



## MODELAGEM MATEMÁTICA DA DEGRADAÇÃO MECÂNICA DE BRIQUETES DE CARVÃO VEGETAL (BIOCARBONO)

Bernardo Honigbaum

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: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2022

MODELAGEM MATEMÁTICA DA DEGRADAÇÃO MECÂNICA DE  
BRIQUETES DE CARVÃO VEGETAL (BIOCARBONO)

Bernardo Honigbaum

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

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Aprovada por: Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho  
Prof. Luís Marcelo Marques Tavares  
Prof. Maurício Covceвич Bagatini

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
DEZEMBRO DE 2022

Honigbaum, Bernardo

Modelagem matemática da degradação mecânica de briquetes de carvão vegetal (biocarbono)/Bernardo Honigbaum. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XXII, 119 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 114 – 119.

1. Quebra de partículas. 2. Método dos elementos discretos. 3. Manuseio de granéis. I. Magalhães de Carvalho, Rodrigo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

*Study hard.*

# Agradecimentos

À minha família;

Ao orientador Professor Rodrigo Magalhães de Carvalho;

Ao membro da banca Professor Luis Marcelo Marques Tavares;

Ao membro da banca Professor Maurício Covcevich Bagatini;

Ao Dr. Emerson Reikdal da Cunha;

Ao Engenheiro Yago Morais Zocoli e colaboradores da VALE S.A.;

Aos colaboradores do Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE e da UFRJ;

Aos colegas da UFRJ;

Enfim, a todos que fizeram parte desta jornada, o meu muito obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

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

## MODELAGEM MATEMÁTICA DA DEGRADAÇÃO MECÂNICA DE BRIQUETES DE CARVÃO VEGETAL (BIOCARBONO)

Bernardo Honigbaum

Dezembro/2022

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Recentemente, foi proposta a adição de briquetes de biocarbono sobre o leito de pelotas verdes antes da entrada no forno de endurecimento, para atuarem como substitutos parciais do gás natural. No entanto, a degradação dos briquetes durante seu manuseio pode afetar a qualidade do produto. Nesse contexto, o propósito deste trabalho é avaliar a integridade física de uma amostra de briquetes, sob a ótica do modelo mecanicista UFRJ. Briquetes de biocarbono com formato de traveseiro foram submetidos a impactos repetidos, em uma ampla faixa de energias específicas. Além disso, foram realizados ensaios de degradação dinâmica por peneiramento e por tamboramento, com suas respectivas simulações DEM, para validar o modelo ajustado ao material. Por fim, foi elaborado um estudo de caso de uma calha de alimentação, prevendo o comportamento dos briquetes nesta etapa de manuseio, em escala industrial. Os resultados dos ensaios de impacto adequaram-se ao modelo de quebra de briquetes com a abordagem UFRJ, enquanto as simulações DEM dos ensaios de peneiramento e tamboramento representaram bem os experimentos. Finalmente, foi possível prever pouca geração de finos com a aplicação do modelo, oriundos da degradação sofrida pelos briquetes ao passar pela calha. O modelo torna possível avaliar a degradação dos briquetes em um circuito completo de manuseio em ambiente industrial, provendo informações para sua otimização.

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

## MATHEMATICAL MODELING OF THE MECHANICAL DEGRADATION OF CHARCOAL BRIQUETTES (BIOCHAR)

Bernardo Honigbaum

December/2022

Advisor: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Recently, it was proposed to add biocarbon briquettes to the bed of green pellets before entering the indurating furnace, to act as partial substitutes for natural gas. However, degradation of briquettes during handling can affect product quality. In this context, the purpose of this work is to evaluate the physical integrity of a sample of briquettes, from the perspective of the UFRJ mechanistic model. Pillow-shaped biocarbon briquettes were subjected to repeated impacts over a wide range of specific energies. In addition, dynamic degradation tests by sieving and drumming were carried out, with their respective DEM simulations, to validate the model adjusted to the material. At last, a case study of a feed chute was prepared, predicting the behavior of the briquettes in this handling step, on an industrial scale. The results of the impact tests fit the briquettes breakage model with the UFRJ approach, while the DEM simulations of the sieving and drumming tests represented the experiments well. Finally, the model was able to predict the low generation of fines due to briquette handling in the feeding chute. The model allows for predictions of the degradation of the briquettes in a complete handling circuit in an industrial environment, providing information for its optimization.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvi</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xviii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xxii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Objetivo</b>	<b>6</b>
<b>3 Revisão Bibliográfica</b>	<b>7</b>
3.1 Briquetes . . . . .	7
3.1.1 Visão Geral . . . . .	7
3.1.2 Processo de Fabricação . . . . .	9
3.1.3 Adição de Briquetes no Processo de Pelotização . . . . .	11
3.2 Fratura de Materiais Granulares . . . . .	12
3.2.1 Fundamentação Teórica . . . . .	12
3.2.2 Energia de Fratura . . . . .	12
3.2.3 Modelo de Quebra . . . . .	14
3.2.4 Distribuição de Energias de Fratura de Partículas . . . . .	16
3.2.5 Dano Acumulado . . . . .	27
3.2.6 Distribuição Granulométrica do Produto da Quebra . . . . .	28
3.3 Método dos Elementos Discretos . . . . .	33
3.3.1 Simulação da Quebra de Partículas . . . . .	35
<b>4 Metodologia</b>	<b>40</b>
4.1 Caracterização da Amostra . . . . .	41
4.2 Ensaios . . . . .	42
4.2.1 Ensaios de Impacto . . . . .	43
4.2.1.1 Ensaio de Queda Individual . . . . .	43
4.2.1.2 Ensaio de Projeção Pneumática . . . . .	46



4.2.2	Ensaaios de Degradação Dinâmica . . . . .	48
4.2.2.1	Degradação por Peneiramento . . . . .	48
4.2.2.2	Degradação por Tamboramento . . . . .	49
4.3	Modelagem Matemática da Quebra . . . . .	51
4.4	Simulações DEM . . . . .	52
4.4.1	Modelagem Avançada da Quebra de Briquetes . . . . .	54
4.4.2	Degradação por Peneiramento . . . . .	56
4.4.3	Degradação por Tamboramento . . . . .	57
4.4.4	Degradação em Calha de Alimentação . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>60</b>
5.1	Caracterização da Amostra . . . . .	60
5.2	Ensaaios . . . . .	62
5.2.1	Ensaaios de Impacto . . . . .	62
5.2.1.1	Ensaio de Queda Individual . . . . .	62
5.2.1.2	Ensaio de Projeção Pneumática . . . . .	71
5.2.2	Ensaaios de Degradação Dinâmica . . . . .	76
5.2.2.1	Degradação por Peneiramento . . . . .	76
5.2.2.2	Degradação por Tamboramento . . . . .	79
5.3	Modelagem Matemática da Quebra . . . . .	81
5.3.1	Probabilidade de Quebra . . . . .	81
5.3.2	Dano Acumulado . . . . .	83
5.3.3	Granulometria da Quebra Volumétrica . . . . .	86
5.3.4	Massa Perdida por Abrasão . . . . .	89
5.3.5	Granulometria da Quebra Superficial . . . . .	91
5.4	Simulações da Degradação dos Briquetes . . . . .	92
5.4.1	Degradação por Peneiramento . . . . .	93
5.4.2	Degradação por Tamboramento . . . . .	100
5.4.3	Degradação em Calha de Alimentação . . . . .	106
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>111</b>
<b>7</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>113</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>114</b>

# Lista de Figuras

1.1	Pelotas verdes na etapa de endurecimento em forno de grelha móvel. Adaptado de MACEDO <i>et al.</i> [3]. . . . .	1
1.2	Evolução da contribuição das principais fontes no consumo energético do setor industrial brasileiro, na área de mineração e pelotização. Gráfico produzido a partir dos dados de EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL) [5]. . . . .	2
1.3	Representação do leito de pelotas verdes coberto por uma camada de briquetes de biocarbono. . . . .	4
3.1	Aplicações de briquetes (a) de madeira com formato cilíndrico [23] e (b) de minério de ferro com formato de travesseiro [24]. . . . .	8
3.2	Matriz da agroenergia [25]. . . . .	8
3.3	Representação da produção de briquetes por prensa de rolos. . . . .	10
3.4	Exemplos de rolos formadores de prensa de rolos para produção de briquetes em forma de gota ou travesseiro (a) e em forma de sela (b) [28]. . . . .	11
3.5	Esquema da célula de carga de impacto [32]. . . . .	13
3.6	Fluxograma do algoritmo do modelo de quebra de Tavares. . . . .	15
3.7	Representação das quebras volumétrica e superficial em função do nível de energia [35]. . . . .	16
3.8	Probabilidade de quebra volumétrica em função da intensidade dos esforços, mostrando os possíveis resultados de um evento de impacto. . . . .	17
3.9	Função de distribuição log-normal na probabilidade de fratura do quartzo, do minério de ferro e do mármore. . . . .	19
3.10	Função de distribuição log-normal truncada na probabilidade de fratura da apatita, do calcário e do clínquer. . . . .	20
3.11	Comparação de funções de distribuição para dados de energia específica de fratura de pelotas queimadas de minério de ferro. Adaptado de TAVARES <i>et al.</i> [20]. . . . .	21
3.12	Influência dos parâmetros da função de distribuição gama na probabilidade de fratura. . . . .	22

3.13	Comparação da probabilidade de fratura entre pelotas queimadas e pelotas verdes. . . . .	23
3.14	Projektor pneumático de partículas individuais [34]. . . . .	24
3.15	Sequência de fotos do impacto de pelotas queimadas de minério de ferro, utilizando projetor pneumático com um alvo de aço. Na parte superior, há a ocorrência de quebra superficial, enquanto na parte inferior há a ocorrência de quebra volumétrica [34]. . . . .	25
3.16	Comparação da distribuição de energias de fratura em compressão lenta e probabilidades de quebra para pelotas queimadas de minério de ferro. As linhas representam o ajuste da distribuição Gama aos dados experimentais, em símbolos. Adaptado de CAVALCANTI <i>et al.</i> [14]. . . . .	26
3.17	Relação entre o percentual mássico menor que 10% do tamanho original da partícula ( $t_{10}$ ) e a razão entre a energia específica de impacto ( $E_k$ ) e a mediana da energia de fratura específica das partículas que não quebram em um determinado impacto ( $E_{50b}$ ). Gráfico para pelotas queimadas de minério de ferro adaptado de CAVALCANTI <i>et al.</i> [14]. . . . .	29
3.18	Distribuição cumulativa do percentual de massa perdida de pelotas queimadas de minério de ferro, a diferentes níveis de energia. Adaptado de CAVALCANTI <i>et al.</i> [40]. . . . .	31
3.19	Algoritmo simplificado de cálculo DEM. . . . .	34
3.20	Evolução das simulações DEM, com discos contidos em um quadrado [16] (a), moinho 2D de [42] (b) e operação de transferência de material por calha em 3D [44] (c). . . . .	35
3.21	Criação de aglomerados de partículas usando o BPM (a) e simulação da quebra de partículas aglomeradas (b) [47, 48]. . . . .	36
3.22	Algoritmo PRM de substituição de partículas na quebra [46]. . . . .	37
3.23	Evolução da fragmentação de uma partícula poliédrica, usando o FBM [22]. . . . .	37
3.24	Simulação DEM de tambor rotativo para avaliação da quebra volumétrica de pelotas queimadas de minério de ferro [20]. . . . .	38
3.25	Simulação DEM de peneiramento laboratorial para avaliação da quebra superficial de pelotas queimadas de minério de ferro [40] . . . . .	39
4.1	Fluxograma da metodologia desenvolvida. . . . .	41
4.2	Ilustração do ensaio de queda individual. . . . .	43
4.3	100 briquetes selecionados de uma amostra para a realização do ensaio de queda individual. . . . .	45

4.4	Projektor pneumático utilizado para os testes de impacto de médias e altas energias. . . . .	47
4.5	Equipamento de agitação automático montado com série de peneiras.	49
4.6	Moinho utilizado para o ensaio de tamboramento de briquetes de carvão vegetal (a) e detalhe das barras elevadoras nele contidas (b). . .	50
4.7	Fluxograma da modelagem matemática da quebra de partículas. . . .	52
4.8	Imagens do modelo da partícula de briquete no EDEM, composta por sete esferas superpostas, em vistas superior (a) e lateral (b) [57]. . . .	53
4.9	Coordenadas da partícula de briquete modelada em ambiente DEM [57]. . . . .	53
4.10	Algoritmo de pós-processamento da modelagem avançada de manuseio de granéis para a avaliação da degradação mecânica de briquetes de biocarbono. . . . .	55
4.11	Algoritmo implementado para a aplicação do modelo de quebra de Tavares, com a modelagem avançada de manuseio de granéis. . . . .	56
4.12	Geometria da peneira simulada. . . . .	57
4.13	Geometria do tambor usada nas simulações DEM, em vista isométrica (a) e detalhe das barras elevadoras (b). . . . .	58
4.14	Geometria da calha de alimentação simulada (a) e em vista lateral (b). . .	59
5.1	Amostra de briquetes de biocarbono. . . . .	60
5.2	Distribuição mássica das partículas de briquetes. . . . .	61
5.3	Escores normais das massas das partículas de briquetes. . . . .	61
5.5	Distribuições cumulativas das velocidades de impacto medidas experimentalmente (E), seu valor médio (M) e o valor teórico para a queda livre no vácuo (T). . . . .	62
5.4	Sequência de quadros do ensaio de queda individual de 4,4 m, mostrando o fenômeno de quebra superficial em (a) e de quebra volumétrica em (b), em que $dt = 2 \times 10^{-4}$ s. . . . .	63
5.6	Velocidade de impacto dos briquetes em função da altura de queda. Os símbolos indicam os ensaios experimentais de queda individual, enquanto as linhas referem-se aos modelos teóricos. . . . .	65
5.7	Evolução do coeficiente de resistência aerodinâmica em função da velocidade do briquete no momento do impacto. . . . .	65
5.8	Percentual cumulativo de briquetes que tiveram quebra volumétrica para cada impacto sequencial, variando a altura de queda. . . . .	67
5.9	Avaliação da orientação inicial do briquete na sua probabilidade de quebra em repetidos impactos. Barras de erro omitidas para facilitar a observação. . . . .	68

5.10	Percentual de massa perdida por abrasão para cada impacto de queda individual ao qual foram submetidos os briquetes. . . . .	69
5.11	Distribuição granulométrica dos fragmentos gerados na quebra volumétrica dos briquetes em função da altura de queda. . . . .	70
5.12	Distribuição granulométrica dos fragmentos gerados na quebra superficial dos briquetes em função da altura de queda. . . . .	70
5.13	Sequência de quadros do ensaio de projeção pneumática PP 3, mostrando o fenômeno de quebra superficial em (a) e de quebra volumétrica em (b), em que $dt = 2 \times 10^{-4}$ s. . . . .	72
5.14	Percentual cumulativo de briquetes que tiveram quebra volumétrica para cada impacto sequencial, variando a variando a energia do impacto. 73	
5.15	Percentual de massa perdida por abrasão para cada impacto de projeção pneumática ao qual foram submetidos os briquetes. . . . .	74
5.16	Distribuição granulométrica dos fragmentos gerados na quebra volumétrica dos briquetes em função da energia do impacto. . . . .	75
5.17	Distribuição granulométrica dos fragmentos gerados na quebra superficial dos briquetes em função da altura de queda. . . . .	75
5.18	Partículas de briquetes maiores que 19,0 mm selecionadas para o ensaio de degradação por peneiramento (a) e as partículas maiores que 10,0 mm após os 60 minutos do experimento (b), referentes à Réplica 1. 76	
5.19	Fração de briquetes retida na peneira de 19,0 mm no ensaio de peneiramento. . . . .	77
5.20	Fração de briquetes passante na peneira de 6,3 mm no ensaio de peneiramento. . . . .	78
5.21	Tambor preparado para o início do ensaio (a) e carregado após 30 min, preparado para o último intervalo de observação (b). . . . .	79
5.22	Fração de briquetes maior que 19,0 mm ao longo do ensaio de tamboramento. . . . .	80
5.23	Fração de briquetes menor que 6,3 mm ao longo do ensaio de tamboramento. . . . .	81
5.24	Probabilidade de quebra da amostra de briquetes de carvão vegetal em função da energia específica do impacto. . . . .	82
5.25	Comparação da probabilidade de quebra de briquetes de carvão vegetal, pelotas queimadas de minério de ferro e pelotas verdes de minério de ferro, em função da energia específica do impacto. . . . .	83

5.26	Quebra acumulada em função do número de impactos repetidos, para diferentes níveis energéticos. Os símbolos representam os ensaios com o projetor pneumático e de queda individual. Já as linhas sólidas indicam o ajuste aos dados experimentais dos ensaios de projeção, com parâmetro de dano $\gamma = 1,248$ . . . . .	84
5.27	Variação do parâmetro de dano acumulado ( $\gamma$ ) em função da energia específica do impacto para os ensaios de queda individual (QI) e de projeção pneumática (PP). A linha tracejada indica o ajuste dos dados de QI a uma função exponencial. . . . .	85
5.28	Quebra acumulada em função do número de impactos repetidos, considerando o parâmetro de dano acumulado $\gamma$ variando de acordo com a energia específica do impacto, conforme Equação 5.3. . . . .	86
5.29	Variação do $t_{10}$ em função da razão entre a energia específica de impacto ( $E_k$ ) e a mediana das energias de fratura dos briquetes que sofreram quebra volumétrica ( $E_{50b}$ ) . . . . .	87
5.30	Relação entre $t_{10}$ e $t_n$ . . . . .	88
5.31	Comparação entre a granulometria experimental (símbolos) e a calculada (linhas) para o briquete após a quebra volumétrica a diferentes energias específicas de impacto. . . . .	89
5.32	Massa mediana perdida por abrasão em função da energia específica dissipada em cada impacto. Os símbolos são os dados experimentais, enquanto a linha tracejada é o ajuste. . . . .	90
5.33	Comparação entre a granulometria do produto da quebra superficial experimental e a calculada para o briquete a diferentes energias específicas de impacto. . . . .	92
5.34	Ilustração da projeção bidimensional de partículas de briquetes com dimensões nominais retidas na peneira de 19,0 mm, nas orientações horizontal (a) e vertical (b). . . . .	93
5.35	Quadro da simulação do peneiramento dos briquetes de carvão vegetal. . . . .	94
5.36	Distribuição das energias de fratura das partículas virtuais e a função gama que as representa (a) e o percentil atribuído a cada partícula virtual, usado no cálculo de sua energia de fratura (b). . . . .	95
5.37	Número de colisões por partícula virtual e energia normal disponível para a quebra por partícula virtual ao longo do tempo de simulação do peneiramento. . . . .	96
5.38	Quebra cumulativa dos briquetes durante a simulação de degradação por peneiramento. . . . .	97
5.39	Fração de finos de briquetes menores que 6,3 mm no ensaio de peneiramento e na simulação realizada. . . . .	98

5.40	Fração de briquetes retida na peneira de 19,0 mm no ensaio de peneiramento e na simulação realizada. . . . .	99
5.41	Fração de briquetes maiores que 10,0 mm no ensaio de peneiramento e na simulação realizada. . . . .	100
5.42	Quadro da simulação do tamboramento dos briquetes de carvão vegetal.	101
5.43	Distribuição do número de colisões (a) e da energia normal dissipada total (b) dentro do tambor, para os 60 s de simulação. . . . .	101
5.44	Número de colisões por partícula virtual e energia normal disponível para a quebra por partícula virtual ao longo do tempo de simulação do tamboramento. . . . .	102
5.45	Quebra cumulativa dos briquetes durante a simulação de degradação por tamboramento. . . . .	103
5.46	Fração de finos de briquetes menores que 6,3 mm no ensaio de tamboramento e na simulação realizada. . . . .	104
5.47	Fração de briquetes maior que 19,0 mm no ensaio de tamboramento e na simulação realizada. . . . .	105
5.48	Distribuição cumulativa dos tamanhos médios das partículas de briquete resistentes durante a simulação do ensaio de tamboramento. . .	106
5.49	Quadro da simulação da calha de alimentação dos briquetes de biocarbono. . . . .	107
5.50	Distribuições do número de colisões (a) e da energia normal dissipada total (b) na calha de alimentação. . . . .	107
5.51	Localização de todas as colisões (em azul) e de todas as quebras volumétricas (em vermelho) dos briquetes de carvão vegetal na calha de alimentação. . . . .	108
5.52	Granulometria de saída da calha, com os produtos das quebras superficial e volumétrica, bem como a granulometria dos briquetes e fragmentos gerados, dada pela média ponderada entre ambas e as partículas resistentes, que são 100,00 % maiores que 19,0 mm. . . . .	110

# Lista de Tabelas

3.1	Potencial dos briquetes em termos ambientais e econômicos [26]. . . . .	9
3.2	Parâmetros de ajuste da probabilidade de fratura de materiais para a função de distribuição log-normal (Equação 3.7) [11]. . . . .	18
3.3	Parâmetros de ajuste da probabilidade de fratura de materiais para a função de distribuição log-normal truncada (Equações 3.8 e 3.9) [11].	20
3.4	Parâmetros de ajuste da probabilidade de fratura de pelotas queimadas e de pelotas verdes. . . . .	22
4.1	Especificação da amostra de briquetes de carvão vegetal. Informações fornecidas pelo fabricante em base seca. . . . .	42
4.2	Composição química das cinzas da amostra de briquetes de carvão vegetal. Informações fornecidas pelo fabricante. . . . .	42
4.3	Descrição dos ensaios com o projetor pneumático, com variação do diâmetro da válvula e da pressão de ar. . . . .	47
4.4	Descrição dos ensaios de peneiramento. . . . .	48
4.5	Parâmetros de contato calibrados para a amostra de briquetes de biocarbono [57]. . . . .	53
5.1	Ensaio de queda individual e suas respectivas velocidades de impacto ( $v$ ), energias específicas de impacto ( $E_k$ ) e proporção de partículas quebradas no primeiro impacto em função da altura de queda ( $H$ ). . .	66
5.2	Ensaio de projeção pneumática e suas respectivas velocidades de impacto ( $v$ ), energias específicas de impacto ( $E_k$ ) e proporção de partículas quebradas em função do ensaio de projeção pneumática realizado.	71
5.3	Fração mássica retida em cada peneira, para cada Réplica após 10 minutos de ensaio. . . . .	78
5.4	Parâmetros de ajuste da função de distribuição cumulativa gama (Equação 3.10) aos dados de impacto de briquetes de carvão vegetal. . . . .	82
5.5	Parâmetros de ajuste ao modelo $t_{10}$ (Equação 3.16). . . . .	86
5.6	Parâmetros de ajuste ao modelo $t_n$ (Equação 3.17). . . . .	88



5.7	Parâmetros de ajuste à granulometria do produto de quebra superficial da amostra de briquetes de carvão vegetal (Equação 3.18). . . . .	91
5.8	Balanço de massa da simulação da calha de alimentação, em quilogramas e em percentuais mássicos. . . . .	109

# Lista de Símbolos

$A$	Parâmetro da função do modelo de $t_{10}$ (%), p. 28
$A_{ij}$	Função de distribuição cumulativa de quebra superficial (-), p. 30
$A_r$	Área da seção transversal da barra ( $m^2$ ), p. 14
$C_D$	Coefficiente de resistência aerodinâmica (-), p. 46
$C_r$	Velocidade da onda na barra (m/s), p. 14
$D_n$	Parâmetro de dano (-), p. 27
$E_{50b}$	Mediana da energia de fratura específica das partículas que não quebram em um determinado impacto (J/kg), p. 28
$E_f$	Energia de fratura da partícula (J), p. 14
$E_k$	Energia específica do impacto (J/kg), p. 23
$E_{loss,m}$	Energia específica dissipada na colisão (J/kg), p. 31
$E_{m50}$	Mediana distribuição de energias específicas de fratura (J/kg), p. 18
$E_{max}$	Energia específica a partir da qual todas as partículas fraturam (J/kg), p. 19
$E_{mf}$	Energia específica de fratura (J/kg), p. 14
$E_m$	Energia específica (J/kg), p. 17
$H$	Dureza da partícula (HV), p. 30
$K_c$	Tenacidade à fratura ( $MPa \cdot m^{1/2}$ ), p. 30
$N$	Número de partículas (-), p. 44
$P$	Probabilidade de fratura (-), p. 17

$P^*$	Probabilidade de quebra das partículas que sofreram dano (-), p. 32
$P_n$	Probabilidade de fratura cumulativa (-), p. 44
$Q$	Calor fornecido ao sistema (J), p. 12
$Re$	Número de Reynolds (-), p. 46
$S$	Taxa de quebra (1/s), p. 77
$V_b$	Volume do briquete (m <sup>3</sup> ), p. 46
$W$	Trabalho realizado pelo sistema (J), p. 12
$\bar{\xi}$	Fração mássica perdida por abrasão de uma partícula em um impacto, em equação modificada (-), p. 31
$\Delta U_{sistema}$	Variação da energia interna do sistema (J), p. 12
$\Delta$	Deformação da partícula (-), p. 14
$\Delta_c$	Deformação da partícula na fratura (-), p. 14
$\Gamma$	Função gama (-), p. 21
$\alpha$	Nível de significância (-), p. 44
$\alpha_n$	Parâmetro da função do modelo de $t_n$ (-), p. 30
$\beta$	Parâmetro de ajuste da função Weibull (-), p. 17
$\beta_n$	Parâmetro da função do modelo de $t_n$ (-), p. 30
$\delta$	Incerteza da medida (-), p. 45
$\epsilon$	Parâmetro de ajuste da função de fração mássica perdida por abrasão, em equação modificada (-), p. 31
$\eta$	Parâmetro de ajuste da função de distribuição cumulativa gama (-), p. 21
$\frac{d^2}{dt^2}$	Derivada temporal de segunda ordem, p. 33
$\frac{d}{dt}$	Derivada temporal, p. 33
$\gamma$	Parâmetro de dano acumulado (-), p. 27

$\kappa$	Suscetibilidade da partícula gerar produtos de quebra superficial (kg/J/m), p. 31
$\lambda$	Parâmetro de ajuste da função de distribuição cumulativa gama (J/kg), p. 21
$\mu$	Viscosidade (Pa · s), p. 46
$\rho$	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> ), p. 30
$\rho_b$	Densidade do briquete (kg/m <sup>3</sup> ), p. 46
$\rho_f$	Densidade do fluido (kg/m <sup>3</sup> ), p. 46
$\rho_r$	Densidade da barra (kg/m <sup>3</sup> ), p. 14
$\sigma$	Desvio padrão da distribuição de energias específicas de fratura (J/kg), p. 18
$\sigma_0$	Parâmetro de ajuste da função Weibull (J/kg), p. 17
$\theta$	Ângulo do impacto (graus), p. 31
$\underline{\underline{I}}$	Tensor de inércia do elemento, p. 33
$\varphi$	Parâmetro da função do modelo de quebra superficial (-), p. 30
$\vec{F}$	Vetor força resultante sobre o elemento, p. 33
$\vec{M}$	Vetor momento resultante sobre o elemento, p. 33
$\vec{\omega}$	Vetor velocidade angular do elemento, p. 33
$\vec{p}$	Vetor posição do centro de massa do elemento, p. 33
$\xi$	Fração mássica perdida de uma partícula em um impacto (-), p. 30
$a$	Fator de proporcionalidade da função do modelo de perda mássica por abrasão (-), p. 30
$a_{i,j}$	Função de distribuição da quebra superficial (-), p. 32
$b'$	Parâmetro da função do modelo de $t_{10}$ (-), p. 28
$b_{i,j}$	Função de distribuição da quebra volumétrica (-), p. 32
$c$	Parâmetro da função do modelo de $t_{10}$ (-), p. 28

$d$	Tamanho médio da partícula (m), p. 31
$d_A$	Parâmetro da função do modelo de quebra superficial (m), p. 30
$d_i$	Tamanho representativo da classe $i$ (m), p. 30
$g$	Aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> ), p. 14
$h$	Altura de queda (m), p. 23
$k$	Parâmetro de ajuste no modelo $t_{10}$ em simulações DEM (-), p. 39
$l$	Dimensão linear da partícula (m), p. 30
$m$	Escalar massa do elemento, p. 33
$m_b$	Massa da bola (kg), p. 14
$m_p$	Massa da partícula (kg), p. 14
$n$	Número de impactos (-), p. 27
$t$	Tempo (s), p. 77
$t_{10}$	Proporção mássica de fragmentos menores 1/10 de seu tamanho original (%), p. 28
$t_n$	Proporção mássica de fragmentos menores 1/ $n$ de seu tamanho original (%), p. 30
$v$	Velocidade do impacto (m/s), p. 30
$v_0$	Velocidade da bola no instante em que inicia o contato (m/s), p. 14
$w_i$	Fração mássica de partículas na classe de tamanhos $i$ (-), p. 32
$z$	Escore normal (-), p. 44

# Lista de Abreviaturas

BPM	Modelo de Partículas Ligadas, na sigla em inglês, p. 35
CCI	Célula de Carga de Impacto, p. 13
DEM	Método dos Elementos Discretos, na sigla em inglês, p. 4
FBM	Modelo de Quebra Rápida, na sigla em inglês, p. 35
LTM	Laboratório de Tecnologia Mineral, p. 23
PRM	Modelo de Substituição de Partículas, na sigla em inglês, p. 35
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 4

# Capítulo 1

## Introdução

O aço pode ser produzido a partir da redução química do ferro contido em minérios com altos teores desse elemento, presente na forma de óxido, seguida por etapas de refino do ferro gusa ou ferro esponja produzidos. As reações de redução ocorrem, principalmente, em reatores do setor siderúrgico, como altos-fornos e fornos de redução direta. Dentre as matérias-primas usadas nesses equipamentos, destacam-se o minério granulado, o sinter e as pelotas, como fonte de ferro, além do coque metalúrgico, utilizado como combustível. O presente trabalho enquadra-se na cadeia produtiva das pelotas de minério de ferro.

As pelotas são produzidas a partir de finos de minério de ferro em um processo de aglomeração a frio (pelotamento), no qual os produtos são aglomerados de formato esférico na faixa de tamanhos entre 8,0 mm e 18,0 mm, denominados pelotas verdes (ou cruas). Posteriormente, para que o material adquira as condições físicas e mecânicas ideais para possibilitar seu transporte e seu uso, ocorre a etapa de endurecimento das pelotas verdes, sendo chamadas, então, de pelotas queimadas. O endurecimento das pelotas cruas pode ser realizado em fornos de grelha móvel, representado de forma esquemática na Figura 1.1, ou em fornos rotativos, tendo como principal combustível o gás natural [1, 2].

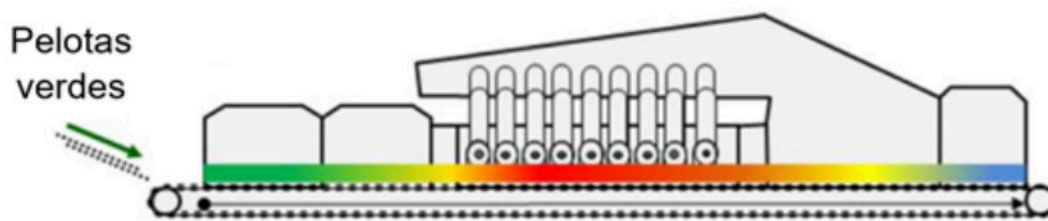


Figura 1.1: Pelotas verdes na etapa de endurecimento em forno de grelha móvel. Adaptado de MACEDO *et al.* [3].

No processo de pelotização, a etapa de endurecimento destaca-se como a principal contribuinte dos custos de produção, representando 34 % do total, especialmente pelo

consumo de gás natural [4]. De acordo com o Balanço Energético Nacional [5], em 2019, a área de mineração e pelletização do setor industrial brasileiro teve o gás natural contribuindo com 12,8% do consumo energético, enquanto a eletricidade representou 42,7%. Nos últimos 10 anos houve uma queda na participação do gás natural, conforme pode ser observado na Figura 1.2, e aumento da parcela composta pela eletricidade. As outras fontes energéticas são, principalmente, óleo diesel, coque de petróleo, carvão mineral e coque de carvão mineral.

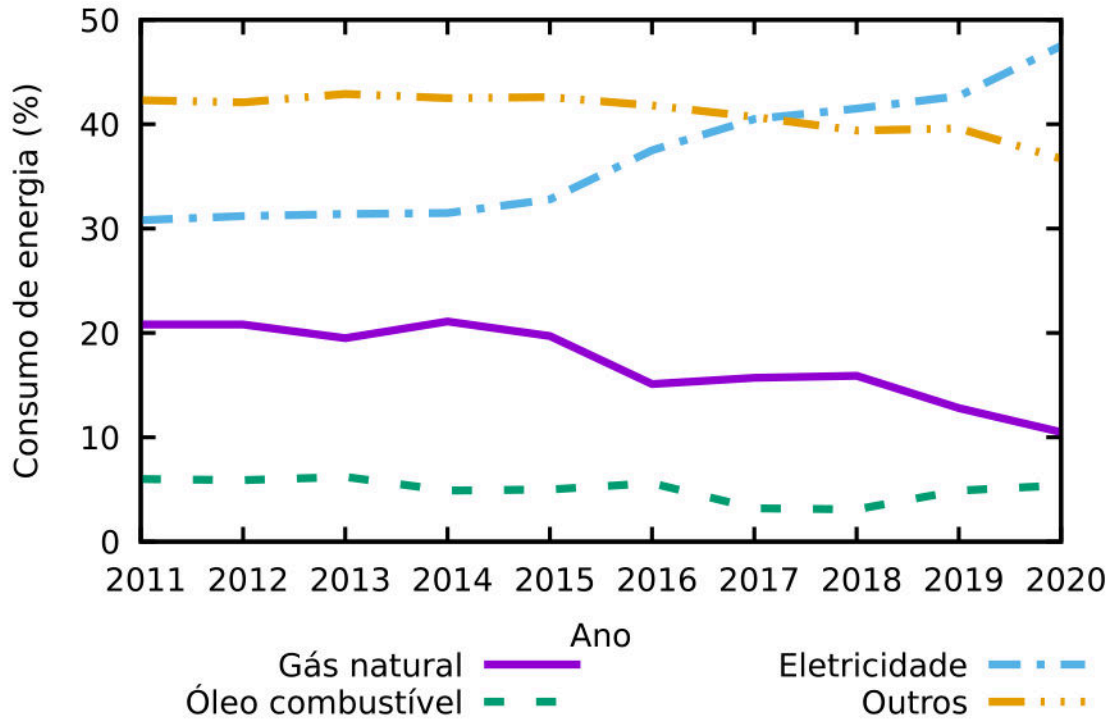


Figura 1.2: Evolução da contribuição das principais fontes no consumo energético do setor industrial brasileiro, na área de mineração e pelletização. Gráfico produzido a partir dos dados de EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL) [5].

No que se refere a combustíveis renováveis, a participação do biodiesel está limitada a 1,9%, enquanto o carvão vegetal é nulo [5]. Nos últimos anos, diversas medidas estão sendo tomadas com o intuito de reduzir as emissões de gases do efeito estufa. No Brasil, entrou em vigor em 2017 a Lei 13.576/2017 [6], que dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências, com o intuito de estimular o uso de fontes de energia renováveis no país e de mitigar os impactos ambientais.

Art. 1º Fica instituída a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), parte integrante da política energética nacional de que trata o art. 1º da Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, com os seguintes objetivos:



I - contribuir para o atendimento aos compromissos do País no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima;

II - contribuir com a adequada relação de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, na comercialização e no uso de biocombustíveis, inclusive com mecanismos de avaliação de ciclo de vida;

III - promover a adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis; e

IV - contribuir com previsibilidade para a participação competitiva dos diversos biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis.

Nesse sentido, alguns estudos foram realizados sugerindo a utilização de combustíveis sólidos renováveis, como o carvão vegetal, na etapa de endurecimento das pelotas verdes de minério de ferro. Essa iniciativa permitiria, por exemplo, a substituição parcial dos combustíveis utilizados, como o gás natural ou finos de coque, desencadeando diversas vantagens, como a própria redução do consumo de gás natural, a redução de custos e a redução dos impactos ambientais. No entanto, essa mudança pode acarretar em alterações no perfil térmico da queima ou gerar a emissão de outros gases no forno, sendo, então, necessário realizar adaptações nos equipamentos.

PRAES *et al.* [7] avaliaram as influências da substituição parcial de carvão mineral por carvão vegetal na composição das pelotas verdes, em que os seus teores de materiais voláteis eram distintos. Eles concluíram que seria possível realocar até 10,0% do antracito por carvão vegetal com teor de voláteis entre 9,4% e 11,1%. Com relação à temperatura da chama da queima, BÄCKSTRÖM *et al.* [8] estudaram sobre a radiação emitida em função da composição dos combustíveis utilizados. Eles verificaram que, quando o combustível utilizado foi o gás natural, a chama atingiu mais de 2000 °C, enquanto, com o carvão contido nas pelotas, variou entre 1500 e 1600 °C.

No entanto, esses trabalhos abordaram o uso de combustíveis sólidos em material particulado fino misturado com as pelotas verdes. Já a recente patente de 2021 de MACEDO *et al.* [3] trata da adição de aglomerados a frio de carvão vegetal, chamados de briquetes de biocarbono, sobre o leito de pelotas verdes no início do processo de endurecimento, conforme apresentado na Figura 1.3. Tal diferença implica em novos desafios a serem superados, tais como a infraestrutura adequada para a fabricação e o transporte dos briquetes até o leito de pelotas cruas, garantir a integridade dos briquetes durante seu manuseio e a possibilidade de interferência no escoamento gasoso nas etapas de secagem e queima. Além disso, faz-se necessário compreender como o fluxo de briquetes adicionados sobre o leito de pelotas poderia afetar a integridade das mesmas.

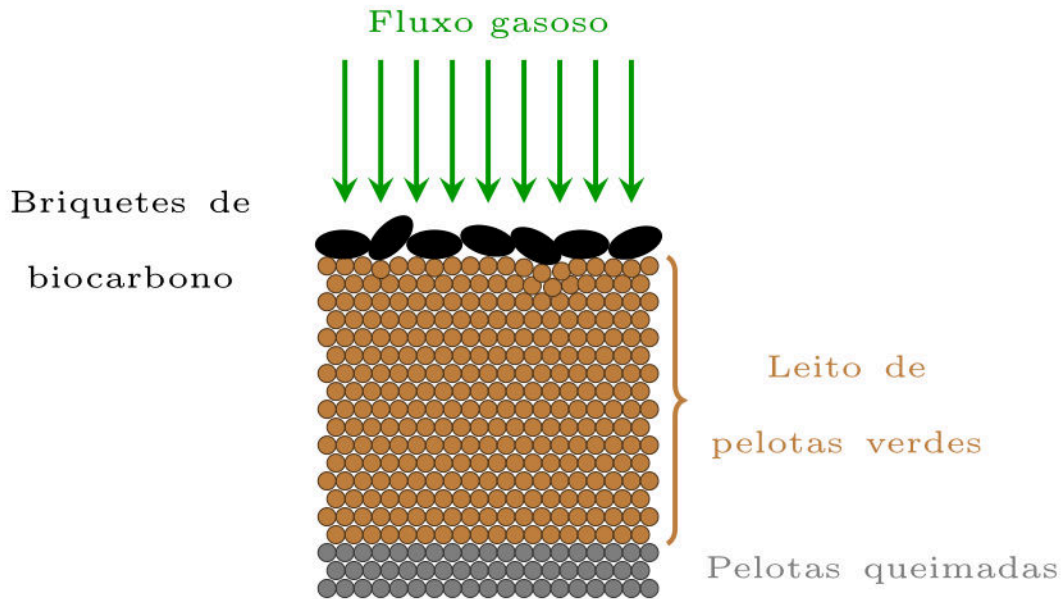


Figura 1.3: Representação do leito de pelotas verdes coberto por uma camada de briquetes de biocarbono.

A integridade das pelotas verdes já foi estudada por TAVARES e ALMEIDA [9] utilizando a abordagem mecanicista da quebra de partículas, capaz de descrever, dentre outras coisas, a probabilidade de fratura, os efeitos de dano e a distribuição de fragmentos gerados. Essa abordagem já foi aplicada em outros trabalhos com outros materiais (por exemplo: quartzo, apatita, calcário, clínquer de cimento, minério de ferro, magnetita e minério de cobre) [10, 11], inclusive na previsão da cominuição em equipamentos, como o moinho de bolas [12, 13]. Essa abordagem é amplamente aplicada em trabalhos da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e é denominada modelo UFRJ. Este modelo também já foi utilizado com sucesso para pelotas queimadas [14, 15], porém ainda não há aplicações relacionadas com briquetes.

Além disso, para a avaliação de sistemas que envolvem grandes quantidades de materiais granulares, costuma-se empregar simulações computacionais utilizando o Método dos Elementos Discretos (DEM, na sigla em inglês). O DEM descreve o movimento e a interação de partículas individualmente por meio de cálculos numéricos explícitos, que levam em consideração as propriedades físicas e mecânicas dos materiais envolvidos [16, 17]. Nesse caso, podem ser destacados estudos relacionados com o efeito das propriedades mecânicas do material no fluxo de um silo [18] e com o peneiramento de pelotas verdes [19]. Pode-se também simular a integridade das partículas do material ou que compõem o fluxo granular a partir das informações obtidas pelas simulações DEM, como realizado com a quebra de pelotas queimadas [20]. E, recentemente, os programas de método dos elementos discretos implementaram uma versão do modelo de quebra de Tavares [10] para simular a quebra de

partículas explicitamente em ambiente DEM [21, 22].

Sendo assim, a adição de briquetes de carvão vegetal sobre o leito de pelotas verdes na alimentação do forno de endurecimento necessita dispor de uma ferramenta para previsão do comportamento e da influência da adição dos combustíveis sólidos, tanto no aspecto de movimentação quanto com relação à sua integridade física. Este estudo, então, busca modelar matematicamente a degradação mecânica de uma amostra de briquetes de biocarbono. Para isso, foram realizados ensaios para a caracterização mecânica dos briquetes. Posteriormente, a ação conjunta de ensaios em escala laboratorial e as respectivas simulações computacionais utilizando DEM permitiram validar os resultados da modelagem matemática. Por fim, a previsão do comportamento dos briquetes sobre o leito de pelotas verdes em escala industrial foi realizada por simulações com o método dos elementos discretos em escala industrial.

O presente trabalho está organizado em sete Capítulos, incluindo esta Introdução. O Capítulo dois é dedicado ao detalhamento dos objetivos dos estudos realizados, enquanto o Capítulo três apresenta a revisão bibliográfica abrangendo tópicos como briquetagem, fratura de materiais granulares e o método dos elementos discretos. Já o quarto Capítulo contempla a metodologia adotada, abordando as amostras a serem utilizadas, os ensaios realizados, a modelagem matemática empregada e as simulações DEM. Além disso, o Capítulo cinco consiste na apresentação e discussão dos resultados obtidos, ao passo que o sexto Capítulo contempla as conclusões desta Dissertação. Por fim, são apresentadas sugestões de trabalhos futuros no Capítulo sete e, posteriormente, estão as referências bibliográficas utilizadas como embasamento desta pesquisa.

# Capítulo 2

## Objetivo

Este trabalho visa, de modo geral, modelar matematicamente a degradação mecânica de uma amostra de briquetes de carvão vegetal, utilizando a abordagem mecanicista UFRJ. Dentre os objetivos específicos do presente estudo, estão:

- obter a probabilidade de quebra do material em análise;
- descrever a distribuição de tamanhos gerada em diversas situações;
- validar a degradação de ensaios experimentais com resultados obtidos via pós-processamento de simulações DEM;
- prever a degradação dos briquetes em uma calha de alimentação em escala industrial.

# Capítulo 3

## Revisão Bibliográfica

### 3.1 Briquetes

#### 3.1.1 Visão Geral

Os processos de aglomeração são as práticas adotadas para aumento de tamanho de partículas finas por união entre elas. Esses métodos podem ser realizados a frio (temperatura ambiente) ou a quente. Já para unir as partículas, pode ser utilizado, simplesmente, água ou então algum outro ligante, a depender do material e da técnica. Dentre os principais métodos de aglomeração, estão o pelotamento, a sinterização e a briquetagem.

O briquete é um sólido prismático ou cilíndrico formado por forças externas, dependendo do método de moldagem, contendo um ligante, com aumento da resistência por envelhecimento em condições naturais ou por autoclavagem [2]. Dentre as técnicas utilizadas para a produção de briquetes, destacam-se a prensas, a extrusão e a vibro prensa. Suas aplicações podem ser com objetivos energéticos, como briquetes de madeira para uso como combustível de navios a vapor, forjas, culinária e outras finalidades (Figura 3.1a) [23] e, recentemente, finos de minério de ferro estão sendo briquetados para utilização em altos-fornos (Figura 3.1b) [24].



(a)



(b)

Figura 3.1: Aplicações de briquetes (a) de madeira com formato cilíndrico [23] e (b) de minério de ferro com formato de travesseiro [24].

Uma tendência de aplicação do uso de briquetes é na forma de combustível, fazendo uso do carvão vegetal, dada sua capacidade de renovação por plantio. De acordo com a EMBRAPA (BRASIL) [25], pode-se considerar biomassa florestal e seus resíduos como membros da agroenergia, ao lado da cana-de-açúcar, que dá origem ao etanol e co-geração de energia; do biodiesel de fontes lipídicas de animais e vegetais; e de resíduos agropecuários e da agroindústria, resultando no biogás. Das florestas podem ser obtidas diferentes formas de energia, como a lenha, o carvão e seus finos e o licor negro, além dos briquetes. A Figura 3.2 mostra esquematicamente a matriz da agroenergia.

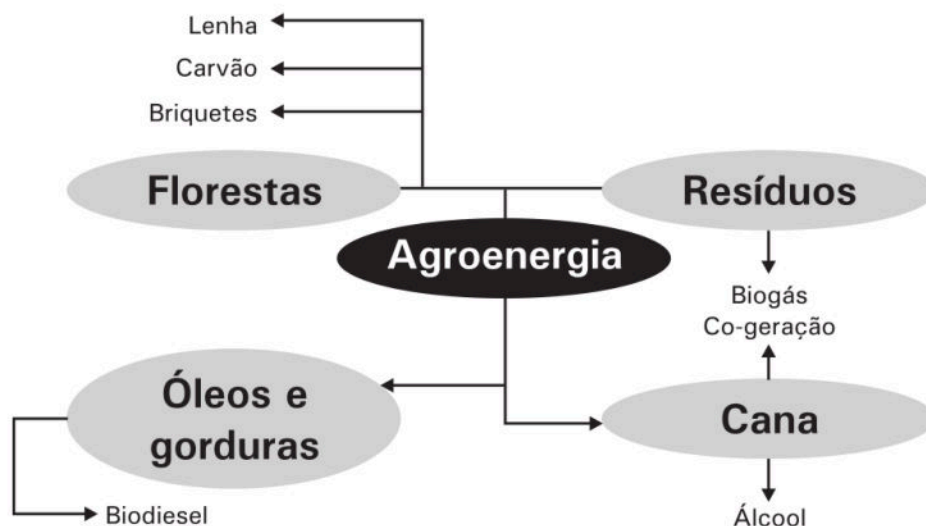


Figura 3.2: Matriz da agroenergia [25].

Nesse sentido, pode-se avaliar as vantagens competitivas dos briquetes tanto em termos ambientais, como em termos econômicos, como apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Potencial dos briquetes em termos ambientais e econômicos [26].

Vantagens ambientais	Vantagens econômicas
É totalmente liberado pelo IBAMA	Alto valor agregado
Dispensa guia e reposição florestal junto ao órgão fiscalizador	Pronto para a queima
Carbono neutro	Alto poder calorífico
Energia limpa, possui o menor índice de poluição comparado aos outros combustíveis	Fácil manuseio, armazenamento e transporte
Fonte renovável de energia	Melhor custo/benefício

As desvantagens de uso de combustíveis renováveis englobam seus altos custos, o fato de serem fontes intermitentes, sua distribuição desigual e seu estágio tecnológico inferior ao das demais fontes em uso [25].

### 3.1.2 Processo de Fabricação

Para o processo de fabricação dos briquetes, algumas características devem ser observadas, no que tange a avaliação do material que será briquetado e as suas propriedades desejadas após a produção, além do estudo de viabilidade econômica e custo benefício da briquetagem. Deve haver também uma definição do pré-processamento da matéria-prima, quanto à granulometria da alimentação, bem como sua secagem, de modo a atingir o teor de umidade adequado para a produção. Em termos de processo, deve-se, definir se a operação será à quente ou à frio e calcular os teores dos aglomerantes e dos agentes redutores contidos no material final. Por fim, as condições de estocagem e de armazenamento do produto devem ser bem definidas [26].

A produção de briquetes se dá pela ação de forças exógenas, que reduzem a distância entre as partículas e possibilitam a influência das forças moleculares de Van der Waals. Três processos podem ser usados para a aplicação da pressão externa ao material a ser briquetado [27]:

- briquetagem em prensas de rolos, em que o material flui continuamente, entre dois rolos paralelos, com cavidades ou moldes dispostos em sua superfície;
- briquetagem por extrusão contínua em máquinas do tipo maromba e
- briquetagem em prensas hidráulicas, em que os moldes são preenchidos, de forma intermitente.

Este trabalho trata de briquetes produzidos por prensa de rolos, que também são os mais utilizados industrialmente [27], com formato de traveseiro. O princípio de operação de tais prensas consiste na alimentação da mistura a ser briquetada no espaço entre dois rolos que giram em sentidos opostos, cuja superfície possui células simetricamente localizadas na forma de semi-briquetes. Essa mistura deve ter partículas com tamanhos controlados, geralmente menores que 5 mm, para reduzir o aprisionamento de ar no sistema. Durante a rotação dos rolos, há uma convergência das células, a captura do material e a sua compressão de vedação. O material é submetido a compressão bilateral, o que contribui para uma distribuição de sua densidade por volume. Então, à medida que os rolos giram, as células divergem e o briquete cai para fora da célula sob sua própria gravidade [2]. A Figura 3.3 mostra a produção de briquetes em prensa de rolos.

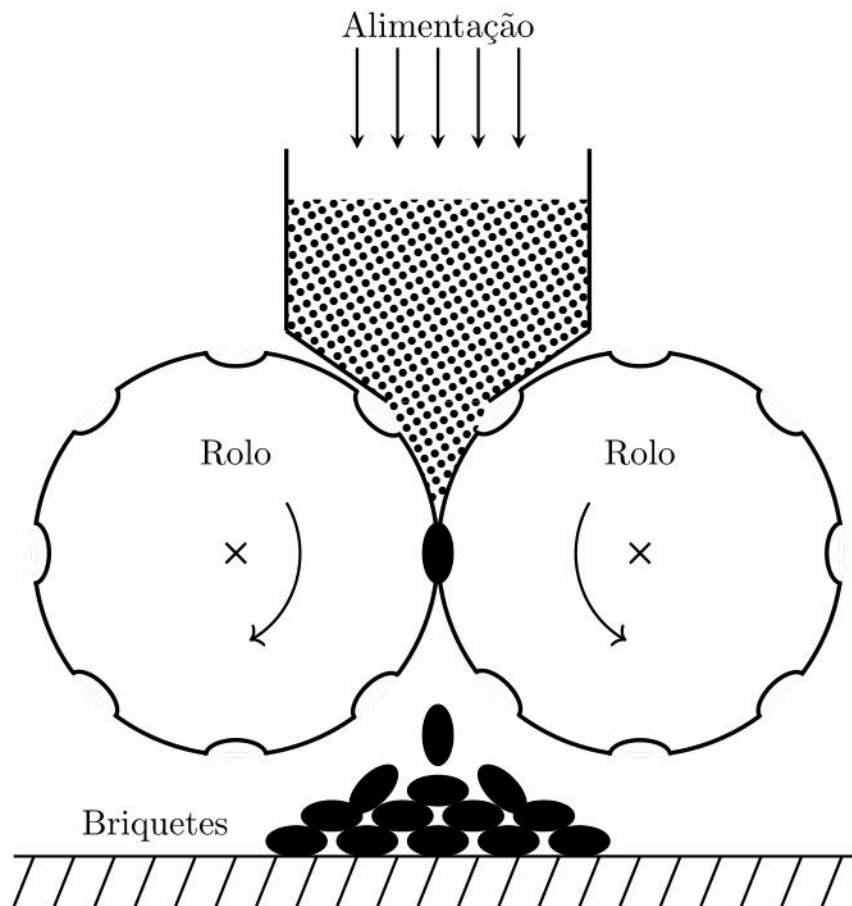


Figura 3.3: Representação da produção de briquetes por prensa de rolos.

O formato dos briquetes é uma consequência das células presentes nos rolos. A Figura 3.4 mostra dois exemplos de rolos que apresentam células com distintos moldes, formando diferentes tipos de briquetes, como em forma de gota ou traveseiro e em forma de sela.





Figura 3.4: Exemplos de rolos formadores de prensa de rolos para produção de briquetes em forma de gota ou travesseiro (a) e em forma de sela (b) [28].

A duração do processo de prensagem afeta, significativamente, a resistência mecânica dos briquetes. A exposição do briquete à região sob pressão permite não apenas forçar a saída de ar do espaço poroso, mas também reduzir a quantidade de deformações elásticas, que podem levar ao seu amolecimento. Por exemplo, a duração da prensagem para rolos com diâmetro de 1,1 m em uma frequência de rotação de 8 a 11 revoluções por minuto é de apenas 0,29 a 0,38 s [2].

As prensas de rolos, tipicamente, têm taxa de produção da ordem de 50 t/h, com vida útil de 1 ano até os componentes necessitarem de manutenção. A pressão de compactação dos rolos pode variar entre 40 e 150 MPa e o consumo específico de energia é de cerca de 45,0 kWh/t. O teor de umidade da carga, geralmente, deve ser menor que 10 % [2].

### 3.1.3 Adição de Briquetes no Processo de Pelotização

No processo de pelotização de minério de ferro, gás natural é utilizado na etapa de endurecimento das pelotas verdes e é considerado o principal contribuinte dos custos de produção, representando 34 % do total, [4]. Em 2021, foi proposta a adição de briquetes de carvão vegetal sobre o leito de pelotas verdes no carro de grelha na entrada do forno de endurecimento como substituto parcial do gás no processo. Essa alternativa mostrou potencial tanto para a redução de custos, quanto para a redução na emissão de gases agravantes do efeito estufa [3].

No entanto, essa mudança pode acarretar em alterações no perfil térmico da queima ou gerar a emissão de outros gases no forno, causando a necessidade de realização de adaptações nos equipamentos presentes para compensar tais modificações. Além disso, o manuseio e o transporte dos briquetes, desde sua produção, sua transferência para armazenamento em pilhas ou silos, para caminhões, navios ou trens, para correias transportadoras e para calhas, até o seu movimento de queda sobre o leito de pelotas verdes podem trazer danos à integridade física dessas par-

tículas, acarretando em geração de finos e perda de resistência mecânica. Ademais, há a possibilidade de que a interação dos briquetes com o leito de pelotas verdes possa afetar a conformação do leito no interior do forno de endurecimento. Os aspectos fundamentais referentes à integridade mecânica de materiais particulados, abordando, especialmente, os briquetes de carvão vegetal, as pelotas verdes e as pelotas queimadas são discutidos na Seção 3.2.

## 3.2 Fratura de Materiais Granulares

### 3.2.1 Fundamentação Teórica

A primeira lei da termodinâmica utiliza a conservação de energia para sistemas termodinâmicos isolados para relacionar a variação da energia interna do sistema ( $\Delta U_{sistema}$ ) com o calor fornecido ao sistema ( $Q$ ) e o trabalho realizado pelo sistema ( $W$ ), de acordo com a Equação 3.1.

$$\Delta U_{sistema} = Q - W \quad (3.1)$$

Quando um sistema passa de um estado fora do equilíbrio para um estado no equilíbrio, há uma redução da energia interna [29]. Essa relação foi utilizada por GRIFFITH [30] para explicar a formação das trincas em materiais sólidos. As trincas surgem ou crescem somente se tal processo causar a redução da energia do sistema. Tal abordagem é aplicada na mecânica da fratura, em que algumas condições precisam ser atendidas, como dimensões do material, tamanho da trinca, distância das extremidades e elasticidade na ponta da trinca.

Para materiais granulares naturais, como os minérios, essas condições são difíceis de serem controladas dada sua formação geológica. No caso dos briquetes, por mais que eles sejam produzidos industrialmente e que haja controle de qualidade, há variações nas condições operacionais que causam variações da resistência mecânica nos lotes dos produtos. As propriedades fundamentais do fenômeno de fratura de partículas frágeis podem ser estudadas, no contexto da abordagem mecanicista, de forma mais eficaz por experimentos bem controlados em partículas individuais [10]. Os aspectos acerca das características da fratura de materiais granulares e sobre a determinação da energia de fratura dos mesmos são descritos na Seção 3.2.2.

### 3.2.2 Energia de Fratura

Esta seção trata da definição da energia de fratura de uma partícula frágil, bem como um método para sua determinação.

Segundo TAVARES e KING [10], em geral, a energia de fratura da partícula

é maior que a energia utilizada pela trinca. A energia excedente será distribuída, quando a fratura estiver completa, na forma de energia cinética dos fragmentos gerados, o que pode resultar em novas quebras. A energia fornecida para o material pode ser bem controlada, por exemplo, com a queda de uma massa de uma determinada altura sobre a partícula, a qual deve permanecer apoiada sobre um objeto aproximadamente rígido e fixo. Um equipamento que reproduz esse controle foi desenvolvido em 1986 por Reiner Weichert e é denominado Célula de Carga de Impacto (CCI) [31].

Esse aparato, apresentado na Figura 3.5, é constituído por uma bola de aço, que cai sob a ação da gravidade, a partir de uma altura predeterminada, até se chocar contra a partícula de interesse, posicionada sobre uma barra de aço equipada com sensores de deformação. A altura de queda deve ser suficiente para garantir que todas partículas contidas na amostra fraturem. O impacto da bola é responsável pela propagação de uma onda de compressão, que causa uma pequena deformação nos sensores de deformação de alta resolução, posicionados lateralmente na barra metálica. A aquisição dos dados é iniciada quando a bola cruza o feixe de laser [31].

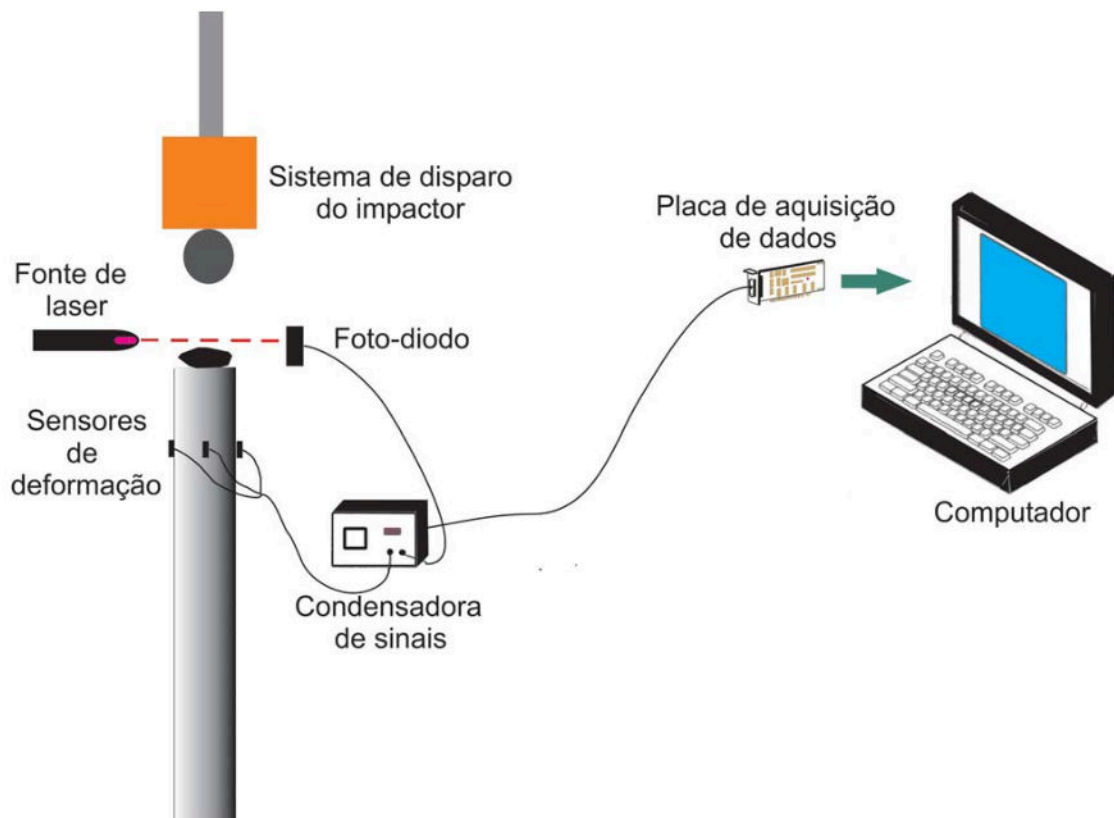


Figura 3.5: Esquema da célula de carga de impacto [32].

O balanço energético do impacto da bola sobre a partícula na CCI pode ser descrito pela Equação 3.2 [33].

$$E_i = E_c + E_r + E_{res} \quad (3.2)$$

Em que  $E_i$  é a energia de impacto aplicada pela bola,  $E_r$  é a energia absorvida na deformação da barra,  $E_{res}$  é a energia residual da bola e  $E_c$  é a perda, ou dissipação, total de energia, representando a energia consumida na quebra da partícula, e outras perdas, como atrito, deformação plástica e calor [33].

A energia de fratura da partícula ( $E_f$ ) corresponde à energia absorvida até o instante de sua fratura e pode ser determinada pela área abaixo da curva força ( $F$ ) x deformação ( $\Delta$ ), avaliada desde o início da aplicação da força até a sua deformação crítica no instante da fratura ( $\Delta_c$ ), conforme Equação 3.3 [10].

$$E_f = \int_0^{\Delta_c} F d\Delta \quad (3.3)$$

Na CCI, a energia de fratura pode ser determinada pela Equação 3.4, considerando que a inércia da bola é desprezível, que há continuidade de forças nas superfícies em contato ( $F_r = F_b = F$ ) e que a bola e a barra são corpos rígidos [10].

$$E_f = v_0 \int_0^{t_c} F(t) dt + g \int_0^{t_c} F(t) dt - \frac{1}{2m_b} \left( \int_0^{t_c} F(t) dt \right)^2 - \frac{1}{\rho_r A_r C_r} \int_0^{t_c} F^2(t) dt \quad (3.4)$$

O termo  $v_0$  é a velocidade da bola no instante em que inicia o contato,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $m_b$  é a massa da bola,  $\rho_r$  é a densidade da barra,  $A_r$  é a área da seção transversal da barra e  $C_r$  é a velocidade da onda na barra.

A energia específica de fratura ( $E_{mf}$ ) é determinada pela razão entre a energia de fratura ( $E_f$ ) e a massa da partícula ( $m_p$ ), conforme Equação 3.5 [10].

$$E_{mf} = \frac{E_f}{m_p} \quad (3.5)$$

### 3.2.3 Modelo de Quebra

Nesta seção é descrita a modelagem matemática da quebra de partículas sob a ótica do modelo mecanicista UFRJ, utilizando a abordagem desenvolvida por Tavares [10, 11].

Nesta abordagem, considera-se que, quando uma partícula é submetida a um impacto, pode ocorrer a sua quebra volumétrica, dando origem a uma distribuição de fragmentos, cada qual com uma nova energia de fratura. Por outro lado, caso não ocorra a quebra volumétrica, a partícula terá sofrido um dano, que reduzirá sua energia de fratura, e, em conjunto, será observada uma perda mássica superficial, com geração de finos. O algoritmo do modelo de quebra de Tavares é ilustrado na

Figura 3.6.

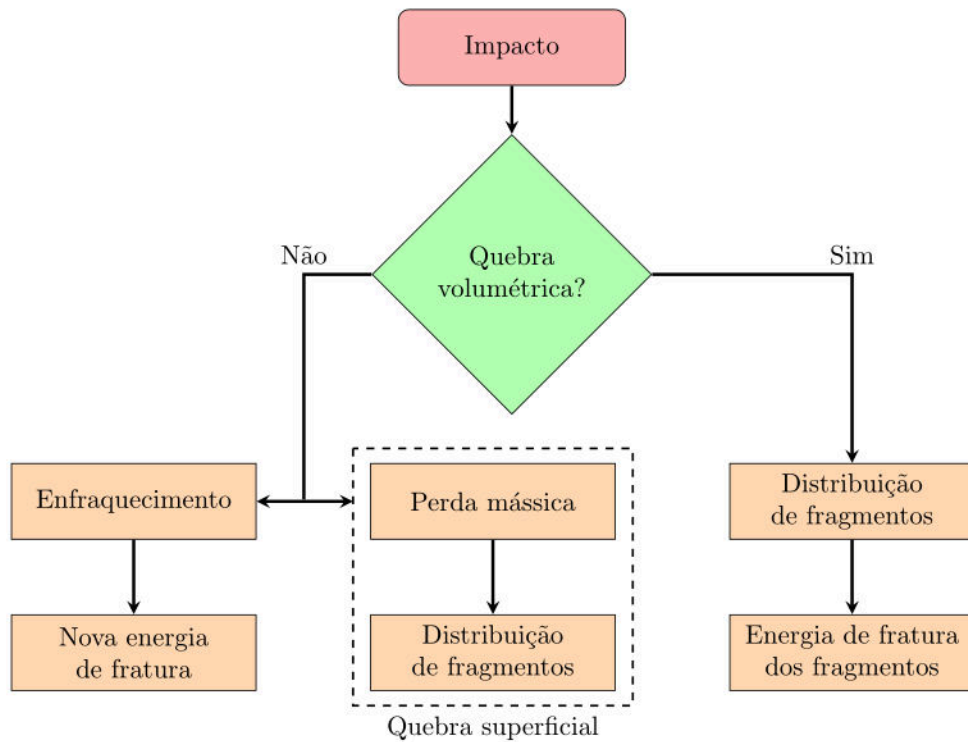


Figura 3.6: Fluxograma do algoritmo do modelo de quebra de Tavares.

Em função da quantidade de energia fornecida à partícula, diferentes formas de quebra podem ocorrer. Quando a energia fornecida à partícula é suficientemente grande, ocorre a quebra volumétrica, em que a partícula é estilhaçada, gerando uma distribuição de tamanhos de fragmentos. Por outro lado, quando pouca energia é fornecida para a partícula (clivagem), é dito que ocorreu quebra superficial [34]. Esta é definida, por TAVARES e KING [11], quando a massa dos fragmentos gerados for menor que 10% da massa da partícula antes do evento de impacto. A quebra superficial pode ser subdividida em lascamento, quando apenas partes do material são liberadas, e em abrasão, quando fragmentos finos são gerados de grande parte da superfície da partícula. A Figura 3.7 mostra, esquematicamente, essa relação entre a quantidade de energia fornecida à partícula e seus possíveis comportamentos, quebra volumétrica ou quebra superficial.

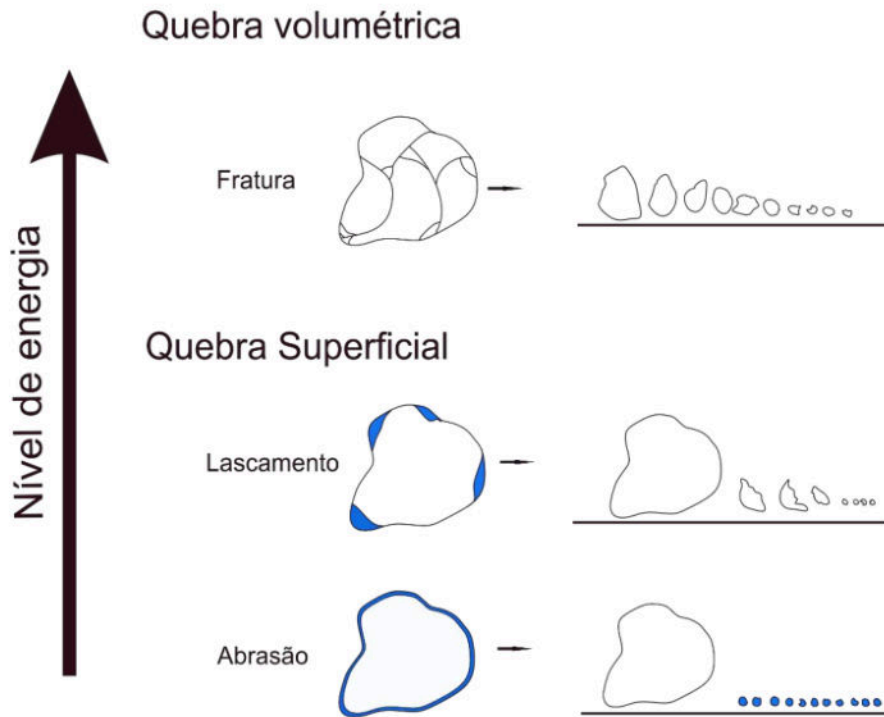


Figura 3.7: Representação das quebras volumétrica e superficial em função do nível de energia [35].

### 3.2.4 Distribuição de Energias de Fratura de Partículas

Quando as características de fratura de partículas individuais de uma amostra são medidas, tem-se como resultado uma grande dispersão de valores. Isso ocorre pela distribuição das trincas em cada partícula, em termos de tamanho e quantidade, bem como devido à sua forma, no caso de partículas de formato irregular [31]. Portanto, uma abordagem estatística torna-se fundamental para descrever o comportamento da população a partir de uma amostra. Nesse sentido, é necessário utilizar uma distribuição de probabilidades de fratura em função da energia específica a qual o material foi submetido. Na versão contínua do modelo de quebra de Tavares, considera-se que uma partícula pode, dependendo da energia específica de impacto, sofrer quebra volumétrica ou quebra superficial. Essa abordagem pode ser ilustrada graficamente em termos probabilísticos, conforme na Figura 3.8.

Supondo um material genérico com distribuição de energias de fraturas dada e sejam três energias específicas  $E_1 < E_2 < E_3$ , com respectivas probabilidades de quebra  $P(E_1) < P(E_2) < P(E_3)$ . No caso,  $P(E_1) = 0$ ,  $P(E_3) = 1$  e  $0 < P(E_2) < 1$ . Na região em que a intensidade dos esforços é muito pequena ( $E_1$ ), a partícula está sujeita à quebra superficial e ao enfraquecimento. Por outro lado, quando a energia específica do impacto é muito grande ( $E_3$ ), ocorre a quebra volumétrica de 100% da população. Além disso, há uma região de transição para intensidades de

esforços intermediárias ( $E_2$ ), quando apenas uma fração da população sofre fratura.

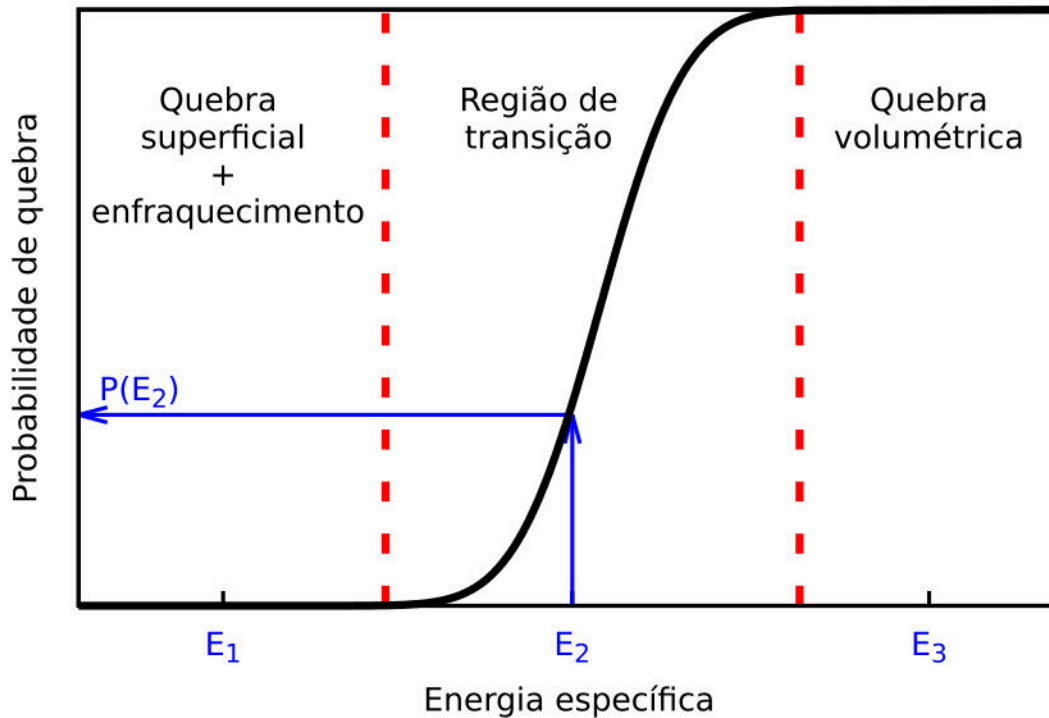


Figura 3.8: Probabilidade de quebra volumétrica em função da intensidade dos esforços, mostrando os possíveis resultados de um evento de impacto.

A curva de probabilidade de quebra (Figura 3.8) é representada na forma de uma função de distribuição cumulativa. Nas últimas décadas diversas funções de distribuição cumulativas foram propostas para representar a probabilidade de fratura ( $P$ ) do material quando submetidos a diferentes níveis de energia específica de impacto ( $E_m$ ) [10]. Nesse contexto, a função, apresentada na Equação 3.6, foi proposta por WEIBULL [36] para medição da resistência de materiais em termos de tensão. Porém, há aplicações da função para descrever dados de energia de fratura de partículas de esferas de vidro e de clínquer de cimento quase esféricas [31].

$$P(E_m) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{E_m}{\sigma_0} \right)^\beta \right] \quad (3.6)$$

Essa função possui dois parâmetros de ajuste para o material,  $\beta$  e  $\sigma_0$ . O parâmetro  $\beta$  está relacionado com a uniformidade dos dados, enquanto o parâmetro  $\sigma_0$  é chamado de resistência característica. CAVALCANTI e TAVARES [15] avaliaram o uso da função Weibull (Equação 3.6) para descrever a probabilidade de fratura de pelotas queimadas de minério de ferro e concluíram que ela tem boa capacidade para isso. No entanto, ela apresentou limitações para representar as variações das distribuições de energias de fratura com o tamanho das pelotas.

A função de distribuição cumulativa log-normal (Equação 3.7) também teve grande adesão na aplicação para a descrição da probabilidade de fratura de materiais frágeis de formato irregular, como quartzo, galena, esfalerita, minério de ferro, mármore e corindo [10, 11].

$$P(E_m) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\ln E_m - \ln E_{m50}}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right] \quad (3.7)$$

A função log-normal requer dois parâmetros de ajuste ao material,  $E_{m50}$ , que representa a mediana da distribuição de energias específicas de fratura (ou probabilidades de quebra), e  $\sigma$ , o desvio padrão da distribuição. Enquanto  $E_{m50}$  aponta para a energia específica que apresenta 50% de chances das partículas sofrerem quebra volumétrica,  $\sigma$  indica a dispersão da população. Além disso,  $E_{m50}$  varia com o tamanho de partícula, nos casos de minérios e pelotas [10, 14]. A Figura 3.9 mostra a influência de cada parâmetro no comportamento da curva para três materiais em uma mesma faixa de tamanhos: quartzo, minério de ferro e mármore. Os seus respectivos parâmetros de ajuste estão listados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros de ajuste da probabilidade de fratura de materiais para a função de distribuição log-normal (Equação 3.7) [11].

Material	Tamanho (mm)	$E_{m50}$ (J/kg)	$\sigma$ (ln J/kg)
Quartzo	4,00 – 4,75	73,3	0,775
Minério de ferro	4,00 – 4,75	48,3	0,706
Mármore	4,00 – 4,75	49,2	0,554



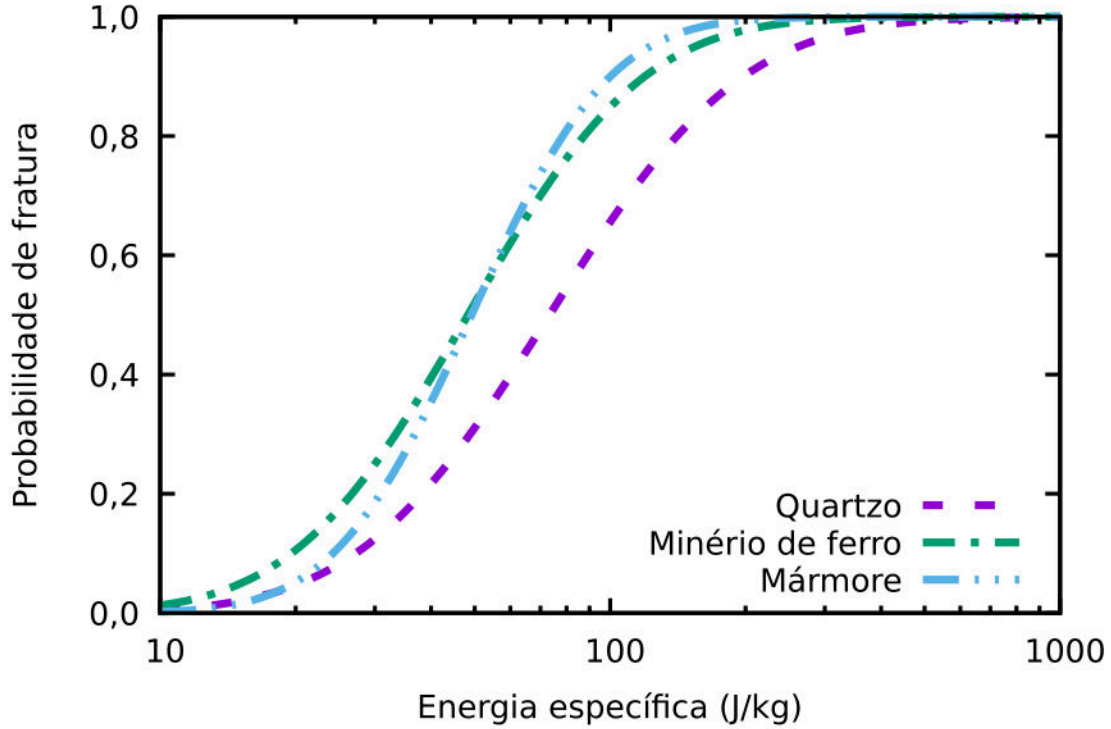


Figura 3.9: Função de distribuição log-normal na probabilidade de fratura do quartzo, do minério de ferro e do mármore.

A função de distribuição cumulativa log-normal (Equação 3.7) pode também ser usada na forma truncada, com a finalidade de se ajustar melhor aos dados experimentais [11], conforme Equações 3.8 e 3.9.

$$P(E_m) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\ln E^* - \ln E_{m50}}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right] \quad (3.8)$$

$$E^* = \frac{E_{max} E_m}{E_{max} - E_m} \quad (3.9)$$

Essa função necessita de um parâmetro de ajuste a mais que a função log-normal,  $E_{max}$ , que corresponde à energia específica a partir da qual todas as partículas fraturam, podendo ser considerado, para minérios,  $E_{max} = 4E_{m50}$  [13]. A Figura 3.10 mostra a influência de cada parâmetro no comportamento da curva para três materiais: apatita, calcário e clínquer. Os seus respectivos parâmetros de ajuste estão listados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Parâmetros de ajuste da probabilidade de fratura de materiais para a função de distribuição log-normal truncada (Equações 3.8 e 3.9) [11].

Material	Tamanho (mm)	$E_{50}$ (J/kg)	$\sigma$ (ln J/kg)	$E_{max}$ (J/kg)
Apatita	2,00 – 2,80	43,1	0,987	937,9
Calcário	4,00 – 4,75	157,2	0,857	500,3
Clínquer	2,00 – 2,80	422,3	0,839	821,6

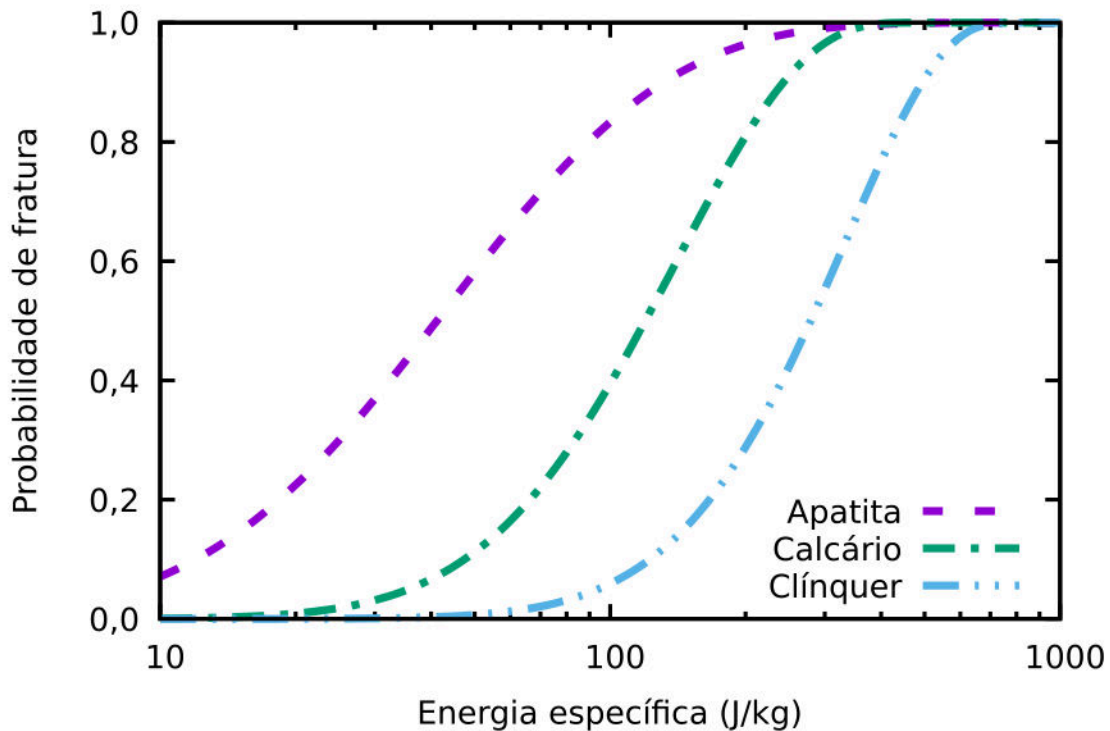


Figura 3.10: Função de distribuição log-normal truncada na probabilidade de fratura da apatita, do calcário e do clínquer.

O parâmetro  $E_{max}$  afeta diretamente a distribuição, em que, para valores de energia específica maiores que  $E_{max}$ , a probabilidade de quebra é 1, indicando que, na população de partículas, não há indivíduos com energia de fratura superior a  $E_{max}$ . Por conta disso, quando seu valor é reduzido para próximo de  $E_{m50}$ , este perde a capacidade de determinar diretamente a mediana da distribuição.

Recentemente, CAVALCANTI e TAVARES [15] demonstraram que a função de distribuição cumulativa gama, descrita pela Equação 3.10 tem boa capacidade para representar a probabilidade de quebra pelotas queimadas de minério de ferro [14, 15, 20].

$$P(E_m) = \frac{1}{\Gamma(\eta)\lambda^\eta} \int_0^{E_m} x^{\eta-1} \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) dx \quad (3.10)$$

Esta função apresenta dois parâmetros de ajuste,  $\lambda$  e  $\eta$ . A restrição matemática dessa função é imposta pelo valor do parâmetro  $\eta$ , que deve ser maior que 1.

Com relação às pelotas queimadas, os autores avaliaram diversas funções de distribuição cumulativa para descrever sua probabilidade de fratura em função da energia específica, conforme apresentado na Figura 3.11.

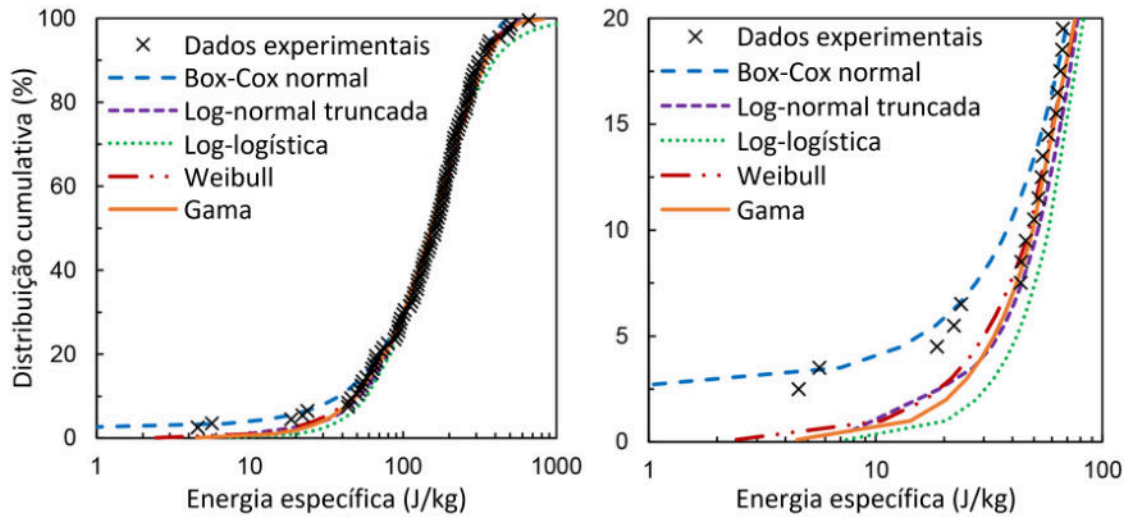


Figura 3.11: Comparação de funções de distribuição para dados de energia específica de fratura de pelotas queimadas de minério de ferro. Adaptado de TAVARES *et al.* [20].

A escolha pela função gama para as pelotas queimadas se deu por descrever bem os dados e porque sua cauda inferior não se estendeu excessivamente, para representar bem os eventos de impacto de baixas energias [20]. No entanto, percebe-se, na Figura 3.11, que os dados experimentais de baixas energias específicas não se ajustam bem à função gama.

A Figura 3.12 mostra a influência de cada parâmetro no comportamento da distribuição cumulativa para um caso hipotético, em que  $\eta$  afeta a inclinação da curva e  $\lambda$  interfere na sua translação horizontal.

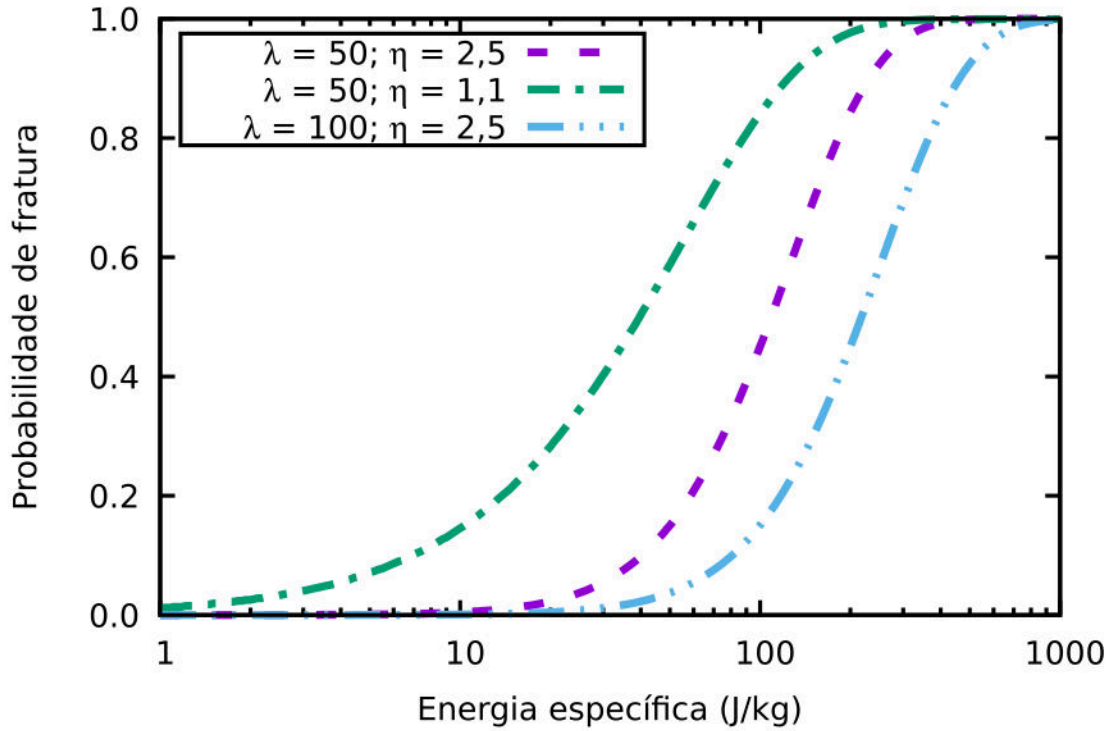


Figura 3.12: Influência dos parâmetros da função de distribuição gama na probabilidade de fratura.

Como as pelotas verdes de minério de ferro são endurecidas para apresentarem melhores propriedades físicas e mecânicas para o seu manuseio e transporte, é interessante compará-las com as pelotas queimadas em termos de probabilidade de fratura (Figura 3.13). As pelotas queimadas foram ajustadas segundo a função de distribuição cumulativa gama (Equação 3.10) por CAVALCANTI *et al.* [14], enquanto as pelotas verdes seguem a log-normal com truncamento superior (Equações 3.8 e 3.9), de acordo com TAVARES e ALMEIDA [9]. A Tabela 3.4 apresenta os respectivos parâmetros calibrados para cada material.

Tabela 3.4: Parâmetros de ajuste da probabilidade de fratura de pelotas queimadas e de pelotas verdes.

Pelota queimada (Equação 3.10) [14]		Pelota verde (Equações 3.8 e 3.9) [9]	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$\lambda$ (J/kg)	37,1	$E_{max}$ (J/kg)	800
$\eta$ (-)	3,92	$E_{m50}$ (J/kg)	105,4
-	-	$\sigma$ (ln J/kg)	0,729
Tamanho (mm)	9,0 – 12,5	Tamanho (mm)	10,0 – 12,5

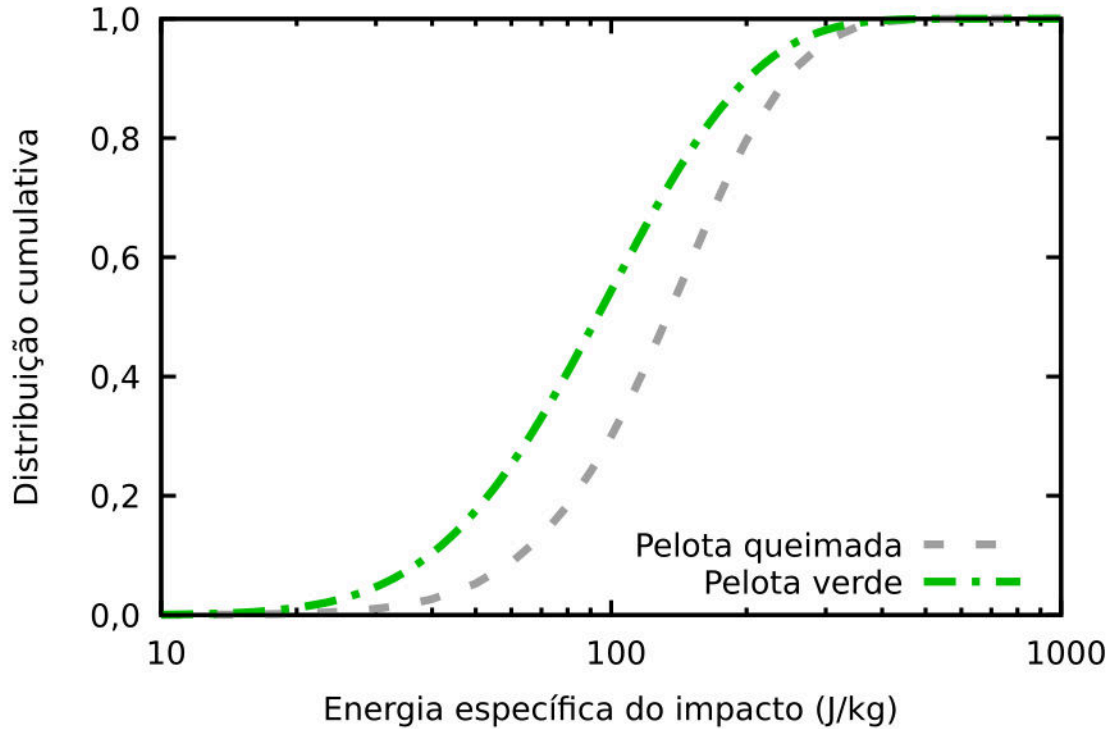


Figura 3.13: Comparação da probabilidade de fratura entre pelotas queimadas e pelotas verdes.

Um ensaio de simples realização para a obtenção de dados experimentais da probabilidade de fratura é o ensaio de queda individual, que consiste em permitir que as partículas colidam individual e sucessivamente sobre uma superfície de interesse, quando soltas a partir de uma altura predeterminada. Assim, pode-se avaliar para cada colisão a quantidade de partículas que sofreram quebra volumétrica e a influência da distribuição de energias específicas na probabilidade de quebra. Quando os efeitos da resistência do ar são desprezíveis, a energia específica do impacto ( $E_k$ ) pode ser calculada em função da altura de queda ( $h$ ) pela Equação 3.11.

$$E_k = gh \quad (3.11)$$

No entanto, para ensaios de altas energias de impacto, o ensaio de queda individual torna-se impraticável, dada a necessidade de alturas de queda cada vez maiores. Nesse sentido, foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologia Mineral da UFRJ um equipamento capaz de projetar as partículas contra uma superfície de interesse com altas velocidades de colisão [14]. O dispositivo, apresentado na Figura 3.14, é denominado projetor pneumático e consiste na injeção de gás comprimido dentro de um tubo propulsor que desloca em alta velocidade a partícula de interesse que ali está localizada.

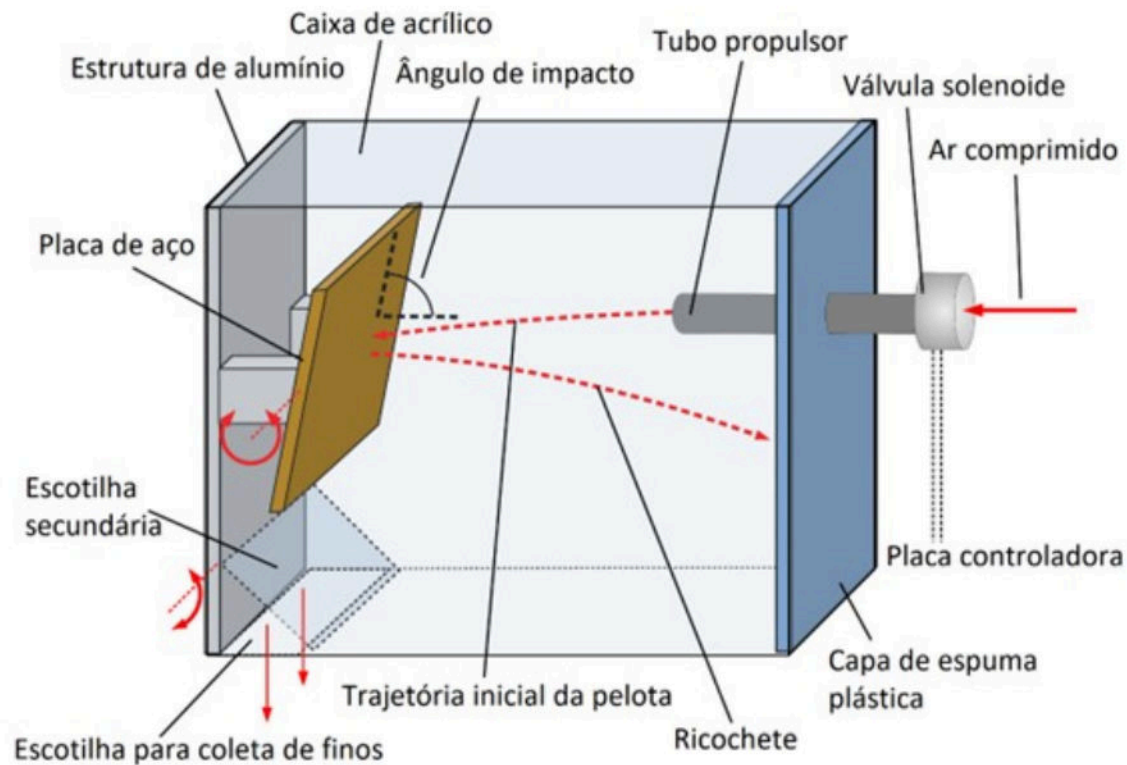


Figura 3.14: Projetor pneumático de partículas individuais [34].

O projetor pneumático foi construído em uma estrutura metálica, com faces de acrílico e contém uma porta e uma abertura secundária para a remoção de finos. Uma placa controladora é responsável por regular uma válvula solenoide conectada a uma linha de ar comprimido e ao tubo propulsor. Quando o equipamento é acionado, uma corrente de ar percorre o tubo propulsor e projeta a partícula contra o alvo, que pode ter sua inclinação regulada. O painel de controle permite definir o tempo de abertura da válvula, enquanto a pressão do ar pode variar entre 1 e 8 bar, resultando em velocidades de impacto com valores além da velocidade terminal da partícula no ar sob efeito da gravidade [34].

A energia específica do impacto no projetor pneumático foi calculada, no contexto de pelotas queimadas de minério de ferro, com a Equação 3.12, em função da velocidade de translação ( $v$ ) das partículas imediatamente antes da colisão [14].

$$E_k = \frac{v^2}{2} \quad (3.12)$$

Nesse caso, dada a pequena distância entre o tubo e o anteparo e o formato da partícula, foram desprezados os efeitos da rotação das pelotas queimadas durante seu movimento. Quando um corpo rígido, que está em repouso, é submetido a um fluxo de ar na forma de um pulso, está sujeito a um torque inicial, que provoca

a sua rotação durante sua trajetória. Caso fossem consideradas essas variáveis, a energia específica do impacto poderia ser descrita, para uma situação de translação e rotação simples, pela Equação 3.13.

$$E_k = \frac{v^2}{2} + \frac{r^2\omega^2}{2} \quad (3.13)$$

Os ensaios com as pelotas queimadas no projetor pneumático estão ilustrados na Figura 3.15, na qual elas colidem com um anteparo de aço a velocidades de 15,6 m/s. Nela também é possível observar as diferenças entre a quebra superficial e a quebra volumétrica, em aspectos visuais.

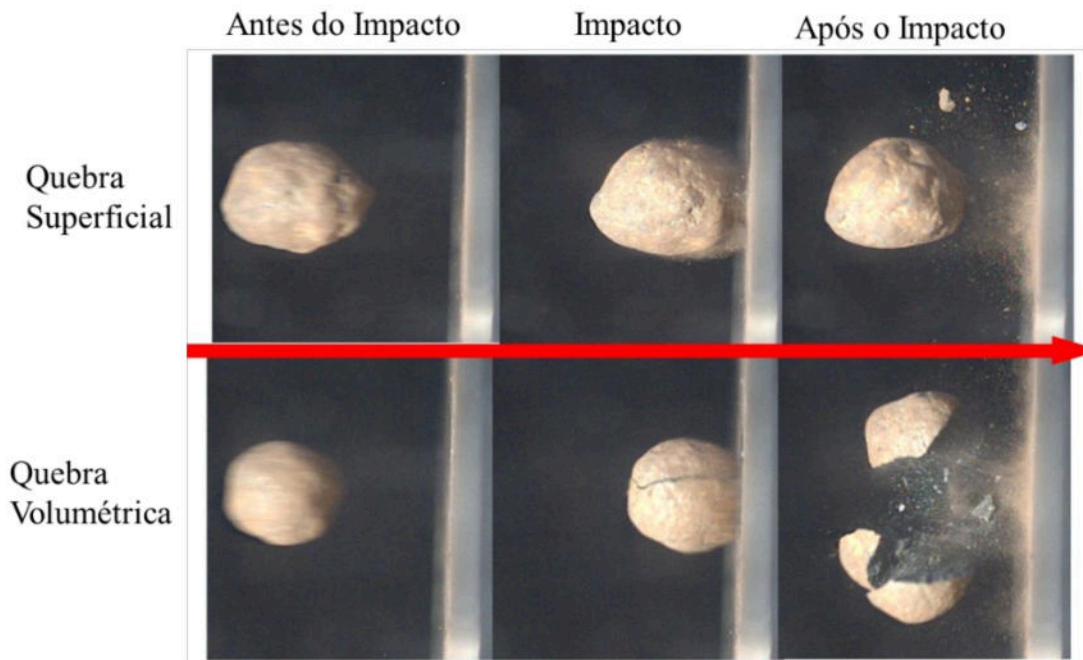


Figura 3.15: Sequência de fotos do impacto de pelotas queimadas de minério de ferro, utilizando projetor pneumático com um alvo de aço. Na parte superior, há a ocorrência de quebra superficial, enquanto na parte inferior há a ocorrência de quebra volumétrica [34].

Os ensaios de impacto de queda individual e com o projetor pneumático apresentam boa correspondência para representar a distribuição de energias de fratura de pelotas queimadas e podem ser usados complementarmente, conforme realizado por CAVALCANTI *et al.* [14]. Além disso, os autores compararam esses resultados com ensaios de compressão lenta e notaram que é necessário fornecer mais energia nos ensaios de impacto do que na compressão lenta. Essa comparação está apresentada na Figura 3.16.

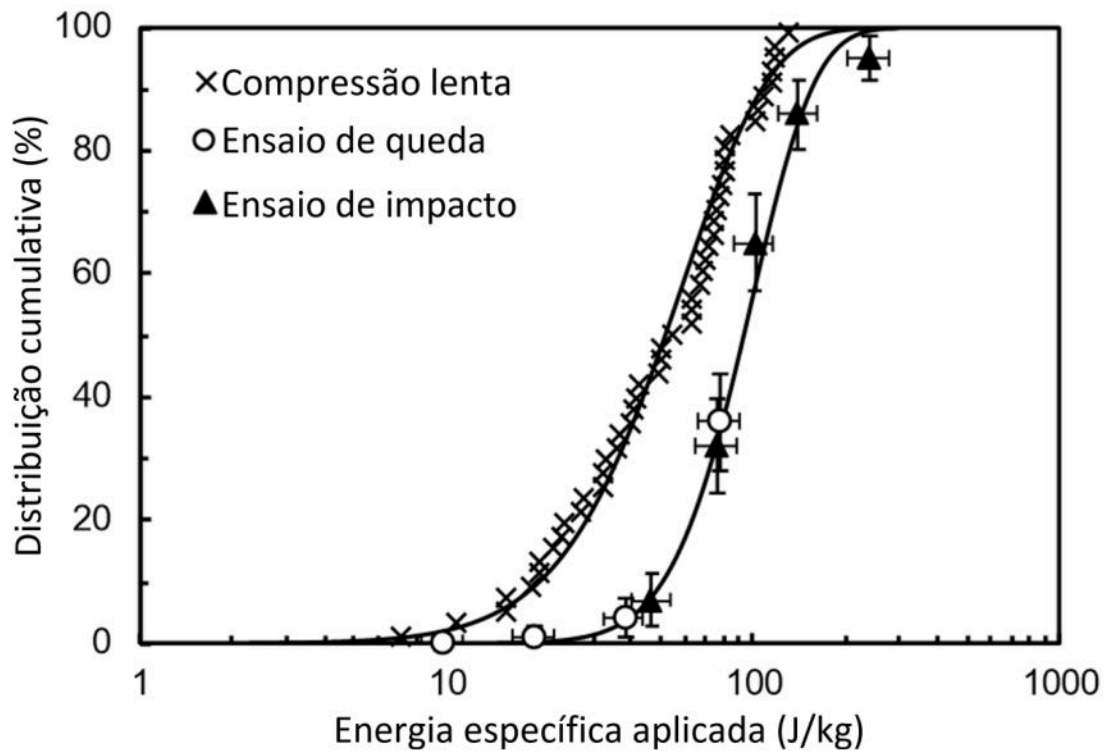


Figura 3.16: Comparação da distribuição de energias de fratura em compressão lenta e probabilidades de quebra para pelotas queimadas de minério de ferro. As linhas representam o ajuste da distribuição Gama aos dados experimentais, em símbolos. Adaptado de CAVALCANTI *et al.* [14].

A diferença na distribuição de energias de fratura para os diferentes ensaios comparados é explicada por TAVARES [31] e está relacionada, primeiramente, com as distintas formas de determinação do consumo da energia. Para os experimentos de compressão, a energia específica é calculada a partir da integração da curva força-deformação, enquanto nos testes de impacto é utilizada a energia do impacto (Equações 3.11 e 3.12). Por outro lado, as diferenças entre impacto único (um ponto de carregamento) e compressão lenta (dois pontos de carregamento) podem ser explicadas com base em vários efeitos, que incluem o estado de tensões, a probabilidade de encontrar defeitos e, em testes de carregamento de dois pontos, as partículas são posicionadas em sua posição mais estável, de modo que sua menor dimensão esteja na direção da aplicação das tensões.

Além de disso, a taxa de carregamento entre ambos os ensaios é distinta. Ela pode influenciar o campo de tensões dentro de uma partícula e o comportamento de propagação da trinca. Portanto, a quebra da partícula é afetada, devido ao efeito das ondas elásticas e pela sensibilidade da taxa de deformação e do comportamento da propagação da trinca [31].



### 3.2.5 Dano Acumulado

Quando a energia de fratura de uma partícula for menor que a energia do impacto a qual ela foi submetida, toda energia será absorvida e a partícula fraturará. Por outro lado, quando a energia do impacto for menor que a energia de fratura da partícula, ela absorverá parte da energia do impacto e sofrerá um dano. Conforme os impactos se sucedem, aumenta o dano acumulado da partícula, que tem sua rigidez degradada progressivamente, causando a redução da energia de fratura da partícula [11].

Para descrever quantitativamente a fratura de uma partícula por impactos repetidos, os mecanismos que são dominantes devem ser identificados com exatidão [11]. Os fatores que influenciam o número de eventos necessários para a quebra da partícula são [37]:

1. a distribuição da força das partículas em uma orientação padrão;
2. a distribuição da força aplicada, originada no impacto;
3. a distribuição da resistência das partículas devido a diferentes orientações ao impacto; e,
4. a redução da resistência com impactos repetidos devido ao efeito de enfraquecimento.

Além disso, uma vez que os materiais granulares tendem a ter sua energia específica de fratura reduzida após um impacto que não cause quebra volumétrica, faz-se necessário aplicar a metodologia da mecânica do dano. Nessa abordagem, para cada colisão  $n$  de energia específica  $E_{k,n}$ , sofrida pela partícula, uma nova energia específica de fratura ( $E_{m,n}$ ) é definida, a qual é proporcional à energia de fratura anterior ao impacto ( $E_{m,n-1}$ ) a menos de um fator de dano ( $D_n$ ), conforme a Equação 3.14. O valor de  $D_n$  pode ser determinado implicitamente de acordo com a Equação 3.15, em que  $\gamma$  é o único parâmetro que requer ajuste e que, normalmente, depende do tipo de partícula [11].

$$E_{m,n} = E_{m,n-1} (1 - D_n) \quad (3.14)$$

$$D_n = \left[ \frac{2\gamma}{(2\gamma - 5D_n + 5)} \frac{E_{k,n}}{E_{m,n-1}} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad (3.15)$$

Segundo TAVARES e KING [11], pelo menos dois experimentos são necessários para determinação de  $\gamma$ , denominado parâmetro de dano acumulado:

- ensaios de impacto simples a energias suficientes para determinar a distribuição de energias de fratura do material original e

- ensaios de impactos repetidos para determinar a fração cumulativa de partículas que sofrem quebra volumétrica a uma dada energia de impacto.

Dentre os ensaios a serem realizados para a determinação do parâmetro de dano acumulado, estão os ensaios de queda individual e de projeção pneumática, apresentados na Seção 3.2.4. Nesses casos, as partículas que não sofrem fratura são novamente ensaiadas nas mesmas condições, até que elas sofram quebra volumétrica ou até um número máximo de ensaios estipulados previamente determinado.

### 3.2.6 Distribuição Granulométrica do Produto da Quebra

Uma vez que a energia do impacto é maior que a energia necessária para fraturar o material, ocorre a quebra volumétrica e a quantidade de fragmentos finos aumenta com a energia do impacto, conforme Equação 3.16 [14].

$$t_{10} = A \left\{ 1 - \exp \left[ -b' \left( \frac{E_k}{E_{50b}} \right)^c \right] \right\} \quad (3.16)$$

O termo  $t_{10}$  representa a proporção mássica de fragmentos menores 1/10 do tamanho original da partícula que sofreu o impacto, enquanto  $A$ ,  $b'$  e  $c$  são parâmetros de ajuste. O termo  $c$  foi introduzido na Equação 3.16 por CAVALCANTI *et al.* [14], especificamente, para modelar a distribuição de fragmentos oriundos da quebra de pelotas queimadas. Já  $E_{50b}$  é a mediana da distribuição de energias de fratura específica das partículas que não quebram em um determinado impacto.

As pelotas queimadas, por exemplo, possuem seus parâmetros de ajuste  $A = 4,0\%$ ,  $b' = 0,15$  e  $c = 2,6$  [14] e o seu  $t_{10}$  pode ser representado em função da razão entre a energia específica de impacto ( $E_k$ ) e a mediana da energia de fratura específica das partículas que não quebram em um determinado impacto ( $E_{50b}$ ), conforme apresentado na Figura 3.17.

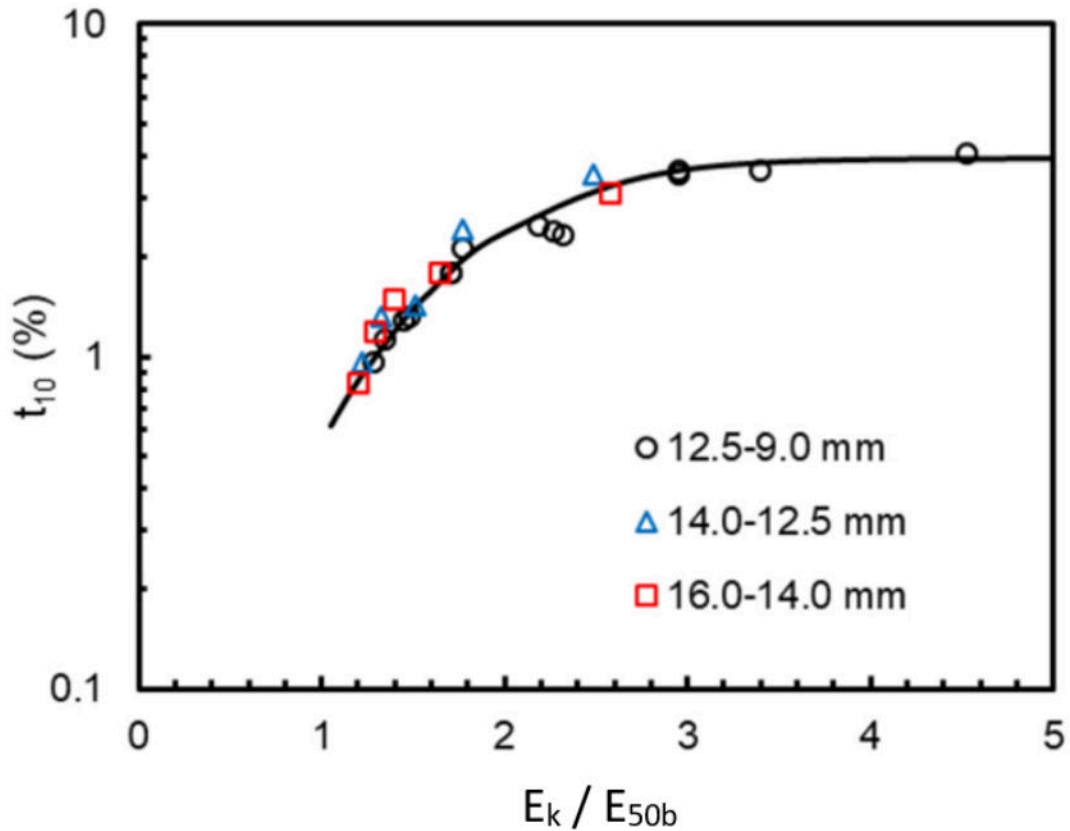


Figura 3.17: Relação entre o percentual mássico menor que 10% do tamanho original da partícula ( $t_{10}$ ) e a razão entre a energia específica de impacto ( $E_k$ ) e a mediana da energia de fratura específica das partículas que não quebram em um determinado impacto ( $E_{50b}$ ). Gráfico para pelotas queimadas de minério de ferro adaptado de CAVALCANTI *et al.* [14].

O comportamento da curva do modelo de  $t_{10}$  consiste em um crescimento aproximadamente linear (na escala log-log) até atingir um patamar máximo (coincidente com o valor do parâmetro  $A$ ), para altas energias específicas de impacto. Além disso, o comportamento constante para altas energias específicas de impacto consiste no fato da quantidade de fragmentos gerados menores que 10% do tamanho original da partícula ser a mesma nesse intervalo, independentemente da energia do impacto.

A partir do valor de  $t_{10}$ , é possível determinar a granulometria completa do produto da quebra volumétrica. Para isso, são determinados outros  $t_n$ 's, ou seja, os percentuais mássicos de partículas menores que  $1/n$  do seu tamanho original. Os  $t_n$ 's comumente avaliados, além do  $t_{10}$ , são:  $t_{1,2}$ ,  $t_{1,5}$ ,  $t_2$ ,  $t_4$ ,  $t_{25}$ ,  $t_{50}$  e  $t_{75}$ . Ou seja, são analisados os percentuais mássicos menores que 83%, 67%, 50%, 25%, 4%, 2% e 1%, respectivamente, do tamanho original da partícula. A função utilizada para relacionar os parâmetros é a função beta incompleta, descrita pela Equação 3.17.

$$t_n(t_{10}, \alpha_n, \beta_n) = \frac{1}{\int_0^1 y^{\alpha_n-1} (1-y)^{\beta_n-1} dy} \int_0^{t_{10}} y^{\alpha_n-1} (1-y)^{\beta_n-1} dy \quad (3.17)$$

Por outro lado, quando o fenômeno de abrasão ocorre, a granulometria dos fragmentos gerados pode ser estimada por meio da Equação 3.18 [14].

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } d_i \geq d_A \\ \left(\frac{d_i}{d_A}\right)^\varphi & \text{se } d_i < d_A \end{cases} \quad (3.18)$$

Em que  $d_A$  e  $\varphi$  são parâmetros de ajuste,  $A_{ij}$  é a fração mássica do material contida na classe de tamanho  $i$  oriunda de  $j$  e  $d_i$  é o tamanho representativo da classe  $i$ . Considera-se, nesse caso, que a distribuição de tamanhos do produto da quebra superficial é independente do tamanho original da partícula, levando a  $A_{ij} = A_j$  [38].

Ao avaliar a quebra superficial, deve-se quantificar também, em termos mássicos, a geração de finos. Nesse sentido, GHADIRI e ZHANG [39] propuseram uma expressão que relaciona a fração mássica perdida de uma partícula ( $\xi$ ) em um impacto com suas propriedades físicas, mecânicas e a velocidade do impacto, conforme a Equação 3.19.

$$\xi = a \frac{\rho v^2 l H}{K_c^2} \quad (3.19)$$

Em que  $\rho$  é a massa específica do material,  $v$  é a velocidade do impacto,  $l$  é a dimensão linear da partícula,  $H$  é a dureza da partícula e  $K_c$  é a tenacidade à fratura da partícula.

No contexto das pelotas queimadas de minério de ferro, CAVALCANTI *et al.* [40] buscaram mensurar as perdas mássicas nos impactos sofridos pelas pelotas que resultaram em quebra superficial. Eles realizaram ensaios de queda individual, descritos na Seção 3.2.4, a diferentes níveis energéticos, a diferentes ângulos de impacto e para composições químicas distintas das pelotas. A Figura 3.18 mostra a distribuição dos percentuais das massas perdidas em cada impacto realizado, para cada energia estudada.

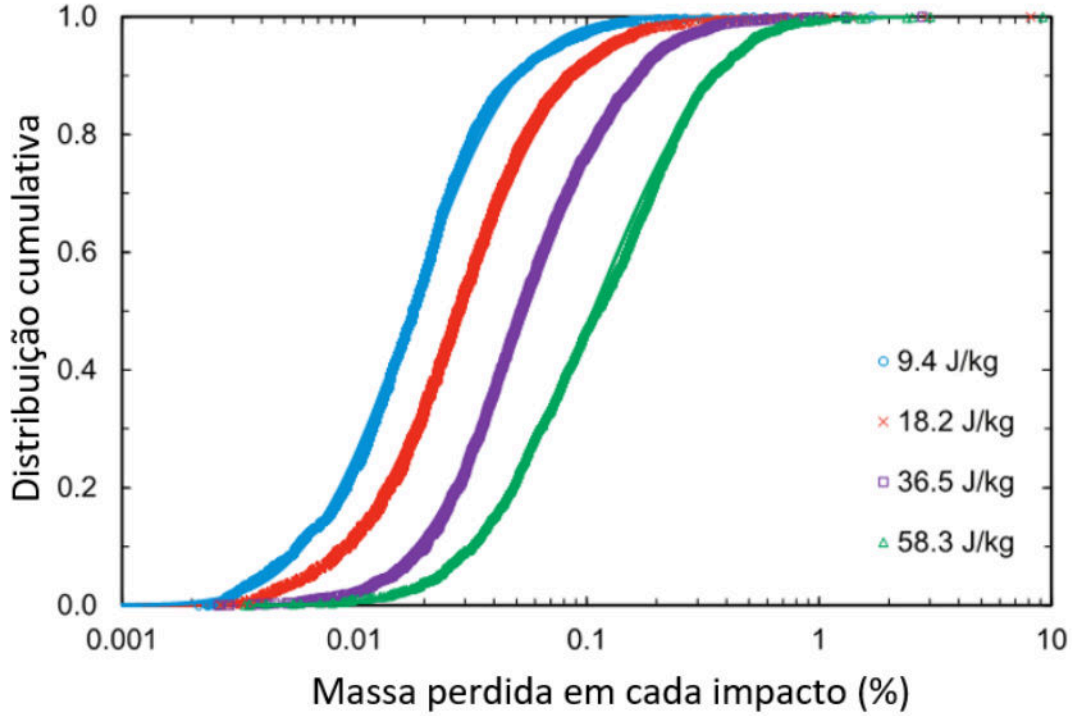


Figura 3.18: Distribuição cumulativa do percentual de massa perdida de pelotas queimadas de minério de ferro, a diferentes níveis de energia. Adaptado de CAVALCANTI *et al.* [40].

As distribuições dos percentuais mássicos foram ajustadas segundo a distribuição log-normal truncada (Equações 3.8 e 3.9), pois há um limite superior de 10 %, ao qual está definida a quebra superficial [11, 40].

Para levar em consideração a velocidade do impacto, o ângulo do impacto e as características das pelotas queimadas, CAVALCANTI *et al.* [40] modificaram o modelo de GHADIRI e ZHANG [39] (Equação 3.19) para atender aos dados experimentais. Primeiramente, o termo cinético  $v^2/2$  foi substituído pela energia específica dissipada na colisão ( $E_{loss,m}$ ). Foi assumido que a dimensão linear da partícula  $l$  é igual ao tamanho médio da pelota ( $d$ ). E, a razão  $a\rho H/K_c^2$  foi denominada  $\kappa$ , que caracteriza a suscetibilidade da partícula gerar produtos de quebra superficial. Assim, a Equação 3.19 pode ser reescrita conforme a Equação 3.20 [14, 40].

$$\bar{\xi} = 100\kappa d E_{loss,m}^{\epsilon} \quad (3.20)$$

E, o termo  $E_{loss,m}$  pode ser determinado por meio da Equação 3.21, que depende do ângulo do impacto ( $\theta$ , em graus) e da energia específica do impacto ( $E_k$ ) [14].

$$E_{loss,m} = E_k (3,0 \cdot 10^{-7} \cdot \theta^3 - 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot \theta^2 + 1,7 \cdot 10^{-2} \cdot \theta) \quad (3.21)$$

Ao usar a energia dissipada, o modelo considera a influência da contribuição do

atrito na colisão e, portanto, a componente de cisalhamento no evento de impacto. Deve-se destacar que a Equação 3.21 foi obtida e validada no contexto das pelotas queimadas de minério de ferro. Nesse sentido, sua aplicação para outros materiais exige cautela.

Finalmente, o modelo mecanicista UFRJ é descrito por meio de um balanço de massas, que considera os dois fenômenos de quebra apresentados: a volumétrica e a superficial [14, 38], conforme descrito pela Equação 3.22.

$$w_{i,n+1} = w_{i,n} [1 - P_{i,n}(E_{k,n})] [1 - \bar{\xi}_i(E_{loss,m,n})] + \sum_{j=1}^i w_{j,n} \{P_{j,n}(E_{k,n})b_{i,j}(E_{k,n}) + \bar{\xi}_i(E_{loss,m,n}) [1 - P_j(E_k)] a_{i,j}\} \quad (3.22)$$

Em que  $w_{i,n+1}$  e  $w_{i,n}$  são as frações mássicas do material contidas na classe de tamanho  $i$  depois e antes do  $n$ -ésimo impacto, respectivamente e  $a_{i,j}$  e  $b_{i,j}$  são, nessa ordem, as funções de distribuição das quebras superficial e volumétrica. O termo  $[1 - P_{i,n}(E_{k,n})] [1 - \bar{\xi}_i(E_{loss,m,n})]$  representa a fração das partículas que não sofreu quebra volumétrica nem superficial durante o  $n$ -ésimo impacto; o termo  $\sum_{j=1}^i w_{j,n} \{P_{j,n}(E_{k,n})b_{i,j}(E_{k,n})\}$  fornece a proporção de material das classes de tamanho  $i$  e mais grosseiros que sofreram quebra volumétrica e reportaram à classe de tamanho  $i$ ; o termo  $\sum_{j=1}^i w_{j,n} \{\bar{\xi}_i(E_{loss,m,n}) [1 - P_j(E_k)] a_{i,j}\}$  indica o proporção de produtos de quebra superficial que se reporta à classe de tamanho  $i$  [38].

A distribuição das energias de fratura específicas de massa das partículas contidas em cada classe de tamanho  $i$  deve ser modificada após cada impacto. Isso ocorre porque algumas partículas contidas nessa classe de tamanho podem ter sido quebradas e outras que não quebraram podem ter sofrido dano, enquanto fragmentos resultantes da quebra de partículas mais grosseiras podem ter reportado a esse tamanho. A distribuição das energias de fratura das partículas contidas na classe de tamanho  $i$  é, então, dada pela Equação 3.23 [38].

$$P_{i,n+1}(E_m) = \frac{P_{i,n+1}^*(E_m)w_{i,n} [1 - P_{i,n}(E_{k,n})] [1 - \bar{\xi}_i(E_{loss,m,n})]}{w_{i,n+1}} + \frac{P_{i,0}(E_m)w_{i,n} \sum_{j=1}^i w_{j,n} \{P_{j,n}(E_{k,n})b_{i,j}(E_{k,n})\}}{w_{i,n+1}} + \frac{P_{i,0}(E_m)w_{i,n} \sum_{j=1}^i w_{j,n} \{\bar{\xi}_i(E_{loss,m,n}) [1 - P_j(E_k)] a_{i,j}\}}{w_{i,n+1}} \quad (3.23)$$

Em que  $P_{i,n+1}^*$  é a probabilidade de quebra das partículas que sofreram dano e  $P_{i,0}$  é a distribuição de energias de fratura das partículas originais, determinadas

por ensaios laboratoriais. E,  $P_{i,n+1}^*$  pode ser obtido ao reescrever as Equações 3.14 e 3.15 pelas Equações 3.24 e 3.25 [38].

$$P_{i,n+1}^*(E_m) = \frac{P_{i,n} [E_m / (1 - D)] - P_{i,n}(E_{k,n})}{1 - P_{i,n}(E_{k,n})} \quad (3.24)$$

$$D = \left[ \frac{2\gamma(1 - D)}{(2\gamma - 5D + 5)} \frac{E_{k,n}}{E_m} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad (3.25)$$

### 3.3 Método dos Elementos Discretos

O Método dos Elementos Discretos (*Discrete Element Method*, DEM, na sigla em inglês) é uma técnica computacional utilizada para calcular as posições e deslocamentos de um grande número de elementos. Esses elementos são, geralmente, materiais granulares, como solo, alimentos e minérios. Para isso, o movimento de cada elemento é descrito pelas Equações de Newton-Euler, descritas nas Equações 3.26 e 3.27.

$$\vec{F} = m \frac{d^2 \vec{p}}{dt^2} \quad (3.26)$$

$$\vec{M} = \underline{I} \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times (\underline{I} \cdot \vec{\omega}) \quad (3.27)$$

O DEM foi desenvolvido por CUNDALL e STRACK [16], na década de 1970, quando foram simulados, em duas dimensões, nove discos iguais contidos em um quadrado, com objetivos futuros de aplicação na área da geotecnia. Nesse estudo, complementado com um teste de verificação com 197 discos de tamanhos distintos, também foi apresentado o ciclo de cálculo utilizado para a determinação das forças e os deslocamentos de cada elemento.

O algoritmo de cálculo no DEM é iniciado após a determinação das condições iniciais do problema, tais como número de elementos, forma das partículas, geometria do ambiente, parâmetros de contato, modelos de força, tempo de simulação, integrador numérico e passo de integração. Com isso, o ciclo de cálculos é aberto com a detecção dos contatos existentes entre as partículas e entre as partículas e as geometrias do sistema. Em seguida, os modelos de força são aplicados para determinação tanto da força resultante quanto do momento resultante para cada partícula. A aceleração e a aceleração angular de cada elemento são obtidas, respectivamente, a partir das Equações 3.26 e 3.27. Posteriormente, são realizadas integrações numéricas de modo a obter a velocidade e a posição de cada partícula. Com isso, é acrescido mais um instante de tempo e o ciclo é repetido até o tempo final de simulação. Esse algoritmo é apresentado, simplificadamente, na Figura 3.19.

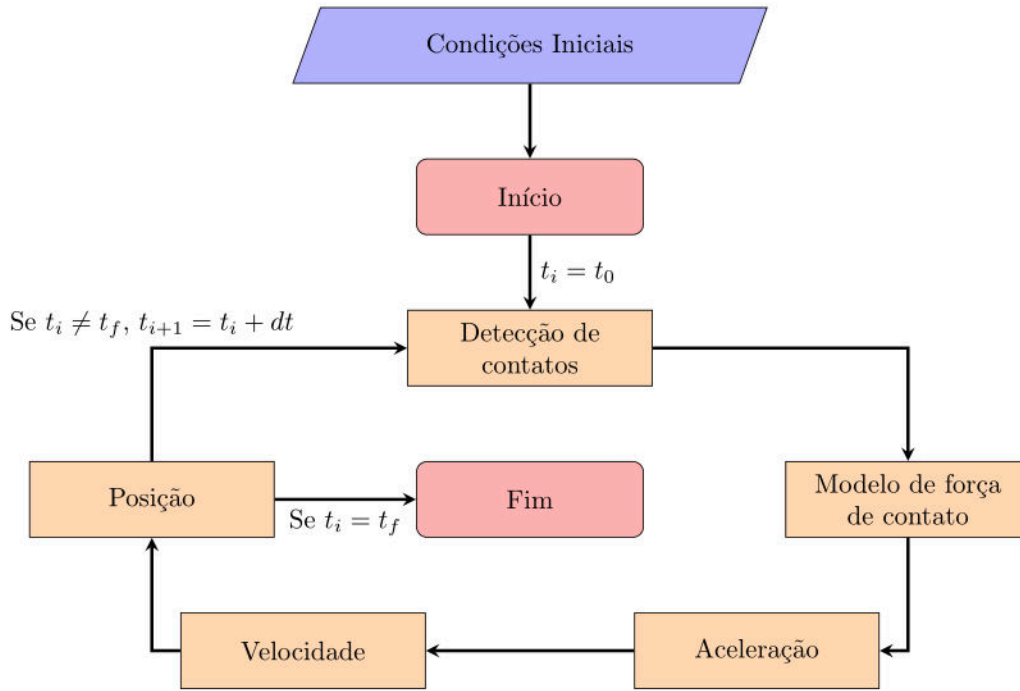


Figura 3.19: Algoritmo simplificado de cálculo DEM.

Na início da década de 1990, MISHRA e RAJAMANI [41] utilizaram um código DEM em duas dimensões para simular um moinho de bolas. Os resultados obtidos foram comparados com experimentos realizados para avaliar a potência do moinho sob diferentes condições. Os autores ressaltam a importância da escolha adequada dos parâmetros utilizados para a obtenção de resultados compatíveis, sendo eles:

- rigidez do material, para estabilização das forças;
- coeficiente de restituição, como medida de amortecimento do material; e,
- coeficiente de atrito, para verificação onde ocorre deslizamento nos contatos.

Já no final da década de 1990, CLEARY [42] utilizou a técnica de DEM para prever a movimentação da carga, o consumo de energia e o desgaste em moinhos de bolas; porém os resultados obtidos não foram confrontados com dados experimentais. Nesse estudo também foi avaliado o uso de partículas com formato alongado, que aumentou a fração de vazios da carga. Além disso, o trabalho já trata da avaliação da quebra de partículas com as informações fornecidas pelas simulações. Mais recentemente, WEERASEKARA *et al.* [43] investigaram a cominuição em moinhos de bolas, variando suas dimensões e a distribuição de tamanhos da carga. Nesse caso, a simulação DEM ocorreu em ambiente 3D. Os resultados visavam a análise da energia dissipada nas colisões e a natureza dos contatos que provocam a quebra.

Outra aplicação interessante está relacionada com a avaliação do fluxo de material particulado em ambientes industriais, em operações de manuseio, por exemplo.



No DEM, as partículas são, tradicionalmente, aproximadas por discos ou esferas, em duas e três dimensões, respectivamente. Essas formas são preferidas devido à sua eficiência computacional, no entanto tais conjuntos de partículas geralmente não reproduzem o comportamento de materiais reais porque suas formas foram idealizadas [44].

A Figura 3.20 mostra a evolução das simulações DEM em quase 50 anos de aplicação, com a simulação de discos contidos em um quadrado de CUNDALL e STRACK [16], o moinho 2D de CLEARY [42] e uma operação de transferência de material por calha, em 3D.

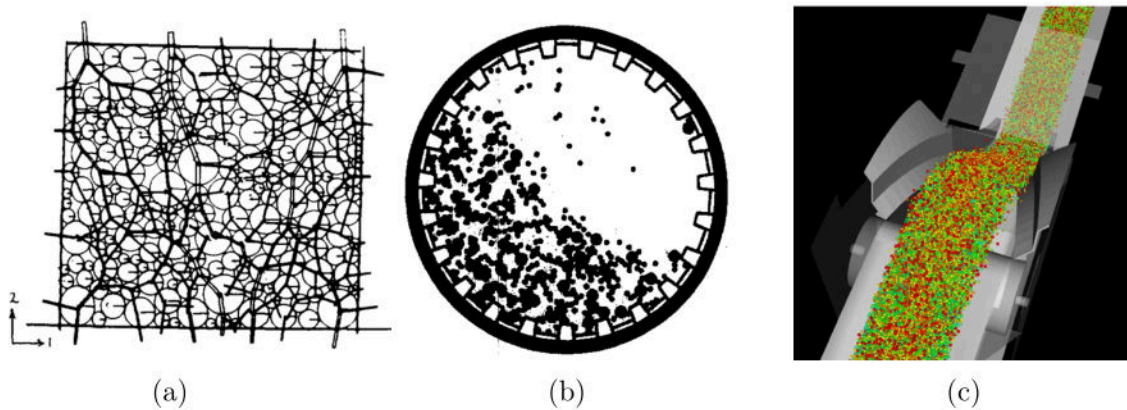


Figura 3.20: Evolução das simulações DEM, com discos contidos em um quadrado [16] (a), moinho 2D de [42] (b) e operação de transferência de material por calha em 3D [44] (c).

### 3.3.1 Simulação da Quebra de Partículas

O uso de simulações na área da cominuição traz novas informações sobre o projeto, otimização e operação de equipamentos [45]. A simulação da quebra das partículas pode ser realizada, basicamente, de duas maneiras: explicitamente no ambiente DEM e na forma de pós-processamento dos resultados, a partir dos dados gerados nas simulações DEM.

Dentre as maneiras de simular a quebra de partículas em ambiente DEM, destacam-se os modelos adotados em programas comerciais, como o Modelo de Partículas Ligadas (*Bonded-Particle Model*, BPM, na sigla em inglês), o Modelo de Substituição de Partículas (*Particle Replacement Model*, PRM, na sigla em inglês) e o Modelo de Quebra Rápida (*Fast Breakage Model*, FBM, na sigla em inglês) [46]. Essas alternativas são aplicadas, a princípio, quando o processo ao qual as partículas estão submetidas ocorre significativos eventos de quebra que afetem, entre outras coisas, o fluxo de materiais e a transferência de energia.

O BPM foi proposto por POTYONDY e CUNDALL [47] para representar rochas com formatos irregulares, formadas por partículas esféricas, que podem ter

tamanhos diferentes, e que estão ligadas entre si nos seus pontos de contato. Essas ligações entre as partículas possuem rigidez finita, ou seja, podem sofrer esforços que rompam o elo, provocando a quebra da rocha. Essa abordagem também foi usada anteriormente por MISHRA e THORNTON [48] para simular o comportamento de quebra de aglomerados de partículas ligadas entre si. Eles avaliaram a influência da velocidade do impacto, a fração de sólidos, a densidade do contato e a localização do contato na superfície do aglomerado. A Figura 3.21 ilustra um arranjo de aglomerados com ligações entre as partículas que os compõem (em preto) e entre os aglomerados (em branco), usando o BPM. Também é mostrada uma simulação de quebra de partículas ligadas realizada por MISHRA e THORNTON [48].

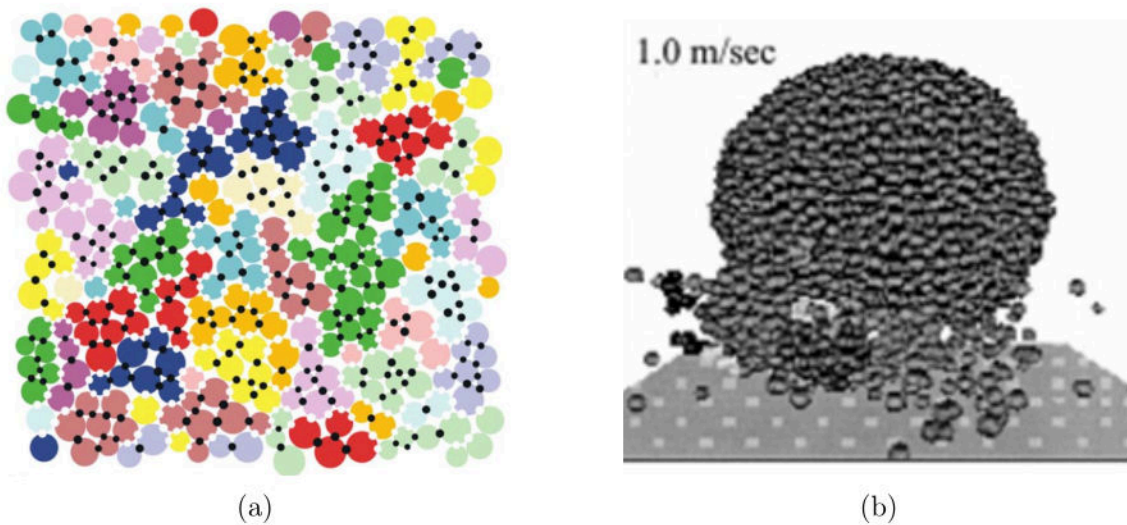


Figura 3.21: Criação de aglomerados de partículas usando o BPM (a) e simulação da quebra de partículas aglomeradas (b) [47, 48].

No caso do PRM, quando há uma condição crítica que implique na quebra da partícula, a mesma é substituída imediatamente por um conjunto de esferas individuais, aglomerados de esferas ou superquádricas [46]. A Figura 3.22 ilustra o método de substituição de partículas.

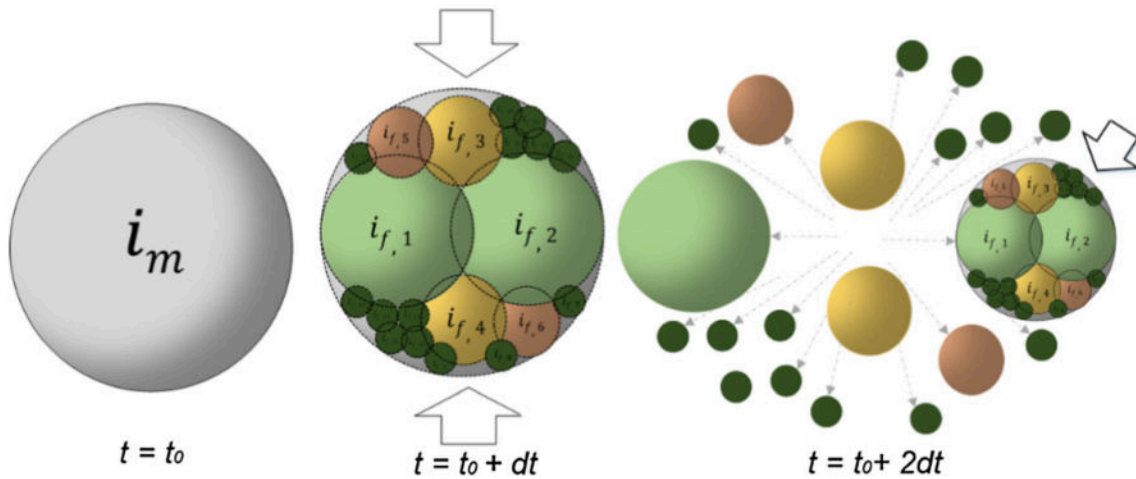


Figura 3.22: Algoritmo PRM de substituição de partículas na quebra [46].

Nessa abordagem, as novas partículas podem apresentar, inicialmente, grandes sobreposições para melhor representarem a granulometria do produto. Essa situação implica em ajustes no modelo de força de contato, para evitar altas magnitudes e manter a estabilidade da simulação [46].

Já o FBM trata de partículas poliédricas, que ao sofrerem esforços críticos que provoquem sua quebra, são subdivididas em novos poliedros, pelo algoritmo de tesselação de Laguerre-Voronoi [22, 46]. A Figura 3.23 mostra a evolução da fragmentação de uma partícula poliédrica, quando submetida a um carregamento vertical.

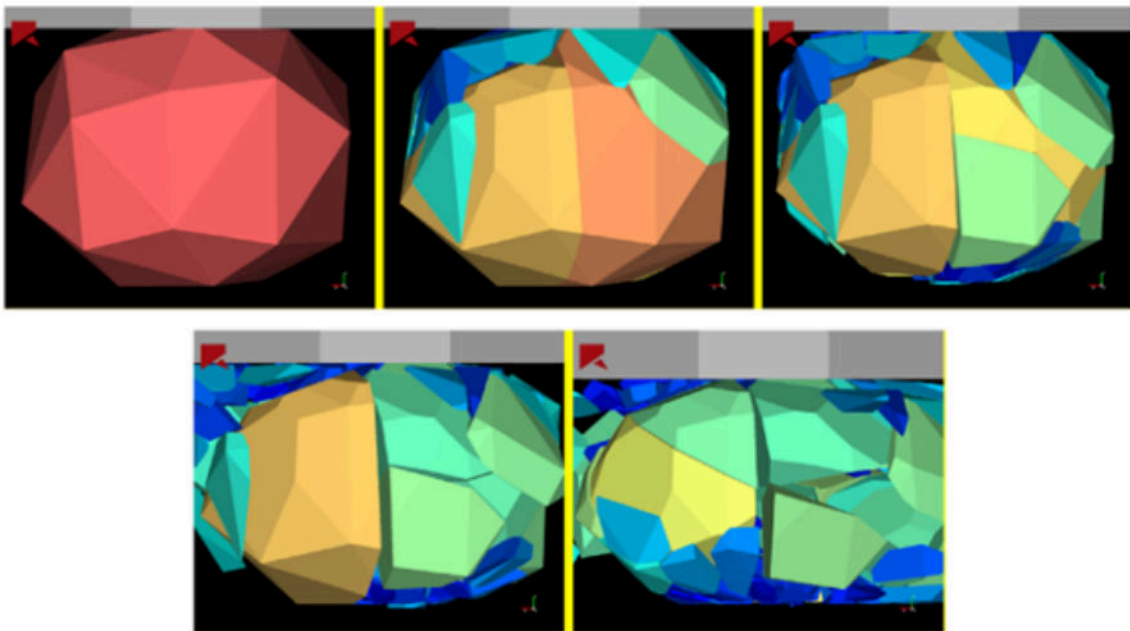


Figura 3.23: Evolução da fragmentação de uma partícula poliédrica, usando o FBM [22].

Essas técnicas mencionadas para a simulação da quebra de partículas em ambiente DEM apresentam, como principal desvantagem, o aumento do tempo de

processamento computacional. Para superar essa limitação, outra abordagem pode ser usada, a partir dos resultados obtidos com o DEM (sem o mecanismo de quebra ativado) e realizando uma etapa de pós-processamento, em que as colisões ocorridas nas simulações são avaliadas. Esse procedimento pode ser aplicado, especialmente, quando o fenômeno de quebra não é o objetivo da simulação, como no manuseio de granéis. Essa metodologia, por exemplo, já foi aplicada por CARVALHO *et al.* [49] para a previsão da degradação de matérias primas da indústria siderúrgica.

Em outro trabalho, TAVARES *et al.* [20] avaliaram a degradação de pelotas queimadas de minério de ferro fora do ambiente DEM, a partir das energias absorvidas por cada partícula em um tambor rotativo. Os resultados foram comparados com experimentos laboratoriais. A simulação do tambor rotativo está apresentada na Figura 3.24.

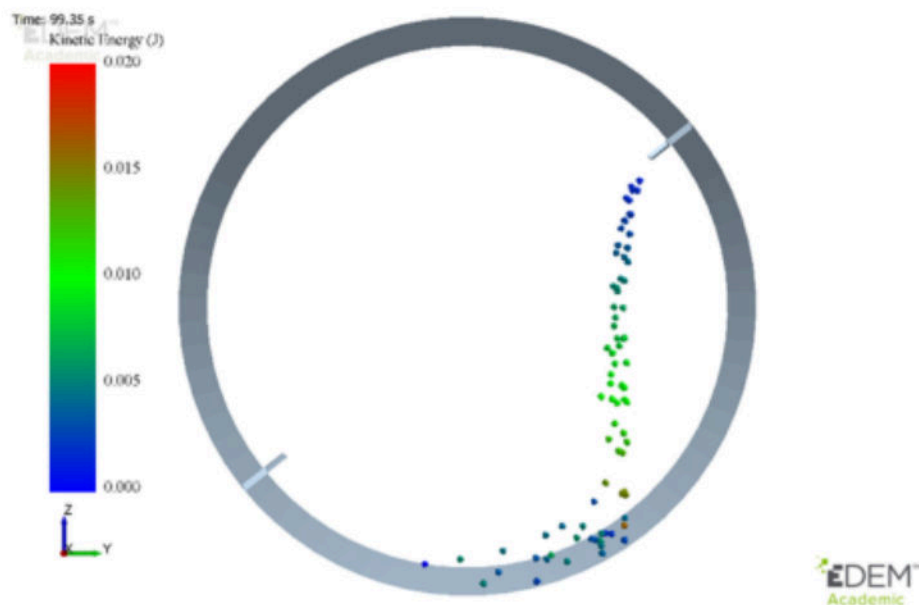


Figura 3.24: Simulação DEM de tambor rotativo para avaliação da quebra volumétrica de pelotas queimadas de minério de ferro [20].

Também com relação às pelotas queimadas, CAVALCANTI *et al.* [40] estudaram o seu comportamento no âmbito da quebra superficial. A Figura 3.25 mostra a simulação DEM realizada pelos autores para a avaliação das energias absorvidas por cada partícula durante o peneiramento em escala laboratorial. E, então, com esses dados e com experimentos, foi possível validar o modelo de abrasão, desenvolvido a partir de ensaios de partículas individuais.

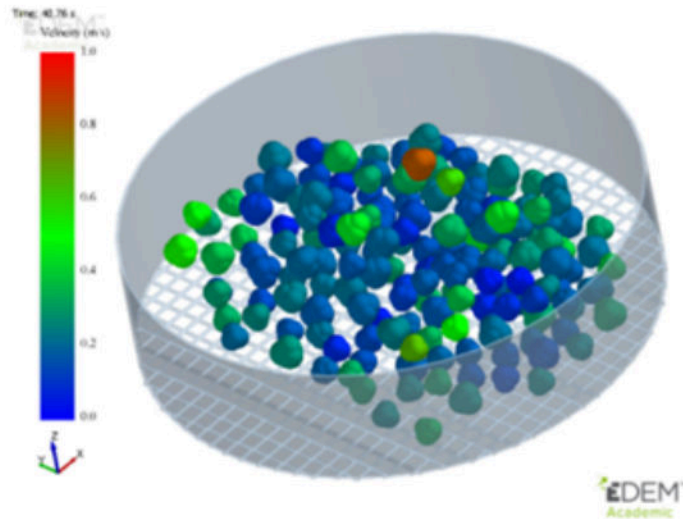


Figura 3.25: Simulação DEM de peneiramento laboratorial para avaliação da quebra superficial de pelotas queimadas de minério de ferro [40]

É importante ressaltar que nas simulações DEM, são consideradas partículas individuais, ou seja, com propriedades discretas, enquanto os modelos apresentados na Seção 3.2 tratam de propriedades contínuas. Assim, o modelo de  $t_{10}$  (Equação 3.16) precisou ser revisto para ser aplicado nessas condições. O termo  $E_{50b}$  foi substituído pela energia específica de fratura ( $E_{mf}$ ) da partícula analisada [22, 50]. Essa alteração, por outro lado, superestima o valor de  $t_{10}$  [51]. Desse modo, um parâmetro adicional  $k$  foi adicionado, conforme apresentado na Equação 3.28.

$$t_{10} = A \left[ 1 - \exp \left( -b'k \frac{E_k}{E_{mf}} \right) \right] \quad (3.28)$$

# Capítulo 4

## Metodologia

A metodologia deste trabalho iniciou-se a partir do recebimento e da análise da amostra de briquetes de biocarbono (Seção 4.1). Paralelamente, as partículas foram submetidas a impactos individuais (Seção 4.2.1), por meio de dois ensaios: queda individual (Seção 4.2.1.1) e projeção pneumática (Seção 4.2.1.2), que forneceram informações mássicas para a análise citada. Posteriormente, baseado nesses experimentos, foi desenvolvida a modelagem matemática da quebra (Seção 4.3).

Ademais, foram realizados ensaios de degradação dinâmica dos briquetes, no contexto laboratorial (Seção 4.2.2), por peneiramento (Seção 4.2.2.1) e por tamboramento (Seção 4.2.2.2). Esses experimentos e um estudo de caso em escala industrial de uma calha de alimentação foram reproduzidos em ambiente DEM (Seção 4.4). Por fim, os resultados obtidos nas simulações DEM foram extraídos para uma etapa de pós-processamento, que permitiu a aplicação do modelo de quebra desenvolvido para os briquetes de carvão vegetal. Essa metodologia está apresentada na forma de um fluxograma na Figura 4.1.

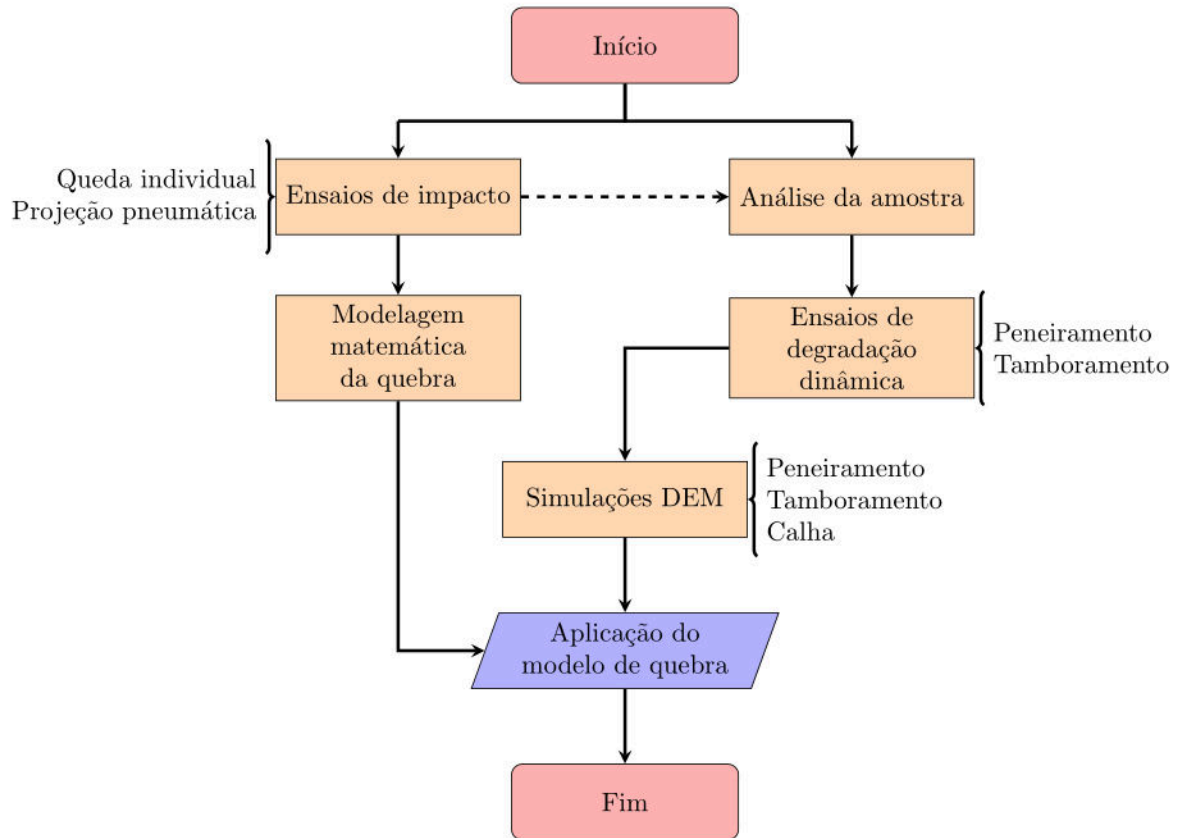


Figura 4.1: Fluxograma da metodologia desenvolvida.

## 4.1 Caracterização da Amostra

Briquetes de carvão vegetal, denominados biocarbono, originários de cana-energia e produzidos em prensa de rolos, com células com o formato travesseiro, com dimensões nominais de  $30 \times 25 \times 15$  mm e densidade  $1080 \text{ kg/m}^3$ , foram utilizados em todas as análises realizadas no contexto deste trabalho. No entanto, devido ao processo industrial ao qual os briquetes são fabricados, as dimensões das partículas desses briquetes apresentam pequenos desvios, sendo possível observar, por exemplo, a presença de rebarbas nas partículas. Foi necessário, portanto, realizar uma etapa de determinação da distribuição mássica dos briquetes, que servirá de subsídio para a modelagem matemática da quebra (Seção 4.3).

A Tabela 4.1 mostra a especificação da amostra de briquetes de carvão vegetal utilizada e a Tabela 4.2 apresenta a composição química das cinzas. Além disso, o teor de enxofre da amostra é  $0,2\%$  e sua umidade,  $0,78\%$ . Os dados apresentados nessas tabelas são provenientes das informações fornecidas pelo fabricante do material, indicadas em base seca.

Tabela 4.1: Especificação da amostra de briquetes de carvão vegetal. Informações fornecidas pelo fabricante em base seca.

Especificação	Teor (%)
Carbono fixo	52,0
Cinzas	29,5
Material volátil	18,5

Tabela 4.2: Composição química das cinzas da amostra de briquetes de carvão vegetal. Informações fornecidas pelo fabricante.

Composição química	Teor (%)
SiO <sub>2</sub>	52,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,7
CaO	3,5
K <sub>2</sub> O	2,8
MgO	2,3
TiO <sub>2</sub>	1,3
Na <sub>2</sub> O	0,8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,9
MnO	0,1

## 4.2 Ensaaios

Dois níveis de ensaios foram realizados visando a quebra de briquetes de carvão vegetal: de caracterização e de validação. Os primeiros, foram os ensaios de impacto (Seção 4.2.1), voltados para a modelagem matemática da quebra dos briquetes de carvão vegetal (detalhada na Seção 3.2). Neste caso, foram realizados ensaios de queda individual (Seção 4.2.1.1) e ensaios de projeção pneumática (Seção 4.2.1.2). Enquanto os primeiros são utilizados para baixos níveis energéticos (semelhantes aos observados em etapas de manuseio), os últimos fornecem informações adicionais em médias e em altas energias de impacto, subsidiando a modelagem matemática da quebra. Os ensaios de validação tiveram o propósito de ratificar a modelagem matemática da quebra dos briquetes. Para isso, foram realizados ensaios dinâmicos (Seção 4.2.2) em que os briquetes interagissem entre si e com o equipamento e que eles tivessem tempo suficiente para se degradarem mecânica e lentamente.



## 4.2.1 Ensaios de Impacto

### 4.2.1.1 Ensaio de Queda Individual

O ensaio de queda individual é de simples execução e consiste em liberar os briquetes individual e repetidamente de uma altura predeterminada sobre uma placa com o material de interesse. Neste trabalho, os briquetes caíram sobre uma chapa de aço de  $(2,5 \pm 0,1)$  cm de espessura em até 10 repetições. A altura de queda foi definida como a distância entre a extremidade inferior do briquete e a superfície de impacto, conforme ilustrado na Figura 4.2.

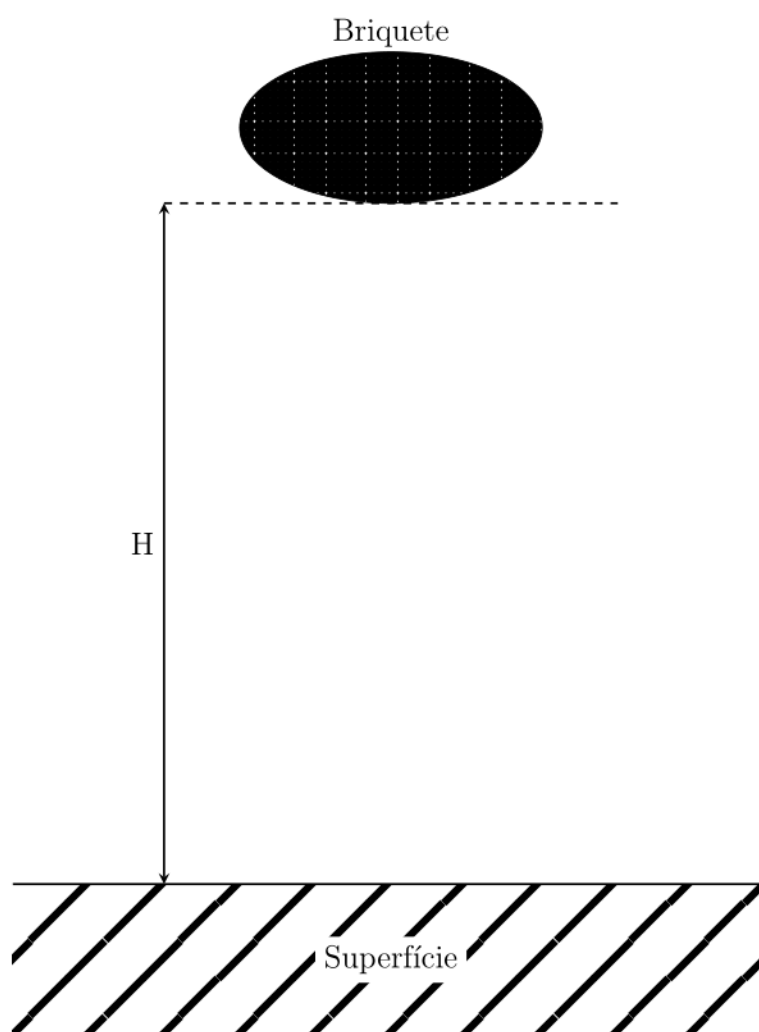


Figura 4.2: Ilustração do ensaio de queda individual.

Para cada impacto as partículas tiveram a sua massa medida para avaliar se o resultado do evento foi quebra volumétrica, quando a perda mássica relativa foi maior que 10%, ou superficial, caso contrário. Neste trabalho, o ensaio foi realizado para alturas de queda de 2,0 m, 4,4 m e 8,4 m, sendo a superfície de impacto o aço. A metodologia detalhada para a execução deste experimento consiste nas seguintes etapas:

1. preparação de lote com 100 briquetes contidos na faixa de tamanhos 22,4 – 26,5 mm;
2. pesagem individual de cada briquete em balança analítica com precisão de 0,001 g;
3. realização de um ciclo de impactos por queda sobre uma placa de aço, a partir de uma determinada altura, de cada um dos 100 briquetes do lote;
4. retirada dos briquetes que tenham sofrido fratura volumétrica (adota-se o padrão de quebra quando o briquete sofreu perda mássica igual ou maior que 10 % de sua massa antes do impacto) e retirada dos fragmentos provenientes da fragmentação superficial;
5. contabilização dos briquetes que tenham sofrido quebra volumétrica;
6. pesagem de cada briquete (que tenha sofrido apenas fragmentação superficial) em balança analítica com precisão de milésimo de grama após o impacto;
7. realização das etapas 3, 4, 5 e 6 até o décimo impacto;
8. cálculo da perda mássica por impacto para todos os 10 impactos e
9. análise granulométrica, separadamente, dos fragmentos relativos à fragmentação volumétrica e à fragmentação superficial.

Os resultados dos impactos repetidos foram registrados em termos de proporção (percentual) de briquetes quebrados em função do número de impactos, de modo a permitir a análise da susceptibilidade à quebra dos briquetes. O erro na determinação da probabilidade de quebra cumulativa ( $P_n$ ) é estimado pelo número de partículas testadas ( $N$ ) e pelo nível de significância ( $\alpha = 0,1$ ), a partir da distribuição binomial, conforme Equação 4.1 [52].

$$P_n \pm z(\alpha/2) \sqrt{\frac{P_n(1-P_n)}{N}} \quad (4.1)$$

Na Figura 4.3 é exibida a seleção de 100 briquetes da amostra para a realização de um ensaio de queda individual.



Figura 4.3: 100 briquetes selecionados de uma amostra para a realização do ensaio de queda individual.

A energia específica do impacto ( $E_k$ ) deve ser calibrada, pois os efeitos da resistência do ar podem ser relevantes. Para isso, as quedas de 20 briquetes foram filmadas com uma câmera de alta velocidade Phantom Miro LAB310, com taxa de aquisição de 5.000 quadros por segundo. Posteriormente, foram separados três quadros: imediatamente antes do impacto ( $i$ ), dois quadros anteriores ( $i - 2$ ) e dois anteriores a este ( $i - 4$ ). Esse intervalo é adotado para que o briquete possa ter um deslocamento maior registrado em vídeo, minimizando desvios locais. Dessa forma, as posições ( $d$ ) e os respectivos tempos ( $t$ ) dos briquetes são determinados e sua velocidade ( $v$ ) antes do impacto pode ser determinada pela Equação 4.2.

$$v = \frac{d_i - d_{i-4}}{t_i - t_{i-4}} \quad (4.2)$$

Como as posições dos briquetes são determinadas por meio de processamento de imagens, existe uma incerteza ( $\delta$ ) associada a essas medidas. Ela pode ser estimada por meio da Equação 4.3.

$$\delta v^2 = \frac{\delta d_i^2 + \delta d_{i-4}^2}{(t_i - t_{i-4})^2} \quad (4.3)$$

A partir da Equação 4.2, pode-se determinar a energia específica de impacto ( $E_k$ ) e sua respectiva incerteza para cada ensaio, com as Equações 4.4 e 4.5.

$$E_k = \frac{v^2}{2} \quad (4.4)$$

$$\delta E_k = v \delta v \quad (4.5)$$

O ensaio de queda também foi utilizado para determinar o efeito da resistência do ar na sua movimentação. A velocidade medida foi comparada com a teórica (con-

siderando uma queda livre no vácuo), de modo a descrever os efeitos do arrasto sobre os briquetes. A metodologia de cálculos foi a mesma adotada por CAVALCANTI *et al.* [14] e é baseada no balanço de forças que atuam sobre o briquete durante seu movimento de queda, descrito pela Equação 4.6.

$$\rho_b V_b \frac{dv}{dt} = (\rho_b - \rho_f) V_b g - \frac{C_D \pi d^2 \rho_f}{8} v^2 \quad (4.6)$$

Em que  $\rho_b$  e  $\rho_f$  são, respectivamente as densidades do briquete e do fluido (ar, sendo  $\rho_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ),  $V_b$  é o volume do briquete,  $d$  é o seu tamanho representativo e  $C_D$  é o coeficiente de resistência aerodinâmica, que pode ser calculado a partir do número de Reynolds ( $Re$ ), que depende da viscosidade do ar ( $\mu$ ), e da circularidade ( $c_i$ ) do briquete, conforme Equações 4.7 a 4.11.

$$Re = \frac{\rho_f dv}{\mu} \quad (4.7)$$

$$f = 2,310(-\log c_i)^{0,6883} \quad (4.8)$$

$$Re^* = Re \cdot c_i^{0,7737} \cdot 10^f \quad (4.9)$$

$$C_D^* = \frac{24}{Re^*} [1 + 0,09528 Re^{*0,7511}] + \frac{0,3528}{1 + \frac{3794}{Re^*}} \quad (4.10)$$

$$C_D = C_D^* \cdot 10^f \quad (4.11)$$

#### 4.2.1.2 Ensaio de Projeção Pneumática

O dispositivo de projeção pneumática (Figura 4.4) permite ensaiar impactos simples de médias e altas energias de partículas individuais contra uma superfície desejada. Seu uso é de grande importância para complementar os ensaios de queda individual (Seção 4.2.1.1).

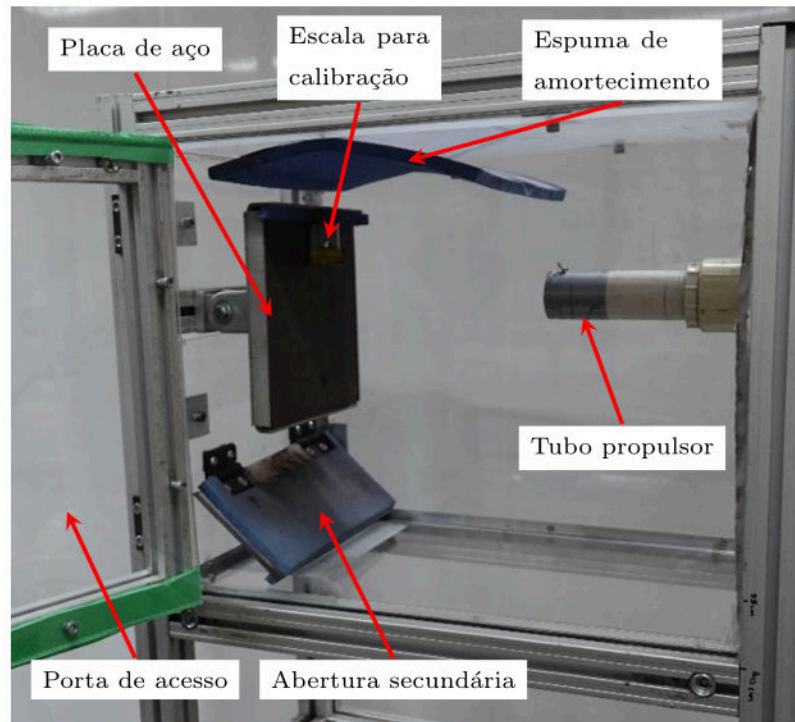


Figura 4.4: Projetor pneumático utilizado para os testes de impacto de médias e altas energias.

A metodologia empregada na utilização do projetor pneumático compreende as mesmas etapas apresentadas na Seção 4.2.1.1, com exceção da terceira etapa, na qual a altura de queda é substituída por uma combinação de valor de pressão e de diâmetro do tubo propulsor do equipamento. Neste caso, foram consideradas 6 variações, conforme apresentado na Tabela 4.3. A bomba de pressão do LTM pode fornecer pressões de até 8,0 bar e o dispositivo sofreu alterações de modo a ser capaz de projetar as partículas com maiores velocidades. Porém, para cada configuração é realizada uma calibração distinta, o que não interfere nos ensaios. Além disso, em todos os experimentos realizados com o projetor, o alvo escolhido foi uma placa de aço de  $(2,0 \pm 0,1)$  cm de espessura, alinhada perpendicularmente ao tubo propulsor.

Tabela 4.3: Descrição dos ensaios com o projetor pneumático, com variação do diâmetro da válvula e da pressão de ar.

Ensaio	Diâmetro (mm)	Pressão (bar)
PP 1	27,25	1,5
PP 2	27,25	2,0
PP 3	27,25	2,5
PP 4	27,25	3,0
PP 5	27,25	4,0
PP 6	33,90	2,0

Antes de iniciar a série de impactos repetidos, deve-se calibrar o equipamento para a amostra de briquetes. Nesse caso, a metodologia de determinação da energia específica do impacto ( $E_k$ ) é análoga àquela apresentada na Seção 4.2.1.1 para os ensaios de queda individual, bem como as estimativas das incertezas das medidas.

## 4.2.2 Ensaios de Degradação Dinâmica

### 4.2.2.1 Degradação por Peneiramento

Esse ensaio visou avaliar a suscetibilidade dos briquetes à quebra superficial, baseado no procedimento adotado por CAVALCANTI *et al.* [40], com o mesmo propósito, para pelotas queimadas de minério de ferro. Para isso, 30 partículas de briquetes foram selecionadas e submetidas a um peneiramento agitado automatizado, durante 60 minutos, com o equipamento RO-TAP<sup>®</sup> [53]. Este, durante a operação, promove nas partículas impactos de baixas magnitudes, oriundos do movimento cíclico da peneira, acarretando em colisões das partículas com a tela de aço e entre os briquetes.

O ensaio foi realizado com duas réplicas e o produto foi observado após 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 60 minutos de peneiramento. O equipamento permite a utilização de 8 peneiras sequenciais, incluindo o fundo, e em cada réplica foram utilizadas peneiras com aberturas diferentes, de modo a poder observar o comportamento tanto dos finos quanto dos fragmentos gerados nos ensaios. As séries de peneiras adotadas em cada ensaio está apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Descrição dos ensaios de peneiramento.

Réplica	Série de peneiras (mm)							
1	19,0	10,0	8,0	6,3	4,0	2,36	1,18	Fundo
2	19,0	15,9	13,2	11,2	10,0	8,0	6,3	Fundo

Na Réplica 1, a série de peneiras adotada permite a análise de tamanhos de fragmentos de briquetes até finos menores que 6,3 mm, enquanto a Réplica 2 propicia o aumento da resolução da granulometria dos fragmentos gerados, em detrimento da análise dos finos menores que 6,3 mm. A Figura 4.5 mostra o equipamento de agitação montado com a série de peneiras da Réplica 1.



Figura 4.5: Equipamento de agitação automático montado com série de peneiras.

#### 4.2.2.2 Degradação por Tamboramento

O ensaio de tamboramento foi utilizado para avaliar a degradação mecânica de briquetes de carvão vegetal, quando submetidos a esforços de baixas e médias magnitudes, de modo que seja possível observar o predomínio de quebra superficial nas partículas. Um ensaio semelhante ao realizado neste trabalho foi utilizado por CAVALCANTI *et al.* [40] para a avaliação da quebra superficial de pelotas queimadas de minério de ferro.

O ensaio de tamboramento foi realizado em um tambor de 58 cm de diâmetro e 24 cm de profundidade, operando a 25 rpm. O equipamento possui 8 barras elevadoras, com cerca de 27 mm de largura e 11 mm de altura, na média. Da amostra de briquetes, foram separados 5,42 kg para a realização do ensaio de tamboramento. Essa medida corresponde a 20% de grau de enchimento do equipamento. A Figura 4.6 mostra o tambor utilizado no ensaio.



(a)



(b)

Figura 4.6: Moinho utilizado para o ensaio de tamboramento de briquetes de carvão vegetal (a) e detalhe das barras elevadoras nele contidas (b).

Inicialmente, o tambor foi alimentado manualmente com 5,42 kg de briquetes de carvão vegetal e o equipamento operou durante 5 minutos. Após isso, foi realizado um cuidadoso peneiramento para a seleção das partículas maiores que 19,0 mm. Elas foram novamente alimentadas no equipamento, enquanto as menores foram separadas para análises mássica e granulométrica.

Esse ciclo foi realizado após 5, 10, 15, 30 e 60 minutos do início do ensaio. E, após cada janela de observação, as partículas menores que 19,0 mm foram separadas para análises mássica e granulométrica e removidas do ciclo de tamboramento seguinte.



### 4.3 Modelagem Matemática da Quebra

A modelagem matemática da quebra é baseada nos resultados dos ensaios de impacto. Os parâmetros de ajuste de cada modelo foram calculados usando rotinas desenvolvidas no *software* Matlab [54], especialmente com a utilização da função “*fminsearch*”, que é interna do interpretador, cujo algoritmo de otimização é a busca direta de Nelder-Mead [55]. Para isso, deve ser elaborada uma função objetivo, que descreve o modelo de interesse e calcula o somatório dos quadrados dos erros.

Inicialmente, a partir dos dados de proporção de partículas briquetes de carvão vegetal quebradas no primeiro impacto para diferentes níveis de energia, pode-se estimar os parâmetros que melhor se ajustam à Equação 3.10, indicando a probabilidade de quebra para um intervalo contínuo de energias específicas de impacto. Paralelamente a isso, com os resultados dos ensaios de impactos repetidos, pode-se determinar o parâmetro de dano acumulado ( $\gamma$ ), lançando mão da Equação 3.15. Como ela é uma igualdade implícita, a mesma pode ser resolvida pelo método de Newton, com estimativa inicial  $D_n = 0$  e tolerância de  $10^{-6}$ .

Com relação ao produto da quebra volumétrica, sua previsão de distribuição de tamanhos pode ser obtida a partir do parâmetro  $t_{10}$ , obtido experimentalmente para cada nível de energia analisado. Com isso, deve-se fazer uso da Equação 3.10 para obter o  $E_{50b}$  referente a cada ensaio e, então, encontrar os parâmetros que melhor se ajustam à Equação 3.16. Posteriormente, os termos  $t_{1,2}$ ,  $t_{1,5}$ ,  $t_2$ ,  $t_4$ ,  $t_{25}$ ,  $t_{50}$  e  $t_{75}$  são calculados desde os resultados experimentais para cada nível energético. Desse modo, cada  $t_n$  deve ser ajustado à Equação 3.17, tal que 7 pares de parâmetros ( $\alpha_n$ ,  $\beta_n$ ) são determinados. Finalmente, a granulometria da quebra volumétrica pode ser obtida pela interpolação de  $t_n$  para cada  $t_{10}$  desejado.

Já a granulometria do produto da quebra superficial pode ser estimada pela Equação 3.18, a qual, a princípio, não faz distinção de níveis de energéticos. A modelagem matemática da quebra segue o fluxograma apresentado na Figura 4.7.

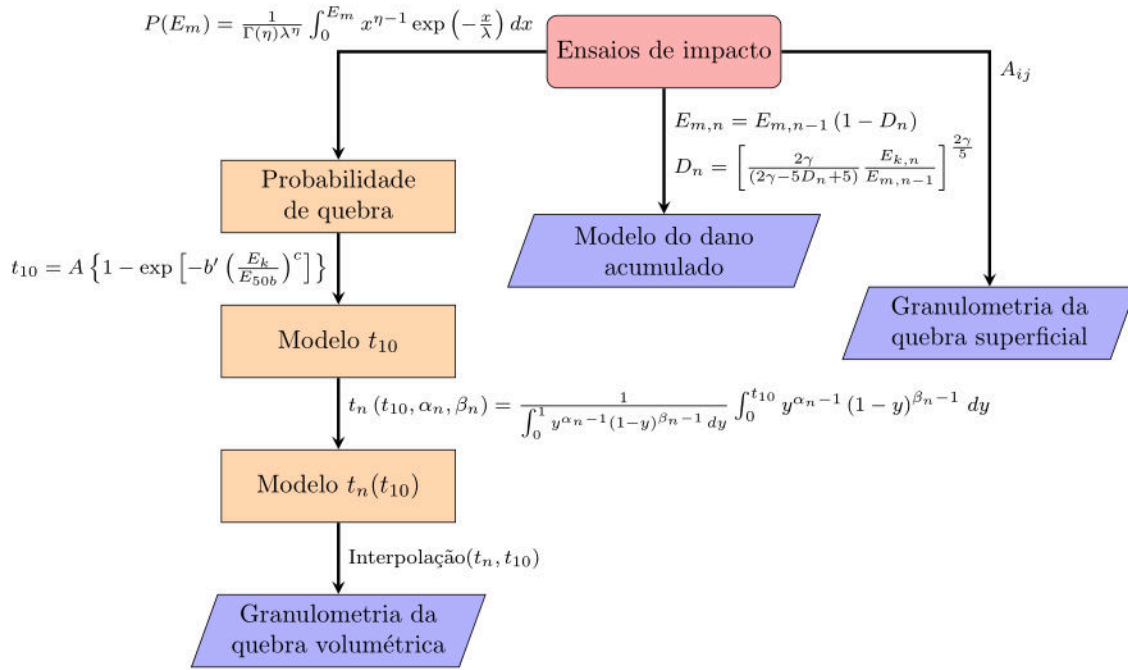


Figura 4.7: Fluxograma da modelagem matemática da quebra de partículas.

## 4.4 Simulações DEM

A realização de simulações DEM tem como objetivo principal validar a modelagem matemática da quebra, descrita na Seção 4.3, por meio de análises análogas as realizadas experimentalmente. Nesse sentido, os ensaios de degradação por peneiramento (Seção 4.2.2.1) e por tamboramento (Seção 4.2.2.2) foram reproduzido em ambiente computacional pelo método dos elementos discretos, com o *software* EDEM 2021 [56] nas Seções 4.4.2 e 4.4.3. Além disso, também foi realizado um estudo de caso de uma calha de alimentação (Seção 4.4.4) que extrapola o ambiente controlado laboratorial.

Neste trabalho, o formato de partícula, o modelo de contato denominado *Hertz-Mindlin no-slip* e os parâmetros de contato utilizados nas simulações DEM são os descritos por CARVALHO *et al.* [57]. O modelo tridimensional do briquete utilizado no EDEM foi criado após análise de imagem, na qual a partícula foi aproximada por um elipsoide, sendo constituída por sete esferas superpostas, visando preencher de modo mais fiel o formato. As Figuras 4.8 e 4.9 mostram o modelo de partícula implementado no EDEM, em que as rebarbas presentes nos briquetes não foram incorporadas ao modelo tridimensional, com a finalidade de minimizar o esforço computacional para as simulações DEM [57].



Figura 4.8: Imagens do modelo da partícula de briquete no EDEM, composta por sete esferas superpostas, em vistas superior (a) e lateral (b) [57].

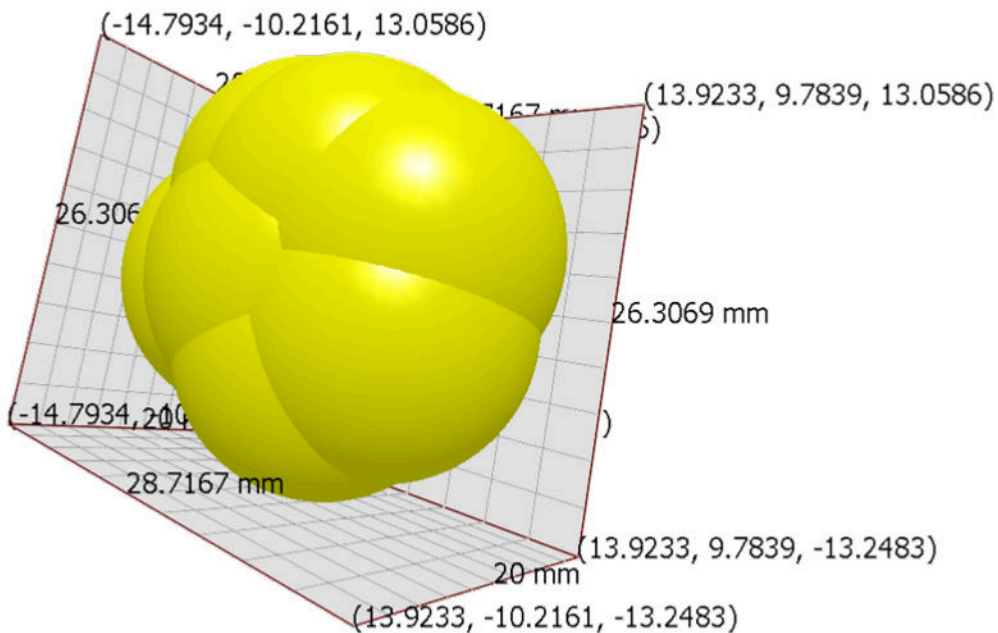


Figura 4.9: Coordenadas da partícula de briquete modelada em ambiente DEM [57].

Os parâmetros de contato para as simulações DEM da amostra de briquetes de biocarbono avaliadas no presente estudo estão apresentados na Tabela 4.5 [57].

Tabela 4.5: Parâmetros de contato calibrados para a amostra de briquetes de biocarbono [57].

Coefficiente	Briquete/briquete	Briquete/aço
Restituição	0,54	0,42
Atrito estático	0,44	0,52
Atrito de rolamento	0,03	0,12

Como, em todos os cenários avaliados, não há o objetivo de fragmentar os briquetes de biocarbono, as simulações foram praticadas sem o dispositivo de quebra

ativado no programa e as análises no âmbito da degradação mecânica dos briquetes de carvão vegetal foram realizadas na forma de pós-processamento dos espectros de energia. Para isso, no entanto, deve ser habilitado no EDEM o salvamento dos registros das colisões e de suas, respectivas, energias dissipadas.

#### 4.4.1 Modelagem Avançada da Quebra de Briquetes

A metodologia para a implementação do pós-processamento das simulações para a avaliação da degradação mecânica dos briquetes de biocarbono foi baseada na abordagem utilizada para a previsão da degradação de matérias primas da indústria siderúrgica, realizadas por CARVALHO *et al.* [49], como coque, sinter, minério granulado e pelotas queimadas. THOMAZINI [58] também aplicou essa modelagem em pelotas verdes de minério de ferro. Essa abordagem refere-se à previsão da degradação sofrida durante o manuseio de partículas em equipamentos de manuseio e transporte, sendo chamada também de modelagem avançada do manuseio de granéis.

Essa modelagem é realizada, basicamente, em 4 etapas: extração das informações da simulação DEM, criação de partículas virtuais, sorteio dos históricos de colisões e aplicação do modelo de quebra de Tavares. A Figura 4.10 mostra o fluxograma geral da metodologia desenvolvida para a avaliação da degradação mecânica dos briquetes de carvão vegetal via pós-processamento.

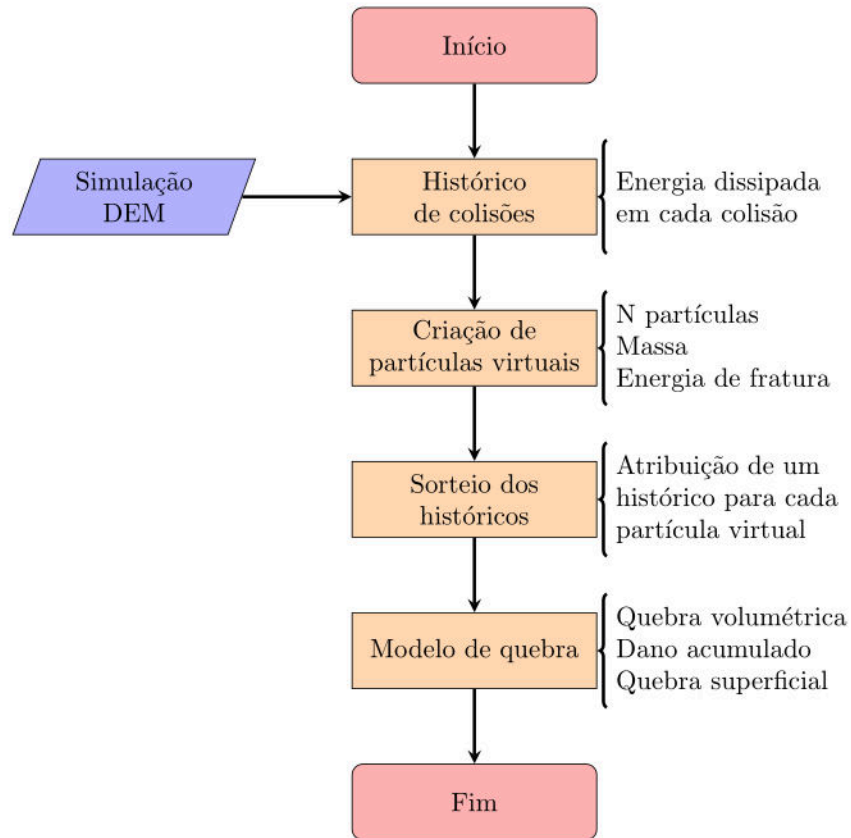


Figura 4.10: Algoritmo de pós-processamento da modelagem avançada de manuseio de granéis para a avaliação da degradação mecânica de briquetes de biocarbono.

Uma vez que o ambiente de pós-processamento está criado, deve-se atribuir para cada partícula virtual um histórico de colisões proveniente da simulação DEM. Nesse caso, haverá a repetição de históricos, porém as partículas terão propriedades diferentes, o que causará respostas distintas em sua trajetória. Além disso, quando se tem um sistema em regime permanente, é possível replicar um intervalo de tempo de simulação para uma faixa mais ampla, viabilizando uma extrapolação do resultado. Por exemplo, se 30 segundos de uma simulação em regime permanente forem replicados 10 vezes, tem-se, então, a previsão da degradação no sistema em 5 minutos de operação. Isso causa uma economia no custo computacional, no entanto só é recomendado ser utilizado em sistemas nos quais não há elevados níveis de degradação mecânica. E, a última etapa é a aplicação do modelo de quebra de Tavares em ambiente discreto, empregando a modelagem avançada de manuseio de granéis. O fluxograma da Figura 4.11 detalha o algoritmo implementado para isso.

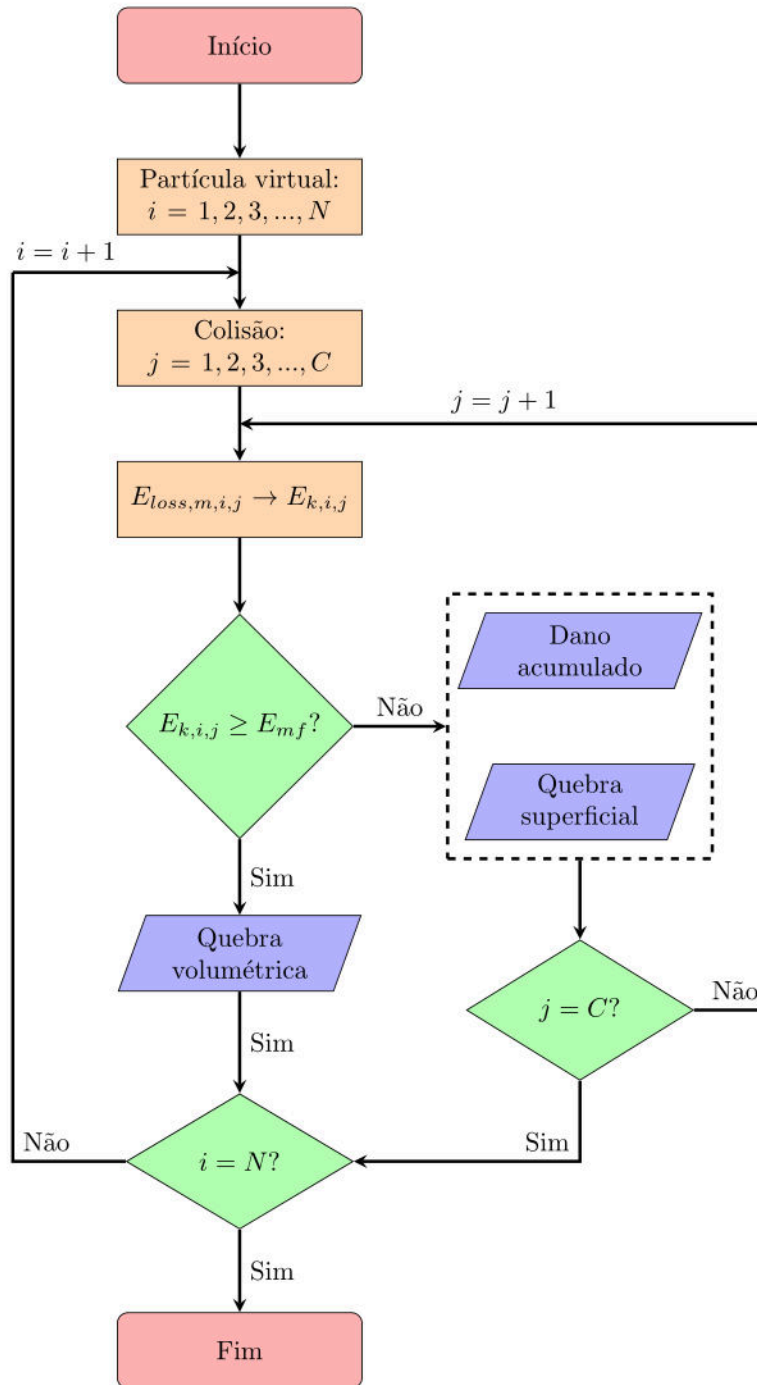


Figura 4.11: Algoritmo implementado para a aplicação do modelo de quebra de Tavares, com a modelagem avançada de manuseio de granéis.

#### 4.4.2 Degradação por Peneiramento

A simulação de degradação por peneiramento é análoga ao ensaio de degradação por peneiramento, descrito na Seção 4.2.2.1. Porém, como os briquetes simulados não sofrem, de fato, degradação mecânica, basta realizar a simulação com uma peneira de abertura de 19,0 mm. CAVALCANTI *et al.* [40] também simularam esse equipamento e detalharam a movimentação do agitador.

O seu movimento consiste em uma rotação elíptica horizontal da peneira, sobreposta por uma ação de batida vertical. Esse movimento elíptico foi aproximado por dois movimentos senoidais, com amplitudes de 28,1 mm e 10,9 mm, e com frequências iguais a 4,6 Hz. A ação de batida vertical foi simulada como um deslocamento senoidal com amplitude de 2,0 mm e 20,0 Hz de frequência [40].

Foram simulados 30 briquetes na peneira durante 60 segundos de operação, os históricos de colisões foram replicados 60 vezes (totalizando os 60 minutos de ensaio) e foram criadas, no ambiente de pós-processamento, 10.000 partículas virtuais para descreverem o comportamento dos briquetes no âmbito da degradação mecânica. A Figura 4.12 mostra a geometria da peneira simulada.

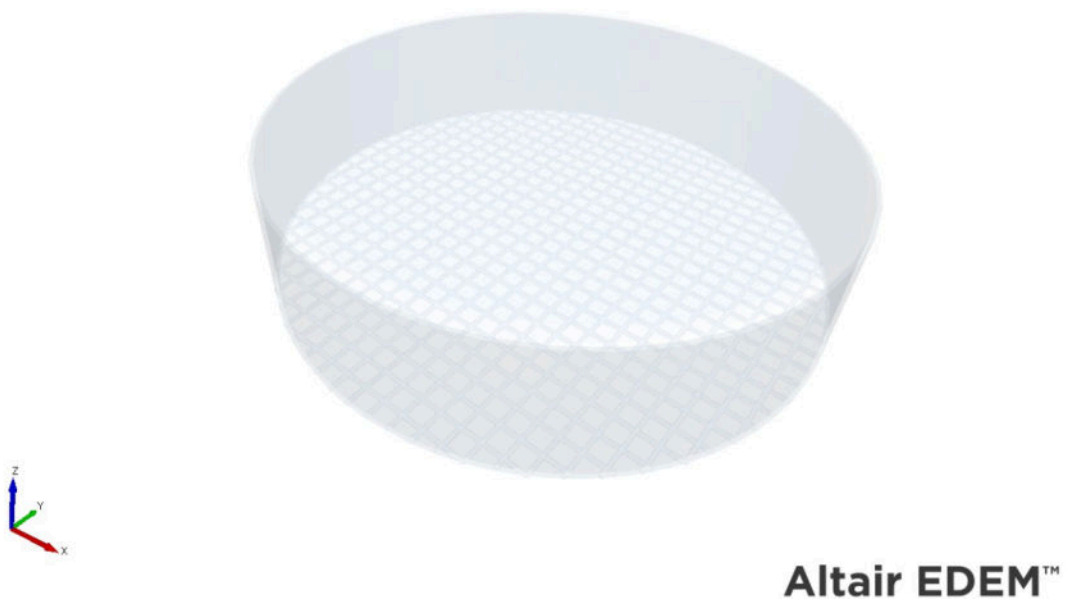


Figura 4.12: Geometria da peneira simulada.

#### 4.4.3 Degradação por Tamboramento

A simulação de degradação por tamboramento é análoga ao ensaio de degradação por tamboramento, descrito na Seção 4.2.2.2. A simulação DEM foi realizada considerando a situação inicial do tambor, preenchido com 5,42 kg, e os históricos de colisão foram coletados durante 60,0s após o regime permanente ser atingido, em cerca de duas revoluções. No ambiente de pós-processamento, 10.000 partículas virtuais foram criadas para descrever o comportamento dos briquetes no âmbito de sua degradação mecânica. A Figura 4.13 mostra a geometria do tambor simulado.

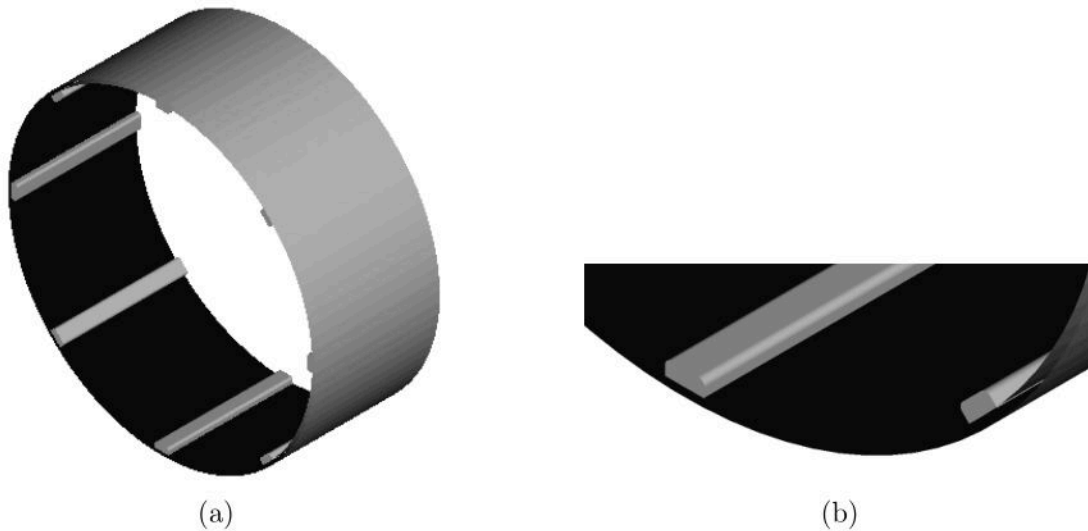


Figura 4.13: Geometria do tambor usada nas simulações DEM, em vista isométrica (a) e detalhe das barras elevadoras (b).

#### 4.4.4 Degradação em Calha de Alimentação

Foi realizado um estudo de caso de uma calha de alimentação em escala industrial, com o intuito de analisar o comportamento dos briquetes de biocarbono em um ambiente menos controlado que o laboratorial. Esse equipamento de manuseio, no contexto da pelletização, poderia ser instalado na entrada do forno de grelha, com o intuito de alimentar os briquetes de carvão vegetal sobre o leito de pelotas verdes, em sua etapa de endurecimento. Como a região em que a calha ficaria localizada é de difícil acesso, por conta da estrutura da usina existente e também pelas elevadas temperaturas, o sistema de alimentação precisa transpor esses desafios.

Esse estudo de caso visou compreender, entre outras coisas, a intensidade dos esforços mecânicos aos quais os briquetes estarão submetidos, bem como mensurar a proporção de partículas quebradas no equipamento. Além disso, foi possível identificar potenciais regiões em que a degradação mecânica é mais acentuada. A geometria utilizada do sistema de manuseio faz parte do acervo de simulações do LTM está representada na Figura 4.14.



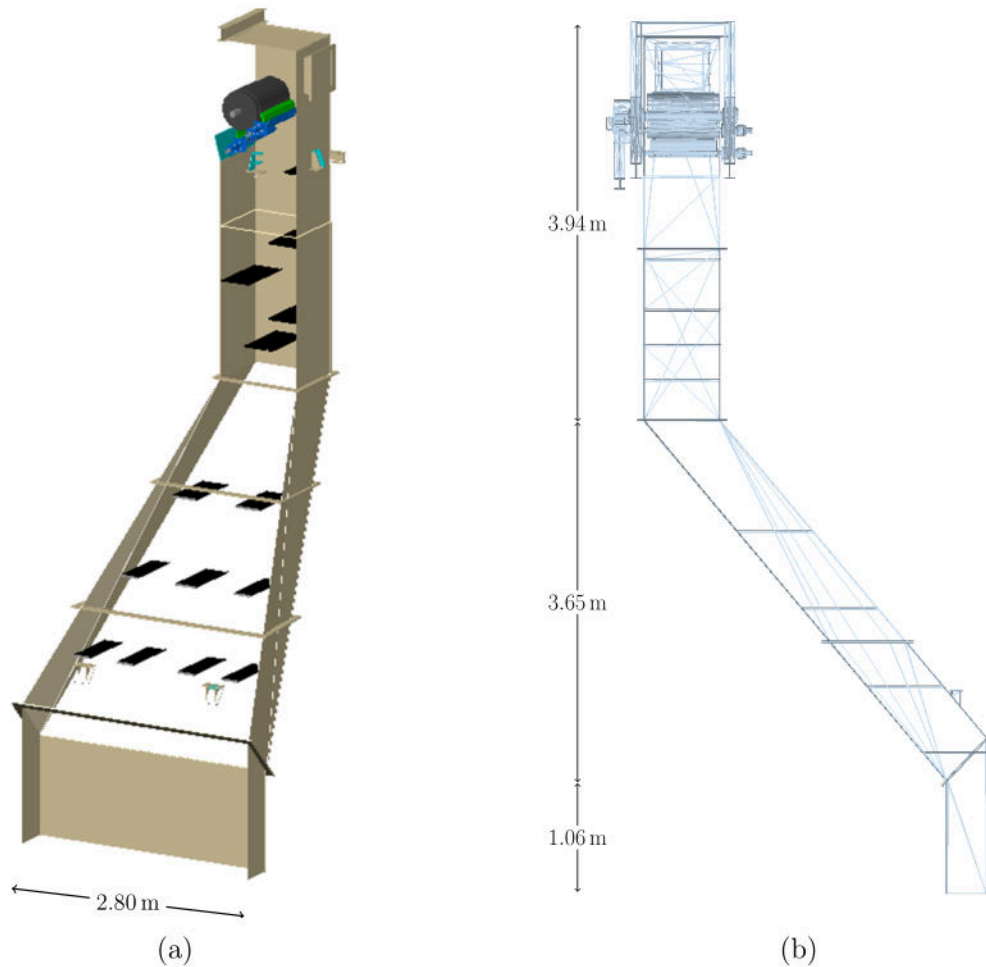


Figura 4.14: Geometria da calha de alimentação simulada (a) e em vista lateral (b).

Os briquetes são alimentados pelo topo da calha, da esquerda para a direita, e ela possui, ao longo de seu comprimento, plataformas, chamadas *flippers*, que servem para amortecer as colisões dos briquetes com o revestimento do equipamento, que é aço. O dispositivo tem capacidade de transportar 11,0 t/h de briquetes e possui, em sua abertura inferior, 2,80 m de comprimento e uma altura total de 8,65 m.

A simulação DEM foi iniciada com a geometria vazia e transcorreu até que fosse atingido o regime permanente. A partir daí, foram desconsideradas, para fins de pós-processamento, as partículas contidas na geometria e selecionados os briquetes que ainda entrarão no sistema. Desse modo, a simulação teve continuação até que cerca de 1.500 partículas pudessem entrar e sair do sistema. Esses briquetes foram os usados para as análises de degradação mecânica via pós-processamento. Nesse caso, os históricos de colisões foram replicados para 10.000 partículas virtuais.

# Capítulo 5

## Resultados e Discussões

### 5.1 Caracterização da Amostra

Foi observado que a amostra de briquetes continha partículas com peculiaridades que poderiam influenciar em determinadas análises. Por exemplo, diversas partículas apresentavam rebarbas, enquanto outras tinham imperfeições superficiais. A Figura 5.1 mostra uma porção de briquetes da amostra utilizada nas análises deste trabalho.



Figura 5.1: Amostra de briquetes de biocarbono.

Em todos os ensaios individuais de briquetes, houve a medição da massa de cada partícula, totalizando mais de 850 dados computados. O desvio padrão das medidas foi 0,96 g, enquanto o valor médio e sua incerteza obtidos foram  $(7,89 \pm 0,03)$  g. A distribuição dos valores medidos está apresentada na Figura 5.2, juntamente com a distribuição cumulativa normal.

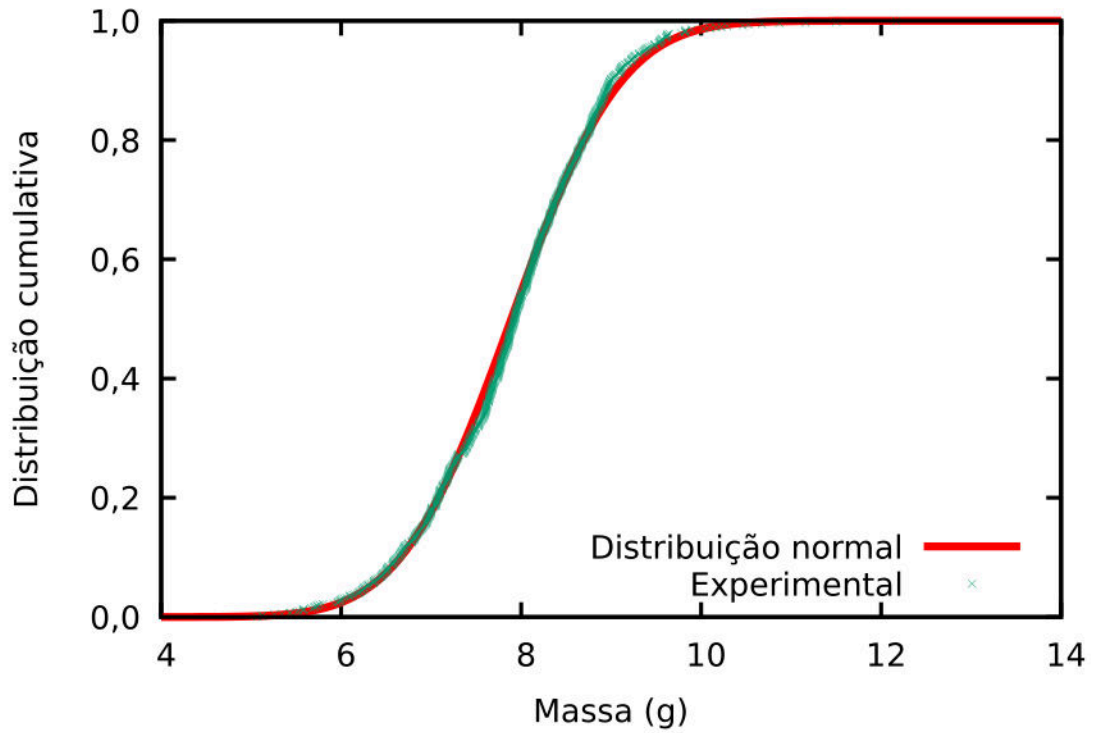


Figura 5.2: Distribuição mássica das partículas de briquetes.

Pode-se afirmar que a distribuição dos valores obtidos para as massas das partículas dos briquetes seguiu a distribuição normal, conforme observado na Figura 5.3, em que o ajuste da reta tem coeficiente de determinação igual a 0,99.

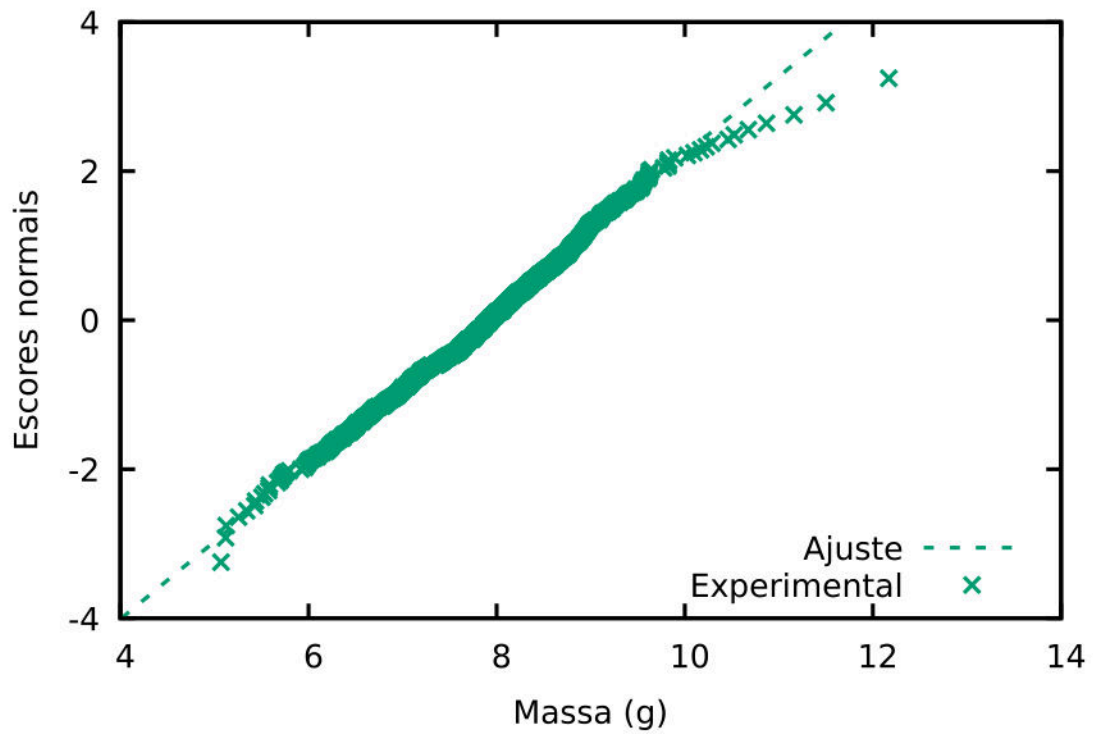


Figura 5.3: Escores normais das massas das partículas de briquetes.

## 5.2 Ensaios

### 5.2.1 Ensaios de Impacto

#### 5.2.1.1 Ensaio de Queda Individual

Os briquetes podem, durante a execução do ensaio de impacto, sofrer quebra volumétrica ou quebra superficial, a depender da massa liberada da partícula original. Visualmente, essa distinção pôde ser feita com base na observação da Figura 5.4, que mostra quatro quadros, incluindo o movimento de queda, o impacto e a trajetória final nas duas situações, para o ensaio de 4,4 m.

Essas imagens foram obtidas com uma câmera de alta taxa de aquisição (5.000 quadros por segundo), que também possibilitou a calibração da velocidade do impacto dos briquetes sobre a superfície de aço. A distribuição dos valores calculados para as velocidades dos briquetes antes do impacto estão apresentadas na Figura 5.5, em que a letra E indica os dados experimentais, a letra M aponta para o valor médio e a letra T representa o valor teórico da queda, caso ela ocorresse no vácuo. As barras de erro são referentes às incertezas das velocidades, que foram calculadas pela Equação 4.3.

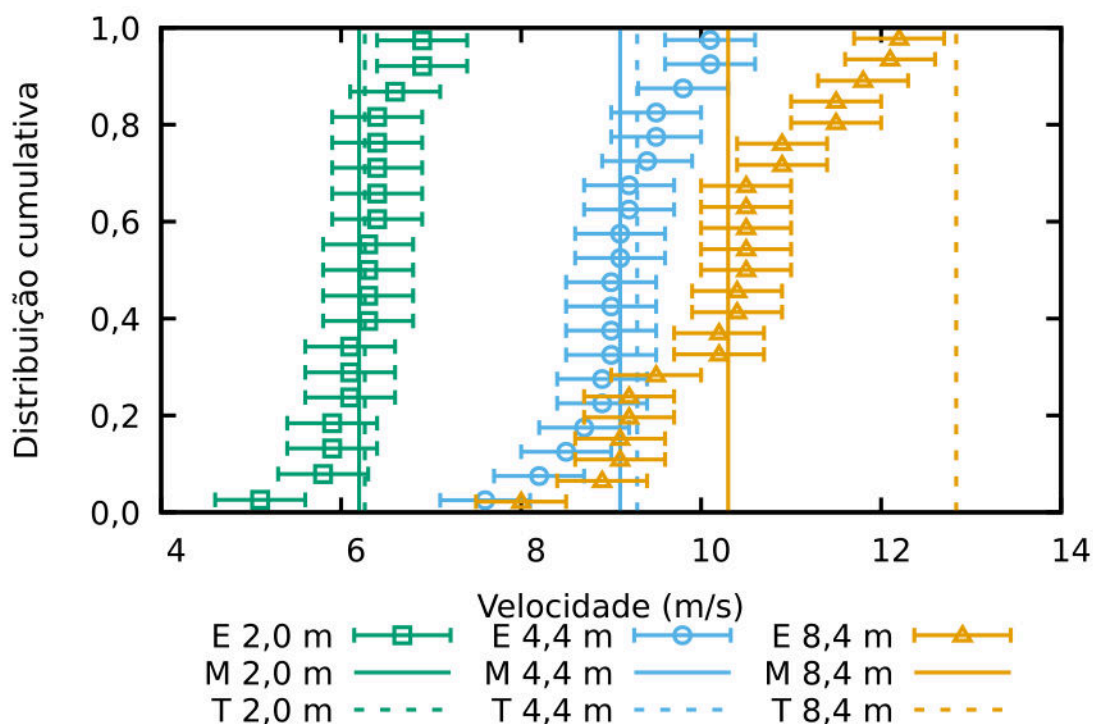


Figura 5.5: Distribuições cumulativas das velocidades de impacto medidas experimentalmente (E), seu valor médio (M) e o valor teórico para a queda livre no vácuo (T).

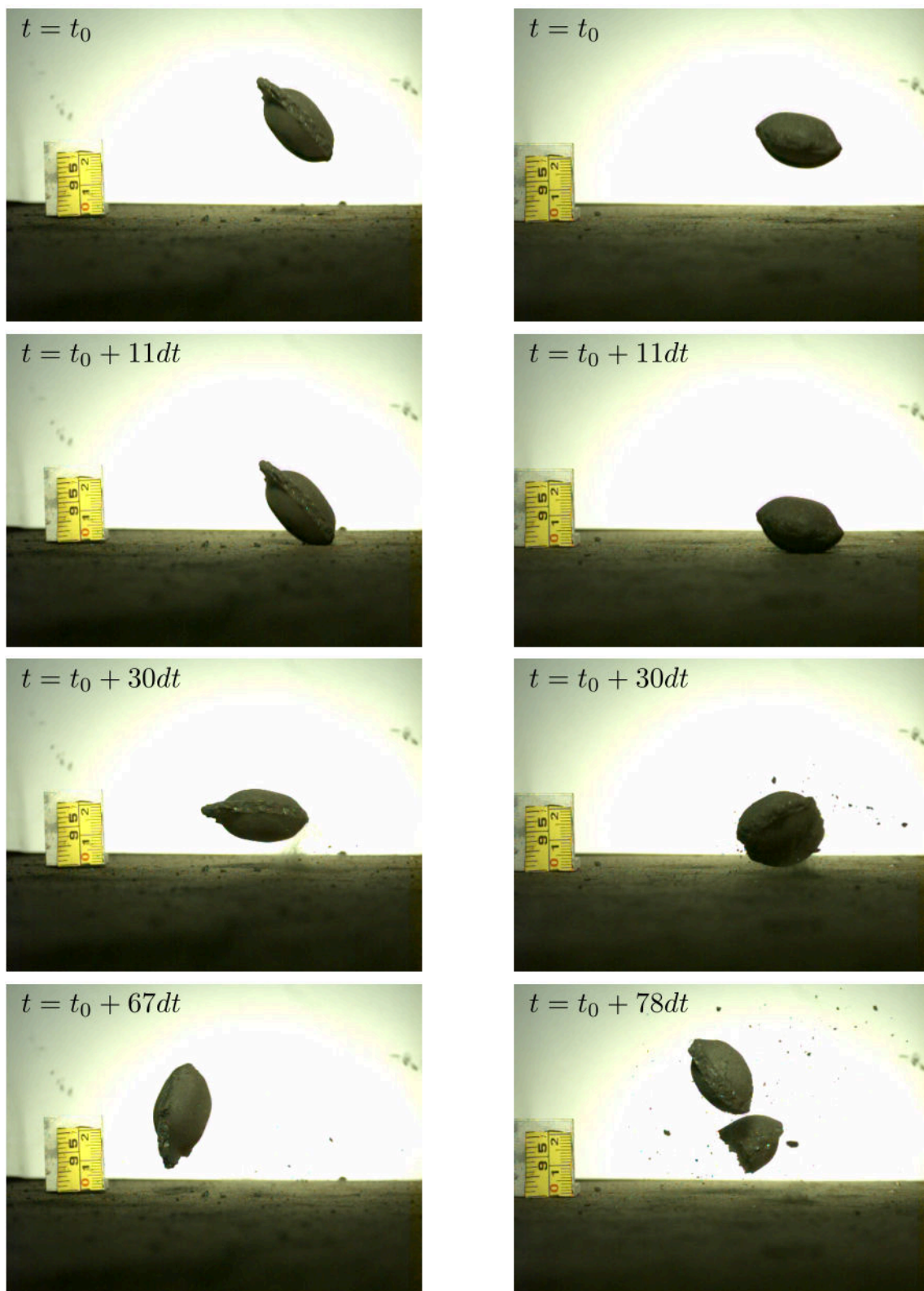


Figura 5.4: Sequência de quadros do ensaio de queda individual de 4,4 m, mostrando o fenômeno de quebra superficial em (a) e de quebra volumétrica em (b), em que  $dt = 2 \times 10^{-4}$  s.

Nota-se que, para a altura de queda de 8,4m, há uma discrepância relativa de 19,8% entre a queda livre no vácuo e o ensaio, enquanto nos experimentos de 4,4m e 2,0m os valores são de 2,0% e 1,0%, respectivamente. Como os ensaios de queda individual estão fortemente sujeitos à resistência do ar conforme a altura experimentada é incrementada, fez-se necessário avaliar o seu efeito, principalmente quanto à velocidade de impacto em diversas alturas de queda.

Nesse sentido, pode-se comparar o movimento dos briquetes em queda livre com a sua trajetória sendo influenciada pela resistência do ar e, ainda, confrontá-los com os resultados experimentais. Para o cálculo do arrasto, lançou-se mão das Equações 4.7 a 4.11, que dependem da circularidade ( $c_i$ ) dos briquetes. Nesse sentido, foi suposto que o formato da partícula é um elipsoide, com raios, em milímetros, iguais a 15,0, 12,5 e 7,5. Porém, como não há simetria entre seus eixos, a orientação da partícula afeta o resultado. Dessa forma, foram consideradas duas orientações para os briquetes: horizontal, com a maior área de projeção 2D, e vertical, com a menor área de projeção.

Além disso, como foi observado na amostra (Seção 5.1), os briquetes apresentam rebarbas que afetam a circularidade da partícula. Por isso, foi proposto um ajuste de  $c_i$ , para determinar o coeficiente de resistência aerodinâmica ( $C_D$ ) em função da velocidade do briquete. A Figura 5.6 apresenta a comparação dos quatro cenários avaliados, frente aos resultados experimentais, da velocidade de impacto dos briquetes em função da altura de queda. Já a 5.7 mostra a variação do  $C_D$  com a velocidade da partícula.

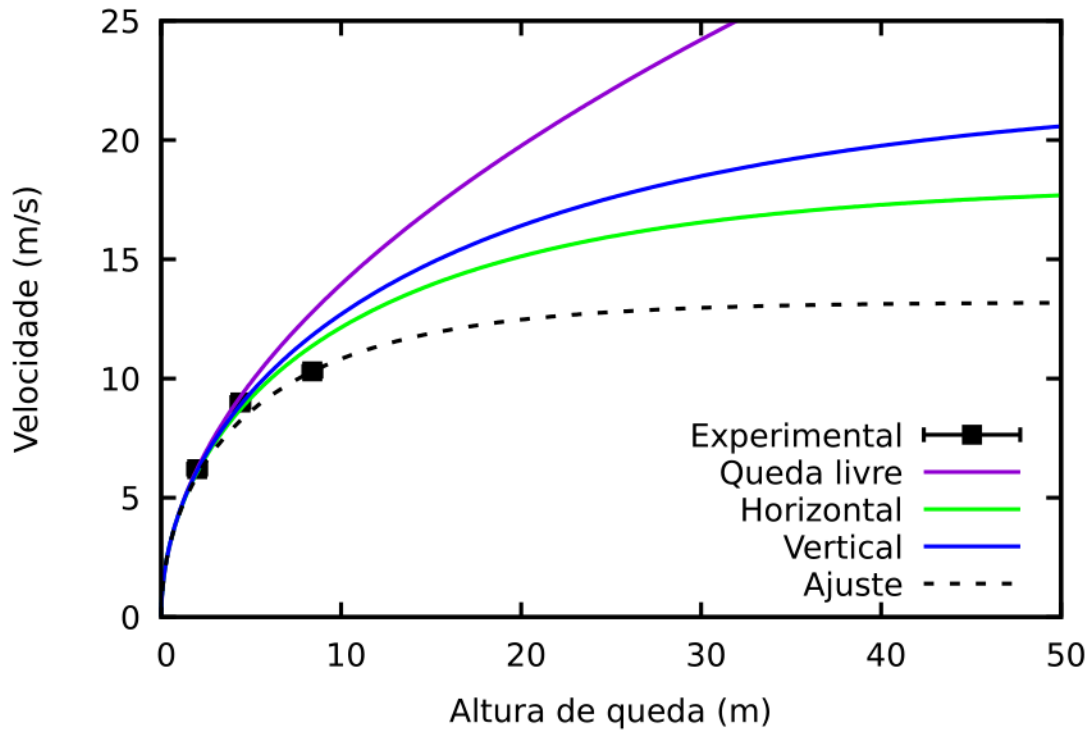


Figura 5.6: Velocidade de impacto dos briquetes em função da altura de queda. Os símbolos indicam os ensaios experimentais de queda individual, enquanto as linhas referem-se aos modelos teóricos.

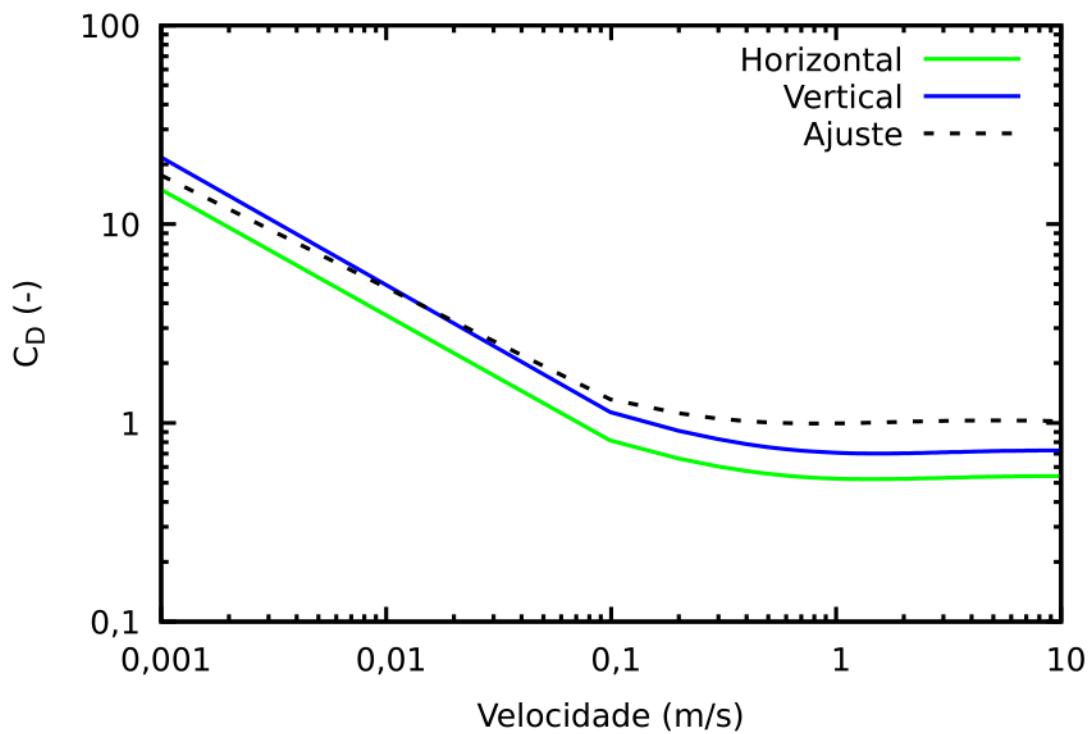


Figura 5.7: Evolução do coeficiente de resistência aerodinâmica em função da velocidade do briquete no momento do impacto.

Nas análises realizadas, a orientação vertical apresentou circularidade 0,950, enquanto a orientação horizontal teve valor igual a 0,994. Já o ajuste realizado indicou  $c_i = 0,878$ . Essa redução pode estar relacionada com dois fatores. O primeiro é a presença de rebarbas no briquete, que alteram sua superfície sujeita ao arrasto. O segundo fator, está relacionado com a orientação que, de fato, o briquete mantém durante sua trajetória. Foi observado que as orientações iniciais não foram respeitadas, com as partículas apresentando rotações durante seu movimento (ver Figura 5.4). Essa redução no  $c_i$  afeta inversa e conseqüentemente o  $C_D$ , sendo igual a 1,03 para o caso ajustado, na velocidade de 5,0 m/s. Nesse sentido, as simulações DEM que envolvem quedas de alturas maiores que cerca de 5 m devem ter suas energias de impacto corrigidas para valores menores, caso o DEM esteja simulando um sistema em condição de vácuo, ou, então, a simulação deve contemplar a resistência do ar.

Com relação à proporção de partículas quebradas no primeiro impacto, pode-se observar na Tabela 5.1 os resultados obtidos das velocidades de impacto ( $v$ ), das energias específicas de impacto ( $E_k$ ) e da proporção de partículas quebradas no primeiro impacto, em função da altura de queda (H).

Tabela 5.1: Ensaio de queda individual e suas respectivas velocidades de impacto ( $v$ ), energias específicas de impacto ( $E_k$ ) e proporção de partículas quebradas no primeiro impacto em função da altura de queda (H).

H (m)	$v$ (m/s)	$E_k$ (J/kg)	Quebra (%)
2,0	$6,2 \pm 0,5$	$19 \pm 3$	$9 \pm 5$
4,4	$9,1 \pm 0,5$	$41 \pm 5$	$33 \pm 8$
8,4	$10,3 \pm 0,5$	$53 \pm 5$	$65 \pm 8$

A Figura 5.8 mostra o efeito dos impactos repetidos na probabilidade de quebra dos briquetes. Nota-se que 7 impactos repetidos das alturas de 4,4 m e 8,4 m provocaram a quebra de todas as partículas ensaiadas.



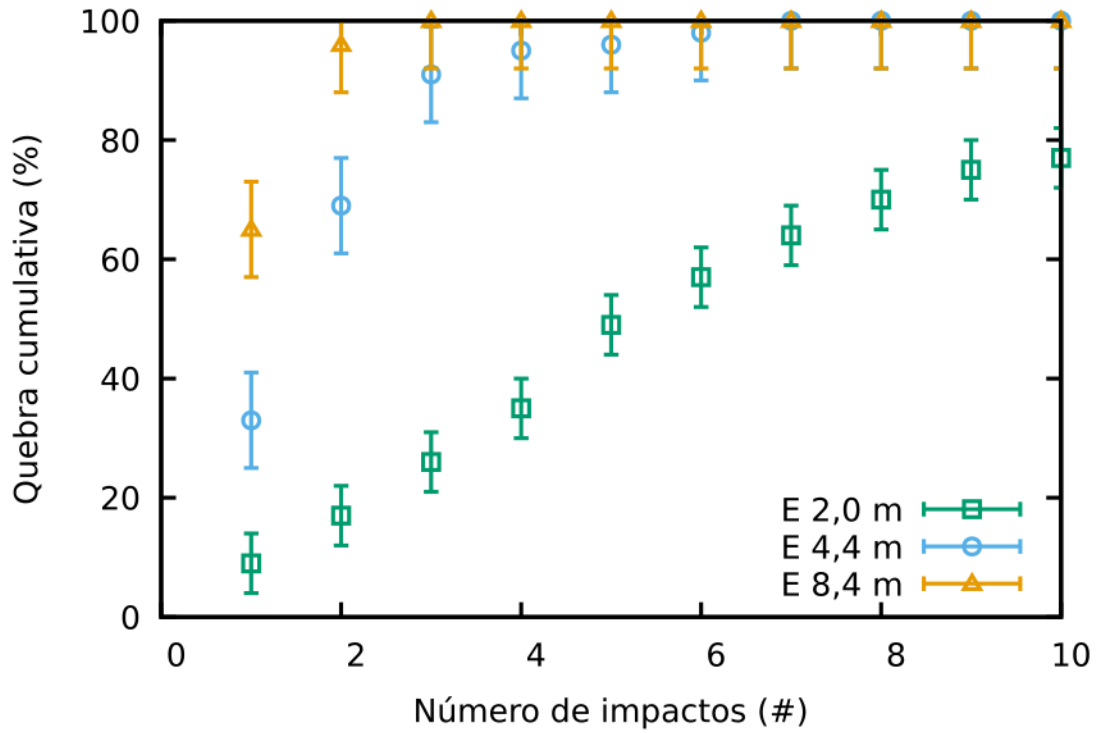


Figura 5.8: Percentual cumulativo de briquetes que tiveram quebra volumétrica para cada impacto sequencial, variando a altura de queda.

Outro efeito avaliado é a influência da orientação inicial do briquete na probabilidade de quebra. A Figura 5.9 mostra o percentual acumulado de briquetes que tiveram quebra volumétrica em função da sua orientação inicial, em que a letra H representa o briquete com sua maior área superficial paralela ao solo (briquete na horizontal), enquanto a letra V representa os briquetes com a menor área superficial. Não há indicativos de que a orientação inicial da partícula tenha afetado o resultado do ensaio.

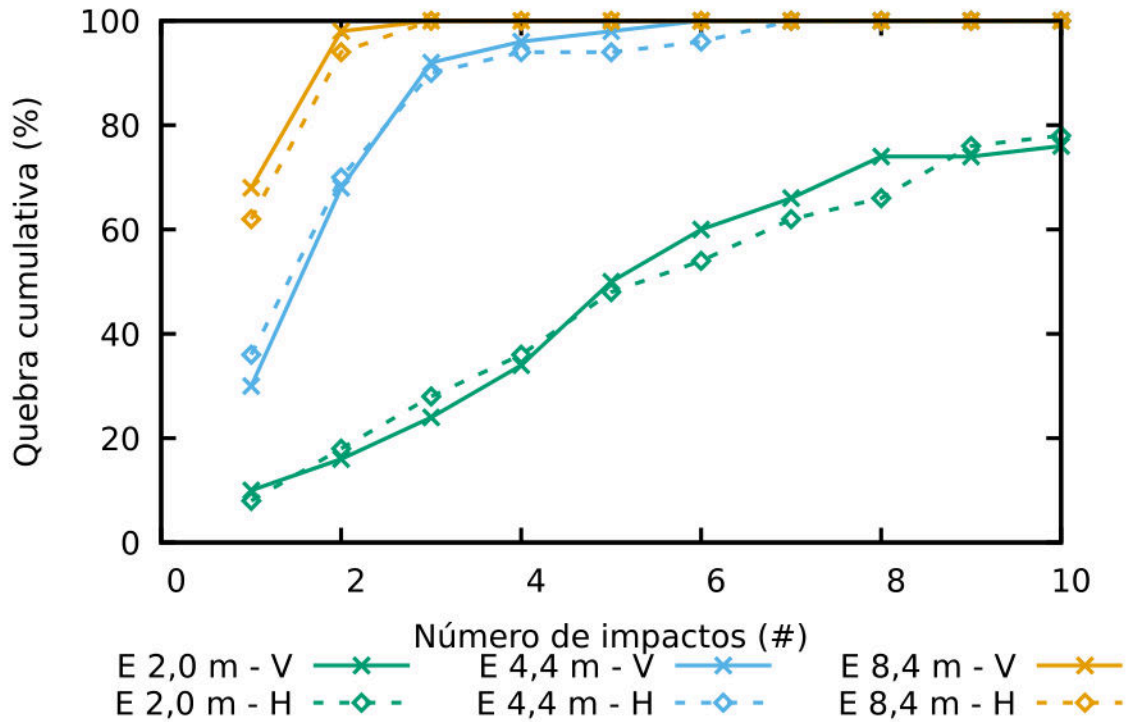


Figura 5.9: Avaliação da orientação inicial do briquete na sua probabilidade de quebra em repetidos impactos. Barras de erro omitidas para facilitar a observação.

A Figura 5.10 mostra a distribuição cumulativa do percentual de massa perdida por abrasão por cada briquete em cada ensaio de queda individual. Cada ponto no gráfico representa um evento de impacto que resultou em quebra superficial, o que explica a diminuição da quantidade de pontos com o aumento da energia específica de impacto (maior probabilidade de ocorrência de quebra volumétrica). Além disso, há um indicativo de maior percentual mássico liberado ao passo que aumenta a energia de impacto, limitado, pela definição, até o quantitativo de 10%, conforme também observado por CAVALCANTI *et al.* [40].

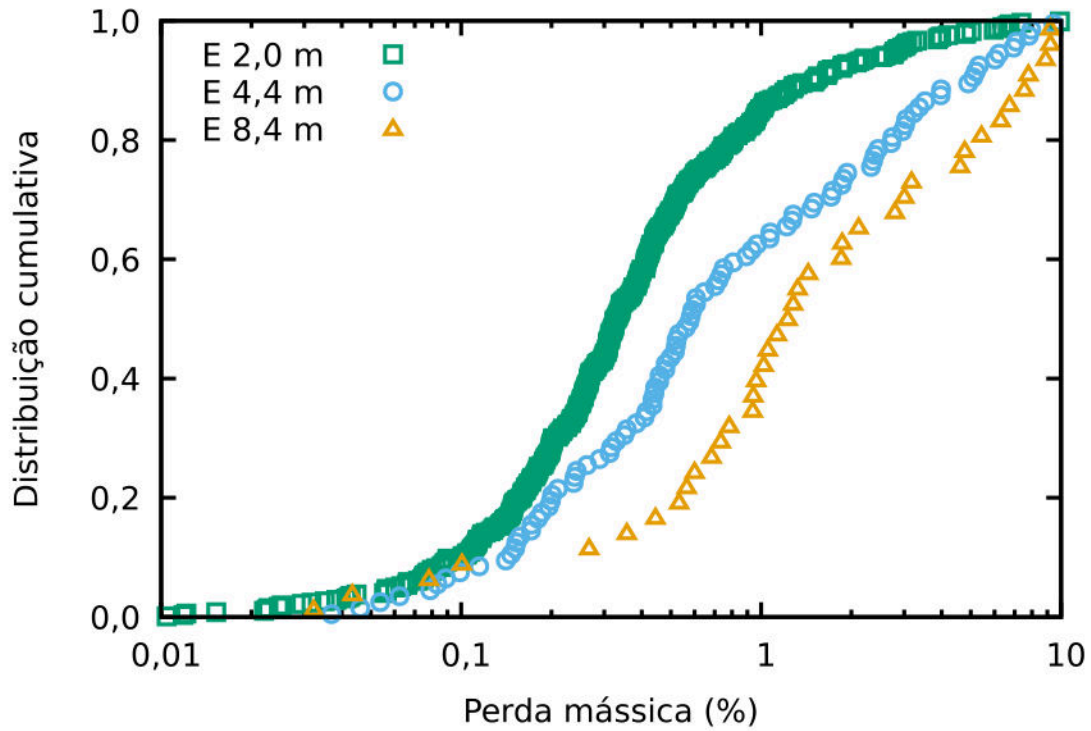


Figura 5.10: Percentual de massa perdida por abrasão para cada impacto de queda individual ao qual foram submetidos os briquetes.

A Figura 5.11 mostra a granulometria do produto da quebra volumétrica dos ensaios de queda individual, enquanto a Figura 5.12 indica a granulometria do produto de quebra superficial. É possível observar que na granulometria da quebra volumétrica há um indicativo de ter produto mais fino conforme aumenta a energia do impacto. Esse efeito, por outro lado, não é tão nítido na granulometria de abrasão, na qual talvez possa haver essa relação no final da curva apenas, para tamanhos menores que 0,3 mm.

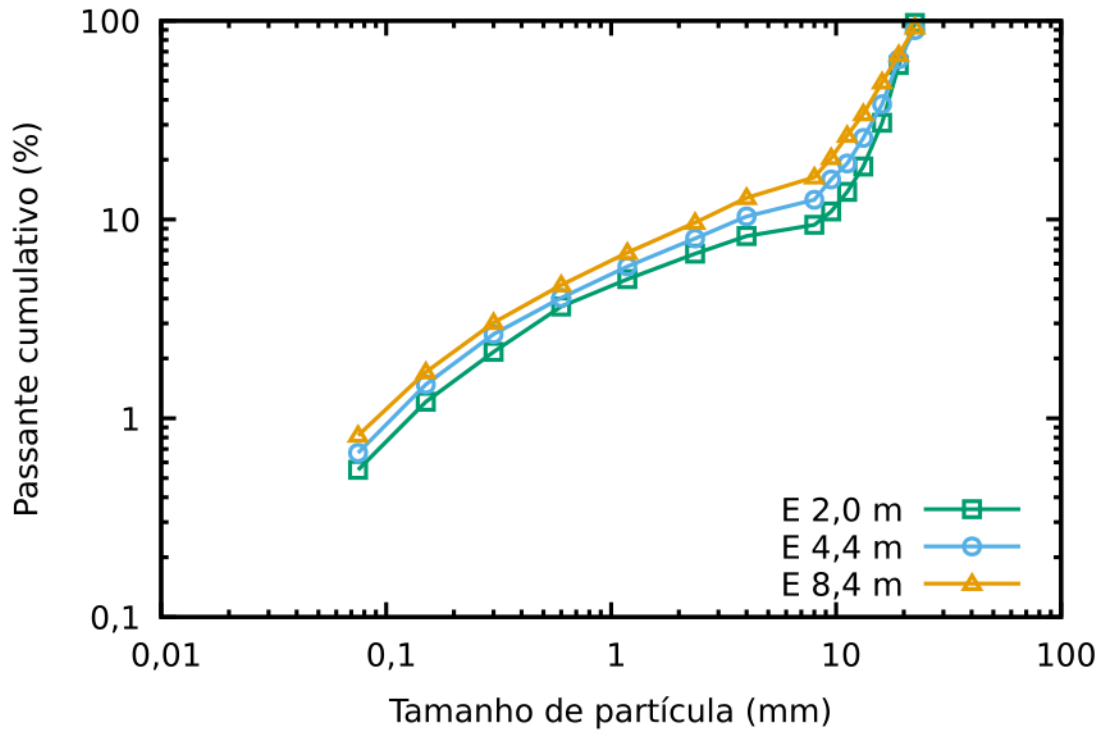


Figura 5.11: Distribuição granulométrica dos fragmentos gerados na quebra volumétrica dos briquetes em função da altura de queda.

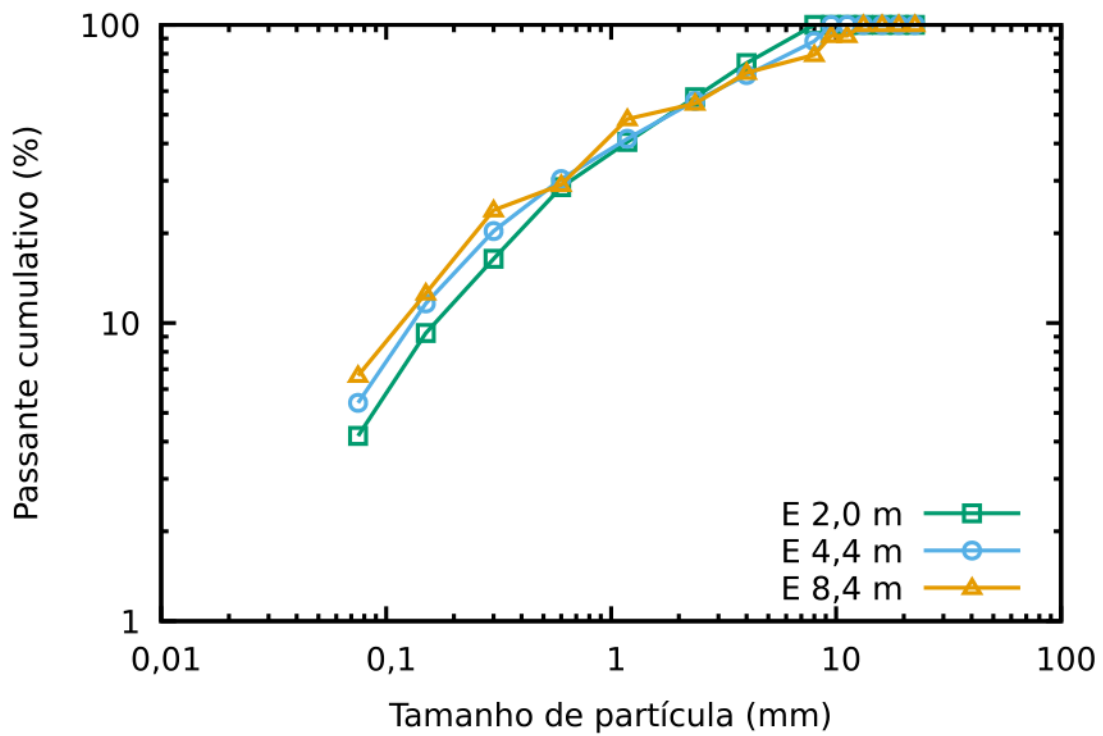


Figura 5.12: Distribuição granulométrica dos fragmentos gerados na quebra superficial dos briquetes em função da altura de queda.

### 5.2.1.2 Ensaio de Projeção Pneumática

O ensaio de projeção também permite a diferenciação visual do tipo de quebra que o briquete sofreu: volumétrica ou superficial. A Figura 5.13 mostra quatro quadros do movimento de aproximação do briquete ao anteparo, do impacto e após a colisão.

A Tabela 5.2 mostra os resultados obtidos das velocidades de impacto ( $v$ ), energias específicas de impacto ( $E_k$ ) e proporção de partículas quebradas em função do ensaio de projeção pneumática realizado. As velocidades dos impactos foram calibradas baseadas na translação dos briquetes. O efeito da rotação das partículas é mais acentuado, conforme aumenta a pressão do ar comprimido injetado na tubulação do equipamento. Porém, mesmo assim, as estimativas de suas energias cinéticas de rotação não chegaram a 2% dos valores das respectivas energias de impacto.

Tabela 5.2: Ensaio de projeção pneumática e suas respectivas velocidades de impacto ( $v$ ), energias específicas de impacto ( $E_k$ ) e proporção de partículas quebradas em função do ensaio de projeção pneumática realizado.

Ensaio	$v$ (m/s)	$E_k$ (J/kg)	Quebra (%)
PP1	$4 \pm 1$	$8 \pm 4$	$4 \pm 3$
PP2	$10 \pm 1$	$50 \pm 10$	$24 \pm 7$
PP3	$14 \pm 1$	$98 \pm 14$	$53 \pm 8$
PP4	$17 \pm 1$	$145 \pm 17$	$87 \pm 6$
PP5	$21 \pm 1$	$221 \pm 21$	$93 \pm 4$
PP6	$26 \pm 1$	$338 \pm 26$	100

A Figura 5.14 mostra o efeito dos impactos repetidos na probabilidade de quebra dos briquetes. Nota-se que, conforme esperado, quanto maior a energia do impacto maior a probabilidade de quebra e, sequencialmente, esse comportamento também é seguido.

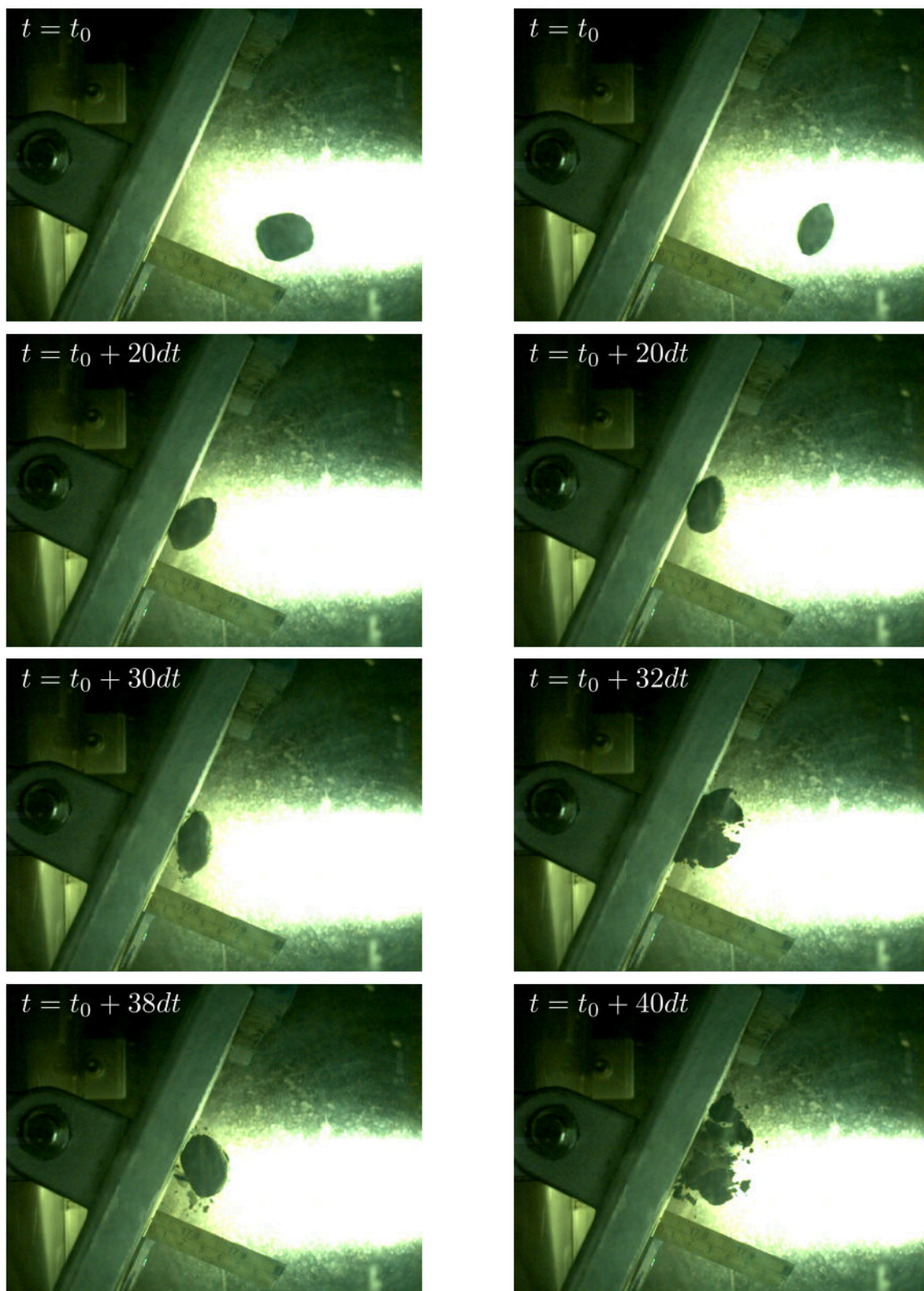


Figura 5.13: Sequência de quadros do ensaio de projeção pneumática PP 3, mostrando o fenômeno de quebra superficial em (a) e de quebra volumétrica em (b), em que  $dt = 2 \times 10^{-4}$  s.

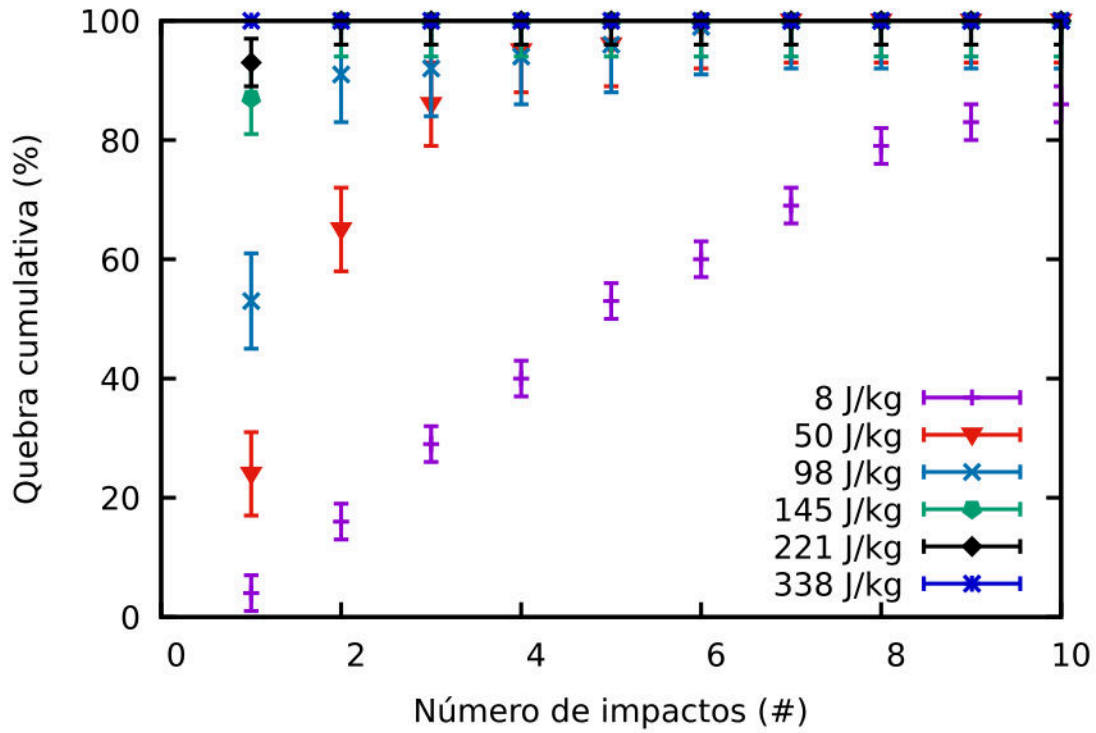


Figura 5.14: Percentual cumulativo de briquetes que tiveram quebra volumétrica para cada impacto sequencial, variando a variando a energia do impacto.

A Figura 5.15 mostra a distribuição cumulativa do percentual de massa perdida por abrasão por cada briquete em cada ensaio de queda individual. Neste caso, também foi observado comportamento semelhante ao descrito para o ensaio de queda individual (Seção 5.2.1.1), de aumento do percentual mássico liberado por quebra superficial em função do aumento da energia específica do impacto.

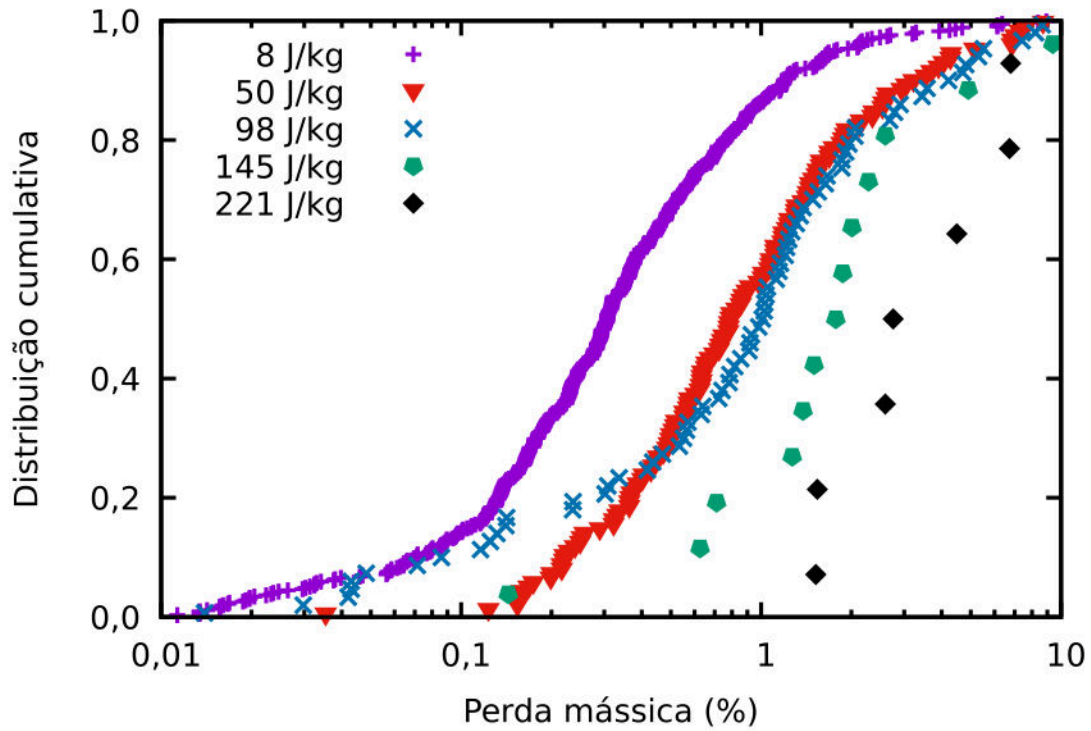


Figura 5.15: Percentual de massa perdida por abrasão para cada impacto de projeção pneumática ao qual foram submetidos os briquetes.

A Figura 5.16 mostra a granulometria do produto da quebra volumétrica dos ensaios de projeção pneumática, enquanto a Figura 5.12 indica a granulometria do produto de quebra superficial. É possível observar que na granulometria da quebra volumétrica, assim como ocorreu nos ensaios de queda individual, há um indicativo de ter produto mais fino conforme aumenta a energia do impacto. Do mesmo modo, esse efeito aparece na granulometria de abrasão. Uma possibilidade para essa ocorrência na quebra superficial é a liberação de fragmentos provenientes da rebarba dos briquetes, que acabam ficando retidas em peneiras com malhas mais grosseiras.



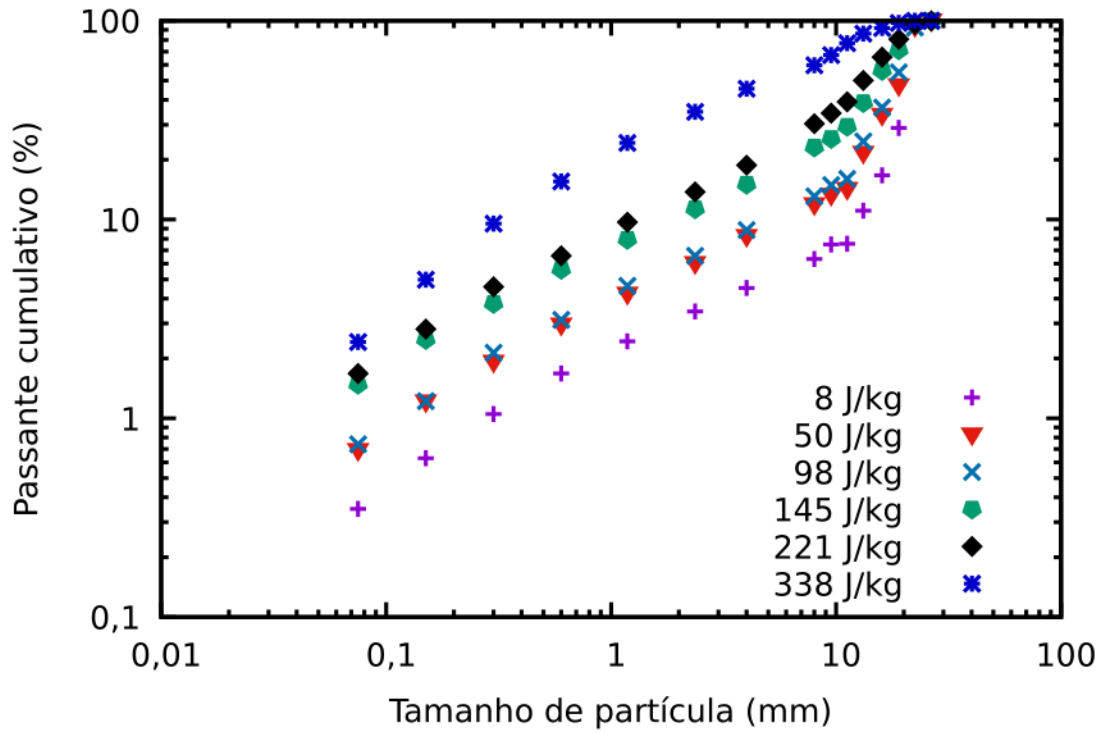


Figura 5.16: Distribuição granulométrica dos fragmentos gerados na quebra volumétrica dos briquetes em função da energia do impacto.

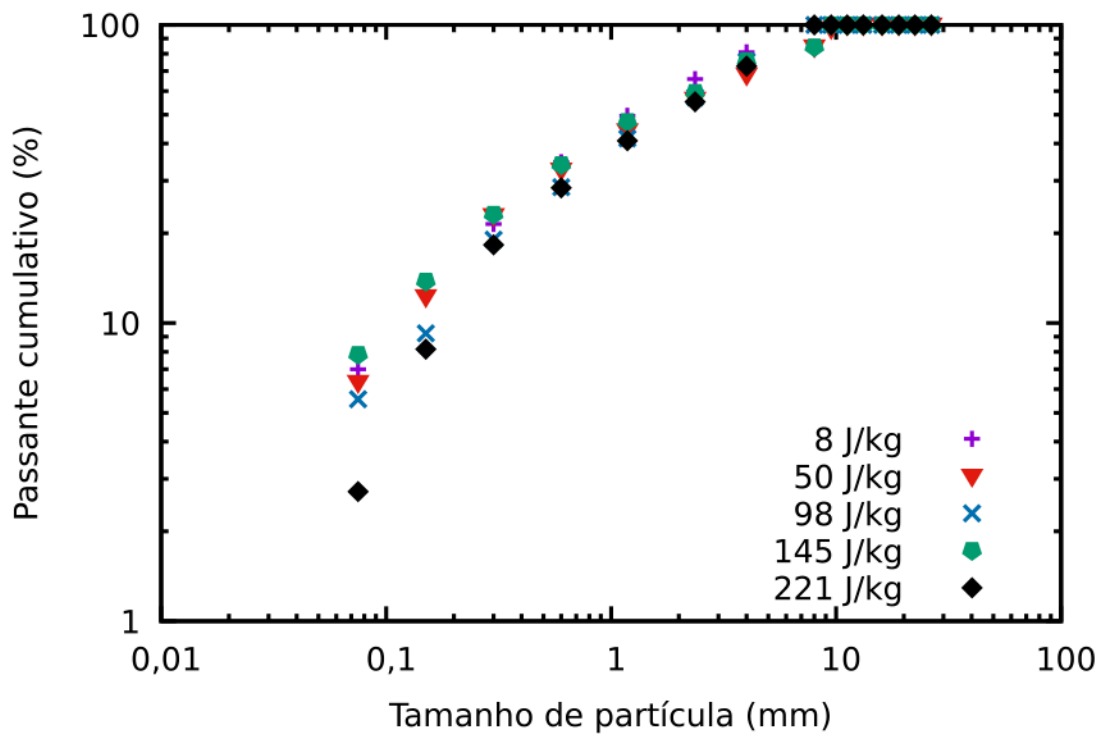


Figura 5.17: Distribuição granulométrica dos fragmentos gerados na quebra superficial dos briquetes em função da altura de queda.

## 5.2.2 Ensaio de Degradação Dinâmica

### 5.2.2.1 Degradação por Peneiramento

O ensaio de degradação por peneiramento teve início com 30 partículas de briquetes maiores que 19,0 mm nas duas réplicas realizadas. Na primeira, restaram 32 fragmentos maiores que 10,0 mm, enquanto a segunda apresentou 31 fragmentos na mesma faixa de tamanhos. A Figura 5.18 mostra as partículas mencionadas antes e após o experimento, referentes à Réplica 1.

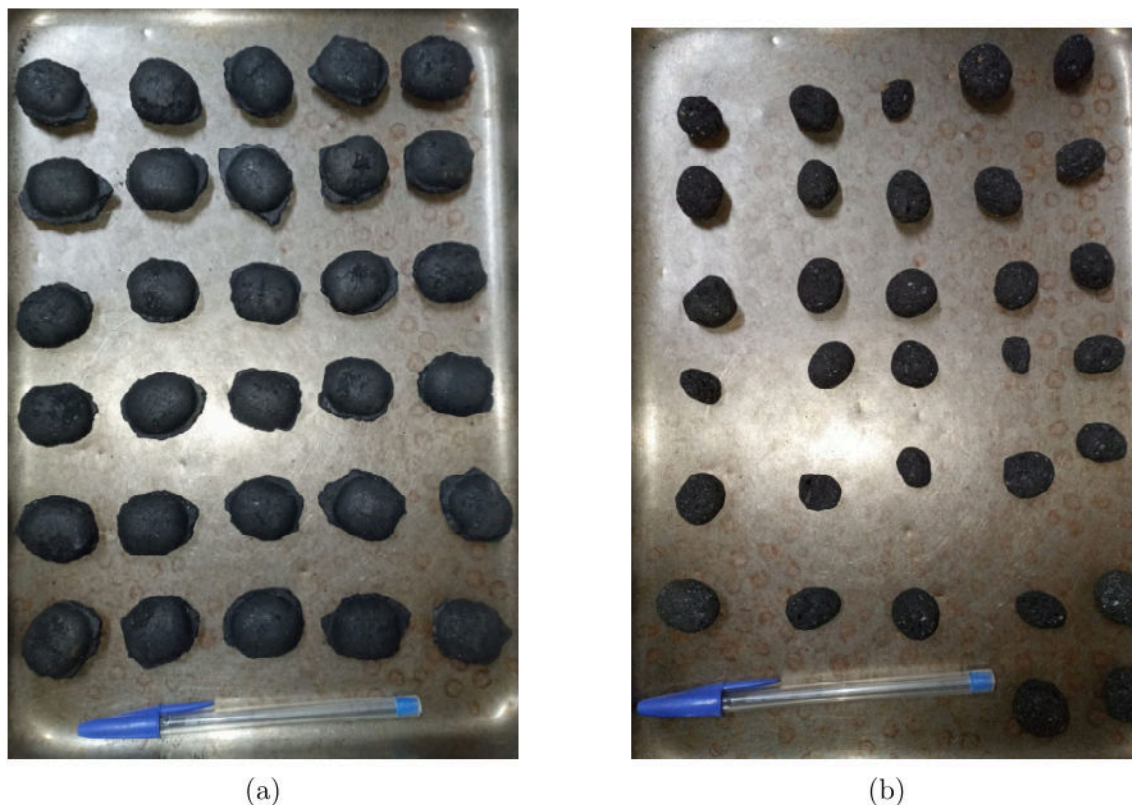


Figura 5.18: Partículas de briquetes maiores que 19,0 mm selecionadas para o ensaio de degradação por peneiramento (a) e as partículas maiores que 10,0 mm após os 60 minutos do experimento (b), referentes à Réplica 1.

A observação da Figura 5.18b aponta que, como a quantidade de partículas de briquetes ao final do ensaio é próxima da inicial, houve, conforme esperado, o predomínio de fratura superficial no experimento. Por outro lado, não foi possível afirmar que as partículas excedentes referem-se ao fenômeno de quebra volumétrica. Porém, isso é um indício de ocorrência do mesmo, sendo plausível que dois briquetes tenham perdido pelo menos 10% de massa em um evento de impacto. Outra hipótese seria a quebra do briquete original, seguida de quebra dos fragmentos gerados, denominados de cacos por CAVALCANTI [34], no caso de pelotas queimadas. Entretanto, a quebra de cacos de briquetes não é objeto de estudo do presente trabalho.

Nesse sentido, análises mais rigorosas devem ser realizadas de modo a permitir

uma maior compreensão dos resultados e subsidiar a comparação com a simulação DEM (Seção 5.4.1). Avaliou-se também a fração de briquetes retida na faixa maior que 19,0 mm durante o ensaio nas duas réplicas realizadas. Foi observado que, no sistema estudado, a taxa de variação da fração mássica de partículas nessa classe de tamanhos ( $\frac{dw(t)}{dt}$ ) pode ser descrita por uma equação diferencial ordinária linear de primeira ordem homogênea, conforme Equação 5.1, em que  $S$  é taxa específica de quebra. A solução dessa equação é dada pela Equação 5.2 e, nesse caso, pode-se dizer que a quebra superficial dos briquetes apresentou cinética de primeira ordem [12].

$$\frac{dw(t)}{dt} = -Sw(t) \quad (5.1)$$

$$w(t) = w(0) \exp(-St) \quad (5.2)$$

Essa relação pode ser observada na Figura 5.19, na qual a taxa de quebra da Réplica 1 foi igual a  $0,044 \text{ min}^{-1}$ , da Réplica 2 foi igual a  $0,030 \text{ min}^{-1}$  e da Média entre ambas (calculada a cada janela de observação) foi igual a  $0,036 \text{ min}^{-1}$ . Os dados experimentais apresentam boa relação com o modelo de primeira ordem.

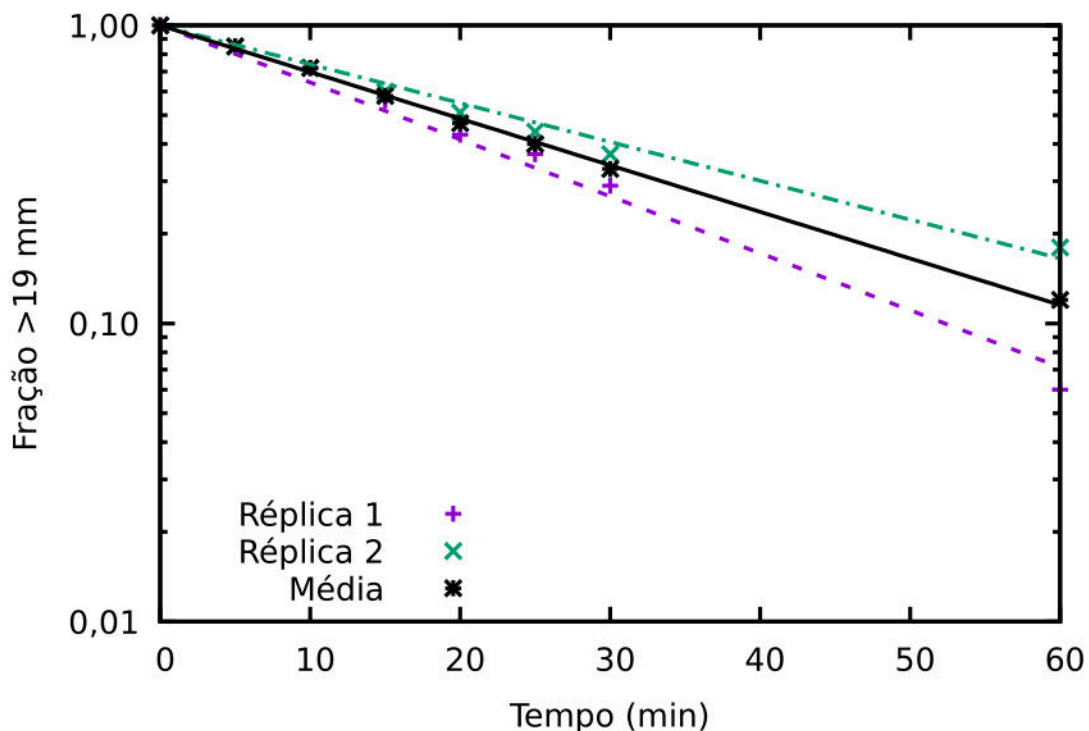


Figura 5.19: Fração de briquetes retida na peneira de 19,0 mm no ensaio de peneiramento.

Os briquetes de carvão vegetal analisados apresentam taxas de quebra tais que, em 10 minutos, ainda restavam cerca de 30% das partículas na classe maior que

19,0mm. Deve ser investigado, então, o destino desses fragmentos. Para isso, avaliou-se a geração de finos menores que 6,3mm durante o ensaio de degradação por peneiramento, conforme apresentado na Figura 5.20.

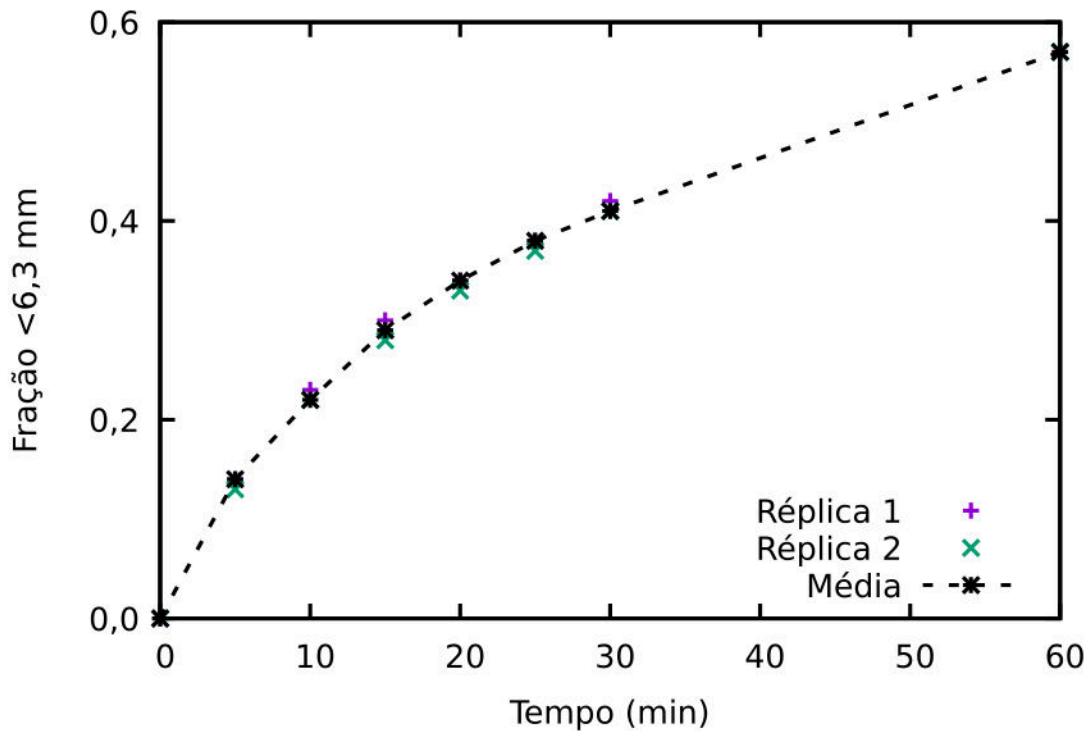


Figura 5.20: Fração de briquetes passante na peneira de 6,3 mm no ensaio de peneiramento.

Adicionalmente, a Tabela 5.3 mostra a fração mássica retida em cada peneira, para cada Réplica após 10 minutos do experimento. Cabe ressaltar que a perda mássica após os 60 minutos de ensaio foi de 3%, para a Réplica 1 e 1%, para a segunda.

Tabela 5.3: Fração mássica retida em cada peneira, para cada Réplica após 10 minutos de ensaio.

Réplica 1		Réplica 2	
Peneira (mm)	Fração	Peneira (mm)	Fração
19,0	0,72	19,0	0,72
10,0	0,04	15,9	0,06
8,0	0,00	13,2	0,00
6,3	0,00	11,2	0,00
4,0	0,00	10,0	0,00
2,36	0,00	8,0	0,00
1,18	0,01	6,3	0,00
Fundo	0,22	Fundo	0,22

A análise da fração de partículas menores que 6,3 mm em 10 minutos de ensaio mostra que cerca de 22% do material encontra-se nessa faixa de tamanhos. Isso indica que as partículas de briquetes perderam massa superficial e algumas podem ter mudado de classe. Tal afirmativa pode ser comprovada, visto que, em ambas as réplicas, a diferença de massa entre o total e o observado nas faixas maiores que 19,0 mm e menores que 6,3 mm encontrava-se na classe imediatamente inferior à primeira classe (10,0 mm, para a Réplica 1 e 15,9 mm, para a Réplica 2).

### 5.2.2.2 Degradação por Tamboramento

O ensaio de degradação mecânica por tamboramento foi iniciado com 5,42 kg de briquetes em seu interior. A cada janela de observação foram removidas as partículas menores que 19,0 mm e o equipamento era ligado novamente. A Figura 5.21 mostra o tambor preparado para iniciar o ensaio e ele preparado para iniciar a última janela de observação. Nela é possível perceber visualmente a grande diferença de volume ocupado pelos briquetes no interior do tambor.



Figura 5.21: Tambor preparado para o início do ensaio (a) e carregado após 30 min, preparado para o último intervalo de observação (b).

A evolução da fração mássica de briquetes maior que 19,0 mm está apresentada na Figura 5.22. A análise do resultado indica que, assim como no ensaio de peneiramento, há uma taxa de quebra específica de primeira ordem. Nesse caso, a taxa de quebra foi  $0,034 \text{ min}^{-1}$ , o que difere em menos de 6% do valor obtido no peneiramento, em que  $S = 0,036 \text{ min}^{-1}$ .

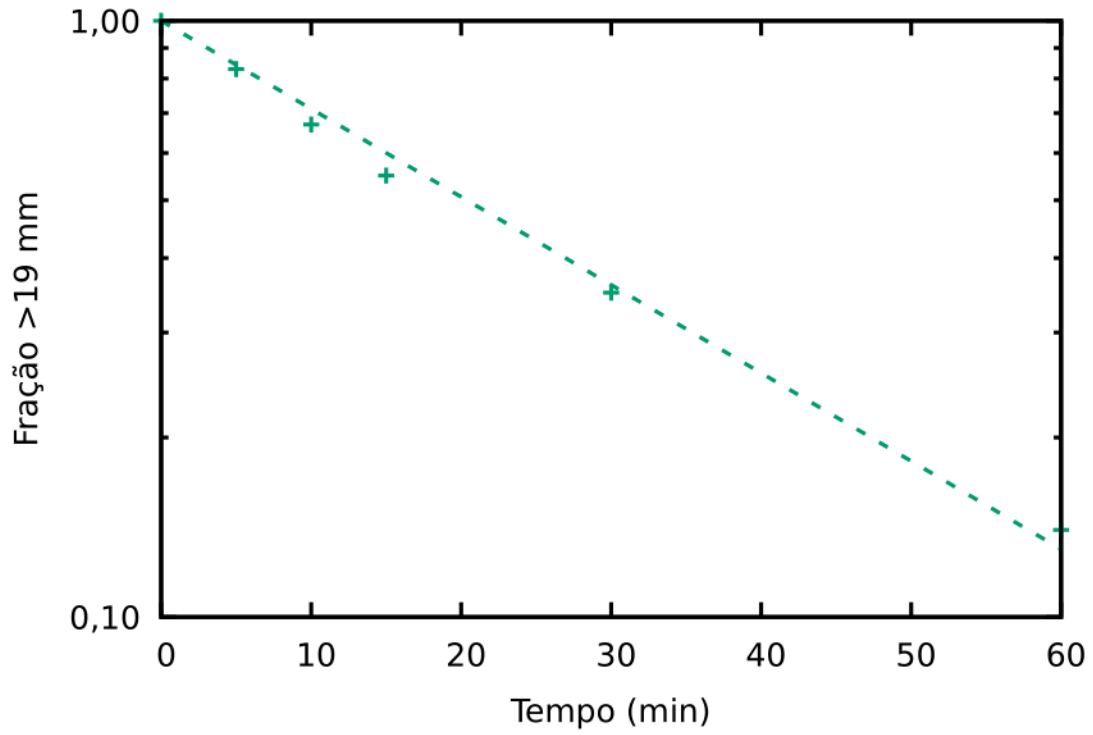


Figura 5.22: Fração de briquetes maior que 19,0 mm ao longo do ensaio de tamboramento.

A análise da evolução temporal dos fragmentos gerados menores que 6,3 mm está apresentada na Figura 5.23.

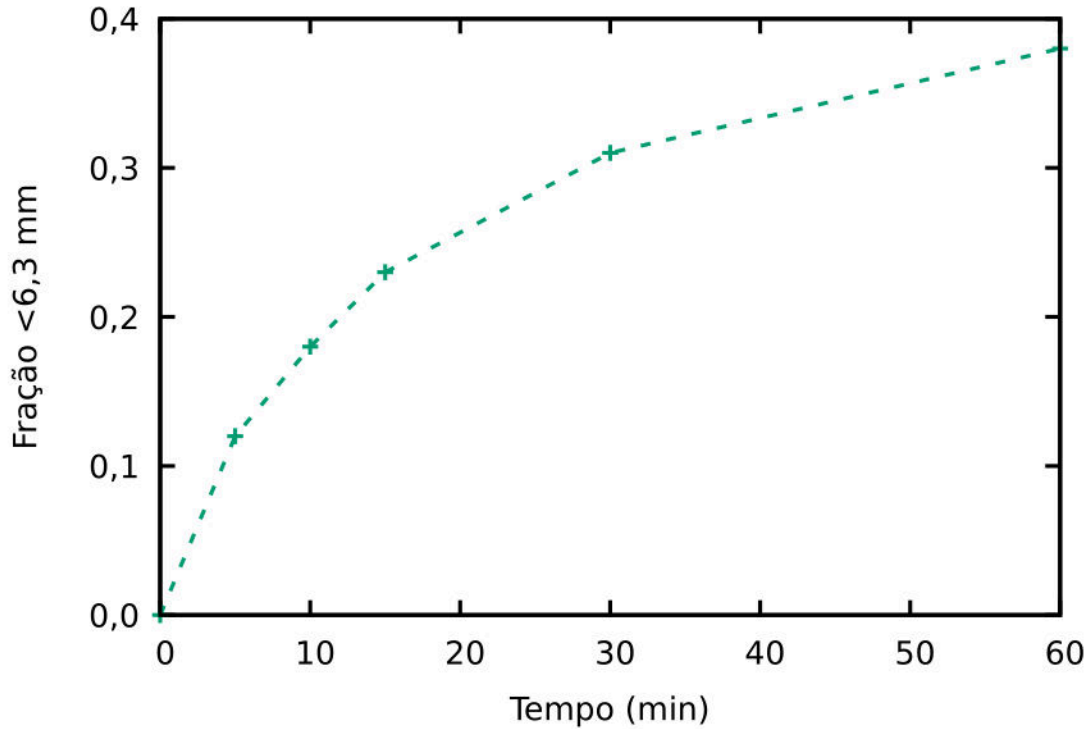


Figura 5.23: Fração de briquetes menor que 6,3 mm ao longo do ensaio de tamboramento.

A geração de finos no ensaio de peneiramento foi proporcionalmente maior que no ensaio de tamboramento. Decorridos 60 min, o primeiro teve 57% da massa total menor que 6,3 mm, ao passo que o segundo chegou a 38%. Em ambos os casos o comportamento dos dados foi semelhante, com um decréscimo da taxa de geração de finos ao longo do tempo. É interessante notar que, para os tamanhos menores que 6,3 mm, não houve o comportamento da cinética de primeira ordem observado para os tamanhos maiores que 19,0 mm.

## 5.3 Modelagem Matemática da Quebra

### 5.3.1 Probabilidade de Quebra

A função de distribuição cumulativa gama (Equação 3.10) foi utilizada para representar a probabilidade de quebra dos briquetes de carvão vegetal. A Tabela 5.4 apresenta os parâmetros de ajuste aos dados experimentais, enquanto a Figura 5.24 ilustra graficamente esse resultado.

Tabela 5.4: Parâmetros de ajuste da função de distribuição cumulativa gama (Equação 3.10) aos dados de impacto de briquetes de carvão vegetal.

Parâmetro	Valor
$\lambda$ (J/kg)	90,228
$\eta$ (-)	1,061

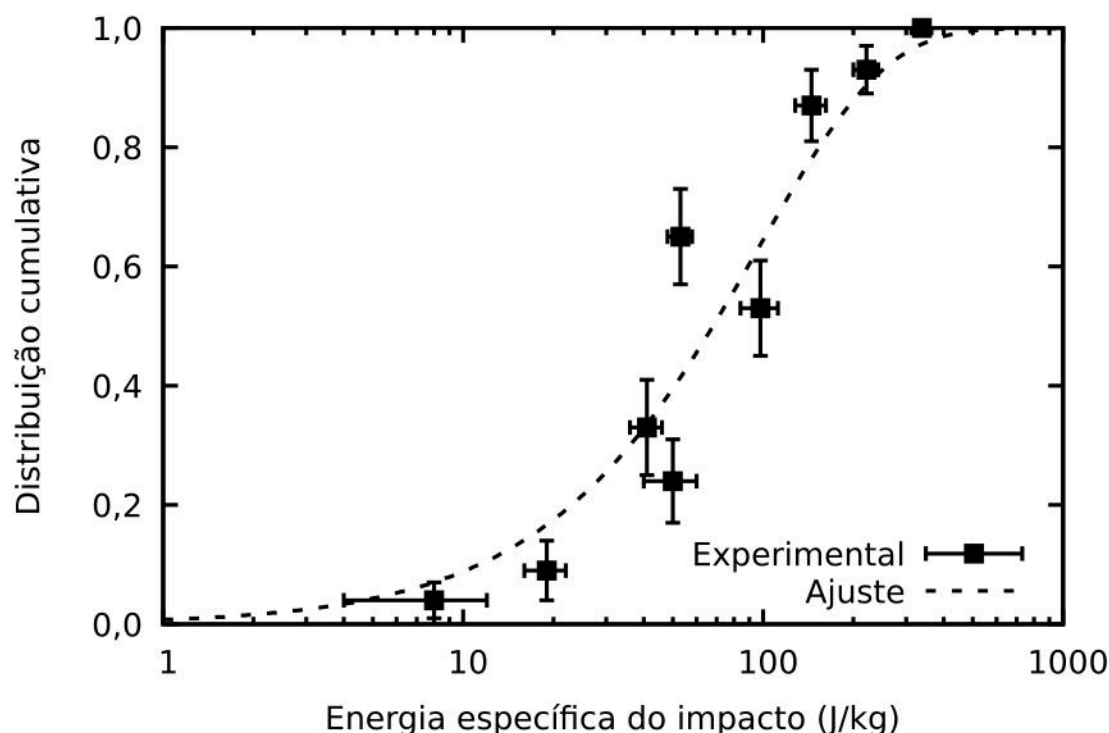


Figura 5.24: Probabilidade de quebra da amostra de briquetes de carvão vegetal em função da energia específica do impacto.

O ajuste foi realizado ponderando os erros pelas incertezas das energias. Desse modo, há uma preferência em representar melhor os dados de baixas magnitudes de impacto, que as situações que predominam no manuseio dos briquetes de carvão vegetal. Nota-se que o resultado do ensaio de queda individual de 8,4 m (53 J/kg) foi o que mais destoou do ajuste, com um desvio relativo de 57,0%. Por outro lado, o ensaio de 4,4 m (41 J/kg) adequou-se bem ao modelo, com discrepância relativa de 1,5%, provocada pela precisão do dado experimental. O comportamento dos ensaios foi compatível entre si, conforme observado por CAVALCANTI *et al.* [14].

Outro termo interessante para ser avaliado é o  $E_{m50}$ , que para os briquetes vale 68,015 J/kg. Para fins de comparação com outros materiais, as pelotas queimadas de minério de ferro apresentam  $E_{m50} = 133,4$  J/kg e as pelotas verdes de minério de ferro têm  $E_{m50} = 93,1$  J/kg, para a faixa de tamanhos, em milímetros, de 9,0–12,5 e 10,0–12,5, respectivamente. Isso significa que 50% dos briquetes sofreriam quebra



volumétrica com 51,0% da energia necessária para fraturar o mesmo quantitativo de pelotas queimadas e 73,1%, no caso das pelotas verdes. A Figura 5.25 mostra as probabilidades de quebra desses três materiais, em que é possível essas diferenças mencionadas. Os parâmetros usados para ambas as pelotas são os apresentados na Tabela 3.4.

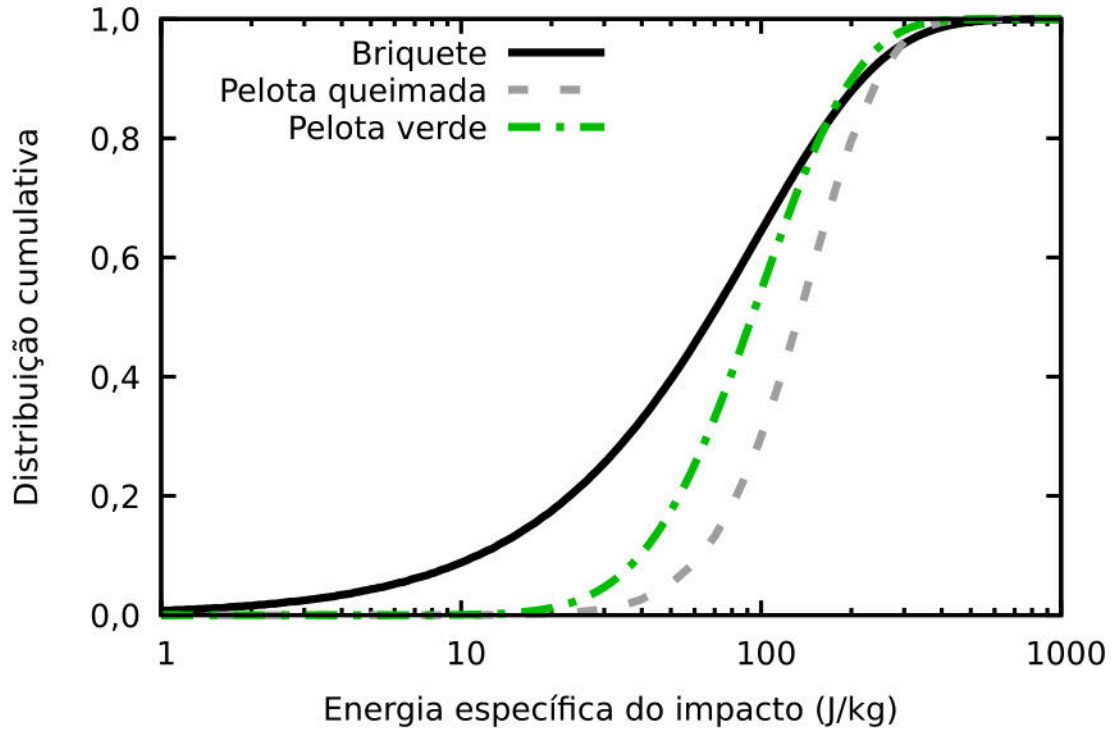


Figura 5.25: Comparação da probabilidade de quebra de briquetes de carvão vegetal, pelotas queimadas de minério de ferro e pelotas verdes de minério de ferro, em função da energia específica do impacto.

### 5.3.2 Dano Acumulado

O efeito dos impactos repetidos na resistência à fratura dos briquetes foi avaliado, a princípio, simultaneamente para os ensaios de queda individual e de projeção pneumática. O valor obtido para o parâmetro de dano acumulado ( $\gamma$ ) foi 1,248, determinado a partir das Equações 3.14 e 3.15. Esse valor pode ser considerado baixo quando comparado com outros materiais, o que indica forte suscetibilidade ao dano, ou seja, as partículas de briquetes quando impactadas sequencialmente tendem a perder muito rapidamente sua resistência à fratura [11].

Esse comportamento pode ser observado na Figura 5.26, que mostra uma comparação dos dados experimentais dos ensaios de queda individual e de projeção pneumática, expressos em termos do percentual de briquetes quebrados em função do número de impactos repetidos, para energias definidas. Ela também mostra os resultados do ajuste do modelo do dano. É possível observar que, embora haja uma

ligeira discrepância entre os dados de queda individual e de projeção pneumática, o modelo foi capaz de descrever o rápido enfraquecimento e a quebra dos briquetes.

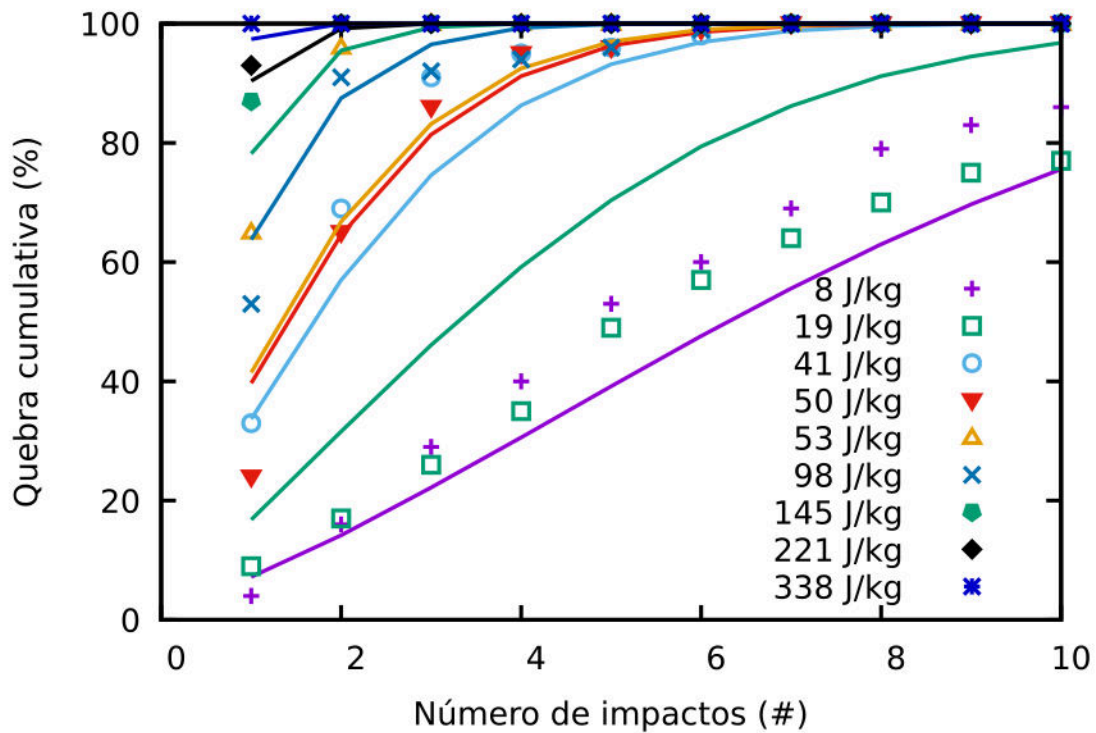


Figura 5.26: Quebra acumulada em função do número de impactos repetidos, para diferentes níveis energéticos. Os símbolos representam os ensaios com o projetor pneumático e de queda individual. Já as linhas sólidas indicam o ajuste aos dados experimentais dos ensaios de projeção, com parâmetro de dano  $\gamma = 1,248$ .

A análise detalhada do ajuste obtido para as energias específicas originárias dos ensaios de queda individual mostra que, enquanto os resultados de impactos à energia específica de impacto de 41 J/kg estão bem representados pelo modelo, tanto os dados de 19 J/kg, quanto os de 53 J/kg não corresponderam bem ao parâmetro obtido inicialmente. Como, durante o manuseio dos briquetes, as partículas serão submetidas, prioritariamente, a baixas energias específicas de impacto, é fundamental que o modelo possa representar bem essa região de análise.

Nesse sentido, ajustou-se individualmente o valor do parâmetro do modelo do dano para cada ensaio de impacto. Com isso, foi possível obter uma correlação entre  $\gamma$  e a energia específica do impacto. Essa análise está apresentada na Figura 5.27.

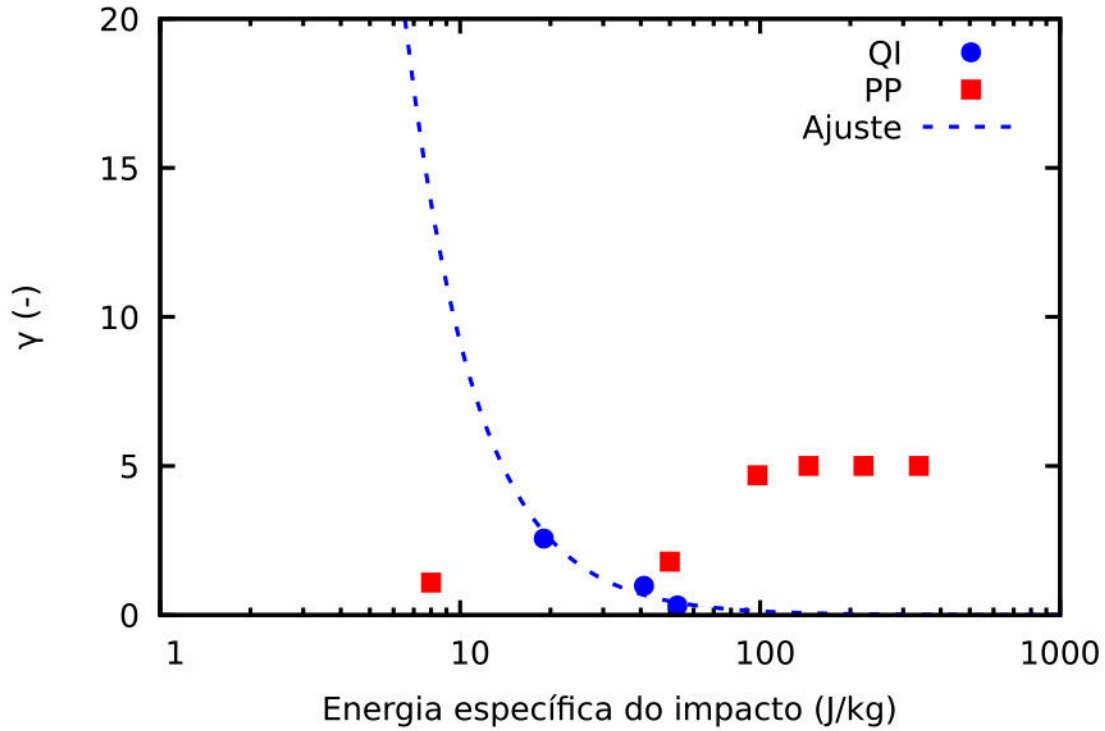


Figura 5.27: Variação do parâmetro de dano acumulado ( $\gamma$ ) em função da energia específica do impacto para os ensaios de queda individual (QI) e de projeção pneumática (PP). A linha tracejada indica o ajuste dos dados de QI a uma função exponencial.

Observa-se que nos ensaios de projeção pneumática, há pouca variação no parâmetro  $\gamma$ , conforme a energia a energia específica do impacto aumenta. Por outro lado, os ensaios de queda individual apontam para um crescimento do parâmetro  $\gamma$ , enquanto a energia específica do impacto diminui. Neste caso, um modelo exponencial adequou-se bem aos dados experimentais. Para evitar o crescimento de  $\gamma$  para valores de energia extremamente baixos (como milésimos ou milionésimos Joules por quilograma), foi adotado um limite superior para o parâmetro, em  $\gamma = 20$ . Assim, a Equação 5.3 descreve o modelo de dano acumulado adotado neste trabalho.

$$\gamma = 646,36E_k^{-1,85} \quad (5.3)$$

Utilizando a relação apontada na Equação 5.3 para os ensaios de queda individual, pode-se verificar o comportamento desse ajuste para os experimentos de impactos repetidos realizados, como apresentado na Figura 5.28. Desse modo, espera-se representar com maior fidelidade a degradação mecânica dos briquetes de carvão vegetal, especialmente, na região de baixas e médias energias específicas de impacto.

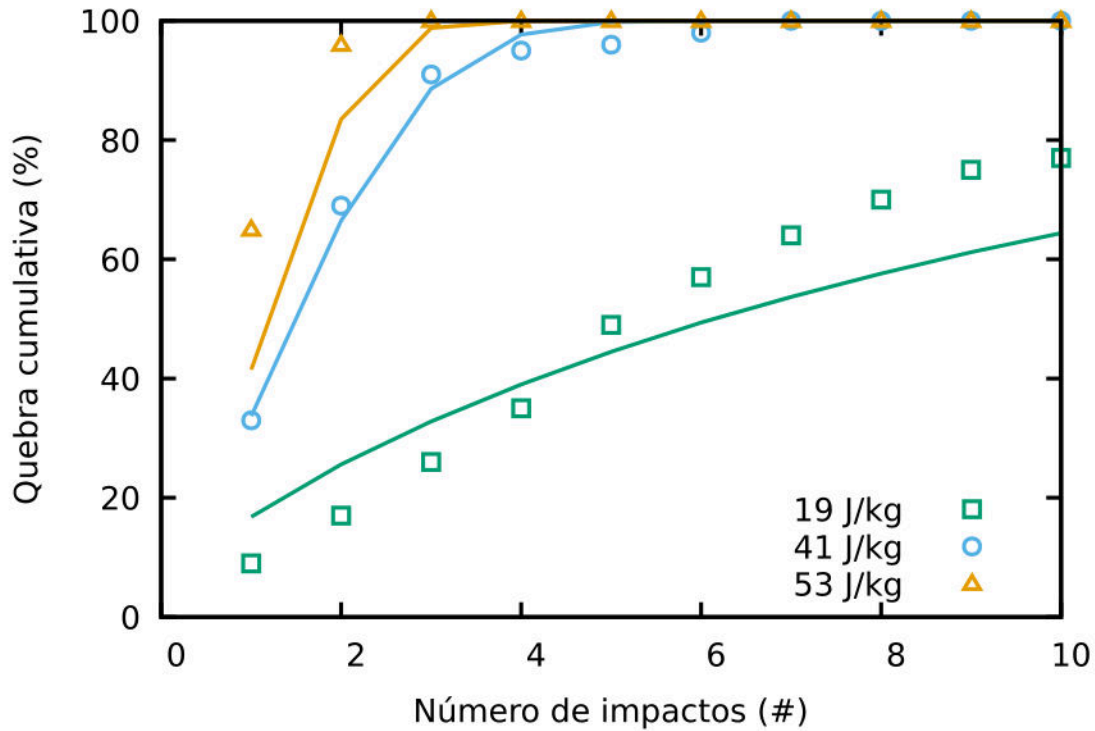


Figura 5.28: Quebra acumulada em função do número de impactos repetidos, considerando o parâmetro de dano acumulado  $\gamma$  variando de acordo com a energia específica do impacto, conforme Equação 5.3.

### 5.3.3 Granulometria da Quebra Volumétrica

A previsão da granulometria da quebra volumétrica é estimada, inicialmente, a partir do modelo  $t_{10}$  (Equação 3.16), cujos parâmetros de ajuste encontram-se na Tabela 5.5 e o gráfico que o representa está na Figura 5.29. O modelo foi ajustado para os valores de  $t_{10}$  obtidos a partir dos resultados experimentais da granulometria da quebra volumétrica, nos ensaios de queda individual e de projeção pneumática (Figuras 5.11 e 5.16). Já o termo  $E_{50b}$  foi obtido com o ajuste da probabilidade de quebra (Figura 5.24), para cada  $E_k$ .

Tabela 5.5: Parâmetros de ajuste ao modelo  $t_{10}$  (Equação 3.16).

Parâmetro	Valor
$A$ (%)	90,044
$b'$ (-)	$1,240 \times 10^{-2}$
$c$ (-)	2,215

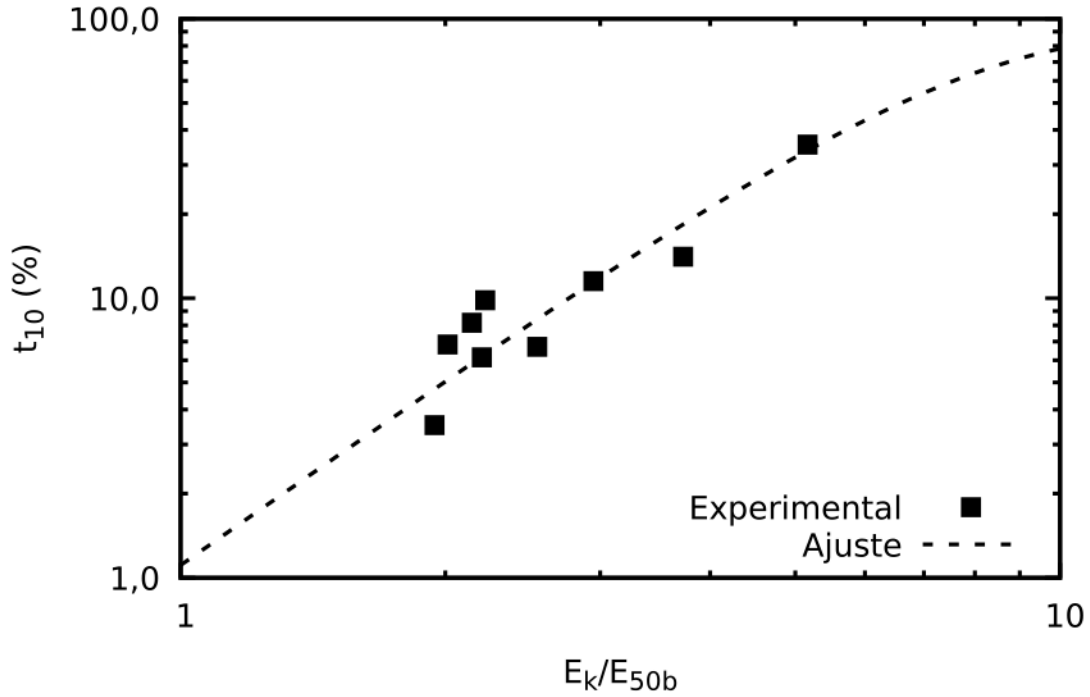


Figura 5.29: Variação do  $t_{10}$  em função da razão entre a energia específica de impacto ( $E_k$ ) e a mediana das energias de fratura dos briquetes que sofreram quebra volumétrica ( $E_{50b}$ )

Da mesma forma que o  $t_{10}$  é obtido, os  $t_{1,2}$ ,  $t_{1,5}$ ,  $t_2$ ,  $t_4$ ,  $t_{25}$ ,  $t_{50}$  e  $t_{75}$  podem ser determinados. Esses termos são definidos com base na granulometria do produto da quebra volumétrica obtida nos ensaios de impacto (Figuras 5.11 e 5.16). Os dados experimentais de  $t_n$  em função de  $t_{10}$ , bem como as curvas que melhor se adequaram ao conjunto de pontos podem ser observados na Figura 5.30. As curvas indicadas foram determinadas para a Equação 3.17, cujos parâmetros de ajuste estão indicados na Tabela 5.6.

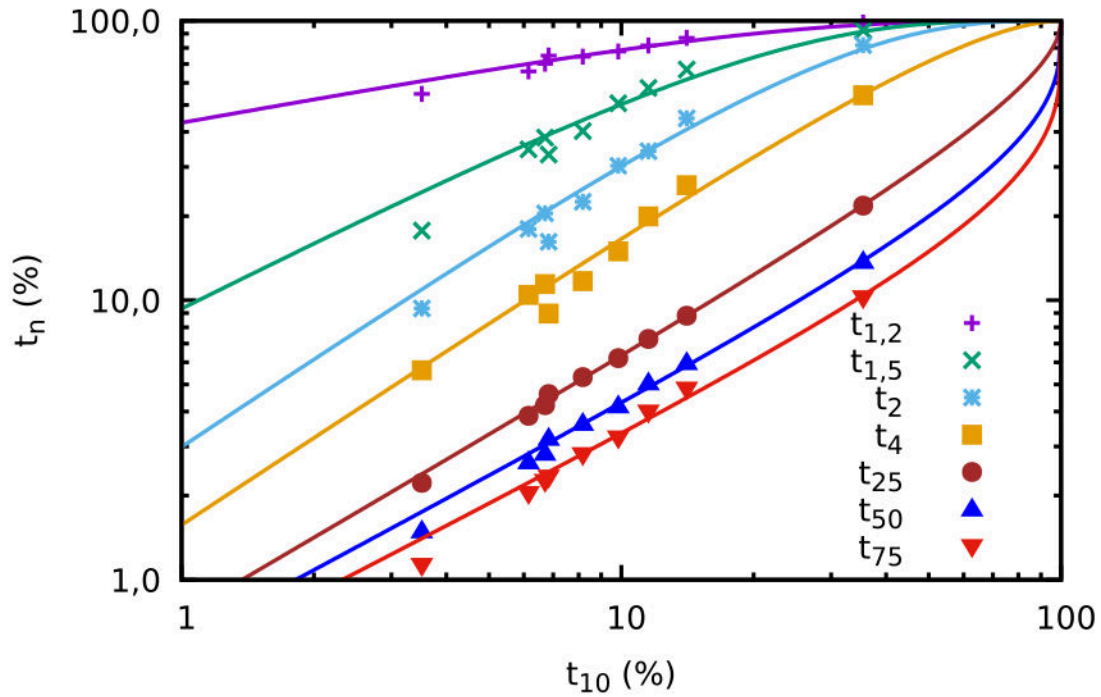


Figura 5.30: Relação entre  $t_{10}$  e  $t_n$ .

Tabela 5.6: Parâmetros de ajuste ao modelo  $t_n$  (Equação 3.17).

$n$	$\alpha_n$	$\beta_n$
1,2	0,286	4,124
1,5	0,798	4,875
2	1,061	3,767
4	1,042	1,875
25	0,920	0,498
50	0,839	0,257
75	0,806	0,176

Os parâmetros de ajuste das curvas apresentadas na Figura 5.30 apresentaram boa correspondência com os dados experimentais. Os desvios, ocorrem principalmente, para o menor  $t_{10}$  (mais baixa energia).

A granulometria do produto da quebra volumétrica pode, finalmente, ser determinada a partir da interpolação do modelo obtido para o  $t_{10}$  e com cada curva ajustada para cada  $t_n$ . Dessa forma, para os dados experimentais (Figuras 5.11 e 5.16), tem-se a comparação entre esses resultados e a previsão da granulometria do produto da quebra volumétrica apresentada na Figura 5.31. Como, para os briquetes, o  $t_{75}$  refere-se ao percentual passante menor que 0,325 mm, foi efetuada uma extrapolação linear, na escala log-log, do resultado, com a finalidade de representar

tamanhos menores que esse.

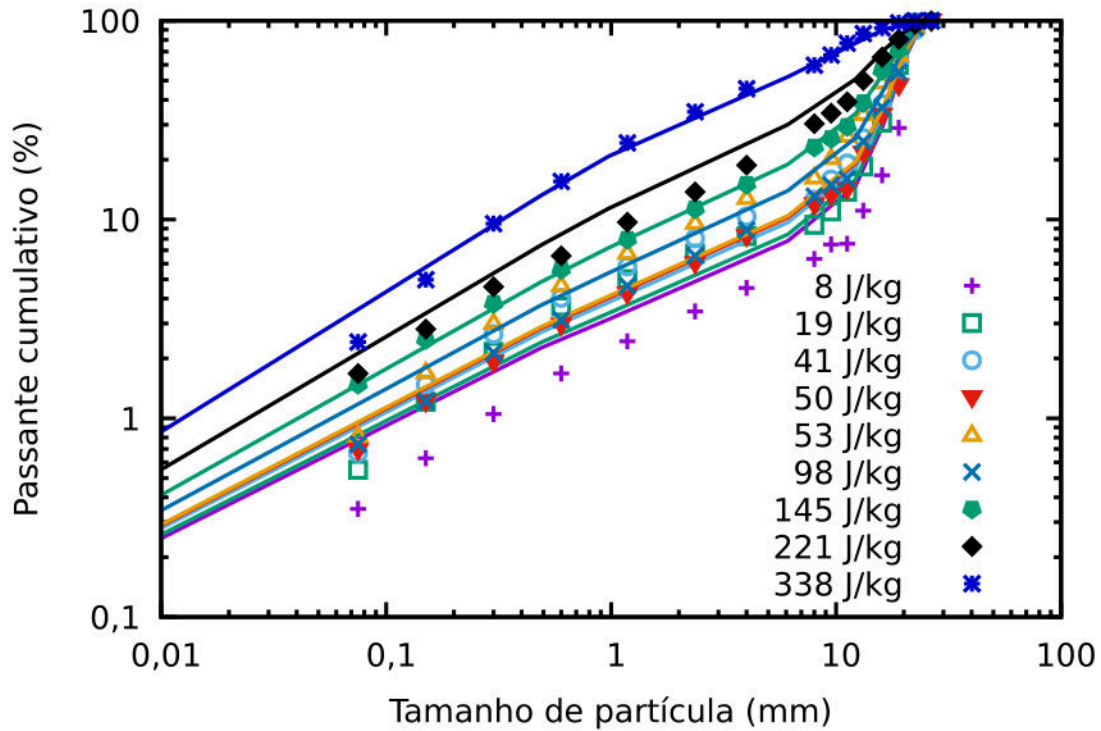


Figura 5.31: Comparação entre a granulometria experimental (símbolos) e a calculada (linhas) para o briquete após a quebra volumétrica a diferentes energias específicas de impacto.

Nota-se que há boa correspondência entre a distribuição granulométrica experimental e a prevista utilizando os parâmetros calibrados para o briquete, com maiores desvios para as mais baixas energias específicas de impacto, na mesma região em que houve maiores desvios no modelo do  $t_{10}$ .

### 5.3.4 Massa Perdida por Abrasão

A partir dos resultados dos ensaios de impacto, pode-se calcular a fração mássica liberada por um briquete durante um evento de colisão pela Equação 3.20, em que o termo  $E_{loss,m}$  é estimado pela Equação 3.21, sendo  $\theta = 90^\circ$  (impacto normal). Cabe ressaltar que a Equação 3.21 foi validada para pelotas queimadas de minério de ferro, modeladas, segundo BARRIOS *et al.* [59], com quatro esferas superpostas e parâmetros de contato calibrados para o material. Embora os briquetes apresentem massa específica e forma diferentes das pelotas, conforme modelo apresentado na Figura 4.9, adotou-se a relação entre a energia dissipada oriunda do DEM, o ângulo e a energia de impacto originalmente proposta para pelotas queimadas (Equação 3.21).

A conversão da energia de impacto,  $E_k$ , para a energia dissipada,  $E_{loss,m}$ , foi

realizada, pois a energia dissipada é obtida diretamente do DEM, o que facilita em outras análises. Neste caso, a energia dissipada pode ser obtida multiplicando-se um fator de 0,66 da energia específica do impacto, uma vez que os ensaios realizados foram de impacto normal [14]. Dessa forma, a Equação 5.4 se ajustou bem aos dados experimentais, conforme apresentado na Figura 5.32, em que as barras de erro em x referem-se à incerteza de  $E_{loss,m}$ , propagadas de  $E_k$ , enquanto as barras de erro em y são relativas à incerteza da mediana de uma distribuição log-normal.

$$\bar{\xi} = 4,93 \cdot 10^{-2} E_{loss,m}^{0,798} \quad (5.4)$$

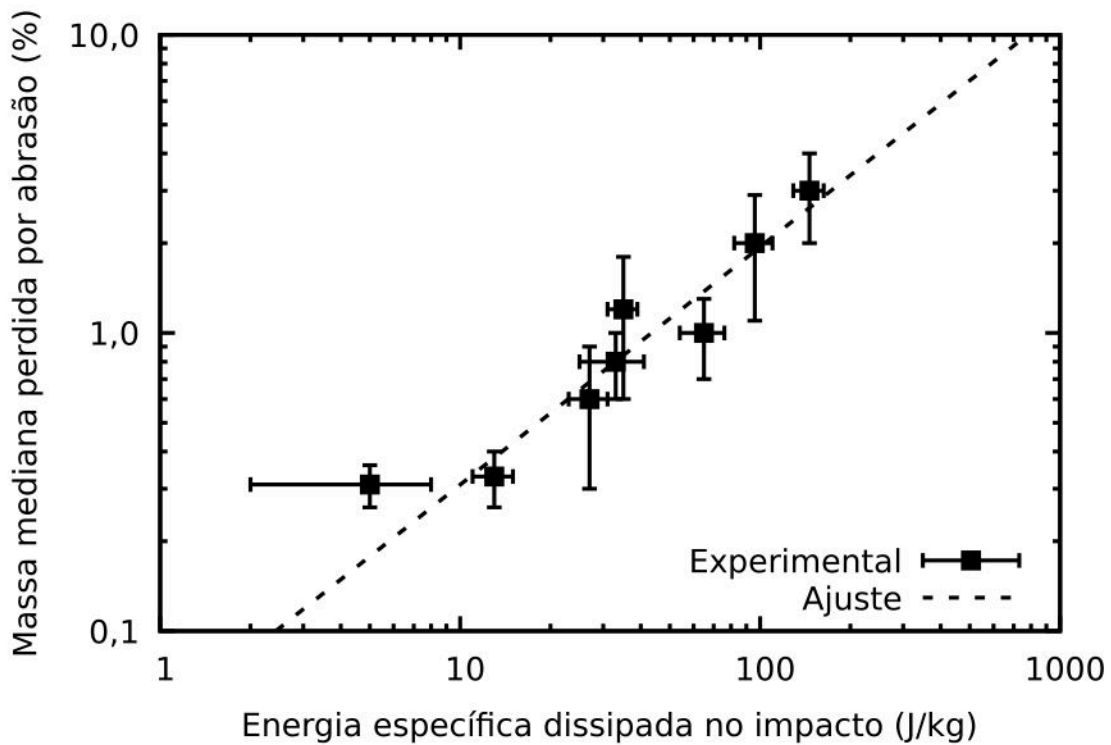


Figura 5.32: Massa mediana perdida por abrasão em função da energia específica dissipada em cada impacto. Os símbolos são os dados experimentais, enquanto a linha tracejada é o ajuste.

É importante enfatizar que a Figura 5.32 contém apenas 8 pontos experimentais, uma vez que no ensaio de projeção pneumática de mais alta energia específica (338 J/kg) ocorreu apenas quebra volumétrica. Além disso, há um limite superior para o percentual de massa perdida por abrasão de 10%, pela definição de TAVARES e KING [11]. Ademais, a Equação 3.20 deve ter um limite inferior, visto que, fisicamente, não faz sentido perdas mássicas com ordens de grandeza menores mili ou microgramas, acrescido a dificuldade de medir esses valores na prática e os erros embutidos nos métodos computacionais. Nesse sentido, no âmbito deste trabalho, foi adotado o valor de  $E_{loss,m} = 0,05$  J/kg como menor energia específica dissipada



capaz de provocar quebra superficial, que corresponde a 0,005 % de massa perdida por abrasão. Considerando o briquete de biocarbono estudado, a perda mássica seria de  $4 \times 10^{-4}$  g. Além disso, esse valor de  $E_{loss,m}$  corresponde a uma queda perpendicular de uma altura de 8 mm, ou uma velocidade antes do impacto de 0,4 m/s. Esta, por sua vez, é cerca de 10 vezes menor que a menor velocidade estudada por GHADIRI e ZHANG [39].

### 5.3.5 Granulometria da Quebra Superficial

A granulometria do produto da quebra superficial pode ser estimada, simultaneamente para todas as energias específicas de impacto, pela Equação 3.18. A Tabela 5.7 indica os parâmetros de ajuste ao modelo, enquanto a Figura 5.33 mostra graficamente sua comparação com os dados experimentais para a amostra de briquetes de carvão vegetal.

Tabela 5.7: Parâmetros de ajuste à granulometria do produto de quebra superficial da amostra de briquetes de carvão vegetal (Equação 3.18).

Parâmetro	Valor
$d_A$ (mm)	8,569
$\varphi$ (-)	0,457

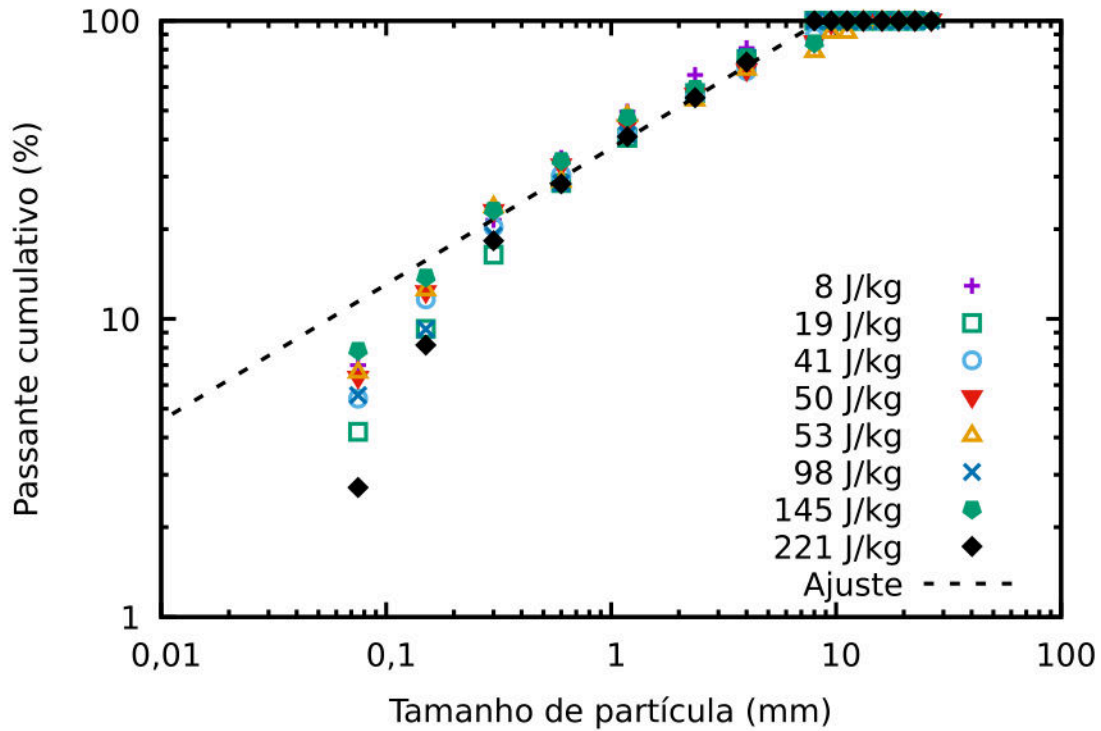


Figura 5.33: Comparação entre a granulometria do produto da quebra superficial experimental e a calculada para o briquete a diferentes energias específicas de impacto.

Nota-se que o modelo é capaz de representar bem os dados experimentais para tamanhos de partícula maiores que 0,3 mm, ao passo que para valores menores, há um indicativo na mudança da inclinação dos dados resultados dos ensaios. Nesse caso, seria necessário a adição de uma parcela na Equação 3.18. Por outro lado, este trabalho não tem como intuito caracterizar com alta resolução a distribuição de tamanhos menores que 6,0 mm, sendo satisfatória configuração obtida.

## 5.4 Simulações da Degradação dos Briquetes

Para avaliar a granulometria dos processos simulados nas etapas de pós-processamento, utilizou-se uma aproximação para o formato dos briquetes por um elipsoide. A Figura 5.34 mostra uma ilustração de uma partícula de briquete com suas dimensões nominais retida na peneira de 19,0 mm para duas orientações: horizontal, com maior área de projeção 2D e com posição mais estável e vertical, inversamente.

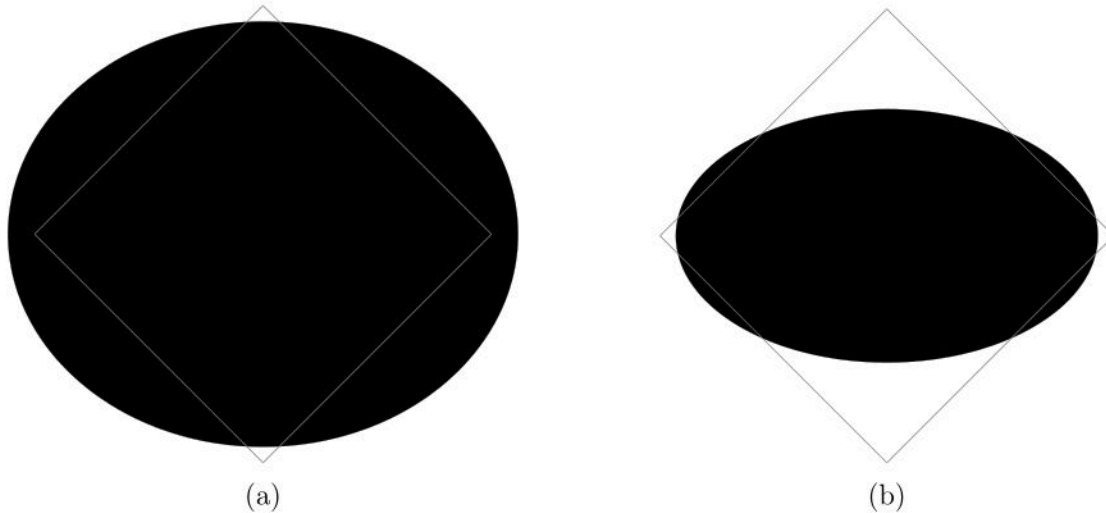


Figura 5.34: Ilustração da projeção bidimensional de partículas de briquetes com dimensões nominais retidas na peneira de 19,0 mm, nas orientações horizontal (a) e vertical (b).

Nesse sentido, a partícula virtual do briquete é considerada passante em alguma peneira, no presente trabalho, quando todo o comprimento da elipse ajustada para as duas menores dimensões do briquete estiver totalmente dentro do quadrado representativo da abertura da peneira.

Além disso, as dimensões do briquete são definidas para a distribuição mássica obtida na Seção 5.1, considerando valores entre os percentis 25 e 75, para evitar partículas que possam apresentar os maiores desvios em relação à média. A partir daí, seu volume é obtido a partir de sua densidade nominal e suas dimensões são calculadas multiplicando cada lado pela raiz cúbica da razão entre o volume da partícula virtual e o teórico, de modo a manter a proporção entre os lados. Conforme há perda mássica por abrasão, é realizado um ajuste dinâmico das dimensões dos briquetes. Foi considerado, neste estudo, baseado nos resultados experimentais que estão descritos no decorrer da Seção 5.2.2, que a perda mássica ocorre, inicialmente, pelas rebarbas, presentes apenas nas duas maiores dimensões da partícula. Após isso, considera-se que há perdas igualmente em todas as direções.

#### 5.4.1 Degradação por Peneiramento

A simulação da degradação de briquetes de carvão vegetal por peneiramento foi realizada em uma etapa de pós-processamento de resultados obtidos via DEM. A Figura 5.35 mostra um quadro da simulação DEM utilizada, contendo 30 briquetes sobre uma peneira de malha quadrada.

Time: 60 s

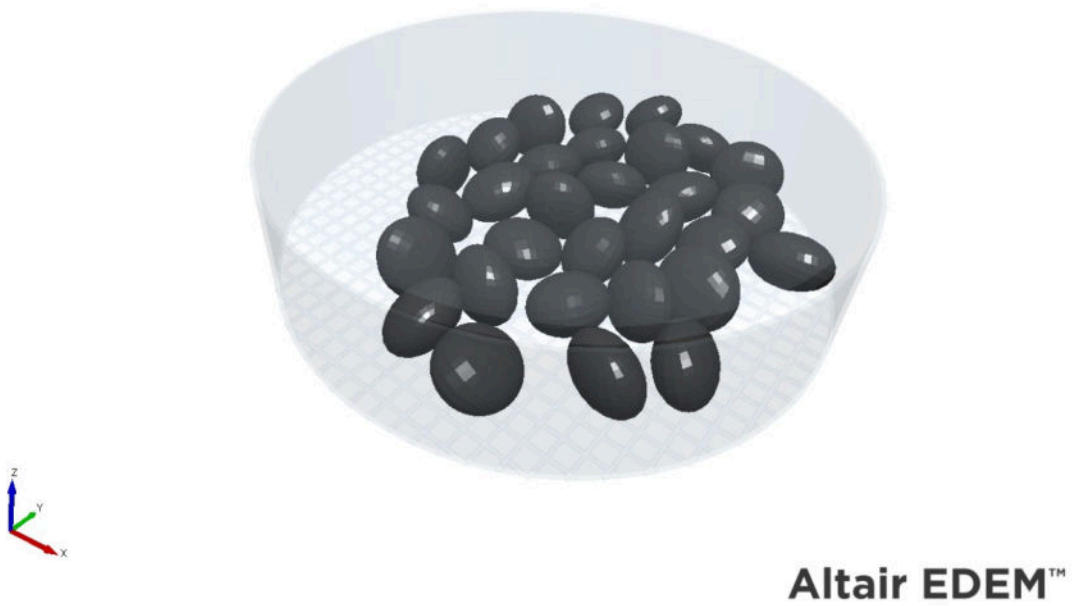
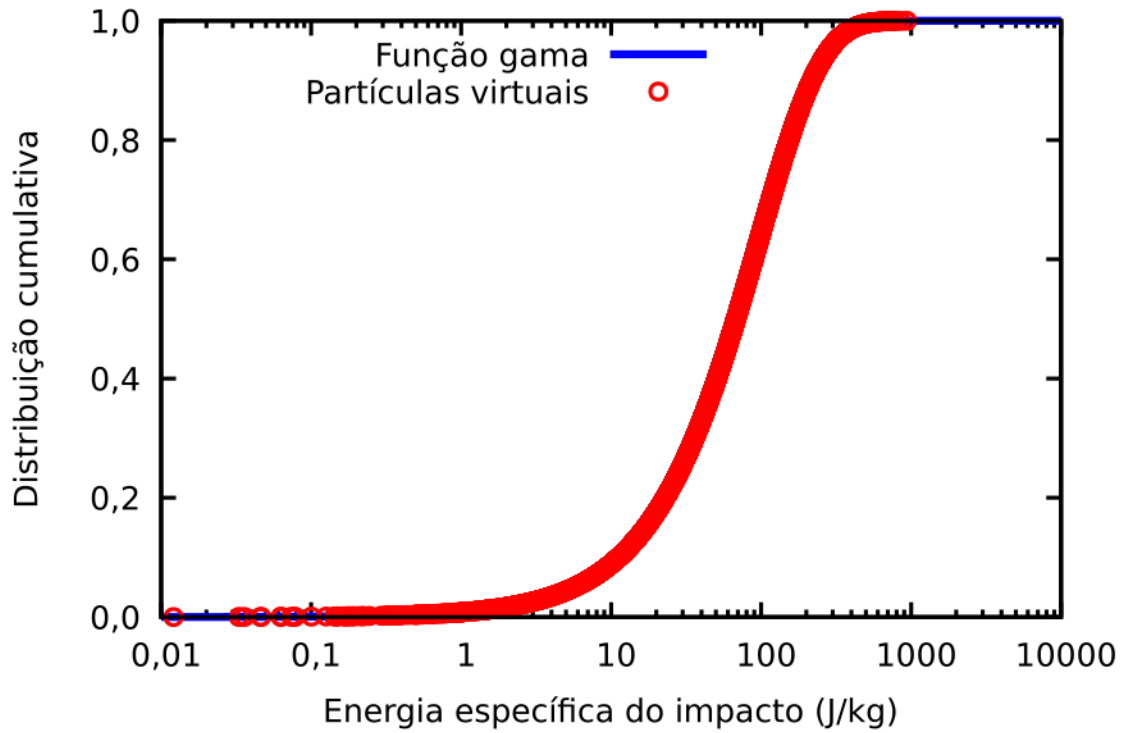
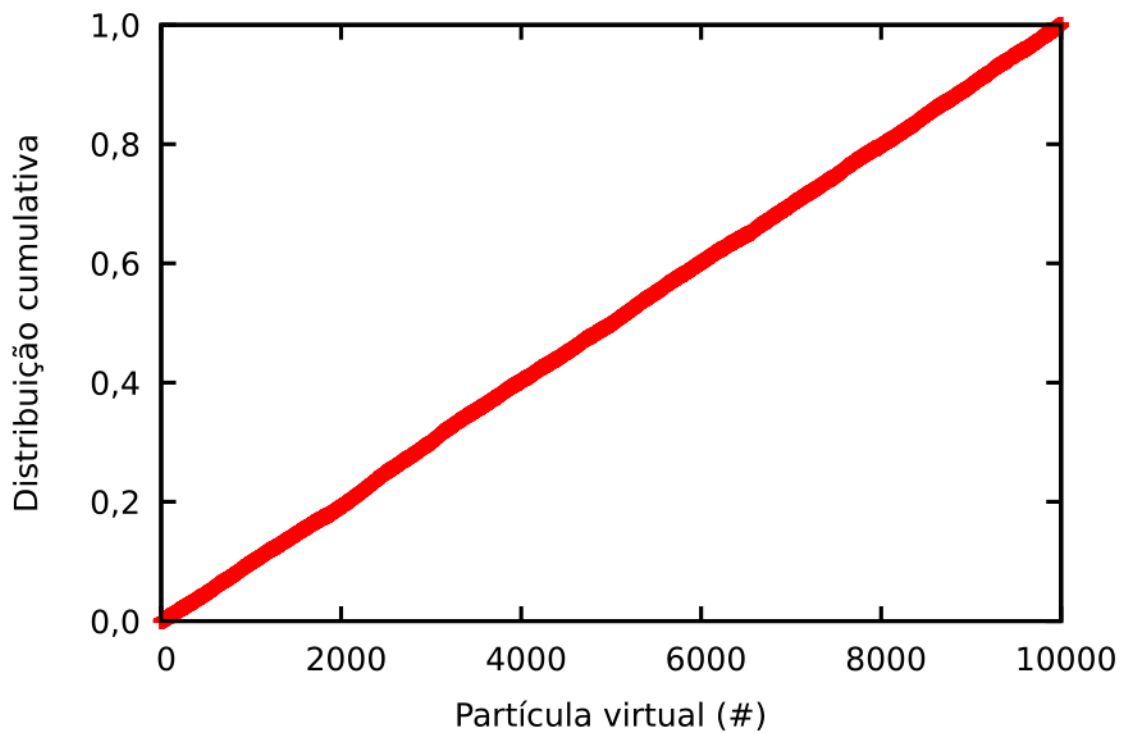


Figura 5.35: Quadro da simulação do peneiramento dos briquetes de carvão vegetal.

Na etapa de pós-processamento, 10.000 partículas virtuais foram criadas. A cada uma delas foi atribuída por sorteio uma energia de fratura, seguindo a distribuição de energias de fratura ajustada para os briquetes de carvão vegetal (Seção 5.3.1). A Figura 5.36 mostra as partículas virtuais sorteadas, bem como o percentil atribuído a cada elemento.



(a)



(b)

Figura 5.36: Distribuição das energias de fratura das partículas virtuais e a função gama que as representa (a) e o percentil atribuído a cada partícula virtual, usado no cálculo de sua energia de fratura (b).

Outro aspecto a ser avaliado é se os sorteios realizados mantêm, em média, a

proporção de colisões por minuto, bem como suas energias normais totais disponíveis para a quebra de partículas. A Figura 5.37 mostra essas duas relações ao longo do tempo de simulação.

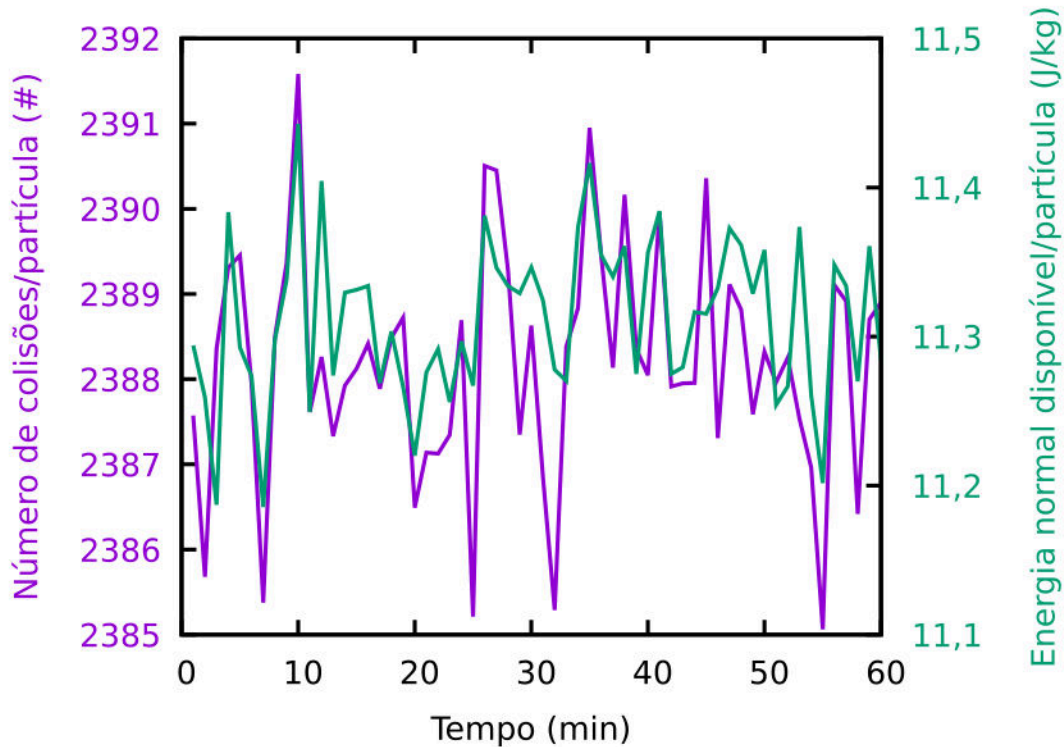


Figura 5.37: Número de colisões por partícula virtual e energia normal disponível para a quebra por partícula virtual ao longo do tempo de simulação do peneiramento.

Cada briquete sofre, em média, 2.388 colisões por minuto e nesse mesmo intervalo de tempo ele está sujeito a um total de 11,3 J/kg de energia normal disponível, distribuídas nos impactos. É possível observar que o número de colisões por partícula, em média, variou na ordem de unidades, enquanto a energia normal disponível oscilou na casa decimal. Além disso, ambas apresentam comportamento semelhante, em termos de crescimento e decrescimento temporal.

A avaliação do percentual de partículas que sofreram quebra volumétrica é importante para avaliar a probabilidade de quebra, bem como o efeito do dano acumulado sobre os briquetes. A Figura 5.38 mostra a distribuição cumulativa de briquetes de carvão vegetal que sofreram quebra volumétrica durante a simulação da degradação por peneiramento.

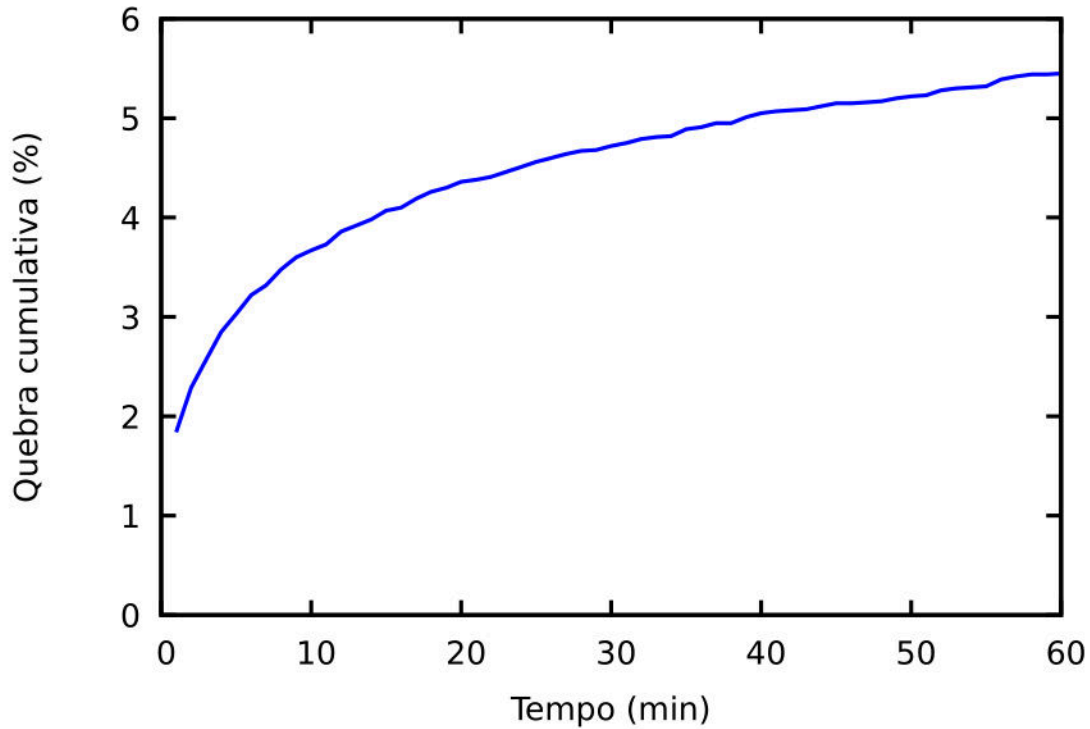


Figura 5.38: Quebra cumulativa dos briquetes durante a simulação de degradação por peneiramento.

O resultado da simulação indica que, no primeiro minuto, 1,84% dos briquetes sofreram quebra volumétrica e após 60 min de simulação 5,45% estiveram nessa condição. Supondo que nos ensaios realizados a presença de 32 e 31 fragmentos após 60 min sejam referentes ao fenômeno de quebra volumétrica, seriam, então equivalentes a 6,67% e 3,33%, respectivamente. Nesse caso, o resultado obtido na simulação está compatível com o experimental.

A mediana das energias de fratura ( $E_{m50}$ ) dos briquetes virtuais aumentou após a simulação. Inicialmente, ela era 67,5 J/kg e decorridos 60 min cresceu para 73,4 J/kg (aumento de 8,7%). Esse tipo de comportamento ocorre especialmente em cenários de manuseio, quando as partículas menos resistentes sofrem quebra volumétrica rapidamente, restando apenas as com maiores energias de fratura, no fenômeno conhecido como estabilização [38].

A comparação, por outro lado, da quantidade de finos de abrasão gerada no experimento e na simulação está apresentada na Figura 5.39. Neste e nos casos seguintes analisados na presente Seção, a menção aos resultados obtidos nos ensaios refere-se ao resultado médio entre as réplicas realizadas.

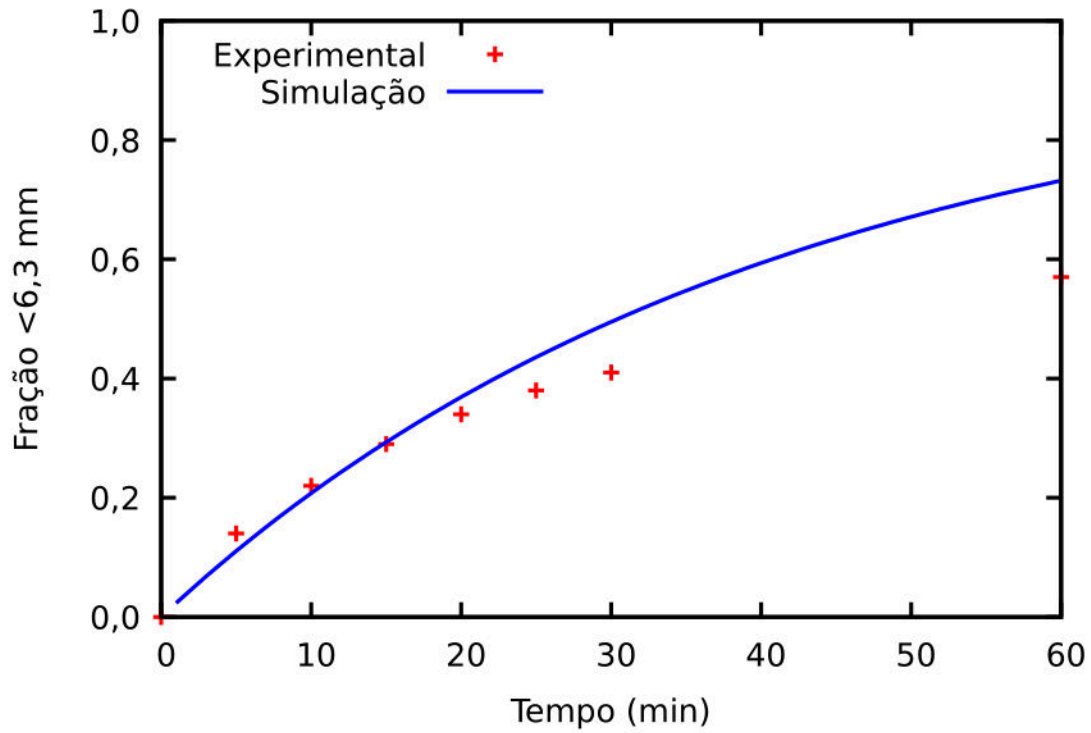


Figura 5.39: Fração de finos de briquetes menores que 6,3 mm no ensaio de peneiramento e na simulação realizada.

Os finos de abrasão gerados apresentam boa correspondência com os resultados experimentais, com aumento nos desvios para maiores tempos de simulação.

A Figura 5.40 apresenta a fração de briquetes retida na peneira de 19,0 mm.



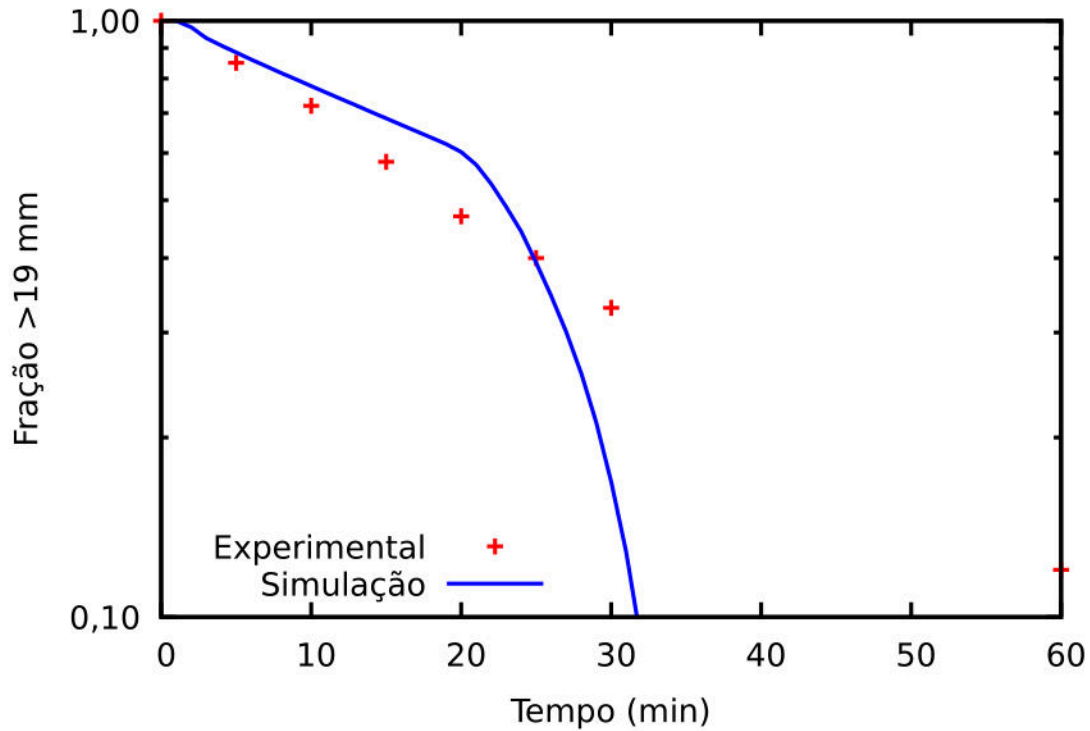


Figura 5.40: Fração de briquetes retida na peneira de 19,0 mm no ensaio de peneiramento e na simulação realizada.

Nota-se que, inicialmente, a simulação apresenta bom comportamento na representação da fração retida, porém, a partir dos 20 min, há uma queda brusca no quantitativo presente nessa faixa de tamanhos. Uma justificativa para tal está no fato da avaliação do tamanho do briquete considerar um cenário ideal, em que o briquete é posicionado perfeitamente na abertura da peneira, de modo que possa ser passante, quando for o caso. Além disso, a posição mais estável do briquete é aquela em que as duas maiores dimensões da partícula estão paralelas à peneira, dificultando ainda mais a possibilidade do briquete encontrar a abertura para a classe seguinte.

Nesse sentido, é interessante avaliar a faixa de tamanhos maiores que 10 mm, quando o volume excedente ao volume teórico dos briquetes já foi perdido e as duas maiores dimensões estão reduzidas. Essa análise da fração mássica dos briquetes que não sofreram quebra volumétrica e que são maiores que 10 mm está apresentada na Figura 5.41.

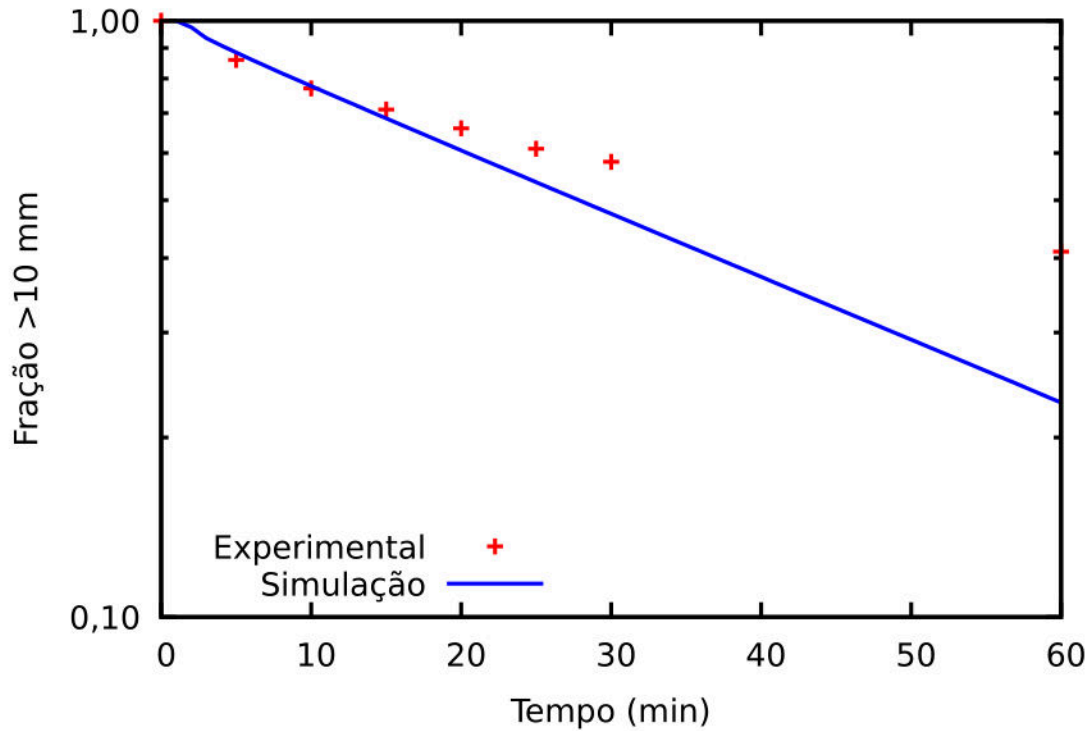


Figura 5.41: Fração de briquetes maiores que 10,0 mm no ensaio de peneiramento e na simulação realizada.

Nesse caso, a simulação foi capaz de representar um comportamento de quebra de primeira ordem ao longo do tempo de análise, compatível com os experimentos, porém as incertezas dos modelos foram se propagando gradativamente, causando grandes diferenças entre a simulação e os ensaios após 60 min de análise.

### 5.4.2 Degradação por Tamboramento

A simulação da degradação de briquetes de carvão vegetal por tamboramento, assim como no caso por peneiramento, foi realizada em uma etapa de pós-processamento de resultados obtidos via DEM. A Figura 5.42 mostra um quadro da simulação DEM utilizada, contendo 5,42 kg de briquetes em um tambor rotativo.

Time: 60 s

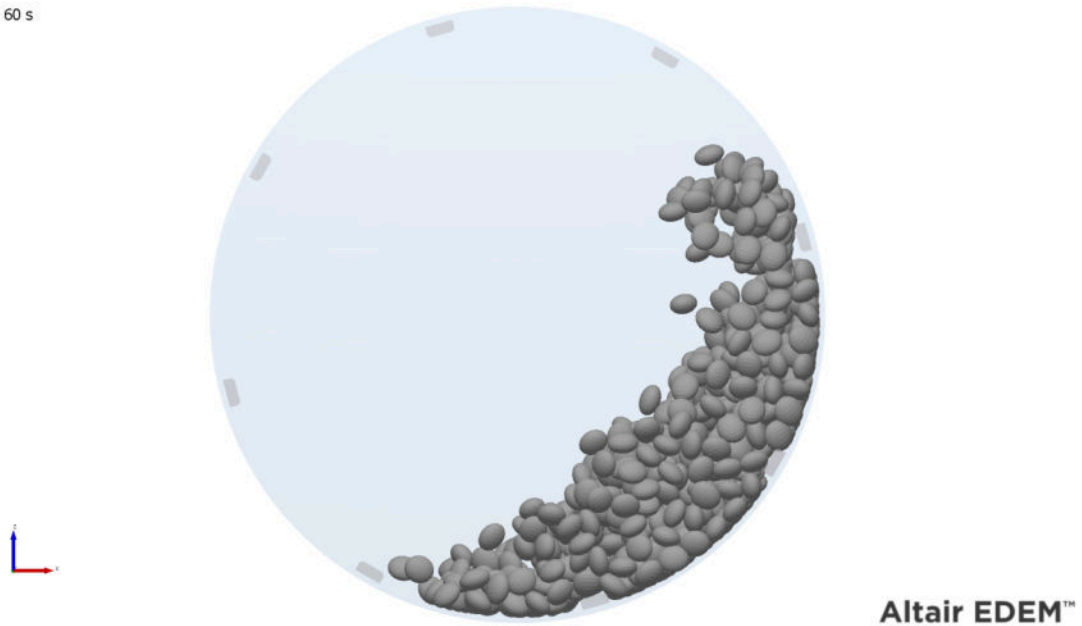


Figura 5.42: Quadro da simulação do tamboramento dos briquetes de carvão vegetal.

Uma análise preliminar permite verificar, para os 60 s de simulação, qual foi a distribuição de colisões totais dentro do tambor, bem como a energia normal dissipada total no equipamento. Essas relações estão apresentadas na Figura 5.43.

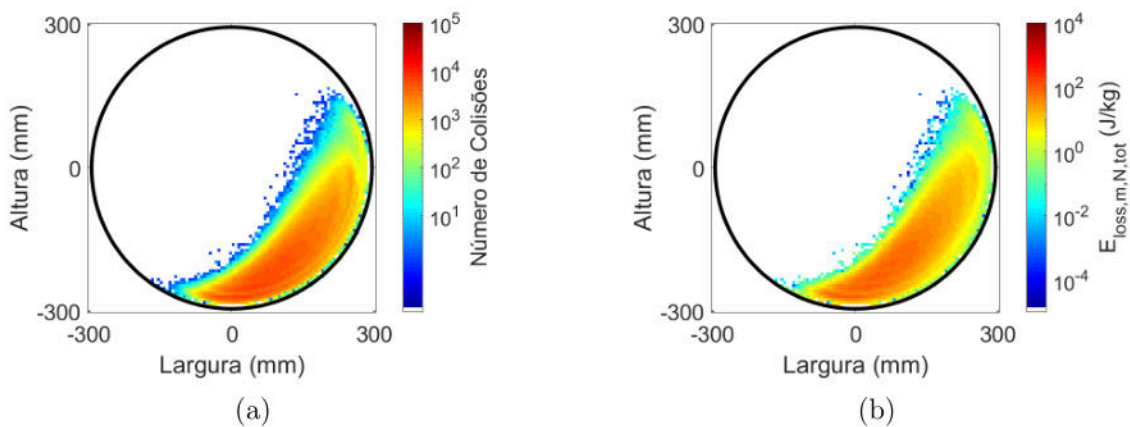


Figura 5.43: Distribuição do número de colisões (a) e da energia normal dissipada total (b) dentro do tambor, para os 60 s de simulação.

Analogamente ao peneiramento (Seção 5.4.1), para o tamboramento também foram criadas 10.000 partículas virtuais, cada qual com uma energia de fratura, semelhantemente ao ilustrado na Figura 5.36. Posteriormente, para cada elemento foi atribuído um histórico de colisões e a etapa de pós-processamento se deu considerando o tambor em seu estado inicial, ou seja, contendo 5,42 kg de briquetes.

Nesse sentido, as análises dessa Seção estão restritas quanto à representatividade da simulação, quando comparada com o ensaio em laboratório. Como no experimento (descrito na Seção 4.2.2.2) houve a retirada de partículas menores que

19,0mm em diversas janelas de intervalo, não é possível fazer comparações entre os resultados obtidos com o pós-processamento da simulação e o ensaio por 60 minutos. Por isso, os resultados apresentados na presente Seção são relativos a 15 minutos de simulação, quando, no experimento, 45% da massa inicial já havia sido removida do sistema.

Além disso, como as partículas reduzem de tamanho por quebra superficial durante o ensaio de tamboramento, a realização de novas simulações representando a massa restante no equipamento em outros instantes, que não o inicial, necessita de cautela. Isso porque o tamanho de partícula deveria ser revisto e, porventura, sua forma geométrica. Ainda haveria a possibilidade dos parâmetros de contato não se manterem iguais aos calibrados para os briquetes originais.

Dessa forma, a avaliação da proporção de colisões por briquete por minuto e suas energias normais totais disponíveis para a quebra de partículas estão apresentadas na Figura 5.44.

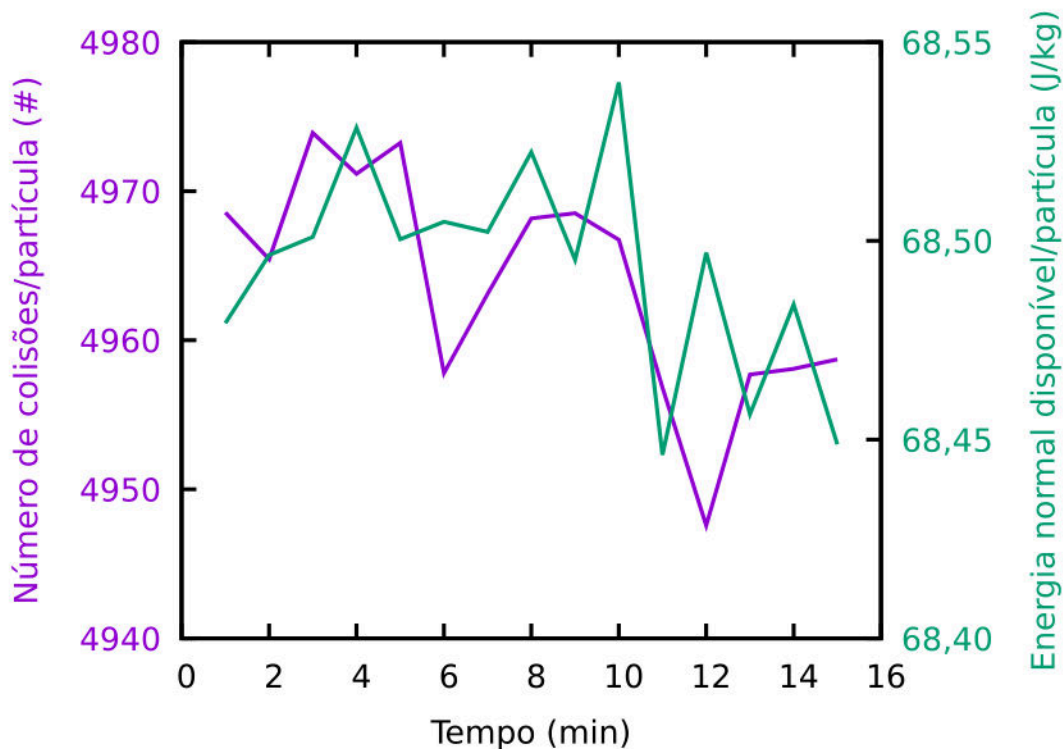


Figura 5.44: Número de colisões por partícula virtual e energia normal disponível para a quebra por partícula virtual ao longo do tempo de simulação do tamboramento.

Em média, cada briquete sofre, por minuto, 4.964 colisões e também está sujeito a um total de 68,5 J/kg de energia normal disponível, distribuídas em seus impactos. Uma comparação com o ensaio de peneiramento aponta que, no tambor, cada partícula está sujeita, em média, a mais do que o dobro de colisões, além de ter um histórico de colisões mais agressivo. Dessa forma, é interessante avaliar a evolução

do percentual de partículas que sofreram quebra volumétrica, conforme apresentado na Figura 5.45.

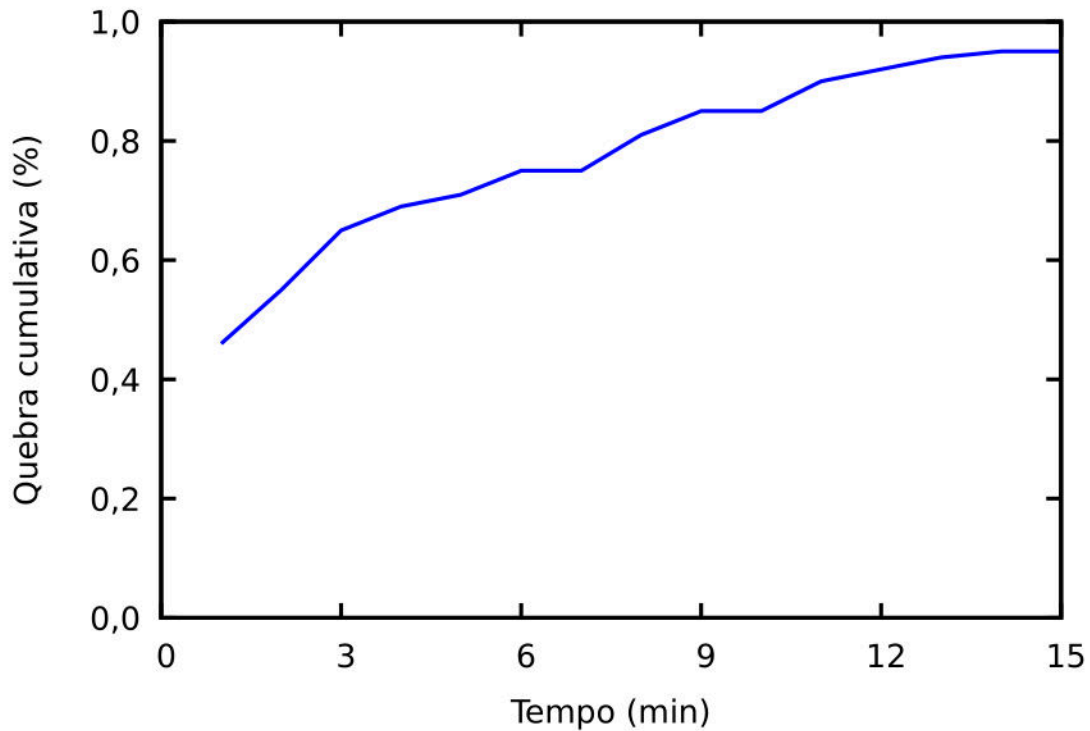


Figura 5.45: Quebra cumulativa dos briquetes durante a simulação de degradação por tamboramento.

No primeiro minuto de simulação, 0,46 % dos briquetes sofreram quebra volumétrica e, ao final de 15 min, 0,95 % estiveram sujeitos a esse fenômeno. Isso indica que, por mais que haja um número maior de colisões e que elas totalizem mais energia dissipada, não é suficiente para provocar a fratura do material. Além disso, o percentual de quebra volumétrica prevista no tambor foi menor que o obtida para o peneiramento. Com relação ao  $E_{m50}$ , houve um aumento de seu valor após a simulação. Inicialmente, a mediana das energias de fratura valia 68,7 J/kg, enquanto no final da simulação foi para 69,5 J/kg.

Por outro lado, a Figura 5.46 mostra a evolução dos finos menores que 6,3 mm gerados por abrasão na simulação e os resultados experimentais. Nela é possível perceber que a simulação superestima o resultado, porém com comportamento semelhante ao experimental.

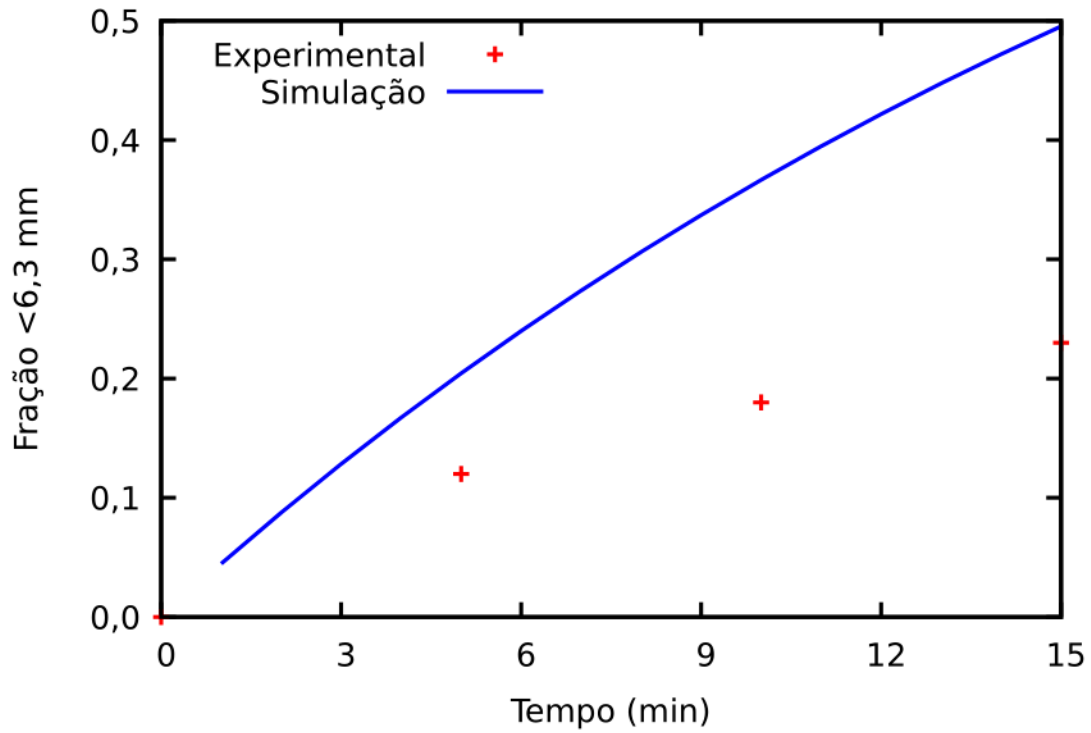


Figura 5.46: Fração de finos de briquetes menores que 6,3 mm no ensaio de tamboramento e na simulação realizada.

Em contrapartida, a fração retida maior que 19,0 mm está apresentada na Figura 5.47, tanto para a simulação realizada, quanto da parte experimental.

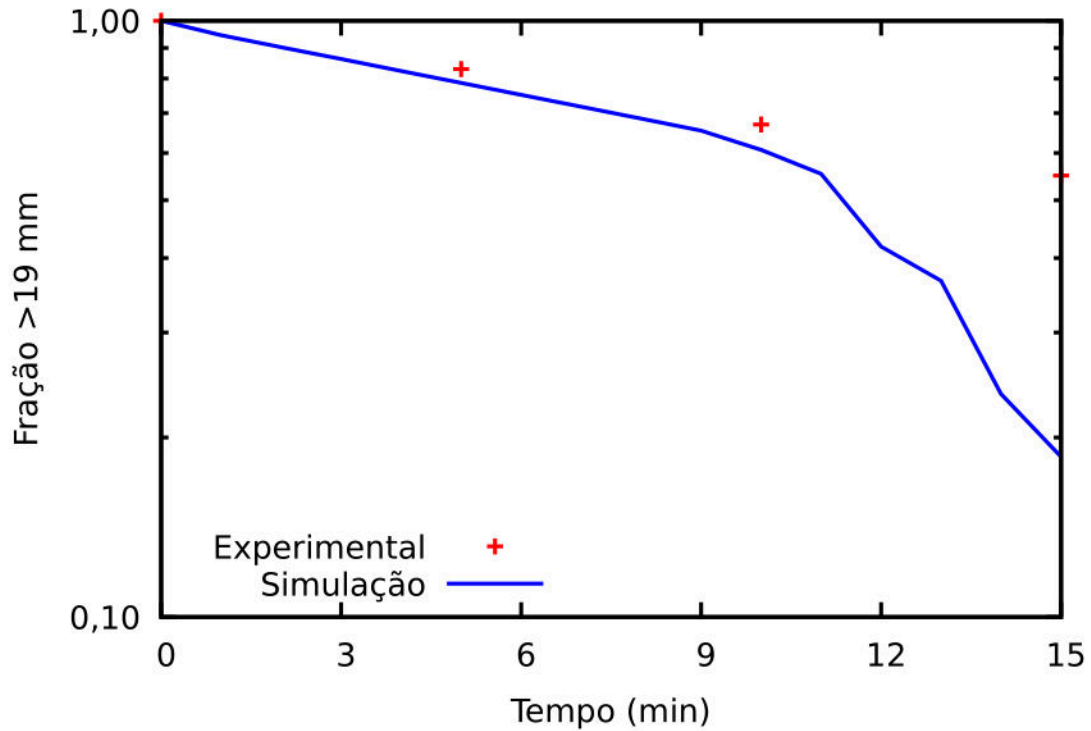


Figura 5.47: Fração de briquetes maior que 19,0 mm no ensaio de tamboramento e na simulação realizada.

Observa-se que a simulação respondeu bem aos resultados experimentais até cerca de 10 min, quando começou a apresentar maiores desvios. É interessante notar, que o resultado obtido nesse intervalo aproxima-se de uma reta, na escala log-normal, indicando uma relação cinética de primeira ordem.

Adicionalmente, as partículas resistentes no sistema, ou seja, que não sofreram quebra volumétrica, podem ser analisadas em função do seu tamanho médio. Essa medida é obtida pela geométrica entre as suas duas menores dimensões. A Figura 5.48 mostra a distribuição cumulativa dos tamanhos médios dessas partículas em quatro situações: antes da operação, após 5 min, após 10 min e após 15 min.

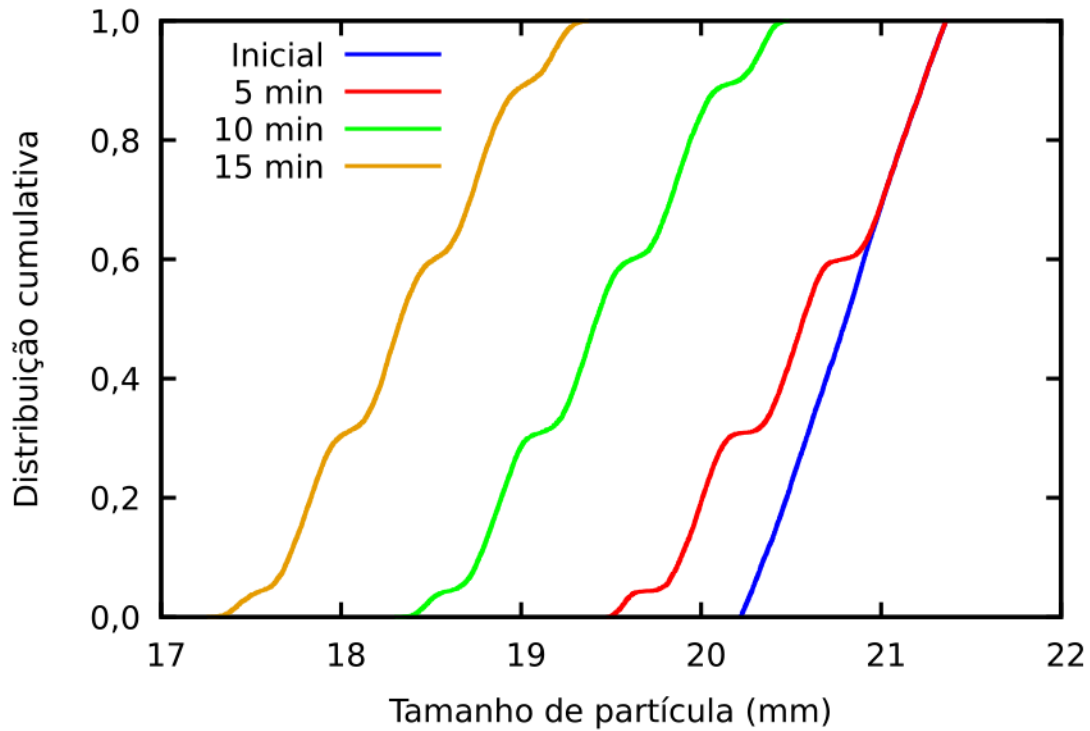


Figura 5.48: Distribuição cumulativa dos tamanhos médios das partículas de briquete resistentes durante a simulação do ensaio de tamboramento.

Inicialmente, as partículas apresentam distribuição normal e, já após 5 min de operação, observa-se uma distribuição multimodal, que também é observada nos intervalos seguintes. É possível notar que a evolução do tempo de simulação indica, conforme esperado, a redução dos tamanhos médios das partículas. Além disso, a análise do instante 15 min mostra que menos de 20% dos resistentes permanecem maiores que 19,0 mm, porém todos eles se mantêm maiores que 17,0 mm.

### 5.4.3 Degradação em Calha de Alimentação

A estimativa da degradação dos briquetes de carvão vegetal em uma calha de alimentação, foi realizada a partir dos dados obtidos de uma simulação pelo método dos elementos discretos, a qual tem um quadro representativo do sistema na Figura 5.49.



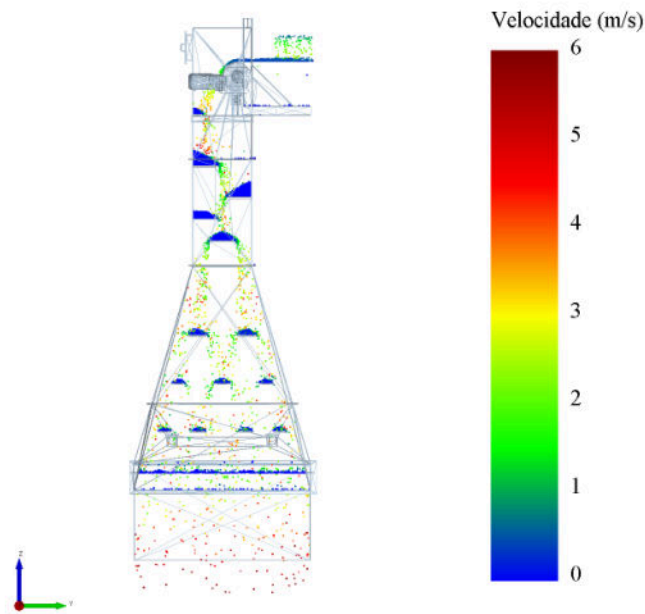


Figura 5.49: Quadro da simulação da calha de alimentação dos briquetes de biocarbone.

Inicialmente, pode-se verificar também qual foi a distribuição de colisões totais dentro da calha de alimentação, bem como a energia normal dissipada total no equipamento, conforme apresentado na Figura 5.50. Desse modo, é possível perceber, de maneira geral, as regiões que devem ser mais propensas à quebra volumétrica.

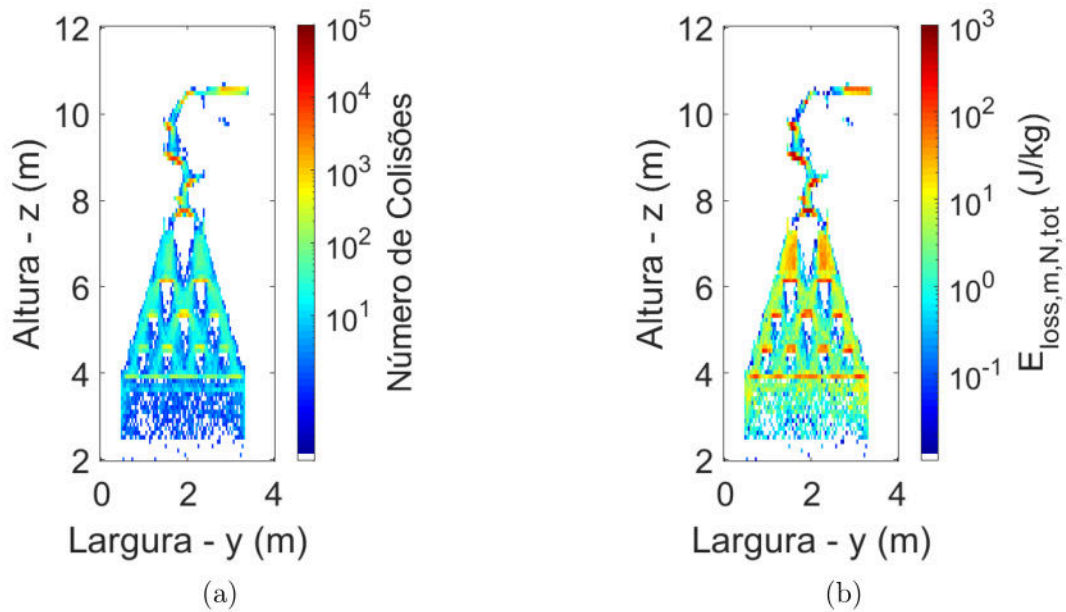


Figura 5.50: Distribuições do número de colisões (a) e da energia normal dissipada total (b) na calha de alimentação.

A análise do número de colisões (Figura 5.50a) aponta que nas regiões com cores mais quentes, próximas da alimentação e nos patamares ao longo da calha indicam que essas localidades devem apresentar a maior quantidade de acúmulo de material, o que pode ser comparado com o quadro da simulação DEM que aponta isso (Figura 5.49). Com relação à energia normal dissipada total (Figura 5.50b), pode-se observar que, nas regiões próximas da alimentação (nos primeiros patamares de queda), há impactos de maiores magnitudes. Além disso, na região de transição entre a alimentação e a distribuição do material ao longo da calha ( $6 < z < 8(\text{m})$ ) há impactos de médias magnitudes.

A análise das energias dissipadas deve estar de acordo com a análise da simulação avançada do manuseio de granéis. Esta, por sua vez, foi capaz de estimar, via pós-processamento da simulação DEM, o percentual de partículas virtuais que sofreram quebra volumétrica em 4,68%. A Figura 5.51 mostra a posição em que aconteceram todas as colisões (em azul), bem como todas aquelas colisões que resultaram em quebra da partícula de briquete virtual (em vermelho), dentre as 10.000 partículas virtuais simuladas.

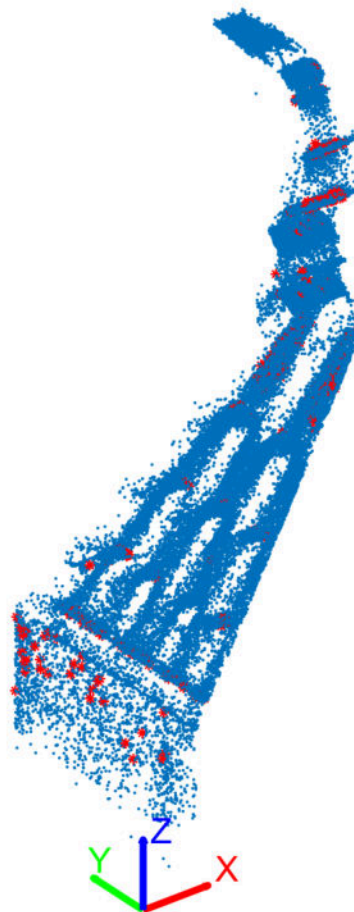


Figura 5.51: Localização de todas as colisões (em azul) e de todas as quebras volumétricas (em vermelho) dos briquetes de carvão vegetal na calha de alimentação.

As quebras volumétricas localizadas próximas da alimentação, nos primeiros es-

tágios de queda, do equipamento são referentes às partículas menos resistentes, ao passo que outras quebras ocorrem nos *flippers*. Destacam-se ainda duas outras regiões: a posição inicial da região inclinada não contém amortecimento e os choques, de cerca de 2 m, ocorrem diretamente no revestimento de aço; e na região final do equipamento, os briquetes colidem contra um direcionador, também de aço, o que contribui para o aumento de quebras nessas regiões.

A mediana das energias de fratura iniciou no sistema em 67,8 J/kg e terminou como 72,1 J/kg. Nesse caso também foi possível perceber o aumento do  $E_{m50}$ , provocado pela remoção das partículas menos resistentes e manutenção das mais fortes.

O balanço de massa do sistema estudado está apresentado na Tabela 5.8. Nela constam as massas total, das partículas que quebraram, dos fragmentos gerados por abrasão e das partículas resistentes ao manuseio, em quilogramas e em percentuais relativos ao total.

Tabela 5.8: Balanço de massa da simulação da calha de alimentação, em quilogramas e em percentuais mássicos.

Total		Quebra		Abrasão		Resistentes	
kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
78,95	100,00 %	3,68	4,66 %	1,46	1,85 %	73,81	93,49 %

Não foram observadas variações nos resultados apresentados em função da região final da calha, não havendo, portanto, caminho preferencial para o aumento da degradação mecânica no sistema em análise. Além disso, com a modelagem matemática apresentada na Seção 5.3, pode-se estimar a granulometria de saída da calha, conforme ilustrado na Figura 5.52, em que constam as granulometrias dos produtos das quebras superficial e volumétrica, bem como a granulometria dos briquetes e fragmentos que seriam dispostos sobre o leito de pelotas verdes (média ponderada), considerando esses dois fenômenos e as partículas resistentes, que são 100,00 % maiores que 19,0 mm.

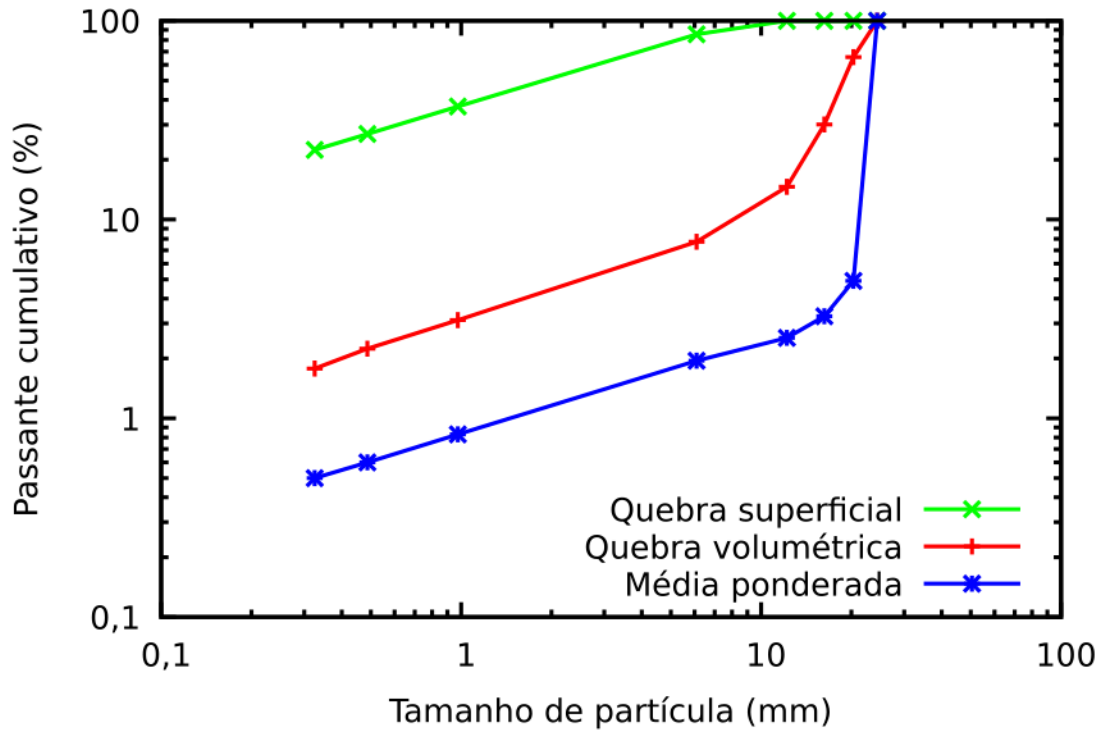


Figura 5.52: Granulometria de saída da calha, com os produtos das quebras superficial e volumétrica, bem como a granulometria dos briquetes e fragmentos gerados, dada pela média ponderada entre ambas e as partículas resistentes, que são 100,00 % maiores que 19,0 mm.

# Capítulo 6

## Conclusões

A amostra de briquetes de biocarbono apresentou boa capacidade para ser representada pelo modelo de quebra de Tavares, no contexto da simulação avançada do manuseio de granéis. Os ensaios de impacto, realizados por quedas individuais e por projeções pneumáticas, permitiram que diversos aspectos da quebra dos briquetes fossem caracterizados. Foi possível identificar, por ambos os ensaios, que, maiores energias de impacto resultaram em maior proporção de partículas de briquetes que sofreram quebra volumétrica. O ensaio de queda individual também mostrou a forte influência da resistência do ar, para a altura 8,4 m.

A modelagem matemática da quebra foi bem sucedida para descrever, segundo o modelo de quebra de Tavares, a probabilidade de quebra dos briquetes, o modelo do  $t_{10}$ , o modelo do  $t_n$  e a proporção mássica de finos de abrasão. Além disso, foi possível estimar a granulometria do produto da quebra superficial e o produto da quebra volumétrica, variando em função da energia específica do impacto.

Por outro lado, o parâmetro de dano acumulado constante não descreveu bem o experimento de queda individual. Foi observado que os briquetes sofrem dano progressiva e aceleradamente, causando distorções no ajuste. Nesse caso, foi utilizada uma função, baseada nos resultados experimentais, para relacionar o valor de  $\gamma$  com a energia específica do impacto.

Os ensaios de degradação dinâmica foram realizados experimental e virtualmente, por simulações DEM, para dois casos: peneiramento e tamboramento. A partir das simulações DEM foi possível extrair os históricos de colisões e, então, por pós-processamento, avaliar a degradação mecânica dos briquetes de carvão vegetal. Os dados laboratoriais mostraram que os briquetes possuem taxa de quebra específica de primeira ordem. Essa relação também foi possível de observar nos dois cenários estudados. No peneiramento, a simulação foi capaz de descrever bem os finos gerados por abrasão, bem como a fração maior que 10,0 mm. Já a simulação do tamboramento superestimou os finos, mas representou bem 10 min do ensaio, no que tange a fração maior que 19,0 mm.

Por fim, foi realizado um estudo de caso de uma calha de alimentação, na qual foi possível perceber a ocorrência de quebra volumétrica dos briquetes de carvão vegetal nas localidades em que os impactos são mais agressivos.

Com isso, espera-se que este trabalho forneça subsídios para a previsão da degradação mecânica de briquetes de carvão vegetal em ambientes industriais, fazendo uso de simulações computacionais.

Ademais, mais estudos acerca do tema em discussão podem ser realizados com a finalidade de aprimorar o modelo desenvolvido. Entre as questões que necessitam de mais atenção estão a influência da morfologia dos briquetes nas propriedades de quebra, a caracterização da degradação mecânica de fragmentos de briquetes e a influência da orientação preferencial para a quebra no contexto do modelo mecanicista UFRJ. O Capítulo 7 apresenta maiores detalhes acerca das lacunas no conhecimento do tema em análise.

# Capítulo 7

## Trabalhos Futuros

No presente trabalho, foi avaliada a degradação mecânica de uma amostra de briquetes de biocarbono. No entanto, diversos fatores, ainda não totalmente compreendidos, podem afetar sua resistência à fratura, tais como:

- tamanho: neste estudo foram utilizados briquetes com dimensões nominais de  $30 \times 25 \times 15$  mm, porém não se tem o conhecimento caso as partículas sejam maiores ou menores;
- formato: briquetes com forma de traveseiro foram avaliados, mas existem outras geometrias possíveis no processo produtivo, como cilindro ou sela, que devem apresentar respostas distintas;
- formulação química: a utilização de outras matérias-primas combustíveis ou briquetes de minério de ferro, por exemplo, necessitam de caracterização individualizada, além do teor de ligantes, que pode aumentar a resistência mecânica;
- teor de umidade: o aumento da umidade pode acarretar na redução da resistência mecânica e, portanto, deve-se avaliar as faixas toleráveis para armazenamento e aplicação.

Além disso, é interessante ter o conhecimento aprofundado da influência da orientação do impacto no comportamento da quebra, segundo o modelo de quebra de Tavares. Outra análise importante em sistemas de manuseio é a suscetibilidade à quebra dos cacos de briquetes.

# Referências Bibliográficas

- [1] BHAGAT, R. P. *Agglomeration of Iron Ores*. Estados Unidos, CRC Press, 2019.
- [2] BIZHANOV, A., CHIZHIKOVA, V. *Agglomeration in metallurgy*. Suíça, Springer, 2020.
- [3] MACEDO, F. A. D., LOVATI, K. G., FERNANDES, R. B., et al. *Processo de produção de pelotas queimadas em um forno de pelotização*. Depositante: VALE S.A., BR 102021004299-0 A2, Depósito: 08 mar. 2021. Concessão: 24 ago. 2021.
- [4] CRUZ, A. F. F., HAAGENSEN, E. B., ZANON, L. R., et al. “Aumento da eficiência energética em fornos de pelotização”. In: *6° Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios*, pp. 127–139, São Paulo, 2018.
- [5] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). *Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro, 2021.
- [6] BRASIL. *Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017*. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Rio de Janeiro, RJ: Presidência da República, 2017.
- [7] PRAES, G. E., DE ARRUDA, J. D., LEMOS, L. R., et al. “Assessment of iron ore pellets production using two charcoals with different content of materials volatile replacing partially anthracite fines”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 1, pp. 1150–1160, 2019.
- [8] BÄCKSTRÖM, D., JOHANSSON, R., ANDERSSON, K., et al. “On the use of alternative fuels in rotary kiln burners—An experimental and modeling study of the effect on the radiative heat transfer conditions”, *Fuel Processing Technology*, v. 138, pp. 210–220, 2015.
- [9] TAVARES, L. M., ALMEIDA, R. F. “Breakage of green iron ore pellets”, *Powder Technology*, v. 366, pp. 497–507, 2020.



- [10] TAVARES, L. M., KING, R. P. “Single-particle fracture under impact loading”, *International Journal of Mineral Processing*, v. 54, n. 1, pp. 1–28, 1998.
- [11] TAVARES, L. M., KING, R. P. “Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics”, *Powder Technology*, v. 123, n. 2-3, pp. 138–146, 2002.
- [12] TAVARES, L. M., CARVALHO, R. M. “Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills”, *Minerals Engineering*, v. 22, n. 7-8, pp. 650–659, 2009.
- [13] CARVALHO, R. M., TAVARES, L. M. “Predicting the effect of operating and design variables on breakage rates using the mechanistic ball mill model”, *Minerals Engineering*, v. 43, pp. 91–101, 2013.
- [14] CAVALCANTI, P. P. S., PETIT, H. A., THOMAZINI, A. D., et al. “Modeling of degradation by impact of individual iron ore pellets”, *Powder Technology*, v. 378, pp. 795–807, 2021.
- [15] CAVALCANTI, P. P. S., TAVARES, L. M. “Statistical analysis of fracture characteristics of industrial iron ore pellets”, *Powder Technology*, v. 325, pp. 659–668, 2018.
- [16] CUNDALL, P. A., STRACK, O. D. L. “A discrete numerical model for granular assemblies”, *geotechnique*, v. 29, n. 1, pp. 47–65, 1979.
- [17] O’SULLIVAN, C. *Particulate discrete element modelling: a geomechanics perspective*. Estados Unidos, CRC Press, 2011.
- [18] MASSON, S., MARTINEZ, J. “Effect of particle mechanical properties on silo flow and stresses from distinct element simulations”, *Powder Technology*, v. 109, n. 1-3, pp. 164–178, 2000.
- [19] SILVA, B. B., CUNHA, E. R., CARVALHO, R. M., et al. “Modeling and simulation of green iron ore pellet classification in a single deck roller screen using the discrete element method”, *Powder technology*, v. 332, pp. 359–370, 2018.
- [20] TAVARES, L. M., CAVALCANTI, P. P., CARVALHO, R. M., et al. “Fracture probability and fragment size distribution of fired Iron ore pellets by impact”, *Powder Technology*, v. 336, pp. 546–554, 2018. ISSN: 0032-5910. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.036>.

- [21] BARRIOS, G. K. P., JIMÉNEZ-HERRERA, N., TAVARES, L. M. “Simulation of particle bed breakage by slow compression and impact using a DEM particle replacement model”, *Advanced Powder Technology*, v. 31, n. 7, pp. 2749–2758, 2020.
- [22] TAVARES, L. M., ANDRÉ, F. P., POTAPOV, A., et al. “Adapting a breakage model to discrete elements using polyhedral particles”, *Powder Technology*, v. 362, pp. 208–220, 2020.
- [23] GENTIL, L. V. B. *Tecnologia e economia do briquete de madeira*. Tese de D.Sc., Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2008.
- [24] OLIVEIRA, S. J. *Avaliação de briquetes de misturas de finos de minérios de ferro e rejeito de mineração para uso em altos-fornos*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2019.
- [25] EMBRAPA (BRASIL). *Plano nacional de agroenergia 2006-2011*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília, DF, 2006.
- [26] SILVA, J. W. F., CARNEIRO, R. A. F., MATOS, J. “Da biomassa residual ao briquete: viabilidade técnica para produção de briquetes na microrregião de Dourados-MS”, *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 6, n. 4, pp. 624–646, 2017.
- [27] LUZ, A. B. D., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de minérios*. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2010.
- [28] BEMBENEK, M. “The issue of selection: shape and volume of briquettes agglomerated in a roller press”, *Journal of KONES*, v. 24, 2017.
- [29] ANDERSON, T. L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. Estados Unidos, CRC press, 2017.
- [30] GRIFFITH, A. A. “VI. The phenomena of rupture and flow in solids”, *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, v. 221, n. 582-593, pp. 163–198, 1921.
- [31] TAVARES, L. M. “Chapter 1 Breakage of Single Particles: Quasi-Static”. In: *Particle Breakage*, v. 12, *Handbook of Powder Technology*, Elsevier Science B.V., pp. 3–68, Holanda, 2007.

- [32] TAVARES, L. M., LIMA, A. S. “Célula de carga de impacto na caracterização de materiais para a cominuição. Parte 1: Calibração”, *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 59, n. 1, pp. 61–69, 2006.
- [33] TAVARES, L. M. “Energy absorbed in breakage of single particles in drop weight testing”, *Minerals Engineering*, v. 12, n. 1, pp. 43–50, 1999.
- [34] CAVALCANTI, P. P. S. *Fratuira e Fragmentação de Pelotas Queimadas de Minério de Ferro*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.
- [35] CUNHA, E. R. *Modelagem Mecanicista de Britadores de Impacto de Eixo Vertical*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.
- [36] WEIBULL, W. “A statistical distribution function of wide applicability”, *Journal of applied mechanics*, 1951.
- [37] VERVOORN, P. M. M., AUSTIN, L. G. “The analysis of repeated breakage events as an equivalent rate process”, *Powder technology*, v. 63, n. 2, pp. 141–147, 1990.
- [38] TAVARES, L. M., DE CARVALHO, R. M. “Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics”, *International Journal of Mineral Processing*, v. 112, pp. 1–6, 2012.
- [39] GHADIRI, M., ZHANG, Z. “Impact attrition of particulate solids. Part 1: A theoretical model of chipping”, *Chemical Engineering Science*, v. 57, n. 17, pp. 3659–3669, 2002.
- [40] CAVALCANTI, P. P. S., CARVALHO, R. M., ANDERSON, S., et al. “Surface breakage of fired iron ore pellets by impact”, *Powder Technology*, v. 342, pp. 735–743, 2019.
- [41] MISHRA, B. K., RAJAMANI, R. K. “The discrete element method for the simulation of ball mills”, *Applied Mathematical Modelling*, v. 16, n. 11, pp. 598–604, 1992.
- [42] CLEARY, P. W. “Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods”, *Minerals Engineering*, v. 11, n. 11, pp. 1061–1080, 1998.
- [43] WEERASEKARA, N. S., LIU, L. X., POWELL, M. S. “Estimating energy in grinding using DEM modelling”, *Minerals Engineering*, v. 85, pp. 23–33, 2016.

- [44] CLEARY, P. W. “DEM prediction of industrial and geophysical particle flows”, *Particuology*, v. 8, n. 2, pp. 106–118, 2010.
- [45] WEERASEKARA, N. S., POWELL, M. S., CLEARY, P., et al. “The contribution of DEM to the science of comminution”, *Powder technology*, v. 248, pp. 3–24, 2013.
- [46] JIMÉNEZ-HERRERA, N., BARRIOS, G. K. P., TAVARES, L. M. “Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds”, *Advanced Powder Technology*, v. 29, n. 3, pp. 692–706, 2018.
- [47] POTYONDY, D. O., CUNDALL, P. A. “A bonded-particle model for rock”, *International journal of rock mechanics and mining sciences*, v. 41, n. 8, pp. 1329–1364, 2004.
- [48] MISHRA, B. K., THORNTON, C. “Impact breakage of particle agglomerates”, *International Journal of Mineral Processing*, v. 61, n. 4, pp. 225–239, 2001.
- [49] CARVALHO, R. M., CAVALCANTI, P. P. S., TAVARES, L. M. “Modeling breakage and mechanical degradation of steelmaking materials during handling”. In: *International Organized Sessions - The Iron and Steel Institute of Japan*, pp. 542–545, Sendai, Japão, 2018.
- [50] TAVARES, L. M., ANDERSON, S. “A stochastic particle replacement strategy for simulating breakage in DEM”, *Powder Technology*, v. 377, pp. 222–232, 2021.
- [51] ANDRÉ, F. P. *Validation and application of breakage model in the discrete element method through the simulation of comminution systems*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019.
- [52] TAVARES, L. M. “Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation”, *Powder Technology*, v. 190, n. 3, pp. 327–339, 2009.
- [53] WS TYLER. *Test sieve shakers (Ro-Tap® and Coarse Models)*. Operations manual, W.S. Tyler, 2004.
- [54] MATLAB. *MATLAB*. Versão 2020a, MathWorks, 2020.
- [55] LAGARIAS, J. C., REEDS, J. A., WRIGHT, M. H., et al. “Convergence properties of the Nelder–Mead simplex method in low dimensions”, *SIAM Journal on optimization*, v. 9, n. 1, pp. 112–147, 1998.
- [56] EDEM. *EDEM*. Versão 2021, Altair Engineering Inc., 2021.

- [57] CARVALHO, R. M., TAVARES, L. M., CUNHA, E. R., et al. *Avaliação do efeito da adição de briquetes em leito de pelotas verdes com o método dos elementos discretos*. Relatório técnico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022.
- [58] THOMAZINI, A. D. *Modelagem e simulação da degradação de pelotas verdes de minério de ferro em operações de pelotização pelo método dos elementos discretos*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2020.
- [59] BARRIOS, G. K. P., CARVALHO, R. M., KWADE, A., et al. “Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling”, *Powder Technology*, v. 248, pp. 84–93, 2013.