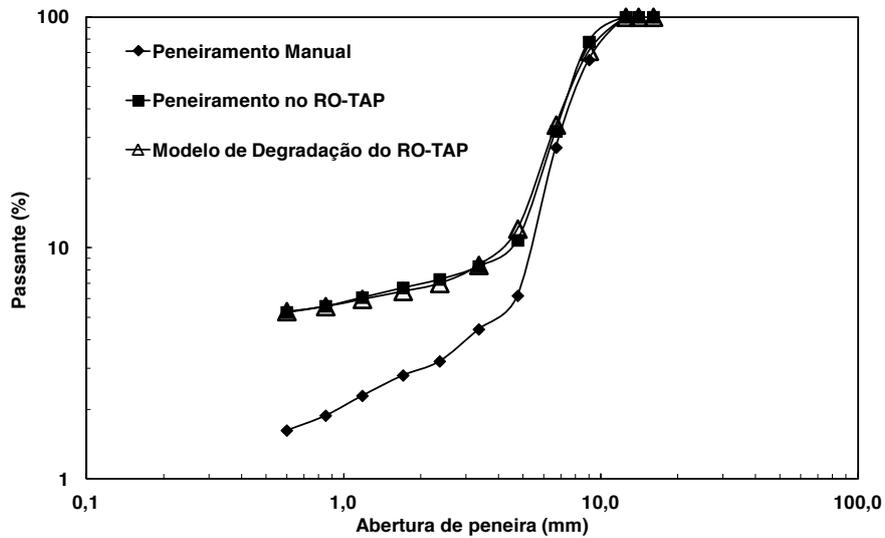


Figura VII-4 – Comparação entre as previsões usando o modelo de degradação do Ro-Tap® sobre o peneiramento manual e comparando ao peneiramento no Ro-Tap® de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 de 12,5x9mm a uma energia de impacto de 180 J/kg.

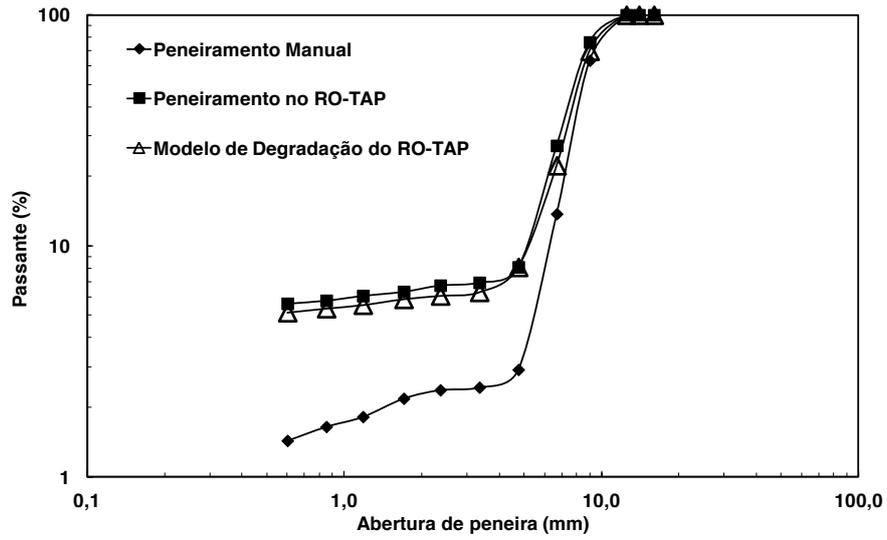


Figura VII-5 – Comparação entre as previsões usando o modelo de degradação do Ro-Tap® sobre o peneiramento manual e comparando ao peneiramento no Ro-Tap® de um ensaio de fragmentação da amostra AM11 de 12,5x9mm a uma energia de impacto de 90 J/kg.