



CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO DE DEGRADAÇÃO DE  
PELOTAS QUEIMADAS DE MINÉRIO DE FERRO DURANTE MANUSEIO E  
TRANSPORTE

Pedro Porto Silva Cavalcanti

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

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2015

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO DE DEGRADAÇÃO DE  
PELOTAS QUEIMADAS DE MINÉRIO DE FERRO DURANTE MANUSEIO E  
TRANSPORTE

Pedro Porto Silva Cavalcanti

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

Examinada por:



---

Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D



---

Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho, D.Sc.



---

Prof. José Adilson de Castro, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
DEZEMBRO DE 2015

Cavalcanti, Pedro Porto Silva

Calibração e validação de modelo matemático de degradação de pelotas queimadas de minério de ferro durante manuseio e transporte /Pedro Porto Silva Cavalcanti. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XI, 168 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 144-151.

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

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

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO DE DEGRADAÇÃO DE  
PELOTAS QUEIMADAS DE MINÉRIO DE FERRO DURANTE MANUSEIO E  
TRANSPORTE

Pedro Porto Silva Cavalcanti

Dezembro/2015

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Os fragmentos gerados no manuseio e transporte das pelotas de minério de ferro interferem no processo de redução que ocorre nas siderúrgicas, sendo necessário o uso de peneiramento prévio para remoção dos finos. Isso traduz-se em prejuízo financeiro para o cliente consumidor e também para as usinas pelletadoras, que podem ser penalizadas. Modelos matemáticos que permitam simular a resposta das pelotas a diferentes cenários de manuseio e transporte, desde a pelletadora até o cliente final (siderúrgica), são úteis nesse sentido. O presente trabalho, inicialmente, propôs modificações em sub-modelos que compõem o modelo matemático de degradação de pelotas, desenvolvido no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ, o qual é baseado na mecânica do dano e na distribuição de energias de fratura das pelotas. Em seguida, comparou-se a resistência mecânica de cinco diferentes tipos de pelotas queimadas comerciais para redução direta (A-E), oriundas de usinas brasileiras, através de uma nova metodologia de caracterização física e ajustou-se parâmetros dos modelos. Após o ajuste, o modelo foi capaz de prever, com erros inferiores a 20% a proporção de material fino gerado em ensaios de manuseio, realizados em laboratório. Neste ensaio, ao contrário do esperado pelos ensaios de rotina da indústria, a Pelota D apresentou a maior resistência à degradação, gerando menor quantidade de material fino, enquanto a Pelota B apresentou a menor, exatamente como o modelo previu. Esse resultado comprovam a inadequação do uso direto de informação dos ensaios padronizados na previsão da degradação que ocorre durante o manuseio e transporte das pelotas de minério de ferro.

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

CALIBRATION AND VALIDATION OF A MATHEMATICAL MODEL OF  
DEGRADATION OF IRON ORE PELLETS DURING HANDLING AND TRANSPORT

Pedro Porto Silva Cavalcanti

December/2015

Advisor: Luís Marcelo Marques Tavares

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Fines generated during transport interfere in the reduction that occurs during steelmaking, being necessary its removal by screening. This translates into losses by the client, which can even lead to contractual penalties to the pelletizing company. The use of mathematical models that would allow predicting the response of pellets to different scenarios of handling and transportation, from the pelletizing plant to the steelmaker is of great interest. Initially, this work proposed modifications to sub-models that make up the mathematical model of pellet degradation, developed at Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) of COPPE/UFRJ, which is based on damage mechanics and on the distribution of particle fracture energy of pellets. Then, five different types of burned and commercial pellets (A-E) from Brazilian pelletizing companies were compared using this new methodology of characterization of pellets of their mechanic resistance and data used to fit the model. Once fitted, the model was able to predict, with less than 20% of errors, the proportion of fine material generated in laboratory handling tests. In this test, contrary to expectations by standard routine industry tests, Pellet D showed the highest resistance to degradation, generating smaller amount of fines, while Pellet B showed the lowest resistance, exactly as predicted model. This result proves the inadequacy of the direct use of information from standardized tests in predicting the degradation that occurs during handling and transportation of iron ore pellets.

## SUMÁRIO

<b>I.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>II.</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>5</b>
<b>III.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>6</b>
III.1	PELOTIZAÇÃO .....	6
III.1.1	PROCESSO PRODUTIVO .....	6
III.1.2	PREPARAÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS .....	8
III.1.3	FORMAÇÃO DAS PELOTAS VERDES (CRUAS).....	9
III.1.4	TRATAMENTO TÉRMICO (ENDURECIMENTO) .....	13
III.1.5	CONTROLE DE QUALIDADE DAS PELOTAS .....	16
III.2	FRAGMENTAÇÃO DAS PELOTAS.....	17
III.2.1	MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS .....	18
III.2.2	FRAGMENTAÇÃO VOLUMÉTRICA.....	21
III.2.3	FRAGMENTAÇÃO SUPERFICIAL .....	24
III.3	DEGRADAÇÃO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO .....	25
III.4	MODELAGEM DA DEGRADAÇÃO .....	26
III.5	MODELO DE DEGRADAÇÃO DE TAVARES E CARVALHO (2011) .....	26
<b>IV.</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
IV.1	ANÁLISE QUÍMICA.....	35
IV.2	ANÁLISE MINERALÓGICA .....	35
IV.3	MICRODUREZA.....	36
IV.4	PICNOMETRIA A HÉLIO.....	37
IV.5	DENSIDADE HIDROSTÁTICA .....	39
IV.6	MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X .....	40
IV.7	MEDIDA DA POROSIDADE .....	41
IV.8	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	42
IV.9	TAMBORAMENTO .....	42
IV.10	TAMBORAMENTO LTM.....	43
IV.11	COMPRESSÃO .....	45
IV.12	COMPRESSÃO LTM.....	45
IV.13	CÉLULA DE CARGA DE IMPACTO (CCI).....	46
IV.14	RAPID BREAKAGE TESTER .....	49
IV.15	AUTOFRATURA .....	49
IV.16	ENSAIO DE IMPACTOS REPETIDOS.....	50

IV.17	ENSAIO DE QUEDA DE PESO – <i>DROP WEIGHT TEST</i> (DWT) .....	52
IV.18	SEPARAÇÃO DE CACOS E PELOTAS .....	55
IV.19	ENSAIO DE TRANSFERÊNCIA (SIMULAÇÃO DE MANUSEIO) .....	56
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>61</b>
V.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	61
V.2	ANÁLISE MINERALÓGICA .....	62
V.3	MICRODUREZA .....	65
V.4	MASSA ESPECÍFICA .....	65
V.5	POROSIDADE .....	66
V.6	ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	71
V.7	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	74
V.8	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA BASEADA NA ISO .....	75
V.9	DISTRIBUIÇÕES DE ENERGIAS DE FRATURA DE PELOTAS POR COMPRESSÃO .....	78
V.10	PROBABILIDADES DE QUEBRA DE PELOTAS POR IMPACTO SIMPLES .....	86
V.11	ACÚMULO DE DANO NAS PELOTAS.....	93
V.12	FUNÇÃO QUEBRA DAS PELOTAS .....	97
V.13	FRAGMENTAÇÃO SUPERFICIAL .....	102
V.14	VALIDAÇÃO DO MODELO DE DEGRADAÇÃO PARA PELOTAS INDIVIDUAIS .....	110
V.15	CARACTERIZAÇÃO DOS CACOS .....	114
V.15.1	ACÚMULO DO DANO NOS CACOS.....	114
V.15.2	MODELAGEM DAS ENERGIAS DE FRATURA DOS CACOS .....	115
V.15.3	MODELAGEM DA FRAGMENTAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS CACOS.....	118
V.15.4	FRAGMENTAÇÃO SUPERFICIAL DE CACOS .....	121
V.16	ENSAIO DE TRANSFERÊNCIA.....	124
V.16.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	124
V.16.2	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	129
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>140</b>
<b>VII.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>143</b>
<b>VIII.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>144</b>
<b>IX.</b>	<b>ANEXO .....</b>	<b>152</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Latinos

$a_1$	-	constante da pelota na equação do desvio padrão
$a_2$	-	constante da pelota na equação do desvio padrão
$a_3$	-	constante da pelota na equação do desvio padrão
$A$	-	parâmetro do modelo de determinação do $t_{10}$ em função da energia de impacto
$A_m$	-	área da cavidade formada no material ( $\text{mm}^2$ ) no ensaio de microdureza
$A_s$	-	área da seção transversal da barra da CCI
$a_{i,j}$	-	função quebra de abrasão
$b$	-	parâmetro do modelo de determinação do $t_{10}$ em função da energia de impacto
$b'$	-	parâmetro do modelo de determinação do $t_{10}$ em função razão da energia de impacto e a energia de fratura
$b_1$	-	constante de cada pelota para satisfazer a equação do $E_{\text{máx}}$
$b_2$	-	constante de cada pelota para satisfazer a equação do $E_{\text{máx}}$
$C$	-	velocidade de propagação da onda na barra
$C_{\text{pelota}}$	-	energia de fratura da pelota de 10 mm (constante para cada amostra)
$C_{\text{caco}}$	-	energia de fratura do caco de 10 mm (constante para cada amostra)
$C_{\text{abrasão}}$	-	constante de cada pelota na equação da abrasão
$D$	-	parâmetro de acúmulo do dano
$d$	-	expoente constante de cada pelota na equação da energia de fratura
$d_{\text{abrasão}}$	-	expoente constante de cada pelota na equação da abrasão
$d_A$	-	parâmetro característico do material na função quebra de abrasão
$d_i$	-	tamanho representativo de partículas na classe $i$ (tamanho de partícula)
$d_h$ $d_v$	-	diagonais da cavidade, em mm, na medição da dureza
$d_m$	-	diâmetro médio de uma partícula
$dp$	-	tamanho da pelota (mm)
$dp_0$	-	constante das equações de energia de fratura e dano, igual a 10 mm
$e$	-	fração da energia de colisão que é absorvida por uma partícula
$E$	-	energia de impacto ou de fratura

$E_0$	-	parâmetro de ajuste do modelo do $t_{10}$ em função razão da energia de impacto e a energia de fratura
$E_{50}$	-	mediana da distribuição de energias de fratura das partículas
$E_{50b}$	-	mediana da distribuição de energias de fratura das partículas que quebram naquele evento de impacto
$E_{cs}$	-	energia específica consumida no impacto
$E_{cs,t_{10i}}$	-	energia específica de cominuição de cada partícula de classe de tamanho $i$ de uma rocha com um valor determinado de $t_{10}$ , (kWh/t)
$E_{is}$	-	energia específica de impacto aplicada no ensaio de DWT
$E_k$	-	energia específica de impacto
$E_{k,n}$	-	energia específica de impacto no $n$ -ésimo impacto
$E_m$	-	razão entre a energia de colisão e a média da massa das partículas em uma classe de tamanho $j$ .
$E_{m50}$	-	energia necessária para fragmentar 50% das partículas no tamanho de classe $j$ em um impacto único
$E_{máx}$	-	truncamento da distribuição log-normal das energias de fratura
$E_n$	-	energia específica de fratura de uma partícula após o $n$ -ésimo impacto
$E_{\infty}$	-	energia específica de fratura de partículas de tamanho infinito (J/kg)
$f_{tamanho}$	-	fator relativo ao tamanho da pelota ou caco
$f_{caco}$	-	fator relativo ao caco de cada amostra
$F$	-	força aplicada (kgf) para medir a dureza
$F_c$	-	força relativa ao momento de fratura (CCI)
$F_{i,0}$	-	distribuição de energias das partículas originais (depois da caracterização em laboratório)
$F_{i,n}$	-	probabilidade de uma partícula contida na classe de tamanhos $i$ quebrar quando absorver uma energia $eE_k$
$F_{i,n+1}^*$	-	distribuição de energias das partículas que sofrem dano mas não fraturam
$F_n$	-	proporção de partículas quebradas no $n$ -ésimo impacto
$g$	-	força gravitacional
$h_i$	-	altura de queda (cm) a partir da qual o peso é solto no ensaio de DWT
$h_f$	-	altura final de repouso do peso (cm) no ensaio de DWT
$i$	-	índice da classe de tamanhos
$I$	-	matriz unitária
$j$	-	índice da classe de tamanhos

$k$	-	rigidez da partícula
$k_i$	-	fração de produtos gerados por abrasão das partículas contidas na classe
i		
$k_{aço}$	-	rigidez do aço
$k_{superfície}$	-	rigidez da superfície
$\bar{m}_a$	-	massa média das partículas ensaiadas (g)
$m_p$	-	massa da partícula (g)
$m_{sec}$	-	massa da partícula seca (g)
$m_{sub}$	-	massa da partícula submersa (g)
$M_1$	-	massa das pelotas secas no ensaio de densidade hidrostática
$M_2$	-	massa das pelotas parcialmente secas no ensaio de densidade hidrostática
$M_3$	-	massa das pelotas úmidas no ensaio de densidade hidrostática
$Md$	-	massa do peso a ser solto no ensaio de DWT (kg)
$M_i$	-	massa da pelota no cálculo da porosidade
$M_f$	-	massa da pelota revestida com politetrafluoretileno
$n_1$	-	parâmetro da função quebra
$n_2$	-	parâmetro da função quebra
$n_3$	-	parâmetro que depende do material
$P$	-	dano da pelota de 10 mm (constante para cada amostra)
$P_1$	-	pressão (psig) na câmara de expansão do picnômetro a Hélio
$P_2$	-	pressão (psig) na câmara de expansão do picnômetro a Hélio
$P_a$	-	parâmetro referente a taxa de quebra por abrasão
$q$	-	expoente constante de cada pelota na equação do dano
rpm	-	rotações por minuto
$t$	-	instante de tempo
$t_c$	-	instante de tempo em que ocorre a fratura
$t_{10}$	-	porcentagem de material gerado na quebra que é menor que o tamanho equivalente a 10% do tamanho original da partícula
$t_n$	-	porcentagem de material gerado na quebra que é menor que o tamanho equivalente a n % do tamanho original da partícula
$v_0$	-	velocidade de impacto
$V$	-	velocidade (m/s)
$V_a$	-	volume da câmara da amostra
$V_e$	-	volume da câmara de expansão

$V_s$	-	volume do sólido
$W_{i,n}$	-	fração mássica do material contido na classe i antes do n-ésimo impacto
$W_{i,n+1}$	-	fração mássica do material contido na classe i após o n-ésimo impacto

#### Gregos

$\alpha$	-	deformação sofrida pelo material
$\alpha_c$	-	constante de deformação do material
$\varepsilon$	-	porosidade total
$\gamma$	-	coeficiente de acúmulo de dano
$\lambda$	-	parâmetro da função de quebra por abrasão
$\rho$	-	massa específica da barra de aço da CCI
$\rho_s$	-	densidade da pelota de minério de ferro
$\rho_{rev}$	-	massa específica da pelota revestida com politetrafluoretileno
$\rho_{tef}$	-	massa específica do politetrafluoretileno
$\sigma$	-	desvio padrão
$\sigma_e$	-	desvio padrão do modelo da probabilidade de fratura
$\nu$	-	coeficiente de Poisson
$\phi$	-	parâmetro da relação entre a energia de fratura e o tamanho de partícula

## I. INTRODUÇÃO

Apesar da recente crise mundial do setor minero metalúrgico, a produção de pelotas de minério de ferro ainda ocupa uma posição de destaque econômico no cenário industrial siderúrgico brasileiro. De acordo com a Sinferbase (2014), foram produzidas mais de 58 milhões de toneladas de pelotas de minério de ferro no Brasil em 2014. Além disso, o minério de ferro e seus concentrados (o que inclui as pelotas) foram os líderes de receita de exportações de produtos básicos, representando 11,5% das exportações brasileiras no mesmo ano, apesar da abrupta queda dos preços.

Resumidamente, as pelotas de minério de ferro podem ser definidas como um aglomerado esférico, produzido com finos do minério de ferro. Concorrem com granulados e sínteres de minério de ferro como carga metálica de fornos de redução direta e altos-fornos. Vale destacar que o processo via alto-forno utiliza a pelota como uma fração da carga metálica, juntamente com o sínter e o minério de ferro granulado, enquanto que o processo via redução direta utiliza elevada proporção de pelota como carga metálica, podendo chegar a 100%.

As pelotas apresentam vantagens sobre seus concorrentes no que diz respeito a alguns quesitos como maior regularidade na distribuição granulométrica, constância na qualidade química e redutibilidade (Meyer, 1980), apresentando maior valor agregado. Por outro lado, a principal vantagem é a sua elevada resistência à degradação mecânica, sendo superior aos seus concorrentes, tanto durante o manuseio e transporte, quanto durante a redução no interior dos fornos. Tais vantagens contribuem para melhorar a estabilidade operacional de fornos, atingindo ganhos de produtividade e/ou metalização, fazendo com que as pelotas se tornem a carga mais atrativa para os produtores de ferro esponja (Tavares *et al.*, 2015).

Apesar de apresentarem maior resistência à degradação mecânica, as pelotas ainda são suscetíveis a esse problema, embora em menor proporção que seus concorrentes. A degradação ocorre, principalmente, durante as etapas de manuseio e transporte, que geram grandes quantidades de material fino (partículas de tamanhos menores que, aproximadamente, 6 milímetros), prejudicial aos processos de redução dos fornos siderúrgicos. Dessa forma, esses finos são removidos da alimentação dos fornos, por peneiramento, e vendidos a custos marginais pelas siderúrgicas que não dispõem de unidades de sinterização, traduzindo em prejuízos. Adicionalmente, a degradação das pelotas também pode gerar cacos (partículas com tamanhos superiores a, aproximadamente, 5 mm, mas que correspondem a fragmentos de pelotas). Como não são removidos por peneiramento, esses cacos são alimentados aos fornos, podendo contribuir

para a formação de cachos ou *clusters* (Pereira, 2012). A presença desses cachos no interior dos fornos é prejudicial para a permeabilidade dos gases de redução e, portanto, para o processo de redução e metalização, assim como para o movimento da carga, sobretudo no caso de fornos de redução direta (Boechat, 2014).

Por esses motivos, as pelletizadoras realizam um controle rigoroso do tamanho e qualidade das pelotas durante o processo de produção. Entretanto, apenas o controle dos finos durante a produção não é suficiente para evitar sua presença dentro dos reatores, uma vez que muitos são gerados durante o manuseio e transporte das pelotas, desde a usina de pelletização até as operações do cliente. Dependendo da quantidade de finos que o produto contém ao chegar ao cliente e do tipo de contrato firmado, podem ser geradas penalidades para o fabricante ou, ao menos, ferir a imagem da empresa produtora frente ao cliente.

Diversas são as variáveis que influenciam a degradação de pelotas durante o manuseio. Elas podem ser divididas entre aquelas que dependem das características intrínsecas das pelotas produzidas e aquelas que dependem das operações de manuseio. Dentre as variáveis que influenciam diretamente na resistência mecânica de pelotas estão a granulometria e a composição mineralógica do *pellet feed*, as características dos aditivos empregados, o método usado na formação de pelotas, bem como as condições de queima empregadas no forno de endurecimento, entre outras (Wright, 1976; Meyer, 1980; Fonseca, 2003; Costa, 2008). Por outro lado, a degradação é tão maior quanto mais intensos forem os esforços mecânicos aos quais as pelotas são submetidas. Esses esforços podem variar desde quedas em transferências entre transportadores de correia, até carregamentos de embarcações e operações de *lighterage*, previamente à descarga em portos de profundidade limitada (Tavares *et al.*, 2015).

Em relação ao cenário brasileiro, a questão da degradação de pelotas ganha uma importância ainda maior, visto que pelotas de vários minérios de ferro brasileiros se destacam, internacionalmente, pela sua alta redutibilidade. Isso geralmente, vem ao custo de uma resistência comparativamente mais baixa à degradação mecânica, o que resulta em um importante desafio à competitividade nacional, sobretudo tendo em vista as diversas operações de manuseio às quais pelotas são submetidas desde as unidades produtoras instaladas no Brasil até os clientes, localizados principalmente no sudeste asiático, Oriente Médio, Caribe e Europa (Tavares *et al.*, 2015).

Neste cenário, as empresas produtoras de pelotas empregam metodologias padronizadas de ensaios de caracterização mecânica para avaliar a qualidade física das pelotas produzidas, como ensaios de medida de resistência à compressão e medida de abrasão por tamboramento (Gariglio e Klein, 1996). Embora estas metodologias sejam até hoje empregadas, elas têm pouca utilidade como ferramenta para prever resultados de degradação pelo efeito da ação mecânica sobre as pelotas, durante o manuseio e transporte (Silveira, 2012).

A partir dessa perspectiva, o que o corpo técnico de uma indústria que produz pelotas de minério de ferro faria se pudesse prever, com grande confiança, a degradação mecânica que ocorre durante o manuseio e transporte das pelotas, desde a usina até o cliente? Evidente que a empresa estaria em melhores condições de negociar contratos, pois poderia adequar a qualidade das pelotas produzidas ao circuito de manuseio e transporte do cliente. Poderia, também, avaliar as ações corretivas, a fim de minimizar a degradação das pelotas de cada circuito, de acordo com as variáveis da pelotização que influenciam a degradabilidade, atuando eficientemente no sentido de otimizar o processo de pelotamento.

O problema reside no fato que, para isso, são necessários modelos matemáticos e resultados de medidas que permitam realizar essa suscetibilidade à degradação. Desta forma, a solução certamente reside no desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de prever a degradação de pelotas de minério de ferro, durante seu manuseio e transporte, e utilizar novas técnicas de caracterização que alimentem esses modelos.

Pesquisadores como Teo e Waters (1988), Weedon e Wilson (2000), Sahoo (2007), entre outros, propuseram, ao longo de décadas recentes, novas metodologias e modelos matemáticos que pudessem ser utilizados para prever a ação deste fenômeno não só para pelotas, mas também para minérios. Infelizmente, estas metodologias ainda não demonstraram ser capazes de fornecer previsões com a fidelidade desejada.

No intuito de preencher esta lacuna, foi desenvolvido um modelo matemático de degradação no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ (Tavares e Carvalho, 2008), o qual sugere caracterizar a susceptibilidade do material à degradação, através do enfraquecimento contínuo, devido à aplicação repetida de esforços mecânicos, por meio da utilização do modelo da mecânica do dano (Tavares e King, 2002). Desafios foram, desde o início, identificados na sua aplicação a pelotas, pois embora promissor, o modelo foi desenvolvido, originalmente, para granulados de minério. Além disso, o modelo demanda uma série de

informações sobre as características de quebra das pelotas que os ensaios de qualidade, rotineiramente realizados pelas pelletizadoras, não fornecem.

Silveira (2012) aplicou o modelo para pelotas de minério de ferro, modificando parâmetros importantes, como a caracterização diferenciada de cacos e pelotas e propondo novas equações para a fratura superficial de pelotas. Entretanto, foi validado para apenas uma amostra de pelotas de minério de ferro, além da caracterização dos parâmetros ter sido realizada baseada em impactos duplos e simples, enquanto é sabido que os choques ocorridos no manuseio são predominantemente por impactos simples.

## **II. OBJETIVO**

Esta dissertação tem como objetivo aplicar o modelo de degradação modificado de Tavares e Carvalho (2008), dando continuidade a trabalhos prévios aplicados a pelotas de minério de ferro (Silveira, 2012), calibrando seus parâmetros, modificando os sub-modelos (quando necessário), validando o modelo como ferramenta de previsão de degradação mecânica das pelotas, durante seu manuseio e transporte.

Além disso, o trabalho também visa relacionar aspectos das características mineralógicas e estruturais das pelotas com a caracterização mecânica usualmente aplicada.

### **III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é realizada uma breve revisão conceitual e abordagem de aspectos importantes, considerados necessários para o entendimento do fenômeno de degradação das pelotas de minério de ferro durante seu manuseio e transporte.

#### **III.1 Pelotização**

O desenvolvimento do processo de pelotização de finos de minério de ferro se deu pela necessidade do aproveitamento das partículas ultrafinas, que se perdiam nas operações de lavra, beneficiamento e da degradação dos granulados, durante o transporte. Intensificou-se, a partir de 1940, diante das perspectivas de exaustão das reservas de alto teor do minério e do aumento da demanda de aço em todo o mundo. Além disso, houve uma demanda pela melhora dos índices operacionais dos fornos siderúrgicos com a utilização de aglomerados, com maior controle das características físicas, químicas e metalúrgicas, além de uma competição maior entre os fornecedores de minério, elevando o nível de exigência da matéria-prima, objetivando a melhora da qualidade do aço.

A pelotização pode ser definida como um processo de aglomeração, a úmido, realizado a frio e a quente, de finos de minério de ferro concentrado (abaixo de 0,15 mm), com quantidades pré-definidas de aglomerantes, aditivos e energéticos. Há formação de um aglomerado esférico, a partir da mistura dessas partículas, em um disco ou tambor de rolamento. Posteriormente, finaliza-se com um tratamento térmico para garantir melhores propriedades mecânicas.

##### **III.1.1 Processo Produtivo**

Resumidamente, o processo de pelotização pode ser dividido em seis principais estágios: extração do minério (lavra), beneficiamento, separação sólido-líquido, formação das pelotas cruas (verdes), endurecimento (tratamento térmico) e transporte. Vale ressaltar que as etapas do processo são interligadas e alterações nestas podem influenciar na qualidade final do produto, conforme mostra a Figura III.1.

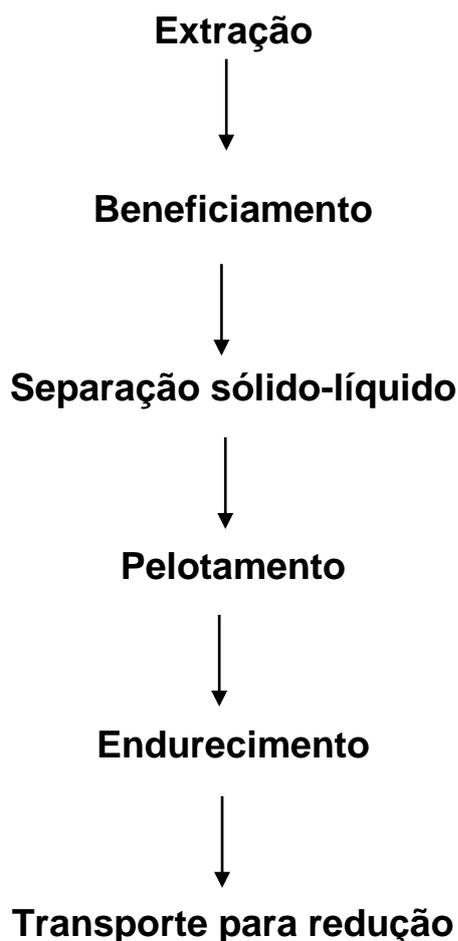


Figura III.1 – Fluxograma simplificado da produção de pelotas de minério de ferro (adaptado de Boechat, 2013)

O minério pode ser extraído em minas a céu aberto ou subterrâneas, sendo a primeira forma a mais utilizada no Brasil, para o minério de ferro. O transporte pode ser realizado com o auxílio de transportadores de correias ou caminhões fora de estrada e a extração é realizada de forma a atender às necessidades do processo seguinte, que é o beneficiamento.

Após a extração do minério, normalmente, há necessidade de um beneficiamento, que será escolhido de acordo com as características intrínsecas do minério. Quando o teor de ferro do minério extraído não atinge os padrões estabelecidos pelo mercado, e/ou apresentar altos teores de elementos fragilizantes à fabricação do aço, como fósforo, enxofre, arsênio, por exemplo, é necessário a concentração do minério e a remoção dos elementos indesejados. Dessa forma, minérios com alto teor de ferro necessitam de beneficiamento restrito à britagem, moagem e classificação do material, enquanto que os com baixo teor necessitam da etapa de concentração do minério, além da moagem final (Meyer, 1980).

O transporte do concentrado com baixa umidade se dá por transportadores de correia e/ou trens, enquanto que o transporte de concentrados na forma de polpa é feito por meio de mineroduto.

A separação sólido-líquido pode consistir em várias etapas, dependendo do processo produtivo adotado. O objetivo das operações de separação sólido/líquido é aumentar o percentual de sólidos ou reduzir a umidade dos produtos de outras operações unitárias de tratamento de minério. Normalmente, é composta de adensamento ou espessamento que permite a redução até aproximadamente 30% de água, da polpa e filtração. Ainda dentro desta etapa, têm-se os tanques homogeneizadores que visam estabilizar a concentração química, estocar o material e, em alguns casos, facilitar a dosagem de carvão para se obter um percentual de carbono fixo adequado para o processo de queima que ocorrerá *a posteriori*. Por fim, tem-se a filtração, que resulta em tortas com umidades entre 9 e 11%, as quais são transportadas para a etapa de adição de insumos (Boechat, 2013).

Antes de se iniciar a etapa de pelotamento, o material, ou *pellet feed* como é chamado, recebe a adição de insumos, que irão colaborar na formação das pelotas cruas e em sua queima.

### **III.1.2 Preparação de matérias-primas**

As matérias-primas utilizadas são de dois grupos diferentes: minerais oriundos de diferentes minérios de ferro, e minerais com baixo teor de ferro ou sem a presença de ferro.

Os minérios de ferro em condições naturais, geralmente, não são apropriados para o processamento em pelotizações, sendo necessária uma preparação do *pellet feed*. Essa preparação consiste no aumento do teor do ferro, separação de constituintes indesejáveis e moagem para alcançar a distribuição granulométrica requerida pela etapa de formação das pelotas cruas (Nunes, 2007). Os métodos de beneficiamento disponíveis podem ser: separação gravimétrica, lavagem, flotação e separação magnética e eletrostática (Meyer, 1980).

Os minerais de ferro comumente utilizados formam a base do *pellet feed* e possuem alto teor de ferro, proporcionando pelotas com 65% de ferro em sua composição. Em geral, são: a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) e pirita ( $\text{FeS}_2$ ).

Além dos concentrados de minérios de ferro, existem outras fontes de minério de ferro, que ocasionalmente podem ser usadas. Essas fontes normalmente são obtidas a partir de resíduos

e subprodutos de outras indústrias e processos que podem servir como insumo à composição do *pellet feed* por conter finos de minério de ferro (Meyer, 1980).

O segundo grupo de matérias-primas são os minerais livres ou com baixo teor de ferro, e englobam os materiais aglomerantes e os aditivos. São utilizados exclusivamente para facilitar a formação das pelotas cruas (aglomerantes), aumentar a qualidade físico-mecânica (aglomerantes e aditivos) e adequar as propriedades metalúrgicas das pelotas (aditivos), tendo como objetivo principal aumentar o poder de aglomeração a frio das partículas da mistura (Figueira *et al.*, 1985).

As finalidades dos insumos na mistura do *pellet feed* variam de acordo com a necessidade do processo. O carvão mineral (antracito) objetiva a introdução de energia térmica ao processo para o endurecimento da pelota, proporcionando uma perfeita distribuição de calor no interior da mesma, durante a etapa de queima. Conseqüentemente, contribui para a melhoria da qualidade física da pelota e para o aumento da produtividade. O calcário e a magnesita, são fundamentais para que a pelota queimada adquira resistência mecânica e características metalúrgicas adequadas para os processos posteriores de redução. Já a bentonita, o aglomerante orgânico e a cal hidratada têm como finalidade facilitar a aglomeração do *pellet feed* nos discos ou tambores de pelotamento. A aglomeração é feita a frio e, além de facilitar o processo de pelotamento, também contribui para a otimização da resistência a seco e a úmido das pelotas verdes.

A preparação das matérias-primas objetiva adequar e homogeneizar as características dos minérios de ferro (*pellet feed*) às exigidas pelo estágio de formação de pelotas cruas, bem como adequar e misturar importantes elementos já citados, como aglomerantes e aditivos, para que adquiram características físicas, químicas e metalúrgicas necessárias aos processos subsequentes.

### **III.1.3 Formação das pelotas verdes (cruas)**

Para que a formação das pelotas se faça de forma homogênea, gerando um produto de boa qualidade, torna-se necessário que o material a ser alimentado no disco esteja bem controlado quanto às suas características físicas, químicas e mineralógicas. Ainda é necessário que o equipamento pelotizador trabalhe em perfeitas condições operacionais, permitindo a estabilidade requerida ao processo (Fonseca, 2003).

Na etapa de pelotamento, o minério preparado alimenta os discos ou tambores de pelotamento para dar início a formação das pelotas cruas.

Inicialmente, a carga circulante do processo e o *pellet feed*, que ainda não passou pelo pelotamento, alimentam um desagregador de partículas e, posteriormente, o disco ou tambor de pelotamento. Nesta etapa, a carga que reside no disco sofre rolamentos sucessivos sobre as partículas finas alimentadas, acarretando o aumento gradativo do diâmetro das pelotas. Por fim, a disposição e forma de operação do disco, permite a classificação das pelotas em determinadas faixas de tamanho. Vale ressaltar que a principal variável a ser controlada no disco de pelotamento é o tempo de residência do material dentro do prato pelotizador, uma vez que isto será determinante no tamanho final das pelotas formadas. Este parâmetro é influenciado pelas seguintes variáveis operacionais: taxa de alimentação, velocidade de rotação, ângulo de inclinação, profundidade útil, posição dos raspadores, espessura da camada de fundo e posição do ponto de alimentação (Meyer, 1980).

Na formação das pelotas cruas, além da mistura sólida (minério, aglomerantes e aditivos), é necessária a utilização de uma fase líquida (água) para facilitar a coesão e aderência das partículas sólidas, conforme ilustrado na Figura III.2. Objetiva-se o estabelecimento de forças nas interfaces sólido/líquido, através da água, que tenham um efeito coesivo sobre o sistema sólido/líquido/ar. As forças interfaciais, responsáveis pela adesão das partículas, são a tensão superficial da água e as forças de capilaridade, como pode ser observado na Figura III.3.

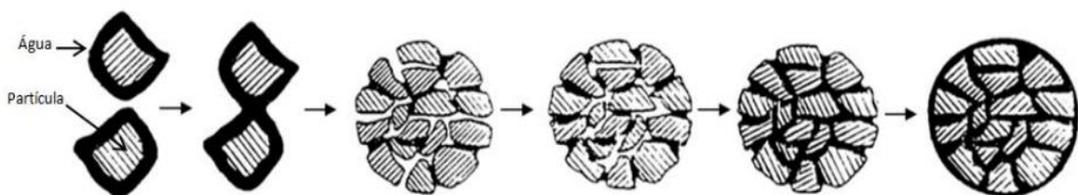


Figura III.2 – Influência da adição de água na formação das pelotas cruas (modificado de Meyer, 1980 – *Apud* Fonseca, 2004)

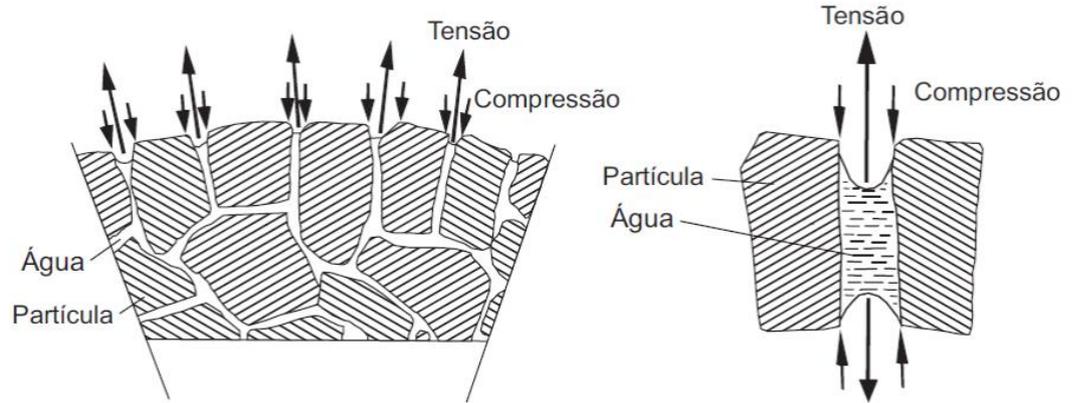


Figura III.3 – Influência das forças de coesão no mecanismo de aglomeração a frio (modificado de Meyer, 1980 – *Apud* Silveira, 2012)

Inicialmente, a tensão superficial da água promove o aparecimento de pontes líquidas que, juntamente com o movimento das partículas e da água no disco de pelotamento, contribuem para a formação de um aglomerado com diversas partículas. No interior das partículas não compactadas, são formadas pontes líquidas que mantêm as partículas juntas como em uma rede. Adicionando mais água ao processo, há ativação das forças de capilaridade, que são fundamentais para se chegar ao ponto ótimo de formação das pelotas. Por fim, após as partículas serem totalmente revestidas pela água do processo, tem-se uma significativa redução das forças de capilaridade e ativação da tensão superficial da água, formando então as pelotas cruas.

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

Na indústria, os discos de pelotização, conforme ilustrado na Figura III.4, são os mais utilizados dentre os equipamentos disponíveis para a operação de pelotamento, pois têm a vantagem de fornecer condições operacionais mais favoráveis à formação das pelotas com maior esfericidade, como resultado do efeito do movimento de rolamento das partículas. Estes discos são conjugados a sistemas de classificação das pelotas cruas, compostos por mesas de rolos vibratórias, que selecionam as que possuem os tamanhos adequados para o estágio de endurecimento das pelotas por tratamento térmico.

Na Figura III.5 pode-se observar um esquema do transporte e classificação das pelotas cruas. É importante destacar que, nesta etapa de classificação, as pelotas que se encontram fora da faixa de tamanhos determinada pelas aberturas dos rolos, são diretamente recirculadas no processo, retornando à mistura, antes de alimentar o disco de pelletização novamente (Fonseca, 2003).

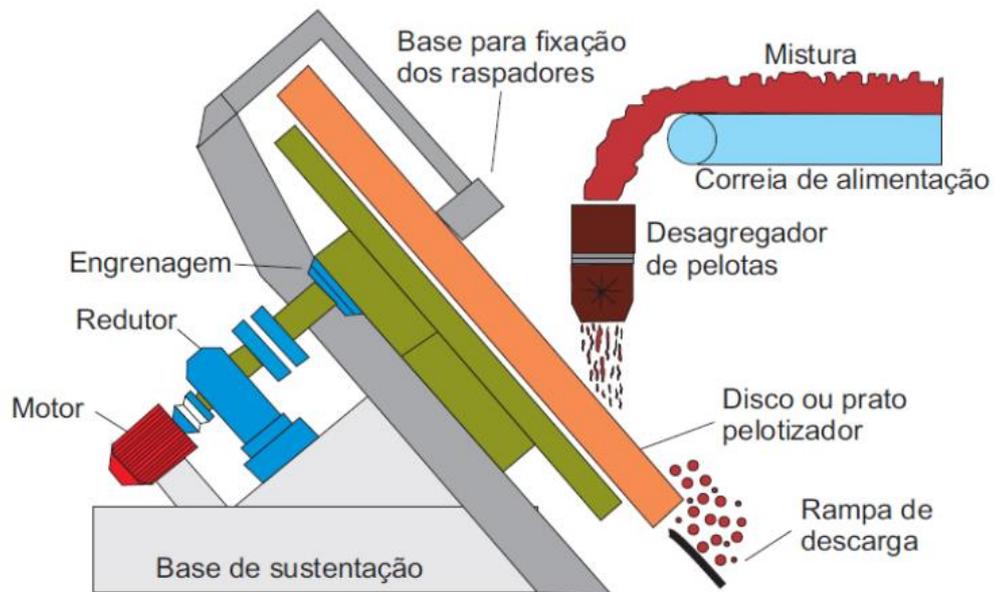


Figura III.4 – Diagrama esquemático de um disco de pelletização (Apud Fonseca, 2003)

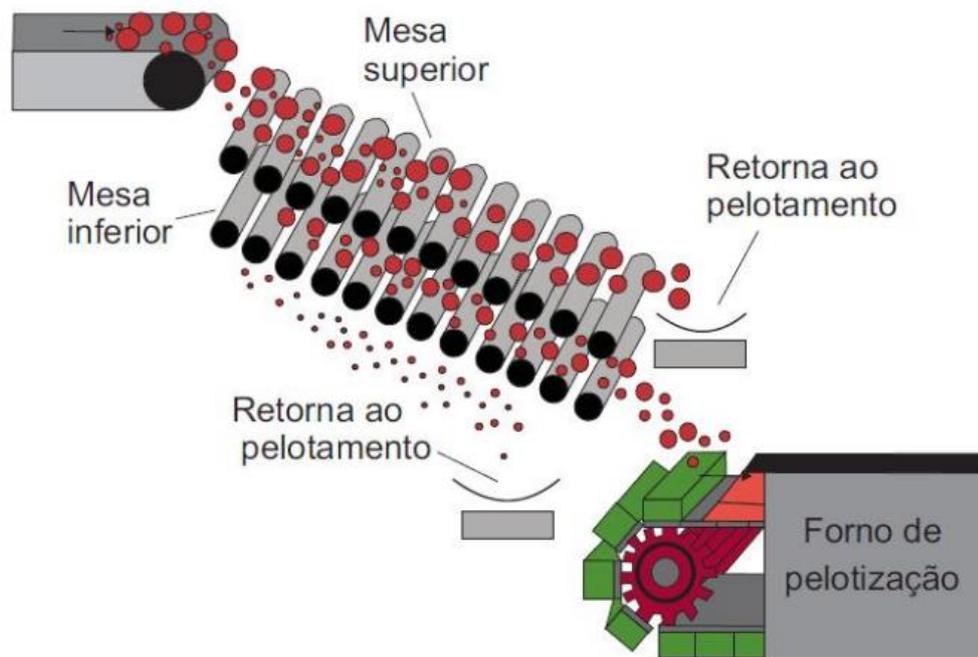


Figura III.5 – Esquema de transporte e classificação das pelotas cruas (*Apud* Fonseca, 2003)

### III.1.4 Tratamento térmico (endurecimento)

Na fase final do processo de pelotização, as pelotas provenientes dos discos de pelotamento passam por um tratamento térmico, chamado também de processo de endurecimento. Este tratamento permite aumentar a resistência mecânica das pelotas para que possam resistir às operações de manuseio e transporte e, também, para que suportem as pressões e os choques térmicos aplicados no interior do forno de redução, durante sua transformação em ferro gusa (por alto-forno) ou ferro esponja (por redução direta).

Para que a etapa de queima seja bem-sucedida, é necessário que as pelotas cruas possuam características físicas e químicas adequadas ao bom desempenho de endurecimento. Nesse ponto, tornam-se relevantes os cuidados na preparação das matérias-primas, tais como quantidades adequadas de aditivos e aglomerantes na mistura, como também na formação dos aglomerados de partículas (pelota crua).

Algumas características essenciais das pelotas cruas que influenciam no processo de queima das pelotas são: melhora no acabamento superficial, aumento da homogeneidade

granulométrica, aumento da umidade da pelota, dosagem de carvão (antracito), mudança na basicidade binária, alteração na resiliência (resistência a queda), aumento da resistência à compressão e dosagem de bentonita.

O acabamento superficial, a dosagem de carvão e a umidade na pelota crua, influenciam diretamente na qualidade física da pelota queimada. Quanto melhor o acabamento da pelota crua, melhor sua qualidade física após queimada. A umidade da pelota deve se manter entre 8% e 10% de água, pois caso esses valores sejam extrapolados, haverá uma redução da qualidade física e um aumento da energia térmica requerida para a secagem. A dosagem de carvão deverá respeitar um intervalo ótimo, pois, fora deste, seja acima ou abaixo, a qualidade física das pelotas queimadas diminuirá. Porém, quando a dosagem está dentro do intervalo ótimo, além de melhor qualidade física, há um menor consumo de combustível (Meyer, 1980).

A homogeneidade granulométrica das pelotas cruas formadas (entre 8 e 18 mm) tem papel fundamental na otimização do processo, contribuindo diretamente para o aumento da alimentação dos fornos e diminuindo o retorno das mesas de rolos. Já o aumento de bentonita, promove elevação da taxa de sílica na pelota.

O forno de grelha móvel, esquematizado na Figura III.6, é o mais utilizado pelas indústrias pelletizadoras no mundo. A primeira etapa do tratamento térmico é a alimentação de pelotas cruas na grelha. As pelotas cruas, previamente classificadas nas mesas de rolos, são colocadas dentro dos carros de grelha. Antes da alimentação das pelotas cruas, há um preenchimento na lateral e no fundo com pelotas queimadas que retornam da descarga do forno, tendo como objetivo minimizar a agressão térmica sobre a estrutura do carro de grelha (Fonseca, 2003).

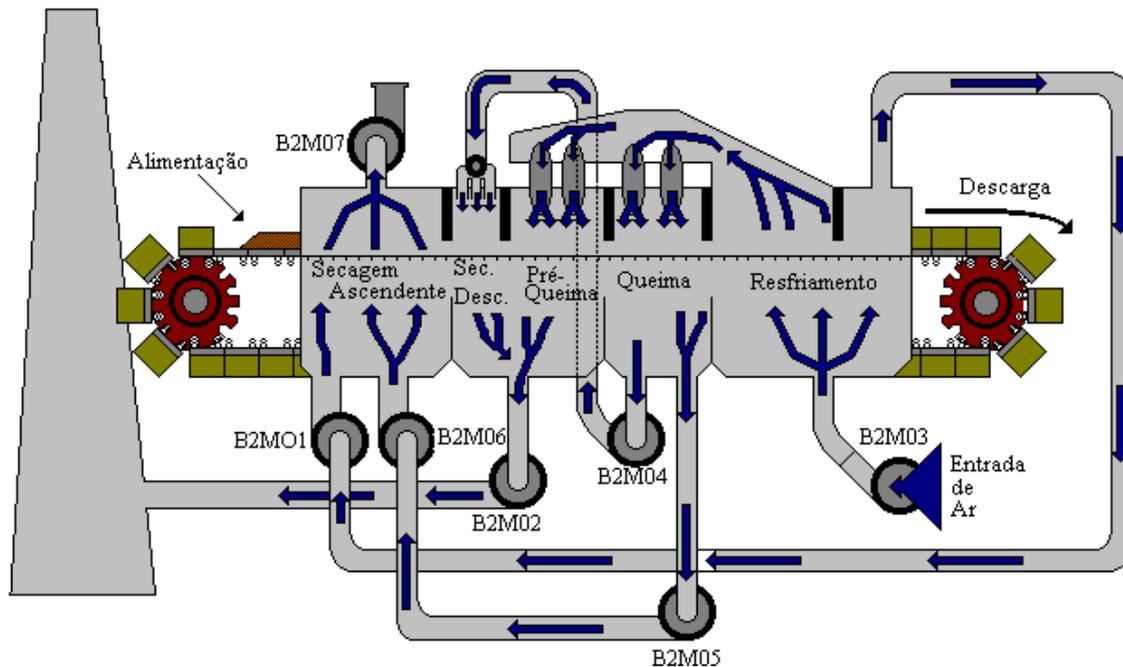


Figura III.6 – Esquema do Forno de Grelha Móvel (modificado de Gariglio e Klein, 1996 –  
*Apud* Fonseca, 2003)

Dentro do forno, as pelotas seguem para a etapa de secagem que consiste em evaporar a água contida no seu interior. O processo é dividido em três zonas de secagem dentro do forno, sendo a zona de secagem ascendente 1 e 2 e a zona de secagem descendente. Todas funcionam com uma circulação de ar quente que permite que a água seja retirada.

Em seguida, as pelotas são pré-aquecidas com fluxos de ar descendentes, a temperaturas entre 500 e 900 graus Celsius, por um período suficiente para evitar choque térmico. Tal procedimento é fundamental para o aquecimento homogêneo, pois, caso contrário, pode causar trincas, fissuras ou, em casos extremos, desintegração da pelota.

A fase de queima, na qual as pelotas são submetidas a fluxos de ar descendentes, com altas temperaturas (entre 1000 e 1300 graus Celsius), é a responsável por conferir as propriedades mecânicas e metalúrgicas adequadas para sua utilização nos reatores siderúrgicos. Desta forma, parte do calor envolvido na queima é utilizado nas reações químicas entre os constituintes do minério e os aditivos e aglomerantes adicionados. São essas reações que permitem à pelota adquirir as características desejadas, como, por exemplo, maior resistência física e mecânica.

Posteriormente, há o resfriamento. Esta etapa é considerada crítica para o processo, pois diversos testes mostraram que, quando resfriada rapidamente, a pelota pode até desintegrar (Meyer, 1980). Então, as pelotas queimadas são resfriadas pela injeção ascendente de ar, removendo o calor retido até atingir temperaturas em torno de 300 graus Celsius.

### **III.1.5 Controle de qualidade das pelotas**

A avaliação da qualidade das pelotas é realizada através de uma amostragem após seu resfriamento. Esta avaliação ocorre com o auxílio de ensaios laboratoriais padronizados por instituições regulamentadoras como a *International Standard Organization* (ISO) e se baseia em análises químicas, testes físicos e metalúrgicos.

Análises químicas buscam o controle do teor de ferro na pelota e determinar os percentuais dos principais elementos químicos e alguns compostos que formam a estrutura das pelotas, tais como: FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, P, S, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, dentre outros. A partir dos teores destes compostos é possível prever o comportamento físico e metalúrgico de uma carga.

Os testes metalúrgicos objetivam prever o comportamento das pelotas durante as operações de redução nos reatores metalúrgicos (alto-forno e forno de redução direta).

Os testes físicos possibilitam a avaliação à resposta potencial das pelotas durante a estocagem, manuseio e transporte, através da granulometria, abrasão e compressão. Entretanto, apesar destes testes serem padronizados, os parâmetros medidos, associados à resistência física das pelotas, não avaliam a susceptibilidade destas à degradação pois não representam corretamente as condições de carregamento às quais elas estão sujeitas, durante o manuseio, desde a produção até o seu carregamento nos fornos de redução. O resultado é limitado pela previsibilidade da degradação de pelotas a partir dessas informações, uma vez que estes testes não conseguem prever qual a quantidade de finos que será gerada no processo de manuseio e transporte das pelotas (Tavares *et al.*, 2015).

Além dos testes físicos, Pena (2010) afirma que os testes metalúrgicos normalizados também não são capazes de estabelecer relação com resultados industriais.

### III.2 Fragmentação das pelotas

A fragmentação de uma partícula ocorre quando há propagação de trincas internas, existentes na sua microestrutura, devido a aplicação de esforços maiores que sua resistência. A redução no tamanho de partículas é de vital importância para muitos processos minerais. Nos equipamentos de cominuição, as partículas são cominuídas simultaneamente. Os produtos da quebra de uma partícula são misturados àqueles de outras, não sendo possível distingui-los na massa fragmentada. Com o objetivo de se obter informações relevantes a respeito do comportamento de materiais, estudos são realizados analisando separadamente como materiais e partículas são fragmentados (Tavares, 1997). Dessa forma, estes estudos auxiliam o presente trabalho, pois, por mais que o foco seja evitar a degradação das partículas (pelotas), deve-se entender como o fenômeno de fragmentação ocorre para poder preveni-lo.

As características relevantes do material para a quebra de partículas são a resistência à fratura e o comportamento na deformação. A resistência à fratura pode ser definida como a energia necessária para provocar a ruptura na partícula, enquanto que o comportamento na deformação pode ser descrito como elástico ou inelástico. As condições de carregamento podem ser classificadas pelos tipos de esforços a que as partículas são submetidas (normais ou tangenciais), números de pontos de contato, intensidade e taxa de carregamento. O completo entendimento das interações das diversas variáveis que influenciam a fragmentação, geralmente, só é possível a partir da análise da quebra mais elementar de um microevento, que é uma única partícula submetida a tensões (Tavares, 1997).

Durante a quebra de um micro evento, são identificados dois principais tipos de cominuição. No mais intenso, a partícula é submetida a forças compressivas, resultando numa fratura desintegrativa (fragmentação volumétrica). No menos intenso, chamado abrasão ou atrição, a partícula sofre gradual perda de superfície, mantendo a “partícula mãe” praticamente intacta, geralmente mais arredondada, devido a concentração de tensão de superfície sobre cantos e saliências, que conduz à fragmentação por abrasão (Tavares, 2004).

Na siderurgia, tanto as pelotas, como os granulados e sinter, são manipulados na forma particulada. Apesar de ser um material resultante de um processo industrial, as pelotas apresentam grande variabilidade na sua distribuição de tamanhos, microestrutura e forma, alterando seu comportamento mecânico. Sendo assim, estudar sua fragmentação é conveniente no sentido de propor uma análise individual da partícula quando submetida a diferentes energias mecânicas, esforços e impactos.

### III.2.1 Mecanismos de fragmentação de partículas

A deformação e fratura dos minérios durante sua cominuição é um importante passo na análise do comportamento mecânico das partículas. Com base em análises da fratura das partículas minerais e a partir de um estudo avançado dos conceitos de mecânica da fratura, é possível estimar o comportamento mecânicos das partículas a partir dos mecanismos de fragmentação que elas são submetidas.

Como mencionado na seção III.2, partículas minerais são fraturadas como resultado da ação de esforços. Estes esforços podem ser genericamente classificados como normais ou tangenciais. Esforços normais podem ser de compressão ou de tração, enquanto os tangenciais correspondem aos de cisalhamento (Tavares, 1997). Os esforços, ao serem aplicados no sólido, fazem com que ele sofra uma deformação. Essa deformação pode ser classificada em dois tipos, sendo: deformações elásticas e deformações não-elásticas (inelásticas). Deformações elásticas e inelásticas são o meio que o sólido (e a sua estrutura interna) dispõe de armazenar ou dissipar, a energia mecânica aplicada sob a forma de esforços. Quando os esforços aumentam além de certo ponto, o sólido não é mais capaz de resistir os esforços e a ruptura ocorre (Tavares, 1997).

A deformação elástica é uma deformação que depende exclusivamente do esforço presente. Não existe, após essa deformação, a possibilidade do sólido se manter deformado, sendo mantida a conservação da energia durante a deformação. Já a deformação inelástica é um comportamento denominado dessa forma, pois considera a deformação permanente do material ou o tempo de permanência da deformação. Neste caso há perda de energia, uma vez que, a deformação consome energia e não é possível recuperá-la totalmente.

Em geral, materiais rochosos se deformam predominantemente de forma elástica até muito próximo do instante da ruptura. Em alguns casos, entretanto, rochas podem apresentar comportamento inelástico, caracterizando-os como elasto-plásticos (Tavares, 2004). Segundo a teoria de Griffith é possível controlar algumas variáveis para que se facilite a ruptura da partícula, como por exemplo, a presença de água e agentes transoativos.

O estudo de materiais particulados envolve uma abordagem um pouco diferente das usadas na mecânica da fratura e resistência dos materiais, uma vez que, as partículas não possuem estruturas internas regulares, dificultando o conhecimento das distribuições internas dos esforços. Em processos industriais, de cominuição, as partículas são fraturadas, principalmente, por compressão gerada pelos impactos, que alteram a estrutura interna da partícula, provocando

fragmentação e/ou deformações inelásticas. Existe uma região de alta densidade de energia de deformação da partícula onde, abaixo desta, começam a surgir esforços de tração que se estendem até o polo oposto de aplicação da carga. É nesse ponto, ou em uma trinca já existente, que se inicia uma ou mais fraturas da partícula (King, 2001).

Segundo Cunha (2014), a quebra de partículas pode ser definida como o processo pelo qual a energia aplicada em um evento provoca a perda de massa em uma partícula original (ou mãe) gerando também partículas “filhas” de menor massa. O processo de fragmentação das partículas pode ocorrer de duas maneiras distintas: pela quebra interparticular e pela quebra de partículas individuais (Evertsson e Bearman, 1997). A fratura interparticular ocorre quando uma partícula apresenta por todo o seu entorno diversos pontos de contato com outras partículas vizinhas. Essa situação é evidenciada quando ocorre a compressão de um leito de partículas. Nem todas as partículas envolvidas nesse modo de quebra sofrem fratura, mas todas que alcançam o limite de tensão crítica são fragmentadas. No entanto, as propriedades fundamentais do processo de fratura podem ser estudadas de forma mais eficiente por experimentos bem controlados em partículas individuais. Os mecanismos de quebra de partículas individuais podem ainda ser classificados de acordo com o número de pontos de contato com a partícula, com a velocidade e com a forma como o carregamento é executado. Três tipos de carregamento podem ser utilizados nesses estudos (Figura III.7): carregamento compressivo lento e controlado (uniaxial), impacto duplo e impacto individual (Cunha, 2014).

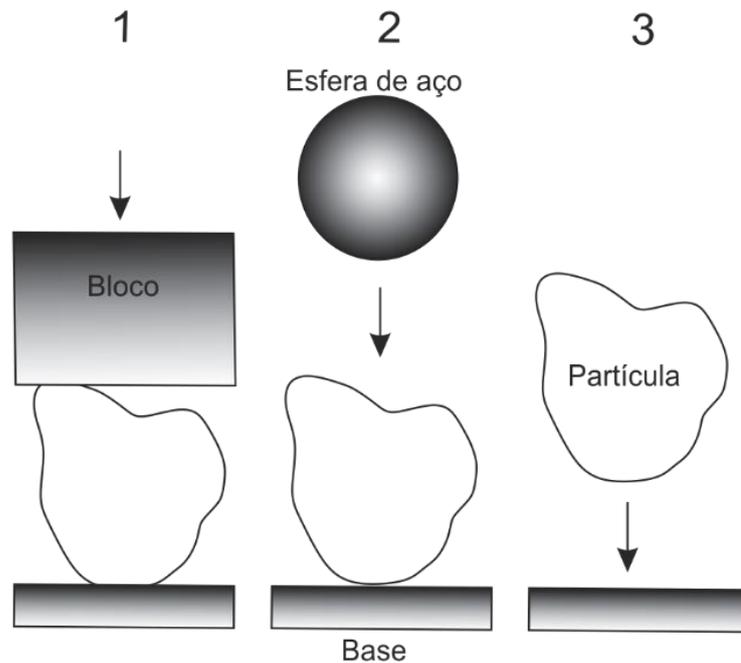


Figura III.7 – Diferentes modos de carregamento na fragmentação de partículas individuais, onde 1 representa a compressão lenta, 2 o impacto duplo e 3 o impacto simples (Cunha, 2014)

A energia de fratura da partícula, em geral, é maior do que a energia envolvida na propagação da trinca, de forma que a energia residual aparece como energia cinética de partículas secundárias, geradas na fragmentação primária que podem sofrer novas fragmentações (Tavares, 2007).

Segundo Tavares (2005), a fragmentação de uma partícula depende da direção e intensidade dos esforços aplicados. Desta forma, há a fratura volumétrica e a fratura superficial, conforme exemplificado na Figura III.8. A fratura volumétrica ocorre quando a energia aplicada à partícula é de grande intensidade, provocando a fragmentação total (estilhaçamento), gerando fragmentos de tamanhos variados, ou quando a energia aplicada é baixa, porém superior à energia de fratura do material (clivagem), gerando uma fração relativamente grossa e outra fração de partículas mais finas. A fratura superficial ocorrerá quando a força normal aplicada for insuficiente para causar ruptura e/ou o cisalhamento ocorrer na superfície, gerando pequena redução no tamanho da partícula original (lascamento ou abrasão).

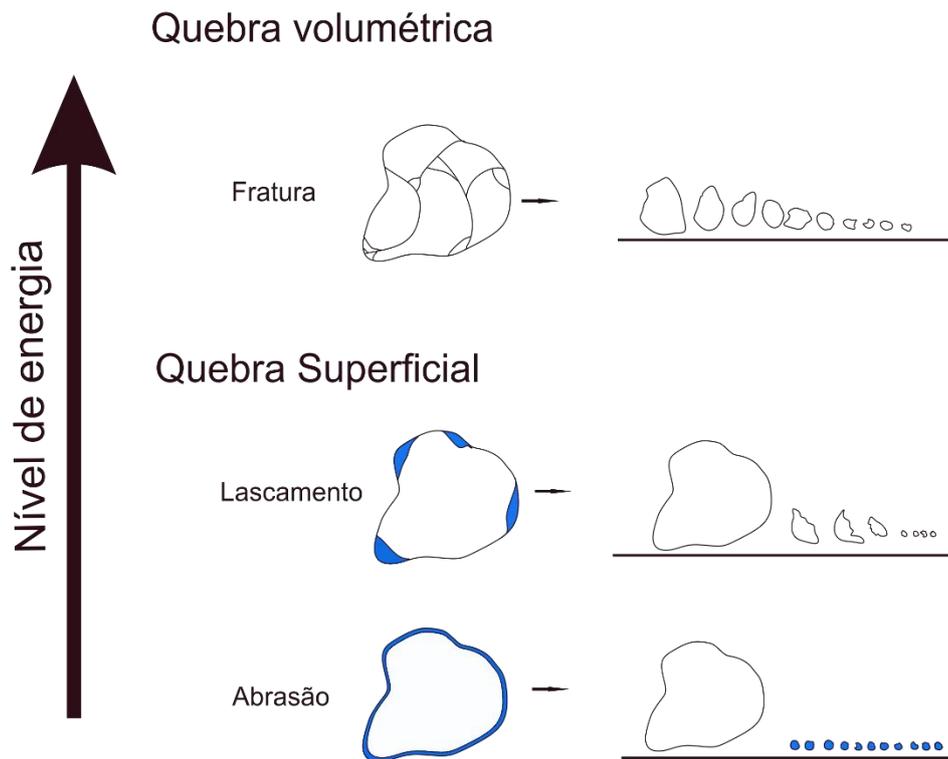


Figura III.8 – Diferentes mecanismos de quebra na degradação de minérios de acordo com o nível de energia de impacto aplicada (Cunha, 2014)

### III.2.2 Fragmentação volumétrica

A partir do instante inicial do contato das ferramentas (peso em queda livre, bigorna), a partícula é tensionada e há energia armazenada como energia de deformação na partícula. A pequena quantidade de deformação plástica no e ao redor dos pontos de carga não são geralmente considerados significativos para a maioria dos materiais. A deformação da partícula é geralmente considerada pelo modelo de Hertz durante o período inicial. Após certo ponto, uma série de fissuras, como danos, começam a se acumular dentro da partícula e quando os critérios para a fratura são satisfeitos, um trinca se propaga instável e cada vez mais rápido, podendo ou não ramificar. Quando a(s) trinca(s) emerge da partícula, várias partículas filhas são criadas. O número e tamanho de partículas filhas depende do tamanho e localização da trinca inicial, da

microestrutura do material, e do grau de ramificação da trinca. A iniciação do crescimento da trinca é governado pelo critério de Griffith, mas as técnicas de fratura mecânica convencionais não podem ser usadas de forma quantitativa, como já mencionado, por causa da dificuldade de se calcular o campo de tensões no interior de uma partícula irregular. A mecânica da fratura determina que se a trinca se propaga de forma instável, a taxa de liberação de energia deve ser maior do que a resistência à ruptura, que é cerca de duas vezes a energia de fratura específica da superfície do material (Tavares, 2004). A característica essencial deste modelo de fratura de partículas é que a energia necessária para conduzir a trinca vem inteiramente da energia de deformação armazenada, que está disponível no início da trinca e é chamada de energia de fratura. Esta ideia baseia-se na observação de que nenhuma outra fonte de energia está disponível para fornecer uma taxa necessária de energia durante o crescimento da trinca, o que é, geralmente, várias ordens de magnitude maior do que a taxa a qual a energia é entregue à partícula durante o carregamento.

A consequência deste modelo é que a energia de fratura, armazenada pela partícula, deve ser, pelo menos, tão grande como a energia total que é dissipada pelo crescimento da trinca. Em geral, a energia de fratura da partícula irá exceder a energia necessária para propagar a trinca significativamente, e a energia não utilizada é dissipada após a ruptura (principalmente como energia cinética dos fragmentos, que, por sua vez, pode resultar em maior quebra, dependendo da configuração física da partícula e do modo de carregamento.

O processo de fratura de uma partícula não termina após a primeira quebra em uma trinca, porque a energia cinética ainda pode estar disponível, a partir das ferramentas utilizadas para aplicar as tensões (pesos) ou a partir do movimento dos fragmentos. Esta energia remanescente deve ser dissipada durante a segunda etapa do processo, o que resulta na fratura secundária e, possivelmente, várias outras fases de fratura sequencial.

Sendo assim, a fratura volumétrica corresponde ao estilhaçamento e à clivagem, como pode ser observado nas Figuras III.9 e III.10, respectivamente.

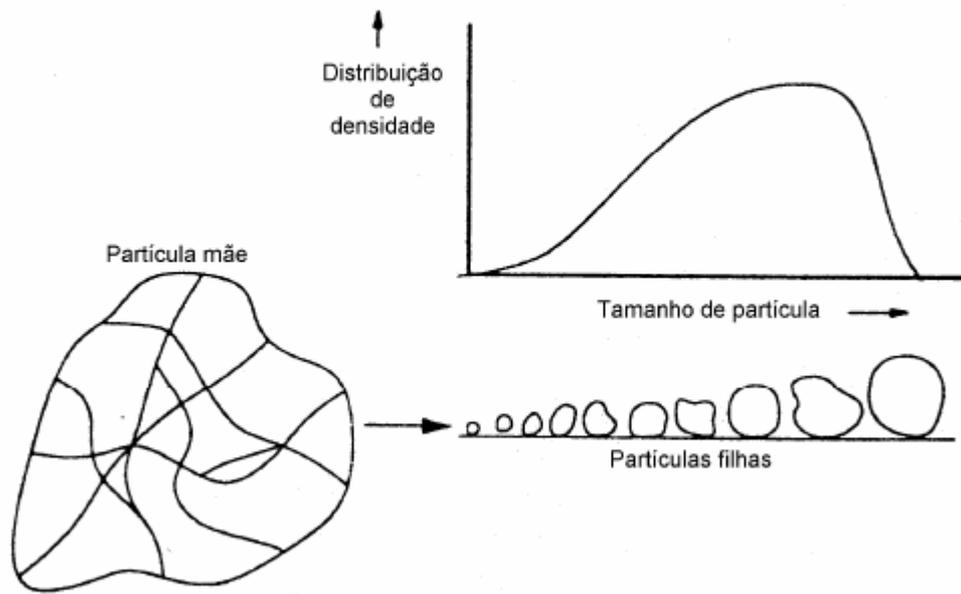


Figura III.9 – Mecanismo de fragmentação de partículas – Fratura por Estilhaçamento (modificado de King, 2001)

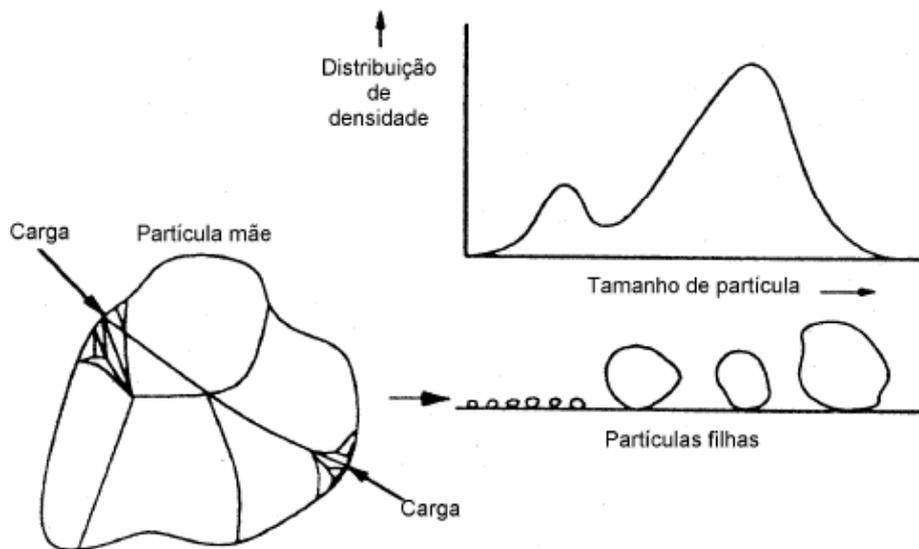


Figura III.10 – Mecanismo de fragmentação de partículas – Fratura por Clivagem (modificado de King, 2001)

### III.2.3 Fragmentação superficial

A fratura superficial, seja ela correspondente à abrasão (Figura III.11) ou ao lascamento (Figura III.8), caracteriza-se pela aplicação de esforços normais insuficientes para ruptura ou pela aplicação de esforços cisalhantes na superfície da partícula, causando quebra superficial. O resultado é uma redução muito limitada do tamanho original da partícula, acompanhada da geração de um grande número de partículas finas, como pode ser observado na Figura III.11. A diferença de abrasão e lascamento é pelo tamanho dos menores fragmentos gerados. Na abrasão, esses fragmentos são apenas pó, enquanto que no lascamento observa-se pequenas lascas, além de certa quantidade de pó.

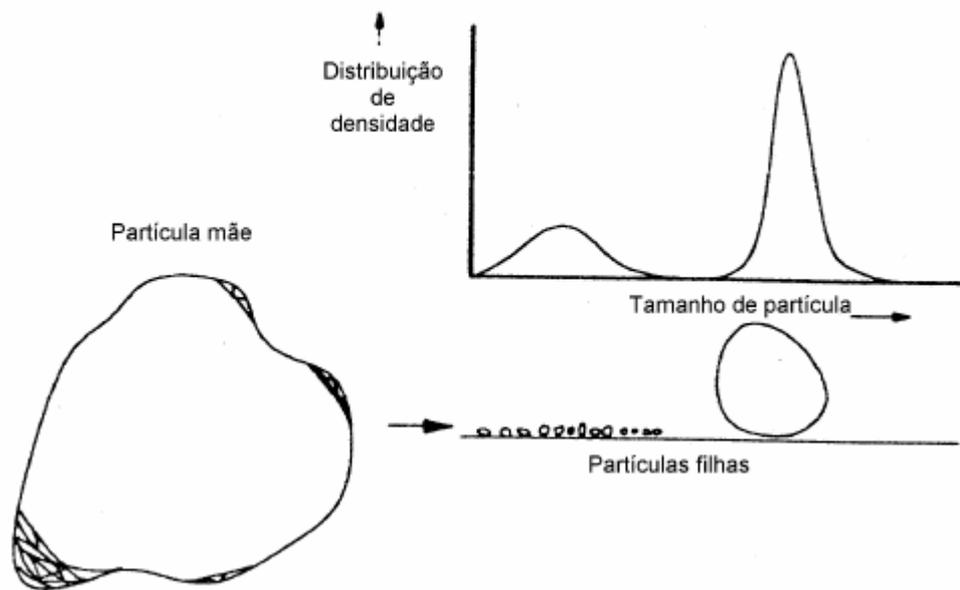


Figura III.11 – Mecanismo de fragmentação de partículas – Fratura por Abrasão (modificado de King, 2001)

### III.3 Degradação de pelotas de minério de ferro

A degradação de pelotas de minério de ferro é decorrente do desgaste mecânico progressivo, durante seu manuseio e transporte, por intermédio de equipamentos que se encontram em todo o percurso de manuseio até a sua chegada aos usuários finais. As pelotas são sujeitas a diferentes esforços que, dependendo de diversos fatores, durante sua fabricação, poderá levá-las à fragmentação. Estes esforços estão ligados às operações de transporte em correias, chutes de transferência, carregamento de navios, dentre outros.

O envelhecimento das pelotas é outro agente que fragiliza sua estrutura, devido à ação das intempéries, como chuva e umidade do ar, durante sua estocagem e transporte. Fonseca (2004) e Martins (2013), comprovam a existência de ciclos de envelhecimento, influenciados pela umidade (água da chuva e/ou água utilizada na aspersão para minimizar a emissão de material particulado).

A quantidade de finos gerada pela degradação depende do tipo e intensidade de esforços que as pelotas são submetidas durante o manuseio e transporte. Porém, quanto maior o número de defeitos e tensões residuais presentes na estrutura das pelotas, mais suscetíveis elas serão à fragmentação. A presença destes efeitos está associada ao processo produtivo das pelotas. Segundo diversos autores, a perda de resistência mecânica das pelotas está relacionada com a distribuição granulométrica do *pellet feed* (Meyer, 1980; Fonseca, 2004), o teor de carvão na pelota verde (Meyer, 1980; Fonseca *et al.*, 2009), a utilização de aglomerantes orgânicos e/ou inorgânicos (Meyer, 1980; Abouzeid *et al.*, 1985), o teor de CaO e MgO na pelota verde (Meyer, 1980; Abouzeid *et al.*, 1985; Fan *et al.*, 2010), as características mineralógicas do minério de ferro (Meyer, 1980; Sá, 2004), as condições de queima das pelotas (Meyer, 1980; Wright, 1976), a distribuição granulométrica dos insumos utilizados (Costa, 2008; Boechat *et al.*, 2011).

O controle dessas variáveis durante o processo de fabricação irá colaborar para a melhoria da resistência mecânica das pelotas e, por conseguinte, da redução da degradação durante o manuseio e transporte.

Entretanto, além do controle da estrutura química e física das pelotas, pode-se minimizar a degradação destas através de modificações no sistema de manuseio e transporte a que serão submetidas. Assim, alguns importantes aspectos envolvidos na degradação de minérios e aglomerados são observados, com o objetivo de entender melhor os possíveis fatores que resultam na degradação das pelotas de minério de ferro.

Fagerberb & Sandberg (1973), Ooshima et al. (1981) e Goodwin e Ramos (1985), sugeriram a utilização de defletores ou degraus em chutes de transferência ou de espirais na alimentação de silos para diminuir a velocidade e altura de queda dos minérios, com objetivo de diminuir sua degradação.

Sahoo (2007) observou o comportamento mecânico dos materiais, com objetivo de qualificar alguns fatores importantes que influenciam na degradação. Além do tamanho de partícula e do tempo de envelhecimento, estudou o número de impactos e a altura total de queda, o amortecimento na presença prévia de finos, o tipo de superfície de impacto, a ordem que ocorrem os eventos de impacto e sua composição mineralógica.

#### **III.4 Modelagem da degradação**

Diversos modelos matemáticos de degradação de minérios foram desenvolvidos, em escala de laboratório, baseados em ensaios de compressão de partículas, tamboramento, queda livre, dentre outros (Teo e Waters, 1988; Weedon e Wilson, 2000; Sahoo, 2007). Foram desenvolvidos para fornecer subsídios para a indústria prever a proporção de finos gerados durante o manuseio e transporte dos minérios e aglomerados.

Entretanto, o presente trabalho se restringirá ao modelo de degradação de Tavares e Carvalho (2011) e na modificação proposta por Silveira (2012), pelo fato desse ter sido o único modelo que permite a descrição suficientemente detalhada do fenômeno, bem como o único já aplicado a pelotas de minério de ferro.

#### **III.5 Modelo de Degradação de Tavares e Carvalho (2011)**

Tavares e Carvalho (2008 e 2011) desenvolveram um modelo matemático que permite a previsão da degradação de granéis quando submetidos a impactos, como aqueles que ocorrem durante o manuseio. Esse modelo foi modificado e calibrado para a previsão da degradação de pelotas de minério de ferro, durante o seu manuseio e transporte, por Silveira (2012), e a principal modificação foi a distinção entre cacos e pelotas.

É importante ressaltar que, dentre todas as modificações propostas ao modelo adaptado, foi atribuído como observação adicional às restrições deste, que quando uma pelota sofre quebra,

esta deixa de existir e torna-se um caco, alterando sua característica de fragmentação, enquanto que o inverso não ocorre (Figura III.12).

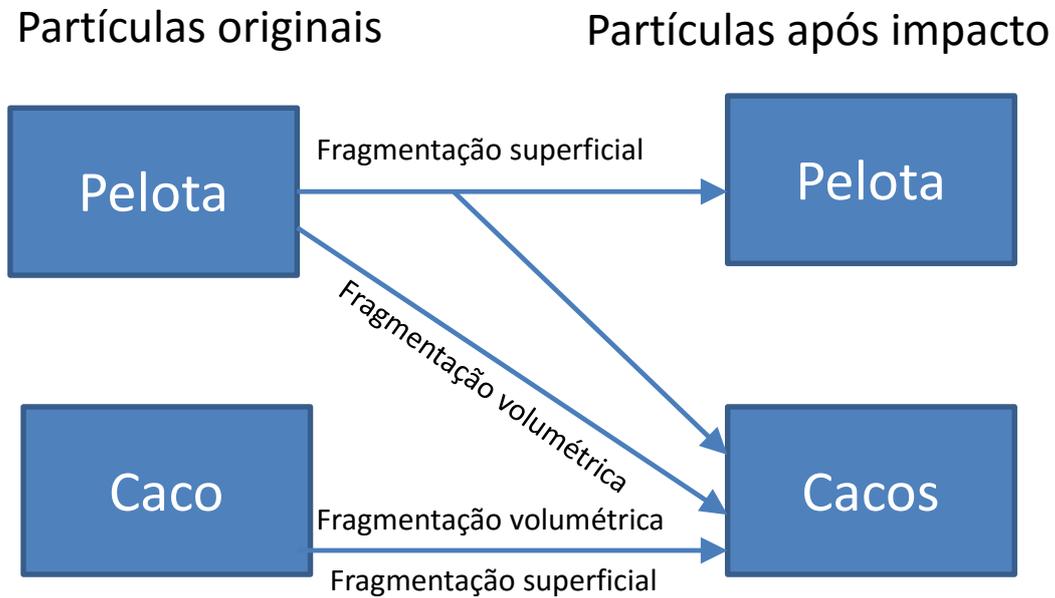


Figura III.12 – Esquema do modelo de degradação modificado por Silveira (2012)

Originalmente proposto com o objetivo de prever a degradação de minérios granulados durante o manuseio, o modelo visava discriminar, explicitamente, tanto as contribuições provenientes das características dos minérios quanto do processo de degradação mecânica. A estrutura básica do modelo é ilustrada na Figura III.13, que ilustra as diferentes contribuições do processo de manuseio e do material na degradação resultante.

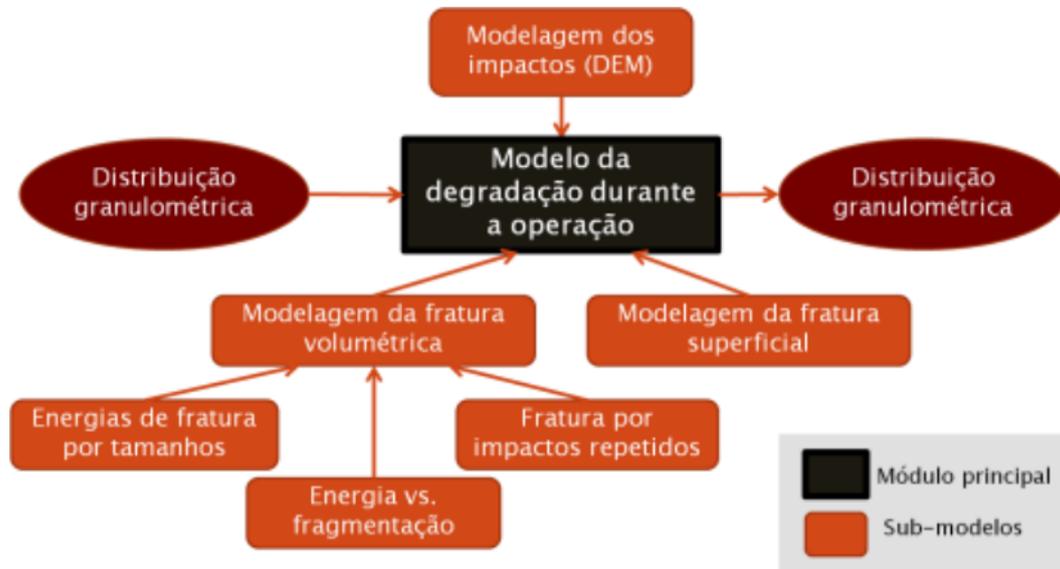


Figura III.13 – Estrutura do modelo matemático da degradação de Tavares e Carvalho (2011)

Após todas as adequações e observações realizadas a partir da versão original (Tavares e Carvalho, 2011) (Figura III.13), o modelo chegou à sua versão modificada, adaptada às pelotas de minério de ferro, como é demonstrado na Figura III.14.

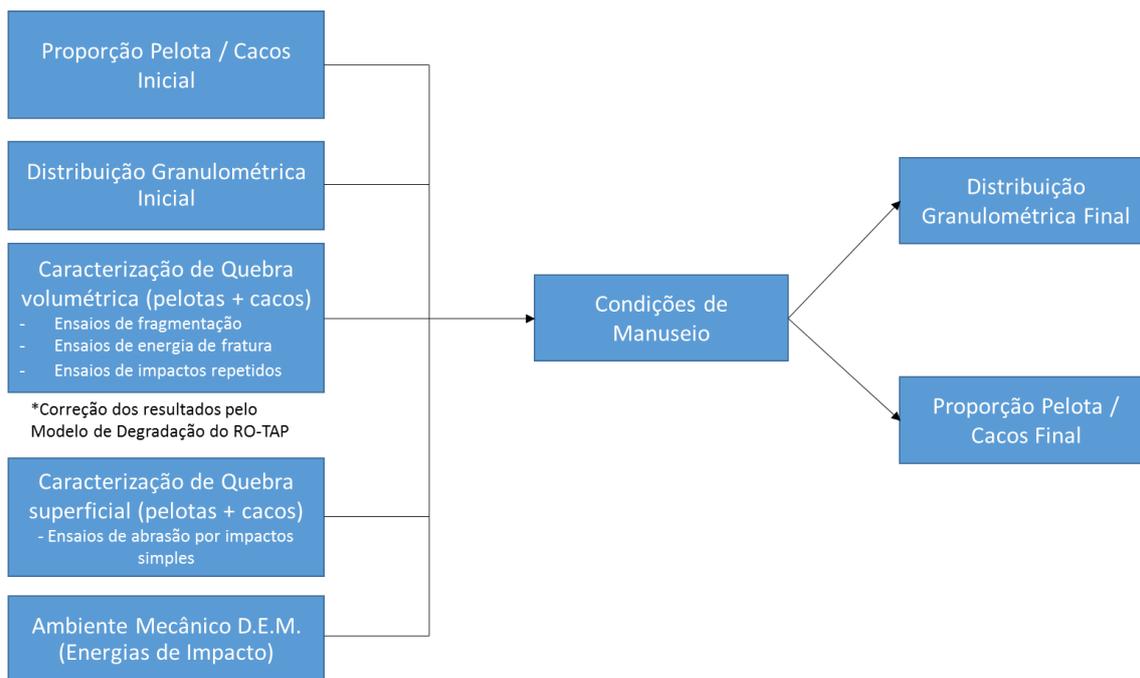


Figura III.14 – Diagrama esquemático da versão modificada do modelo de degradação durante o manuseio para pelotas de minério de ferro (adaptado de Silveira, 2012)

O modelo se caracteriza por distinguir os diferentes mecanismos de quebra envolvidos na degradação de minérios em função da magnitude da energia de impacto aplicada ao material, permitindo prever a proporção de partículas quebradas e a distribuição granulométrica resultante, em uma sequência qualquer de eventos de impacto.

Sabe-se que nem sempre uma partícula fratura após um impacto a uma determinada energia. Nesse caso, a superfície da partícula sofre uma pequena perda de massa (quebra superficial) e a partícula acumula dano na forma de uma ou mais trincas, ou na propagação daquelas já existentes. Dessa maneira, a partícula poderá vir a fraturar num próximo impacto de mais baixa energia. Essa degradação pode ser interpretada à luz de uma abordagem mecanicista, através do enfraquecimento progressivo da partícula, resultante dos impactos repetidos que ela sofre durante o seu processo de manuseio. O modelo utilizado baseia-se na combinação da mecânica do dano com a teoria de contatos elásticos de Hertz (Tavares e King, 2002) na descrição do impacto de uma partícula esférica. Como pode-se observar na Figura III.15, a aplicação do modelo é dada pela mudança do comportamento mecânico da partícula, representado por uma curva de forças versus deformação que varia como consequência de sucessivos impactos de mesma magnitude.

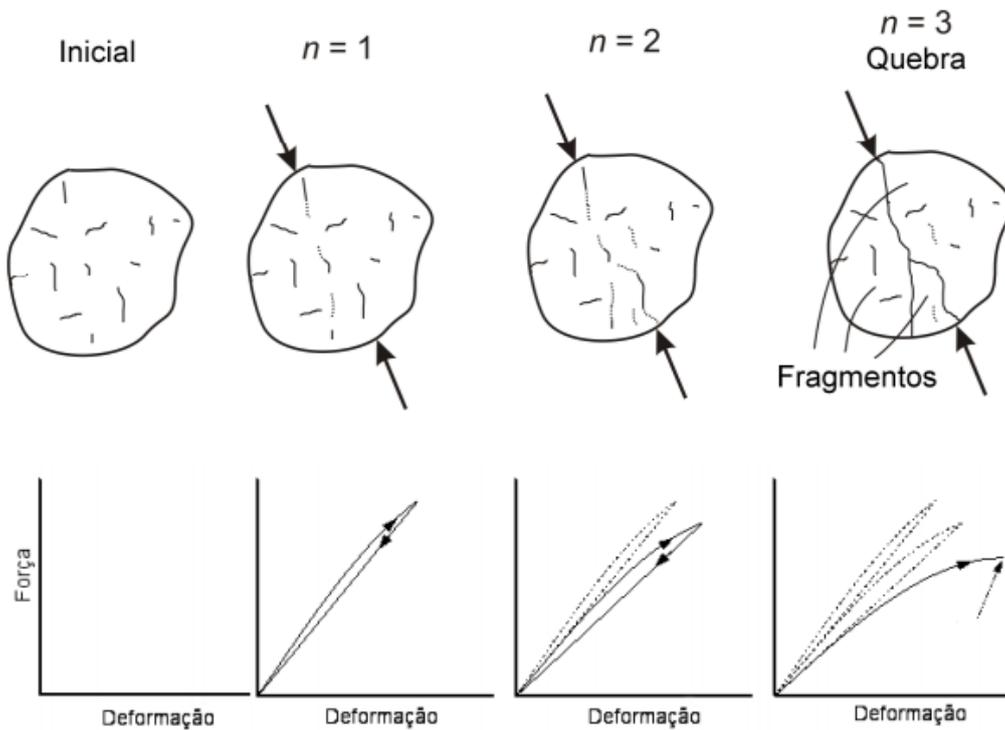


Figura III.15 – Efeito do enfraquecimento devido ao acúmulo de dano causado por impactos repetidos de mesma energia (Tavares, 2009)

Este modelo prevê como a rigidez do material varia à medida que sofre um impacto com uma energia insuficiente para fraturar a partícula. Por sua vez, esta energia de impacto é acumulada em forma de deformação permanente, que faz com que a rigidez diminua a cada impacto sofrido. Como o modelo presume que cada material possui uma constante de deformação ( $\alpha_c$ ), o dano acumulado pode ser descrito por meio da variação da razão entre a deformação ocasionada pelo impacto e a constante de deformação do material (Equação III.1):

$$D = \left(\frac{\alpha}{\alpha_c}\right)^\gamma \quad (\text{III.1})$$

onde D é o dano,  $\alpha$  é a deformação sofrida pelo material com impacto e  $\alpha_c$  é a constante de deformação do material.  $\gamma$  é um parâmetro que mede a susceptibilidade do material à fragmentação. Através dos resultados dos ensaios de laboratório, Silveira (2012) observa que o valor de  $\gamma$  varia com o tamanho do caco, porém não com o tamanho da pelota, adaptando o modelo inicial proposto.

O modelo também se baseia na descrição de probabilidade de fratura do material original, que pode ser obtida a partir de experimentos realizados na célula de carga de impacto do LTM COPPE/UFRJ.

Então, o modelo permite calcular como a distribuição de energias de fratura varia com o número de impactos de energia  $E_k$  (energia específica de impacto a que a pelota é submetida), resultando na distribuição de energias de fratura dada pelas Equações III.2 e III.3:

$$F_{n+1}(E) = \frac{[F_n [E/(1-D)] - F_n (E_k)]}{1 - F_n (E_k)} \quad (\text{III.2})$$

$$D = \left[ \frac{2\gamma (1-D)}{(2\gamma - 5D + 5)} \frac{E_k}{E} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad (\text{III.3})$$

sendo que  $F_n (E_k)$  é a proporção de partículas quebradas no n-ésimo impacto a partir de uma energia específica de impacto  $E_k$  e  $D$  é o dano acumulado na partícula. Vale ressaltar que a proporção de partículas quebradas é diferente para cacos e pelotas no modelo modificado. As equações não se apresentam na forma explícita, sendo necessário aplicar um método numérico para resolvê-las (Tavares e Carvalho, 2008).

O modelo simula a degradação considerando toda a distribuição de tamanhos do material através de um balanço de massas de uma faixa granulométrica individual para cada impacto de partículas, pela Equação III.4:

$$W_{i,n+1} = W_{i,n} [1 - F_{i,n} (eE_{k,n})] (1 - k_j) + \sum_{j=1}^i w_{j,n} [F_{j,n} (eE_{k,n}) b_{ij} + k_j [1 - F_{j,n} (eE_{k,n})] a_{ij}] \quad (\text{III.4})$$

sendo que  $W_{i,n+1}$  e  $W_{i,n}$  são as frações mássicas do material contido na classe de tamanhos  $i$  antes e depois do n-ésimo impacto,  $e$  é a fração da energia de colisão que é absorvida por uma partícula individual durante o evento de manuseio.  $F_{i,n}(eE_k)$  é a probabilidade que uma partícula contida na classe de tamanhos  $i$  irá quebrar quando absorver uma energia  $eE_k$  de um impacto. O termo  $k_i$  é

a fração de produtos gerados por abrasão das partículas contidas na classe de tamanhos  $i$ , a qual é presumida como independente da altura de queda, e  $a_{i,j}$  é função quebra de abrasão (fragmentação superficial), dada na sua forma cumulativa pela Equação III.5:

$$A_{i,j} = A_i = \left(\frac{d_i}{d_A}\right)^\lambda \quad (\text{III.5})$$

sendo  $d_A$  e  $\lambda$  parâmetros característicos dos materiais.

É importante citar que o termo  $k_i$  se distingue em sua aplicação para pelotas e cacos.

No modelo, a energia cinética de queda do  $n$ -ésimo impacto é dada pela Equação III.6

$$E_{k,n} = m_p g h_n \quad (\text{III.6})$$

sendo  $m_p$  a massa da partícula,  $g$  a aceleração da gravidade e  $h$  a altura de queda.

O efeito do tipo da superfície de impacto é considerado pela fração de energia de impacto que é absorvida pela partícula na queda. Ela pode ser estimada por meio da expressão (Equação III.7), baseada na teoria de contatos de elásticos de Hertz (Tavares e Carvalho, 2008)

$$e = \left(\frac{k_{superfície}}{k_{superfície} + k}\right) \left(\frac{k_{aço} + k}{k_{aço}}\right) \quad (\text{III.7})$$

sendo  $k_{aço}$  a rigidez do aço (aproximadamente 230 GPa),  $k_{superfície}$  a rigidez da superfície e  $k$  a rigidez da partícula. Esse parâmetro permite simular impactos de partículas contra uma placa de qualquer material ou contra outras partículas. No caso de um leito de partículas do mesmo material, a Equação 3.7 se torna (Equação III.8), pois o  $k_{superfície}$  se torna o  $k$  da partícula:

$$e = 0,5 \frac{(k_{a\zeta o} + k)}{k_{a\zeta o}} \quad (\text{III.8})$$

A função quebra  $b_{ij}$  é calculada a partir do parâmetro  $t_{10}$ , o qual é calculado pela relação (Tavares, 2009) (Equação III.9):

$$t_{10i} = A \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b'eE_{k,n}}{E_{50bi}}\right) \right] \quad (\text{III.9})$$

sendo  $E_{k,n}$  a energia de impacto e  $E_{50bi}$  a energia de fratura mediana das partículas que quebraram, da classe de tamanho  $i$ , sendo calculada pela Equação III.10 (Tavares, 2009):

$$E_{50bi} = F_{i,n}^{-1} \left[ \frac{1}{2} F_{i,n}(E) \right] \quad (\text{III.10})$$

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

A distribuição inicial de energias de fratura de partícula pode ser normalmente bem descrita usando a distribuição log-normal (Tavares e King, 1998), dada pela Equação III.11:

$$P(E_m) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\ln E_m - \ln E_{m,50}}{\sqrt{2\sigma_E^2}} \right) \right] \quad (\text{III.11})$$

Após cada impacto, a distribuição de energia de fratura, específica em relação à massa das partículas contidas em cada classe de tamanho  $i$  deve ser modificada, uma vez que algumas partículas que permaneceram íntegras podem ter sido enfraquecidas. Então, os fragmentos resultantes da quebra de partículas mais grossas podem ter passado para este tamanho  $i$ . A distribuição de energia de fratura das partículas contidas na classe de tamanhos  $i$ , após evento de impacto  $n$  é dada pela Equação III.12:

$$F_{i,n+1}(E) = F_{i,n+1}^*(E)w_{i,n} [1 - F_{i,n}(E_{k,n})](1 - k_i) + F_{i,0}(E) \sum_j^i w_{j,n} [F_{j,n}(E_{k,n})b_{ij} + [1 - F_{j,n}(E_{k,n})]k_j a_i] \quad (\text{III.12})$$

onde  $F_{i,n+1}^*(E)$  é a distribuição de energias das partículas que sofrem dano (recebem impacto), mas não fraturam, e  $F_{i,0}$  é a distribuição de energias das partículas originais (provenientes de caracterização em laboratório). Entretanto, a adaptação do modelo atribui duas distribuições de energia de fratura distintas, uma para cacos e outra para pelotas.

Com isso, de acordo com Silveira (2012), a equação original do modelo de Tavares e Carvalho (2011) (Equação 3.4) se transforma na Equação III.13

$$w_{i,n+1} = \left\{ w_{i,n} [1 - F_{i,n}(eE_{k,n})] (1 - k_i(E_{k,n})) + \sum_{j=1}^i w_{j,n} [F_{j,n}(eE_{k,n})b_{ij}(eE_{k,n}) + k_j(E_{k,n})[1 - F_{j,n}(eE_{k,n})]a_{i,j}] \right\} \text{pelotas} + \left\{ w_{i,n} [1 - F_{i,n}(eE_{k,n})] (1 - k_i(E_{k,n})) + \sum_{j=1}^i w_{j,n} [F_{j,n}(eE_{k,n})b_{ij}(eE_{k,n}) + k_j(E_{k,n})[1 - F_{j,n}(eE_{k,n})]a_{i,j}] \right\} \text{cacos} \quad (\text{III.13})$$

na qual, assim como na Equação 3.4,  $w_{i,n}$  e  $w_{i,n+1}$  são a fração retida do material, pelota ou caco, contido na classe de tamanho  $i$  antes e depois do  $n$ -ésimo impacto,  $e$  é a fração da energia de impacto absorvida pelas pelotas, individualmente, durante o evento de colisão e  $F_{i,n}(eE_k)$  é a probabilidade de que uma pelota ou caco pertencente à classe de tamanho  $i$  irá quebrar quando absorver uma energia  $eE_k$  de um impacto.

## **IV. METODOLOGIA**

O presente trabalho caracterizou cinco diferentes tipos de pelotas queimadas, comerciais, de minério de ferro. Nem todas foram produzidas pela mesma empresa, sendo necessário manter a confidencialidade dos produtores. Sendo assim, as pelotas foram identificadas como amostras A, B, C, D e E.

Inicialmente são apresentadas as metodologias dos ensaios da caracterização química, como a composição química e mineralógica das amostras. Posteriormente, são detalhadas as metodologias dos ensaios de caracterização física, bem como da calibração do modelo de degradação de minérios de Tavares e Carvalho (2011), modificado por Silveira (2012), onde são obtidos dados de quebra de pelotas individuais, suscetibilidade à quebra por impactos repetidos e à fratura superficial. A metodologia não é trivial, porém, necessária para ajustes dos modelos, imprescindível para simulação e comparação com o resultado do ensaio de transferência (simulação de manuseio em laboratório).

A seguir, são apresentados os ensaios realizados na caracterização das pelotas.

### **IV.1 Análise Química**

A análise química foi realizada no espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva da marca Shimadzu Co, utilizando a técnica de fluorescência de raios X, que é baseada na medida das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos químicos correspondentes da amostra, quando devidamente excitada. Dessa forma, é possível identificar os elementos e as suas respectivas quantidades nas amostras das pelotas estudadas.

### **IV.2 Análise Mineralógica**

As análises mineralógicas foram feitas a partir da contagem de grãos em microscópio ótico.

As análises microscópicas foram realizadas em Microscópio Óptico Zeiss modelo Imager M2m (Figura IV.1) com auxílio do software de análise de imagens AxioVision 4.8. Toda a caracterização mineralógica mostrou que o material estava dentro da especificação padrão para produção de pelotas tipo redução direta.



Figura IV.1 – Microscópio Óptico com software de análise de imagens acoplado onde foram obtidas imagens da microestrutura das pelotas

### IV.3 Microdureza

O ensaio de microdureza é muito utilizado para avaliar a resistência à deformação plástica (indentação) de materiais industriais. Os testes realizados em pelotas de minério de ferro foram feitos visando analisar tal resistência de maneira a contribuir para a caracterização das mesmas.

A escala de dureza utilizada nos testes em pelotas foi a Dureza Vickers (HV). Tal escala e teste são conhecidos por sua correlação com a resistência a tração na medição de materiais metálicos e por não exigir que as amostras tenham formas especiais.

O equipamento utilizado para realização do ensaio foi o microdurômetro Shimadzu DUH-211 Dynamic Ultra Micro Hardness Tester para análise da área ensaiada. Para perfuração da amostra foi utilizado um Indentador Berkovich com ângulo de ponta de  $115^\circ$  (feito de diamante). Nas condições operacionais, utilizou-se uma carga de 1000 mN (metade da carga máxima) e uma velocidade de carregamento de 35,035 mN/s.

Inicialmente, a amostra foi analisada através de um microscópio óptico em diferentes aumentos (10x e 50x), visto a necessidade de avaliar as melhores regiões do centro e da borda da amostra (regiões com poucos poros) para a realização das indentações. A partir disso, em cada amostra, foram feitas 10 indentações, sendo 5 na borda e 5 no centro da amostra. Por meio de análise de imagens (Figura IV.2) foi possível o acompanhamento da curva “força x profundidade de indentação”, onde avalia-se o comportamento do carregamento aplicado. Após a indentação, novamente a imagem foi analisada no microscópio óptico. No entanto, agora, com o intuito de

medir o comprimento da cavidade proveniente da indentação. Tal medida é necessária, uma vez que, é necessário calcular a área da cavidade para se obter a Dureza Vickers, de acordo com as Equações IV.1 e IV.2:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2 * F * \sin 136/2}{d^2} = 1,8544 * \frac{F}{d^2} \quad (IV.1)$$

onde

$$d = \frac{d_h + d_v}{2} \quad (IV.2)$$

sendo HV a Dureza Vickers, medida em HV, F a força aplicada, medida em kgf e A a área da cavidade formada no material, medida em mm<sup>2</sup>, d<sub>h</sub> e d<sub>v</sub> são os valores das diagonais da cavidade, medidos em mm.

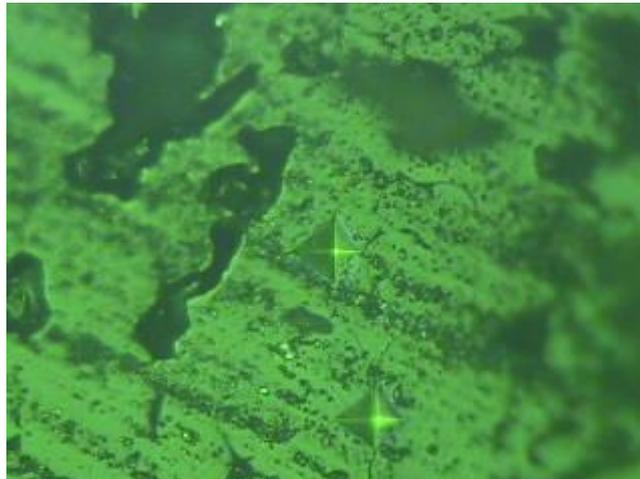


Figura IV.2 – Imagem do ensaio de microdureza realizado na borda da pelota E

#### IV.4 Picnometria a Hélio

Para determinar a massa específica real da partícula, foi realizado o ensaio de Picnometria a Hélio utilizando os seguintes materiais:

- 1 amostras de cada uma das 5 diferentes pelotas de minério de ferro pulverizadas
- Balança analítica
- Picnômetro a hélio para a medição da densidade do material analisado

Cada amostra do ensaio foi preparada com uma mistura de vinte pelotas do mesmo tipo, a fim de minimizar o desvio padrão da análise. Para realização do ensaio, todas as pelotas foram pulverizadas a uma granulometria de 80% passante em 0,075 mm, sendo quarteadas apenas 20 gramas do total (pesados em balança analítica) para a medição da massa específica.

O Picnômetro a Hélio determina o volume verdadeiro de um sólido, mesmo que poroso, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido (Moura e Figueiredo, 2002). Utiliza-se este gás por ser inerte e por causa do pequeno tamanho de seus átomos, devido a fácil penetração nos poros das amostras, permitindo determinar o volume do sólido com mais rigor e sem reagir com a amostra. O picnômetro é constituído por duas câmaras de volumes conhecidos: a câmara onde se coloca a amostra e a câmara de expansão, ligadas por uma válvula.

O processo de medida funciona com o sistema, inicialmente, a pressão atmosférica. Fechando a válvula de expansão, tem-se o isolamento da câmara de expansão e o aumento da pressão na câmara da amostra até uma pressão P1 (cerca de 17 psig). Em seguida, a válvula é aberta e há uma conseqüente redução da pressão para P2. Admitindo um comportamento ideal do hélio, o volume do sólido pode ser calculado a partir da Equação IV.3 (Moura e Figueiredo, 2002):

$$V_s = V_a - \frac{V_e}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \quad (\text{IV.3})$$

sendo

$V_a$  – Volume da câmara da amostra

$V_e$  – Volume da câmara de expansão

$V_s$  – Volume do sólido

Então, a massa específica da amostra é calculada através da massa medida no início do teste e do volume de sólido calculado pelo equipamento.

## IV.5 Densidade Hidrostática

A medição da porosidade realizada pelo método de densidade hidrostática utilizado pelo LTM, tem sua idéia baseada no Princípio de Arquimedes, onde há medição da força de impulsão exercida por líquidos sobre os corpos nele imersos. Os materiais usados foram:

- Cinco amostras de 20 pelotas de minério de ferro na faixa de tamanho de 12,5 x 9 mm
- Balança com precisão de 0,01 g (Figura IV.3)
- Medidor de densidade que permite a pesagem das partículas individualmente quando submersas em água (Figura IV.3)
- Frasco com água para armazenamento das pelotas
- Fogareiro para aquecimento da água
- Frasco com água a temperatura ambiente.



Figura IV.3 – Balança e medidor de densidade utilizados no ensaio de densidade hidrostática

Inicialmente, as partículas foram selecionadas de maneira a evitar que houvesse pelotas geminadas, com trincas, com superfície irregular ou mal queimadas. Posteriormente, as pelotas foram lavadas, individualmente, para que se retirasse todas as impurezas superficiais e possíveis partículas finas. Feito isto, o lote de pelotas foi secado em uma estufa com temperatura de 60° C e pesado (M1). Em seguida, as pelotas foram colocadas em um frasco contendo água suficiente para cobrir todo o lote de partículas. A mistura de água e pelotas é aquecida até o ponto de ebulição da água, permanecendo nesta temperatura por aproximadamente 15 minutos. Esta etapa é necessária para que todas as cavidades das pelotas sejam ocupadas pela água e seus poros preenchidos por capilaridade. Após o aquecimento o lote deve ser resfriado em “banho maria” até a temperatura ambiente, fato que também contribui para melhor ocupação da água nas cavidades da partícula.

Já na temperatura ambiente, as partículas são secas, superficialmente, com a utilização de um papel toalha e, novamente, pesadas (M2). Finalmente, utilizando o medidor de densidade da balança, o lote de partículas deve ser submerso em água, sendo possível medir sua massa (M3).

Dessa forma, obtém-se o volume das pelotas, densidade aparente e finalmente a porosidade total, por meio das Equações IV.4, IV.5 e IV.6:

$$Volume = M3 - M2 \quad (IV.4)$$

$$Densidade\ Aparente = \frac{M1}{Volume} \quad (IV.5)$$

$$Porosidade = \left(1 - \frac{Densidade\ Aparente}{Densidade\ Real}\right) 100 \quad (IV.6)$$

Onde a massa específica real das pelotas foi obtidas através do ensaio de picnometria à hélio.

#### **IV.6 Microtomografia Computadorizada de Raios-X**

As pelotas de minério de ferro foram ensaiadas no sistema microtomográfico de alta energia Skyscan 1173 (Skyscan/Bruker). O sistema foi calibrado para operar em sua potência máxima, 8 Watts, com 130 kV de tensão e 61 µA de corrente. Um filtro de alumínio de 1mm de espessura foi inserido na saída do tubo de raio X com o propósito de eliminar o efeito de endurecimento de feixe que ocorre devido a presença de fótons de baixa energia, estes fótons são atenuados nas bordas do corpo de prova gerando artefatos de imagem (Geet, Swennen e Wevers, 2000). As

amostras foram posicionadas a 73 mm da fonte de raio X e a 291 mm do detector de forma que todo o corpo de prova estivesse compreendido no campo visual do detector. Nesta configuração o tamanho de pixel utilizado foi de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ , o que corresponde a uma resolução espacial efetiva de 27  $\mu\text{m}$ . O escaneamento foi realizado pela rotação das amostras a passos de 0.5  $^\circ$ , gerando um total de 720 projeções radiográficas.

As projeções foram reconstruídas utilizando o programa Nrecon® SkyScan - versão 1.6.4.1 e InstaRecon - versão 1.3.5.0, cujo algoritmo está baseado nos trabalhos de Feldkamp (Feldkamp, *et al.*, 1984). Os resultados deste processo foram um conjunto de imagens de 8 bits (256 tons de cinza) que correspondem as seções transversais das amostras. Durante a reconstrução, melhorias na qualidade de imagem foram realizadas aplicando correções de artefatos implementadas pelos softwares. Correção de artefatos em anel, que consiste em círculos concêntricos causados por falhas no detector, e correção de endurecimento de feixe foram feitas, além de um filtro de suavização do tipo gaussiano ser aplicado para redução de ruído.

#### IV.7 Medida da Porosidade

Para medição da porosidade total das pelotas de minério de ferro, foi utilizado um método desenvolvido no LTM, que consiste na medição da massa específica real da partícula, através de Picnometria a Hélio, e da massa específica aparente da partícula revestida, através de Densidade Hidrostática.

A medida da porosidade total foi obtida usando a Equação IV.7 (Silva, 2007):

$$\varepsilon = 100 \left[ 1 - \left( \frac{M_i \rho_{rev}}{M_f \rho_s} \right) - \left( 1 - \frac{M_i}{M_f} \right) \frac{\rho_{rev}}{\rho_{tef}} \right] \quad (\text{IV.7})$$

$\varepsilon \rightarrow$  Porosidade total

$M_i \rightarrow$  Massa da partícula

$M_f \rightarrow$  Massa da partícula revestida com politetrafluoretileno

$\rho_s \rightarrow$  Densidade real da pelota de minério de ferro

$\rho_{rev} \rightarrow$  Densidade da pelota revestida

$\rho_{tef} \rightarrow$  Densidade do Politetrafluoretileno

#### **IV.8 Análise Granulométrica**

Uma das formas de se avaliar a qualidade física das pelotas é através da determinação da distribuição de tamanhos em que a amostra se encontra. Com o objetivo de medir essa distribuição, para as pelotas, foi utilizado o procedimento rotineiro de análise da granulometria por peneiramento mecânico a seco, seguindo a norma ISO 4701, porém com peneiramento realizado cuidadosamente a mão, com a seguinte série de peneiras: 19,0; 16,0; 14,0; 12,5; 9,0; 8,0 e 6,3 milímetros. Para os cacos, foi utilizada a a série de peneiras utilizada foi: 19,0; 16,0; 14,0; 12,5; 9,0; 8,0; 6,3; 4,75; 3,35; 2,36; 1,70; 1,18; 0,850; 0,600; 0,425; 0,300; 0,212; 0,150; 0,106; 0,075; 0,053 e 0,038 milímetros.

#### **IV.9 Tamboramento**

O ensaio de Tamboramento, padrão ISO 3271, é realizado com um lote de 15 Kg de pelotas secas e alimentado com partículas maiores que 6,3 milímetros. O teste tem como objetivo determinar o índice de tamboramento (índice de quebra) e o índice de abrasão (geração de partículas finas). Tal ensaio é um método bastante utilizado para a avaliação da resistência ao desgaste das pelotas queimadas. Este ensaio simula de maneira simultânea, os mecanismos de abrasão e impacto (quebra), que são os dominantes nas operações de manuseio e transporte.

O procedimento padronizado consistiu em colocar o lote de 15 kg de pelotas dentro de um tambor/moinho (Figura IV.4) com dimensões de 1 metro de diâmetro e 1 metro de altura e rotacioná-lo a uma velocidade angular de 25 rpm. Dessa forma, como a norma determina que sejam realizadas 200 rotações, o tempo de ensaio corresponde a 8 minutos. Completando as 200 rotações, o lote deve ser coletado e peneirado em uma peneirada de 6,3 mm e outra de 0,5 mm. Diante das massas retido e passante em cada uma das peneiras, são determinados os índices de tamboramento e abrasão, sendo obtidos respectivamente pelas percentagens de massa retida em 6,3 mm e passante em 0,5 mm.



Figura IV.4 – Tambor de Abrasão dentro das especificações da ISO 3271

#### IV.10 Tamboramento LTM

O ensaio de Tamboramento do LTM é uma modificação do Tamboramento da ISO 3271 (Seção IV.9), onde o tambor utilizado neste ensaio possui o mesmo diâmetro (1 metro), porém com espessura diferente (0,3 metros ao invés de 1 metro). Além disso, para a realização deste são utilizados dois lotes contendo 80 pelotas cada, escolhidas aleatoriamente dentro da mesma faixa granulométrica, e sendo suas massas balanceadas. Dessa forma, o ensaio de tamboramento não segue o padrão recomendado pela ISO, sendo um ensaio proposto no LTM com o objetivo de analisar a fragmentação de pelotas como resultado de impactos de baixa energia.

No trabalho de Silveira (2012), através de simulação, utilizando o Método dos Elementos Discretos, no software comercial EDEM, foi determinado que, para o moinho disponível no LTM/COPPE/UFRJ (Figura IV.5), a quantidade ideal dentro do moinho é de 80 pelotas. Essa quantidade permite minimizar a interação entre as partículas, permitindo que o impacto ocorra diretamente contra a superfície interna do equipamento e não entre as pelotas.

Assim, o ensaio permite avaliar a geração de finos por impactos de baixa energia (abrasão ou fragmentação superficial) com a chapa de aço e não de pelota com pelota, o que ocorreria caso a quantidade de pelotas fosse maior, como no ensaio proposto pela ISO. A frequência ótima de rotações por minuto do moinho, também determinada pelas simulações do software EDEM, foi de 12,7 rpm. Para uma melhor avaliação do ensaio de abrasão utiliza-se a seguinte metodologia: um lote da amostra deve ser pesado e colocado dentro do moinho e o tamboramento ocorre por 1 minuto, transcorrido esse período a amostra é retirada. O excesso de finos na superfície deve ser retirado através de sopragem por ar comprimido e o lote repesado. Em seguida, o lote volta para o moinho e será tamborado por mais 2 minutos, totalizando 3 minutos de tamboramento. Nesse momento o lote deve ser retirado e os finos superficiais soprados e repesados novamente, sendo esse processo repetido até que o tempo total de tamboramento seja igual a 9 minutos. A partir das massas obtidas, calcula-se a perda mássica por minuto do lote e a perda mássica por impacto do lote (calculado a partir da velocidade de rotação do moinho e do tempo de ensaio). Para uma melhor determinação da massa perdida, evitando erros da balança, a massa do lote deve ser pesada três vezes e, a partir dos valores obtidos, deve ser calculada a média da massa pós tamboramento. Assim, com o valor dessa massa média, é estimada a perda mássica por pelota e por tempo. O teste tem como resultado o índice de fragmentação superficial, que corresponde à percentagem de finos gerados por impacto (de baixa magnitude) e por pelota no interior do tambor.



Figura IV.5 – Moinho de tamboramento LTM/COPPE/UFRJ

## IV.11 Compressão

O ensaio de resistência à compressão individual de pelotas, rotineiramente realizado na indústria, segue a norma a ISO 4700. Deve ser realizado com um mínimo de 60 partículas e é utilizado para avaliar a resistência das pelotas quando submetidas a ação mecânica de cargas. Este método, apesar de não ser o mais adequado, é o mais utilizado para a previsão do comportamento mecânico das pelotas quando submetidas a impactos durante o manuseio e transporte.

O equipamento, como mostrado na Figura IV.6, consiste de uma prensa hidráulica operada por uma célula de carga. O lote de pelotas utilizado no experimento consiste em partículas contidas nas faixas de tamanho entre 16 x 12,5 mm e 12,5 x 9 mm. Todas as partículas são armazenadas em um silo que alimenta a prensa e as pelotas são prensadas individualmente, a uma velocidade constante de 10 mm/min, enquanto a curva Força x Deformação é registrada, assim como os valores da carga de ruptura. Por meio dos valores obtidos para as cargas de ruptura, calcula-se a média e esta é a força de resistência à compressão do lote de pelotas ensaiado.



Figura IV.6 – Prensa de compressão individual

## IV.12 Compressão LTM

O ensaio de compressão foi realizado baseado na ISO 4700, porém, utilizando um lote com 100 pelotas escolhidas aleatoriamente, sendo cada pelota submetida, individualmente, à compressão lenta, com velocidade constante de 10 mm/min. A célula de carga utilizada foi de 10 kN da marca EMIC, modelo DL 1000 (Figura V.7).

São ensaiadas as faixas de tamanho 19 x 16, 16 x 14, 14 x 12,5 e 12,5 x 9 milímetros. Presumindo velocidade constante da prensa, calcula-se a curva Força x Deformação. Calculando-se a área abaixo dessa curva (até o ponto da fratura) é obtida a energia. Antes das pelotas serem colocadas no prato de compressão deve ser medido seu diâmetro e sua massa para se obter, além das distribuições de força de ruptura e as energias, as energias específicas de fratura.



Figura IV.7 - Prensa de compressão EMIC com capacidade de 10kN

#### IV.13 Célula de Carga de Impacto (CCI)

Com o objetivo de fornecer subsídios para a calibração dos parâmetros dos modelos que descrevem a degradação e a fratura dos cacos por impacto baseando nos modelos desenvolvidos no LTM/COPPE, ensaios de medida de energia de fratura foram realizados na célula de carga de impacto (Figura IV.8) (Tavares e King, 1998).

O procedimento adotado nos ensaios consistiu das seguintes etapas (adaptado de Tavares, 2011):

- Separação de lotes contendo 50 partículas de cada faixa de tamanhos para ensaios.
- Medida da energia específica de fratura e da resistência de cada uma das partículas na Célula de Carga de Impacto de 19 mm (Figura IV.9), a partir da

curva força-tempo para os ensaios, a partir das Equações IV.8 e IV.9 (Tavares e King, 1998)

$$E = v_0 \int_0^{t_c} F(t)dt + g \int_0^{t_c} F(t)t dt - \frac{1}{2m_i} \left( \int_0^{t_c} F(t)dt \right)^2 - \frac{1}{\rho AC} \int_0^{t_c} F^2(t)dt \quad (\text{IV.8})$$

$$\sigma_e = \frac{2,8 F_c}{\pi d_p^2} \quad (\text{IV.9})$$

sendo  $F_c$  a força relativa ao momento de fratura,  $d_p$  o tamanho da partícula,  $v_0$  a velocidade de impacto,  $\rho$  a densidade da barra,  $A$  a seção transversal,  $C$  a velocidade de propagação da onda na barra,  $g$  a aceleração da gravidade,  $F$  a força medida e  $t_c$  o instante em que ocorre a fratura da partícula.

- Cálculo dos parâmetros das distribuições de energias de fratura e da relação entre a energia mediana de fratura e o tamanho de partícula.

Energia de fratura é calculada pela Equação IV.10:

$$P(E_m) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\ln E_m - \ln E_{m,50}}{\sqrt{2\sigma_e^2}} \right) \right] \quad (\text{IV.10})$$

sendo  $E_{m,50}$  e  $\sigma_E$  são parâmetros do modelos a serem ajustados a partir de resultados experimentais.

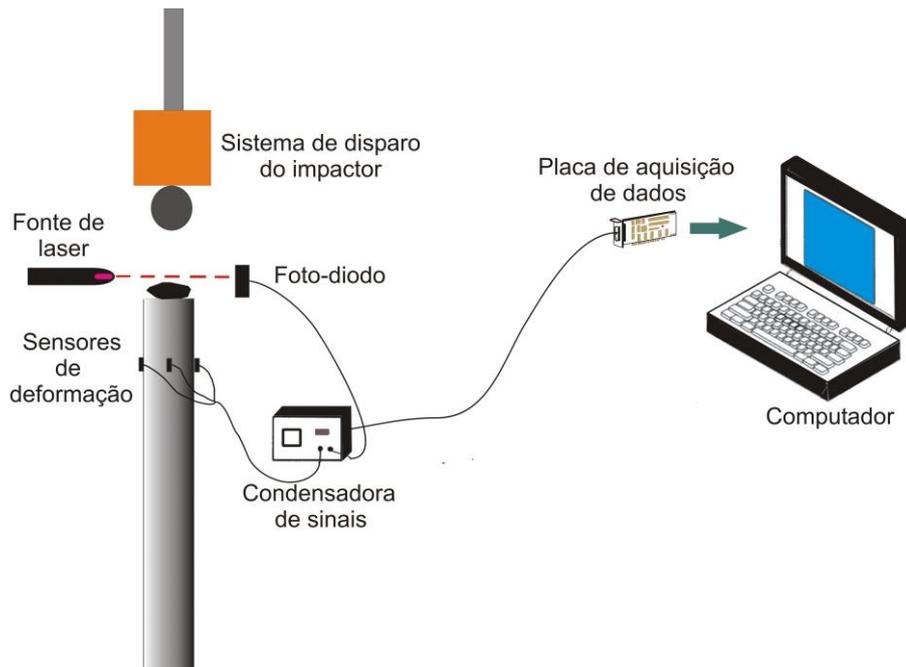


Figura IV.8 – Diagrama esquemático da célula de carga de impacto COPPE (*apud* Lima e Tavares, 2006)

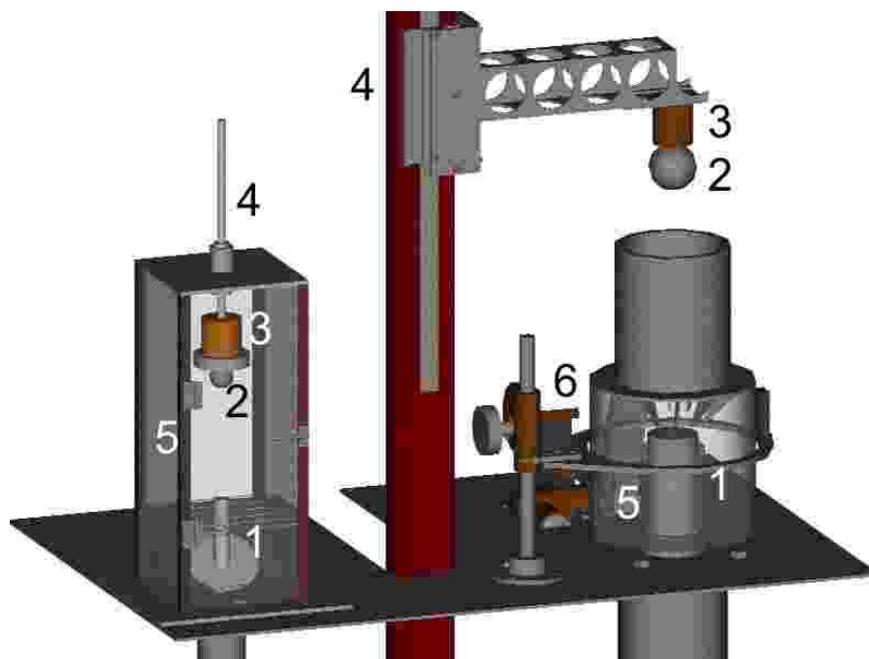


Figura IV.9 – Diagrama esquemático em Autocad® da célula de carga de impacto de 19 mm (esquerda) e 63 mm (direita) instaladas no LTM/COPPE. 1: Barra da CCI; 2: impactor; 3: eletroímã; 4: guias de posicionamento do impactor; 5: caixa de coleta dos fragmentos e 6: sistema de laser/foto-diodo (*apud* Lima e Tavares, 2006)

#### **IV.14 Rapid Breakage Tester**

O *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre* (JKRMC) desenvolveu um equipamento de análise da quebra de partículas individuais para caracterização da energia de fratura por impacto (Shi *et al.*, 2009). Este equipamento utiliza a energia cinética para fraturar as partículas, sendo uma alternativa viável para auxiliar a análise da fratura por impactos simples para elevadas energias.

Seu sistema é composto por um alimentador, um rotor e uma carcaça, com bigornas anguladas nas laterais, além de uma unidade de controle de operação.

Partículas com tamanho determinado e restrito (monotamanho) são alimentadas no rotor através de um alimentador vibratório e são distribuídas aleatoriamente nas guias de orientação. As partículas são aceleradas e projetadas do rotor e o impacto acontece nas bigornas no redor da carcaça, com uma velocidade que combina as componentes tangencial e radial. Após o impacto, o produto é coletado para análise em um recipiente localizado abaixo do rotor. O objetivo do desenvolvimento do JKRBOT foi o de criar um equipamento prático, com resultados de análises mais rápidas do que os ensaios convencionais como o DWT. Isso se deve ao fato que o equipamento não exige nem posicionamento de partícula manualmente e nem pesagem como é feito na maioria dos equipamentos descritos anteriormente, tornando o processo mais simples e rápido (Cunha, 2014).

Caso a quantidade de energia aplicada no processo seja perfeitamente controlada e aferida, características da resistência à fratura, do acúmulo de dano e dos mecanismos de fratura (como a partícula quebra) podem ser bem caracterizadas.

#### **IV.15 Autofratura**

Sabendo que os eventos de impacto, durante o manuseio, ocorrem, em sua maioria, por impacto simples (queda livre), e não duplo (CCI), é relevante investigar a diferença na suscetibilidade das pelotas à quebra em função do modo de aplicação dos esforços. Por conseguinte, os ensaios de fratura por impactos repetidos, por meio de queda livre (impacto simples), são denominados autofratura.

O ensaio é bem trabalhoso e se constitui de:

1. Preparação de lote com 100 pelotas contidas em uma faixa de tamanho pré-definida (monotamanho);
2. Pesagem individual de cada pelota em balança analítica com precisão de 4 casas decimais;
3. Realização de um ciclo de impacto por queda livre sobre uma placa de aço, a partir de uma determinada altura, de cada uma das 100 pelotas do lote;
4. Retirada das pelotas que tenham sofrido fratura volumétrica (adota-se o padrão de quebra quando a pelota sofreu perda mássica igual ou maior que 10% de sua massa antes do impacto) e retirada dos fragmentos provenientes à fragmentação superficial;
5. Contabilização das pelotas que tenham sofrido quebra volumétrica;
6. Pesagem de cada pelota (que tenha sofrido apenas fragmentação superficial) em balança analítica com precisão de 4 casas decimais após o impacto;
7. Realização das etapas 3, 4 e 5 até o 40º impacto;
8. Cálculo da taxa de perda mássica por impacto para todos os 40 impactos;
9. Análise granulométrica, separadamente, dos fragmentos relativos à fragmentação volumétrica e superficial.

#### **IV.16 Ensaio de Impactos Repetidos**

Com o objetivo de caracterizar a resistência das pelotas sob a ação de impactos sucessivos de baixa magnitude, que ocorrem durante o manuseio e transporte, foram realizados ensaios de impactos repetidos seguindo uma metodologia adotada no LTM.

Para este ensaio são utilizados lotes com 100 pelotas aleatórias, em determinada faixa de tamanho, e balanceados. Cada lote deverá ser ensaiado a uma energia diferente, para se analisar a resistência da pelota a sucessivos impactos de diferentes energias.

Inicialmente, foram determinadas as energias específicas de impacto (duplo) dos lotes, em 90 J/kg, 180 J/kg e 360 J/kg. O ensaio foi realizado na Célula de Carga de Impacto da COPPE (Figura IV.9), onde as partículas, individualmente, foram colocadas em uma superfície plana e impactadas por um peso com massa e altura pré-determinadas. As pelotas sofreram impactos sucessivos até se fragmentarem ou até um máximo de 40 impactos. As partículas que não fraturaram volumetricamente até o quadragésimo impacto (resistentes) foram separadas, enquanto

os fragmentos das demais foram recolhidos para a realização da análise granulométrica, em séries de peneiras com progressão geométrica com razão de raiz de 2.

Posteriormente, analisou-se a suscetibilidade das pelotas a impactos simples, utilizando os ensaios de Autofratura e JKRBT, que serão descritos nas seções IV.15 e IV.16.

Durante os ensaios, tanto de impacto duplo, como de impacto simples, anota-se o número de impactos necessários para fragmentar cada pelota. A quebra é caracterizada como a perda de, pelo menos, 10% de sua massa em relação ao impacto precursor. Dessa forma, é possível analisar a quebra acumulada das pelotas e a sua resistência ao longo dos impactos de baixa energia. Assim, ensaios de fragmentação de impactos repetidos, sejam de impacto duplo ou simples, são realizados da mesma forma (Figura IV.10).

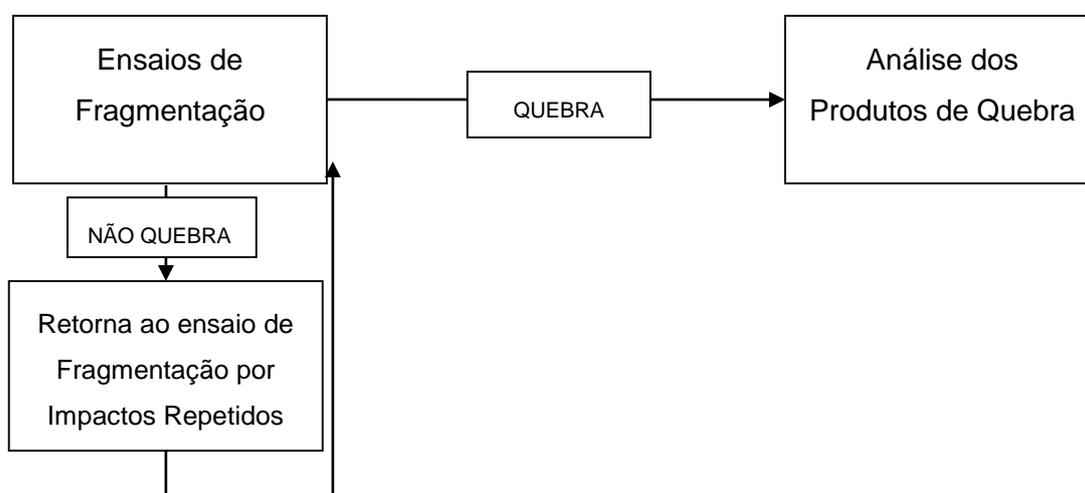


Figura IV.10 – Fluxograma de ensaios de fragmentação de impactos repetidos, tanto para impactos duplos, como para impactos simples (modificado de Tavares, 2011)

Os resultados foram registrados em termos de proporção (percentual) de pelotas quebradas em função de número de impactos e foram diferentes para impactos duplos e simples. Esses dados são a base para a modelagem da suscetibilidade à fratura por impactos repetidos das diferentes pelotas analisadas (parâmetro  $\gamma$  do modelo de Tavares e King, 2002).

#### IV.17 Ensaio de Queda de Peso – *Drop Weight Test* (DWT)

É um dos métodos mais simples e dos mais utilizados para analisar as características de resistência à fragmentação das partículas por impacto. No DWT, a partícula é colocada sobre uma superfície rígida (geralmente de aço) e sofre o impacto de elevada energia de um impactor em queda a partir de uma altura conhecida. Os fragmentos, provenientes da fratura da partícula são recolhidos e analisados por peneiramento. Pela análise dos fragmentos produzidos por aplicação de diferentes energias, é possível determinar a relação entre a energia fornecida e a distribuição granulométrica do produto. A variação da energia aplicada pode ser realizada pela variação da massa do impactor ou sua altura. A tendência é que a quebra (distribuição granulométrica dos fragmentos) será proporcional à energia aplicada (King, 2001).

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

O procedimento adotado nos ensaios consistiu das seguintes etapas (adaptado de Tavares, 2011):

- Separação de 3 lotes balanceados, cada um dos quais contendo 50 pelotas para cada fração de tamanhos que se deseja analisar. No caso, foram realizados os ensaios nas faixas de 16x14, 14x12,5, 12,5x9 e 9x8 milímetros.
- Determinação do peso médio de cada partícula.
- Cálculo da altura de queda, por meio da Equação IV.11:

$$h_i = h_f + \frac{\bar{m}E_{is}}{0,0272 Md} \quad (\text{IV.11})$$

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

impacto aplicada é considerada como sendo equivalente à energia específica de cominuição ( $E_{cs}$ ).

- Quebra de partículas, uma a uma, na Célula de Carga de Impacto (Tavares e King, 1998) (Figuras IV.11 e IV.12).
- Coleta dos fragmentos e peneiramento a seco usando peneiras que seguem uma série com razão igual à raiz quadrada de dois.
- Normalização da distribuição granulométrica dos produtos de cada ensaio em relação ao tamanho médio das partículas originais. Cálculo do  $t_{10}$  para cada energia específica de impacto através de interpolação linear da distribuição granulométrica do material fragmentado (Figura IV.13). Estimação dos parâmetros A e b' da Equação IV.12:

$$t_{10} = A \left( 1 - e^{-b' \frac{E}{E_{50b}}} \right) \quad (\text{IV.12})$$

- Determinação da relação entre  $t_{10}$  e os diversos  $t_n$ s, a fim de determinar o padrão de fragmentação das pelotas.

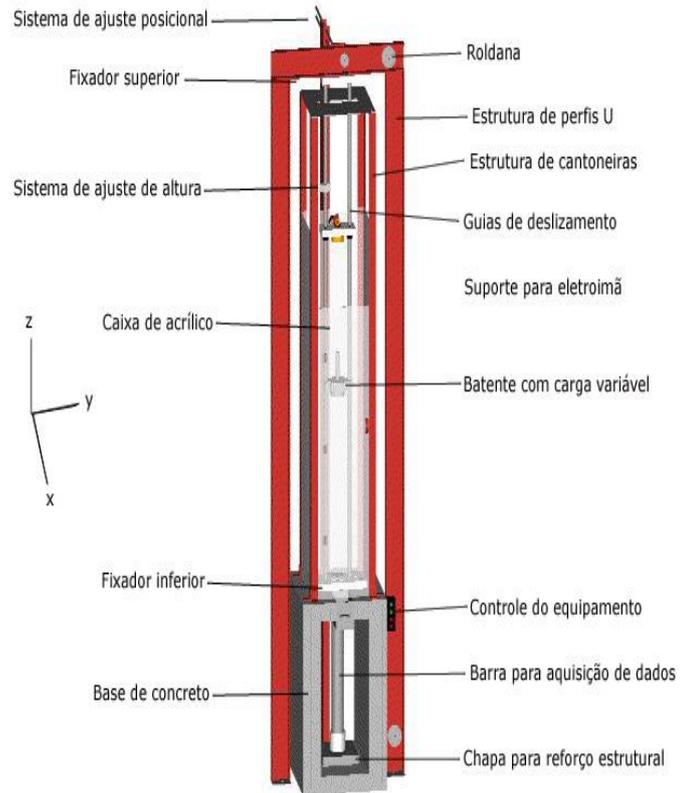


Figura IV.11 – Célula de carga de impacto COPPE de 100 mm

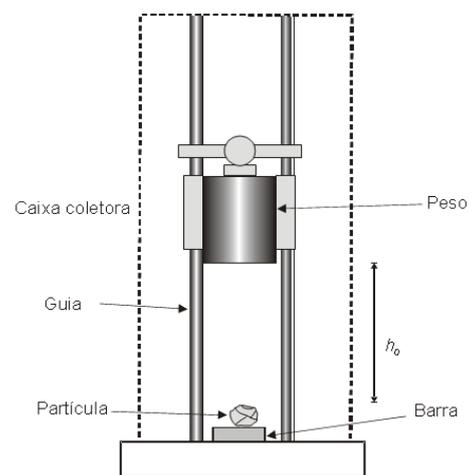


Figura IV.12 – Célula de carga de impacto COPPE de 63 mm

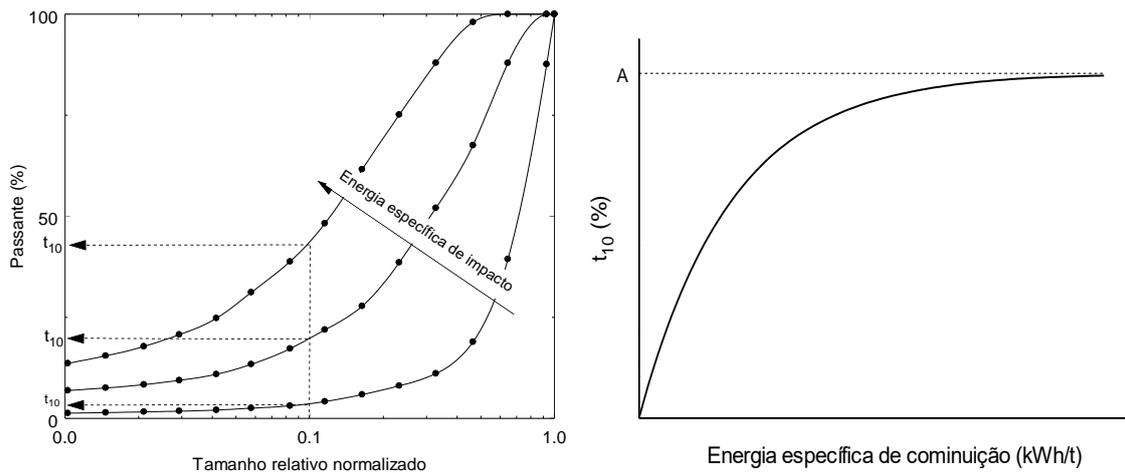


Figura IV.13 – Cálculo do parâmetro  $t_{10}$  a partir de análises granulométricas de produtos de ensaios de fragmentação e sua relação com a energia específica de impacto – também chamada de energia específica de cominuição ( $Ecs$ )

#### IV.18 Separação de cacos e pelotas

Estudos preliminares (Silveira, 2012) mostram que existe diferença na resistência a fragmentação por impacto entre cacos e pelotas bem formadas, sendo que cacos são menos resistentes que pelotas.

Neste sentido, foi realizada a caracterização física, bem como a modelagem dos mecanismos de quebra em separado para pelotas e cacos. Dessa forma, se torna necessário levar em consideração, nas simulações, a proporção de pelotas e cacos por faixa de tamanhos no material que é sujeito ao processo de manuseio.

A Figura IV.14 ilustra as diferenças de forma entre pelotas bem formadas e cacos, sugerindo como deve ser feita a classificação das amostras.

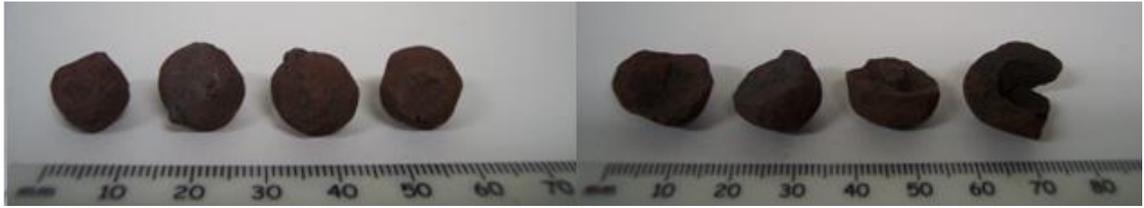


Figura IV.14 – Diferença de pelotas bem formadas (esquerda) e cacos (direita) da amostra B

Desse modo, foram realizados ensaios de caracterização para cacos e pelotas, em diversas faixas de tamanhos, separadamente, a fim de se modelar seu comportamento mecânico de maneira individual, sendo devidamente identificados no modelo.

#### **IV.19 Ensaio de Transferência (simulação de manuseio)**

Com objetivo de reproduzir os tipos de impactos ocorridos durante o manuseio, como, por exemplo as quedas provenientes de chutes de transferência, se elaborou um experimento em escala de laboratório.

Este experimento consiste em um sistema de transferência guiada por dois tubos de PVC, com altura total de aproximadamente 8,4 metros e uma placa de aço, fixada no chão, na extremidade. O diâmetro do tubo guia, com aproximadamente 200 mm, foi suficientemente grande para garantir uma limitada interação entre o mesmo e as pelotas, enquanto o diâmetro do tubo de confinamento, com aproximadamente 400 mm, foi escolhido de maneira a garantir que uma parcela significativa dos impactos ocorresse entre as partículas e a chapa de aço, além de impactos entre as próprias partículas, inclusive as que já haviam colidido contra a superfície de aço. Um diagrama esquemático é mostrado nas Figuras IV.15 e IV.16.

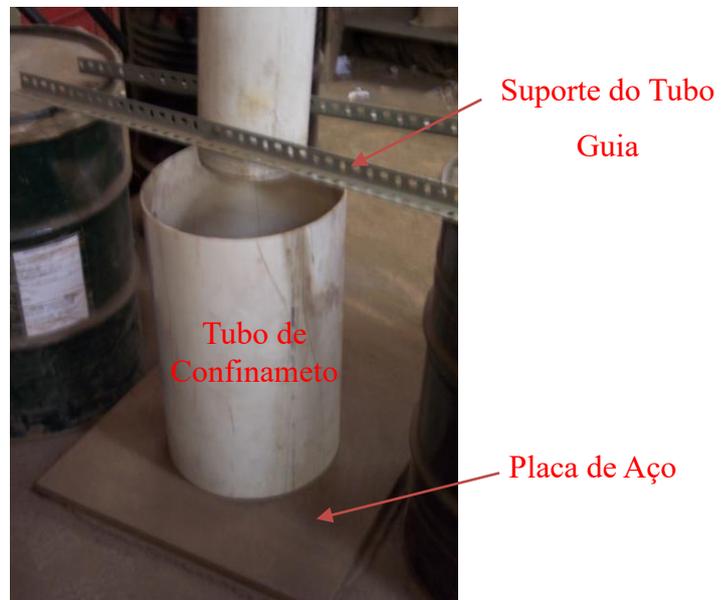


Figura IV.15 – Sistema de transferência construído em laboratório para simulação do modelo de degradação.

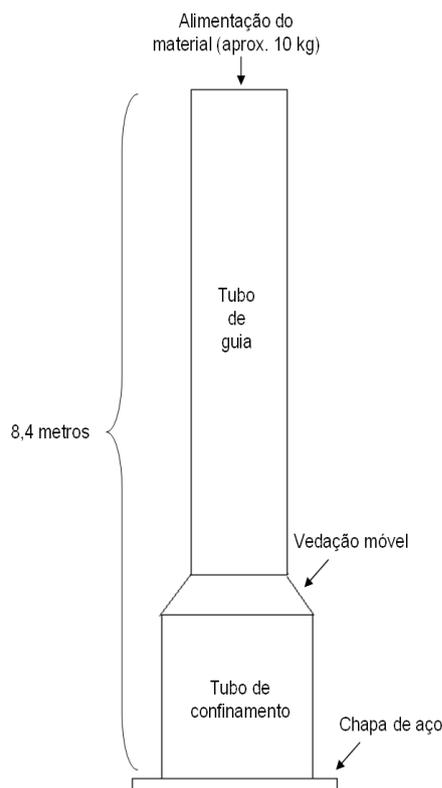


Figura IV.16 – Diagrama esquemático do sistema de transferência construído no LTM (COPPE/UFRJ) para simulação de uma etapa de manuseio

Para o experimento foi separada uma fração representativa (aproximadamente 10 kg) de cada uma das amostras (A, B, C, D e E). As amostras foram peneiradas por classe de tamanhos e, em seguida, separadas em cacos e pelotas. Para a realização do ensaio, foi retirado o material menor que 6,3 mm e, as pelotas e cacos restantes (com diâmetro acima de 6,3 mm) foram submetidas a uma sequência de impactos sucessivos por queda livre contra a chapa de aço já mencionada.

A metodologia adotada para o ensaio consistiu nas seguintes etapas:

1. Preparação de uma amostra representativa de aproximadamente 10 kg da amostra;
2. Peneiramento manual inicial da totalidade da amostra de 10kg, contabilizando a quantidade cacos e pelotas por inspeção visual, nas faixas de tamanho: 19,0; 16,0; 14,0; 12,5; 9,0; 8,0 e 6,3 mm;
3. Despejo de todo o material maior que 6,3 mm através do “tubo guia”, em queda livre, sendo confinado no “tubo de confinamento”, após o impacto contra a chapa de aço

localizada na base do sistema de transferência (Figura IV.17), configurando um evento de impacto;

4. Coleta de todo material depositado no “tubo de confinamento”;



Figura IV.17 – Amostra após choque contra placa de aço no ensaio de simulação de manuseio

5. Retirada de todo material menor que 6,3 mm através de peneiramento manual;
6. Realização de peneiramento manual de todo o material, contabilizando a quantidade cacos e pelotas (seção IV.18), nas faixas de tamanho: 19,0; 16,0; 14,0; 12,5; 9,0; 8,0 e 6,3 mm;
7. Peneiramento no RO-TAP® do material menor que 6,3 mm nas faixas de tamanho: 4,75; 3,35; 2,36; 1,70; 1,18; 0,85; 0,60; 0,425; 0,212 e 0,106 mm;
8. Repetição das etapas 3 a 5 até o 5º impacto;
9. Repetição das etapas 4 a 7;
10. Repetição das etapas 3 a 5 até o 10º impacto;
11. Repetição das etapas 4 a 7;
12. Repetição das etapas 3 a 5 até o 15º impacto;
13. Repetição das etapas 4 a 7;
14. Repetição das etapas 3 a 5 até o 20º impacto;
15. Repetição das etapas 4 a 7.

A partir deste ensaio foi possível avaliar como as distribuições de tamanho, bem como as populações de cacos e pelotas variam após cada ciclo de impacto.

A fim de facilitar a compreensão das etapas do ensaio, foi elaborado um fluxograma (Figura IV.18) simplificado do mesmo. Apesar de não contemplar a série de peneiras dos peneiramentos, bem como a reconciliação das partículas contidas nas faixas menores que 6,3 mm para análise granulométrica final, apresenta, de forma clara, os passos mais importantes do ensaio, de modo a esclarecer possíveis dúvidas.

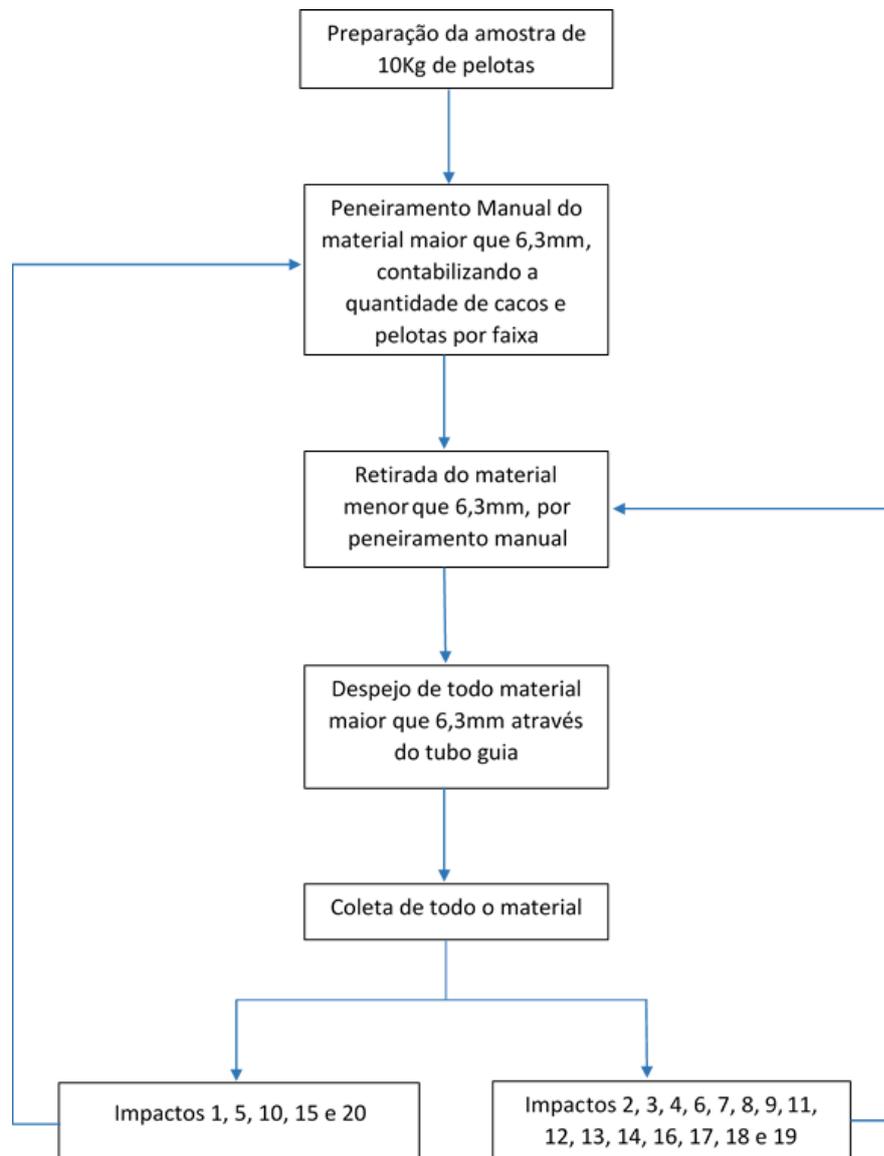


Figura IV.18 – Fluxograma simplificado do Ensaio de Transferência

## V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de facilitar a comparação e fornecer subsídios para o leitor se familiarizar com a metodologia sugerida para a caracterização de pelotas visando a previsão de resultados de manuseio, serão apresentados, inicialmente, os resultados da caracterização química e mineralógica das cinco amostras de pelotas queimadas, selecionadas, seguida da caracterização física seguindo os ensaios padronizados da ISO e empregados rotineiramente pelas usinas pelletizadoras. É importante mencionar que as pelotas não foram produzidas ao mesmo tempo e são provenientes de diferentes empresas. Além disso, não foram caracterizadas ao mesmo tempo, com exceção à análise mineralógica e de porosidade. Apesar de bem acondicionadas, podem ter sofrido envelhecimento, porém, acredita-se que não há influência do envelhecimento nos resultados das análises mineralógica e de porosidade. Para finalizar, serão apresentados os resultados da caracterização física usada na calibração dos modelos que descrevem a degradação, baseada nos modelos originais propostos por Tavares e Carvalho (2008), incluindo modificações de sub-modelos propostas no presente trabalho. Concluindo, são apresentados os resultados que mostram a validação do modelo, comparando-se resultados de quedas múltiplas das várias amostras.

### V.1 Composição Química

As pelletizadoras, fabricantes das pelotas estudadas, forneceram os resultados das análises químicas das cinco pelotas selecionadas (Tabela V.1). Esses ensaios são utilizados de forma rotineira como ferramentas de avaliação da qualidade dos produtos, fornecendo subsídios para avaliação da suscetibilidade das pelotas à degradação.

Tabela V.1 – Análise química das pelotas A, B, C, D e E

Teores	A	B	C	D	E
Fe Total (%)	67,5	67,7	67,6	67,5	67,0
SiO <sub>2</sub> (%)	1,5	1,5	1,4	1,8	1,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
CaO (%)	1,0	0,8	1,1	0,9	1,6
MgO (%)	0,09	0,10	0,15	0,10	0,15
P (%)	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05
Basicidade (B2)	0,66	0,55	0,76	0,50	0,90

Como todas as pelotas analisadas são destinadas a fornos de redução direta e provenientes de minérios hematíticos, não há diferenças significativas nas composições químicas. As pelotas A, C e E apresentam maior basicidade (%CaO/%SiO<sub>2</sub>), o que diminui o inchamento das mesmas no forno de redução, enquanto as pelotas D e E apresentam maior teor de fósforo, o qual pode atuar como um elemento fragilizante do aço.

## V.2 Análise Mineralógica

A análise da mineralogia de cada pelota também foi realizada no laboratório de uma das empresas pelletizadoras. O ensaio, apesar de mais complexo que a análise química, é bastante utilizado, fornecendo importantes subsídios para a avaliação da resistência das pelotas. Os resultados da análise mineralógica média das cinco amostras de pelotas se encontram na Tabela V.2. As pelotas B e E apresentam elevado teor de magnetita, que pode ter sido decorrente da falta ou excesso de queima das pelotas, e pode acarretar em baixa resistência à compressão das pelotas.

Tabela V.2 – Análise mineralógica média das pelotas A, B, C, D e E

Pelota	A	B	C	D	E
Hematita (%)	94,58	86,07	95,20	95,41	63,41
Magnetita (%)	0,53	11,61	1,03	0,57	29,88
Silicatos (%)	4,77	2,27	3,65	3,93	6,16
Ferritos (%)	0,12	0,05	0,12	0,09	0,56

As imagens das Figuras V.1 a V.3 apresentam as microestruturas, com ampliações de 500x e 1000x, das amostras B, C e E, respectivamente. As imagens da pelota B (Figura V.1) indicam que a região central e intermediária da amostra analisada apresentaram alto teor de magnetita e baixo crescimento de grão. Esses indicadores, somados à reoxidação da magnetita nas zonas intermediárias, com teores relativamente altos desta, sugerem uma má sinterização do material, o que pode ocasionar uma baixa resistência mecânica à compressão. A amostra C apresenta microestrutura com boas reações de sinterização, satisfatório crescimento de grão, pouca magnetita e muitos silicatos. Essa microestrutura (Figura V.2) deve resultar em boa resistência física do material devido a excelentes condições de queima das pelotas. As imagens da pelota E (Figura V.3) indicam que houve um excesso de queima na amostra, pois há um

excessivo crescimento dos grãos, uma grande quantidade de magnetita e de poros na região central da pelota, como pode se observar na análise mineralógica por regiões, apresentada na Tabela V.2. Além disso, há teores intermediários de magnetita na extremidade, sem evidências de reoxidação desta e baixos teores na extremidade, que reforça a hipótese de excesso de sinterização, que também pode resultar em baixa de resistência mecânica. As demais imagens de microestruturas, em geral, apresentaram boas reações de sinterização, com crescimento e arredondamento dos grãos de ferro e formação de silicatos nos contornos de grão.

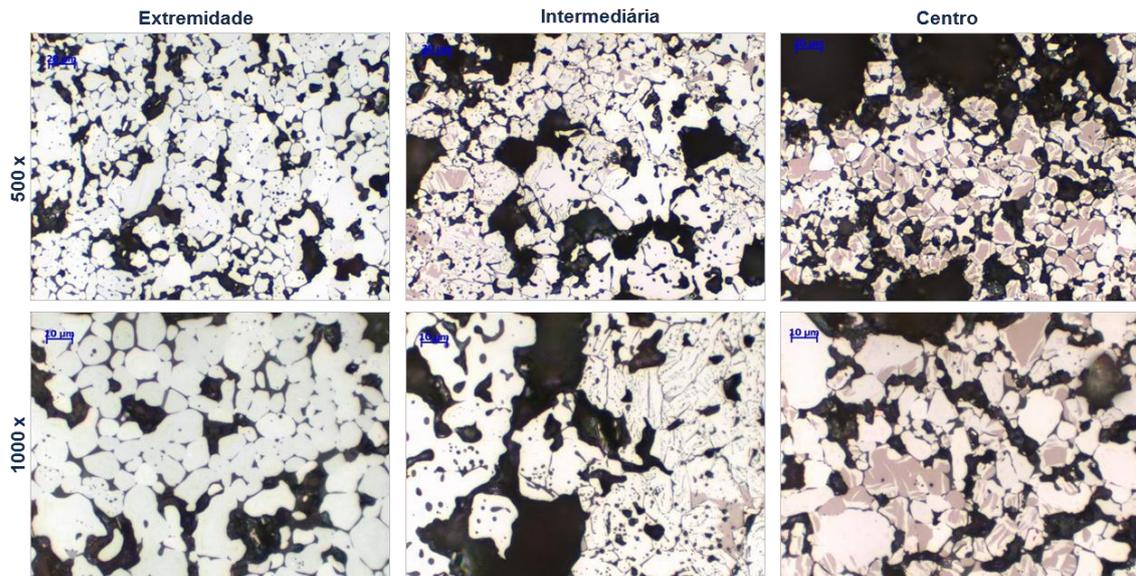


Figura V.1 – Imagens da microestrutura da pelota B nas magnificações de 500x e 1000x, nas regiões: extremidade, intermediária e centro da pelota.

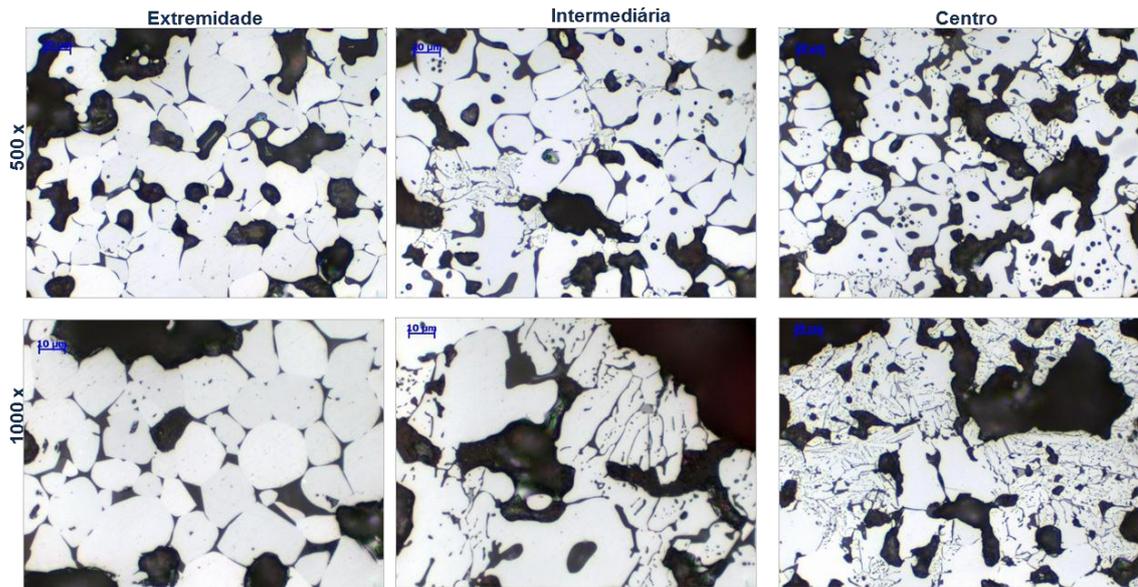


Figura V.2 – Imagens da microestrutura da pelota C nas magnificações de 500x e 1000x, nas regiões de extremidade, intermediária e centro da pelota.

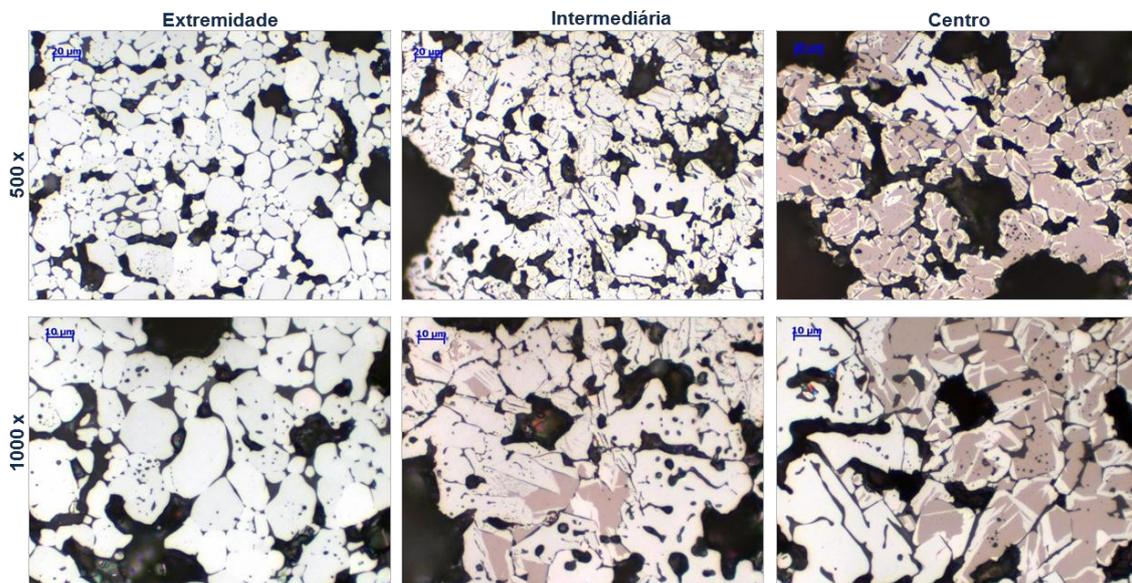


Figura V.3 – Imagens da microestrutura da pelota E nas magnificações de 500x e 1000x, nas regiões de extremidade, intermediária e centro da pelota.

Tabela V.2 – Percentual das fases microestruturais na pelota E

Posição	Hematita	Magnetita	Silicatos	Ferritos
Extremidade	94,59	1,18	4,08	0,15
Intermediária	70,20	24,31	5,24	0,26
Centro	18,85	70,16	9,64	1,35
<b>Média</b>	<b>63,41</b>	<b>29,88</b>	<b>6,16</b>	<b>0,56</b>

### V.3 Microdureza

A Tabela V.3 apresenta os valores de dureza das bordas (cavidades externas) e centros (cavidades internas) das cinco amostras de pelotas, medidos por meio do ensaio de Microdureza Vickers. É evidente que as pelotas D e E obtiveram maiores valores de dureza nas bordas e os menores valores no centro, enquanto que a pelota C apresentou baixos valores de dureza nas bordas. Sendo assim, pode se observar que os valores do ensaio de microdureza nas pelotas apresenta coerência com os ensaios realizados por Huang, *et al.* (2012), onde a microdureza das pelotas, a altas temperaturas, varia de 200 a 800 HV, aproximadamente.

Tabela V.3 – Resultados da Microdureza do centro e das bordas das pelotas A, B, C, D e E

Pelota	Dureza (HV) Centro	Dureza (HV) Borda
A	880	727
B	553	638
C	545	335
D	288	883
E	533	810

### V.4 Massa específica

A Tabela V.4 apresenta os valores de massa específica medidos para as 5 matrizes das amostras de pelotas por meio do ensaio de Picnometria a Hélio. Também apresenta os valores da massa específica aparente, medida pela razão da massa aparente, medida através de uma balança

analítica, pelo volume aparente, medido pela microtomografia destas 5 amostras. Como as pelotas possuem mais de 90% de óxidos de ferro (Tabela V.2), é natural que a massa específica das matrizes se aproxime do valor da massa específica desses óxidos e que não haja uma variação significativa entre elas, visto que são provenientes de minério de ferro hematítico.

Tabela V.4 – Resultados de massa específica das pelotas A, B, C, D e E medidos por Picnometria a Hélio

Pelota	A	B	C	D	E
Massa Específica da matriz (g/cm <sup>3</sup> )	5,16	5,22	5,22	5,18	5,17
Massa Específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	3,55	3,51	3,42	3,37	3,35
Desvio Padrão (g/ cm <sup>3</sup> )	0.26	0.17	0.10	0.03	0.08

## V.5 Porosidade

Quando se avalia a resistência física das pelotas, deve-se levar em consideração a porosidade devido à influência da quantidade de vazios, no sentido de concentrar tensões e interferir na resistência mecânica. Segundo Meyer (1980), uma pelota que contém quantidade bem menor de vazios (poros) poderá ser mais resistente do que uma pelota contendo maior quantidade de vazios. Os valores de porosidade foram medidos por diferentes técnicas, sendo apresentados de forma sintética na Tabela V.5.

Tabela V.5 – Resultados de medidas de porosidade para as pelotas A, B, C, D e E

Métodos	A	B	C	D	E
Densidade hidrostática (%)	33,2	32,9	32,6	34,1	35,2
Análise de imagens (%)	40,0	57,9	42,6	43,5	49,6
Microtomografia (%)	4,8	2,8	4,24	5,8	6,3
Microtomografia e picnometria (%)	31,3	32,8	34,5	34,9	35,2

É evidente na Tabela V.5 a grande variabilidade nos resultados dos diversos testes para determinação da porosidade das pelotas. Apesar dessa variabilidade, há uma certa coerência entre os resultados das pelotas que são mais ou menos porosas. Em geral, a ordem das amostras de pelotas que possuem as maiores quantidades de poros não varia muito em cada tipo de ensaio. Porém, algumas vezes, essa diferença de porosidade é tão pequena que pode ser confundida com o erro experimental.

O ensaio considerado mais representativo é o de medição de porosidade através das técnicas de Microtomografia Computadorizada de Raios-X com Picnometria a Hélio. Apesar do ensaio de Microtomografia não possuir resolução alta o suficiente para identificar os menores poros das pelotas (limitação do equipamento utilizado), esta técnica consegue medir, de maneira muito precisa, o volume destas, identificando suas entrâncias e cavidades. Já a Picnometria a Hélio fornece valores precisos de densidade da matriz da pelota, independente dos poros. Sendo assim, tem-se os valores precisos da densidade da matriz das pelotas, bem como o seu volume e massa aparentes, além do valor conhecido da densidade do ar. Dessa forma, acredita-se que os resultados deste ensaio sejam os mais próximos da realidade, pois é calculado, de forma precisa a quantidade de ar que está contida em cada pelota, sendo o valor de referência quando comparado aos outros ensaios realizados neste trabalho. Assim, com base nessa medida as pelotas apresentaram porosidades crescentes da A até a E.

Apesar de muito usado pelas usinas pelletizadoras, o cálculo da porosidade através da Análise de Imagens da estrutura da pelota não é muito representativo. Mesmo a análise sendo feita na pelota com resistência igual a média de resistência à compressão de cada amostra, a medição da porosidade é feita em uma única pelota por amostra, de maneira que não se avalia a variabilidade da amostra. Além disso, é realizada a análise apenas no corte transversal da pelota, onde estima-se a mesma porcentagem média de poros para o resto do volume, o que nem sempre é válido. Por conseguinte, ainda há possibilidade de ocorrer falhas na preparação do material devido à fragilidade do mesmo. Acredita-se que foi esse o caso da Pelota B, que, como apresentou fragilidade na preparação da amostra, parte do material se despreendeu durante o lixamento.

A Figura V.4 ilustra um mosaico com as macroestruturas das pelotas A, B, C, D e E. A Pelota A apresenta excelente distribuição da porosidade, a Pelota B apresentou região central e intermediária com trincas e poros interligados, gerando um vazio, enquanto que a Pelota C é pouco porosa com alguns macroporos, provavelmente, provenientes de insumos com granulometria grosseira na sua preparação. Já a Pelota D apresenta algumas trincas finas e a Pelota E apresenta concentração de porosidade na região central.

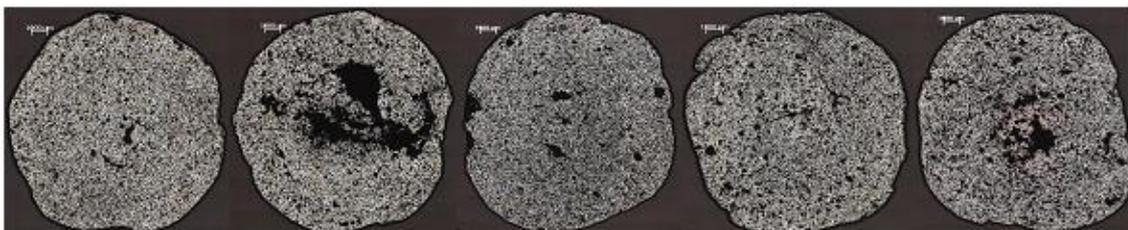


Figura V.4 – Imagem da macroestrutura de pelotas selecionadas A, B, C, D e E, respectivamente.

Ainda de acordo com a Análise de Imagens, a Tabela V.6 apresenta o percentual de porosidade presente por região, nas amostras avaliadas. As pelotas A, C e D apresentam uniformidade na porosidade das regiões analisadas, enquanto que as pelotas B e E mostram discrepância nos valores entre regiões, aumentando substancialmente a porosidade conforme se aproxima do centro. Maior porosidade na região central sugere menor resistência à fratura do material, o que faz com que as amostras B e E possuam tendência a se comportar de maneira mais frágil – se considerado exclusivamente o quesito porosidade.

Tabela V.6 – Percentual de porosidade classificados por região das pelotas A, B, C, D e E

	A	B	C	D	E
Extremidade	40,7	44,4	42,9	44,7	45,1
Intermediária	38,1	57,2	41,2	42,7	49,9
Centro	41,0	72,2	43,7	43,1	53,9
<b>Média</b>	<b>40,0</b>	<b>57,9</b>	<b>42,6</b>	<b>43,5</b>	<b>49,6</b>

Apesar da limitada resolução do equipamento, as análises da porosidade por Microtomografia Computadorizada de Raios-X foram importantes para determinar as características geométricas dos poros, como diâmetro, área superficial e volume. É importante ressaltar que, devido ao limite de resolução, a técnica não permitiu a análise de todos os poros da pelota, tendo em vista que poros com diâmetro menor que 75  $\mu\text{m}$  não puderam ser detectados. As informações a respeito do espaço poroso das pelotas foram obtidas através das imagens

reconstituídas (Figura V.5) e só permitiu identificar duas fases: matriz (sólida) e vazios (poros e trincas).

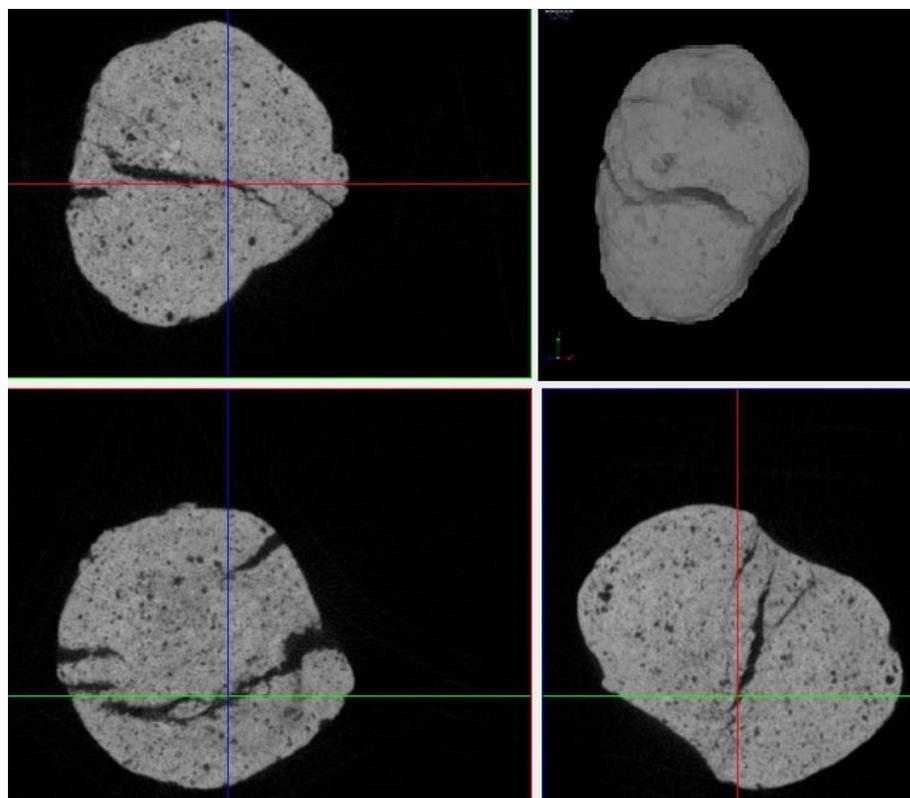


Figura V.5 – Imagens reconstituídas da Pelota D em seções transversais e modelo 3D.

A distribuição de tamanhos de poros foi determinada pela porcentagem do total de poros que a microtomografia foi capaz de analisar. Devido a baixa resolução do equipamento, a porosidade calculada pela microtomografia representa apenas uma parcela da porosidade total. O valor considerado como referência, é o resultado da combinação das técnicas de Picnometria a Hélio e Microtomografia Computadorizada de Raios-X. Dessa forma, a porosidade calculada somente pela microtomografia subestimou a quantidade de poros das pelotas analisadas, indicando apenas os maiores poros e não a quantidade total destes. No entanto, o resultado deste ensaio indica o tamanho e volume dos poros, resultando em estimativas da distribuição volumétrica dos maiores poros das amostras das pelotas (dos 25% maiores).

A Figura V.6 apresenta a distribuição volumétrica cumulativa de tamanho de poros. Observa-se que as pelotas D e E possuem os maiores tamanhos de poros, enquanto as pelotas A e B os menores. Meyer (1980), sugere que há relação inversa entre a porosidade e a resistência mecânica das pelotas, ou seja, da quantidade e tamanho de poros com a resistência mecânica das pelotas. Sendo assim, a tendência é que as pelotas A e B possuam maiores valores de resistência mecânica que as pelotas D e E. Como a microtomografia preserva a integridade da partícula, por ser uma técnica não destrutiva, se mostra bem útil pela possibilidade de se realizar outros ensaios na mesma partícula, o que é ideal para comprovar hipóteses. Entretanto, o ensaio de microtomografia é lento e dispendioso, sendo, atualmente, inviável de ser realizado em escala industrial.

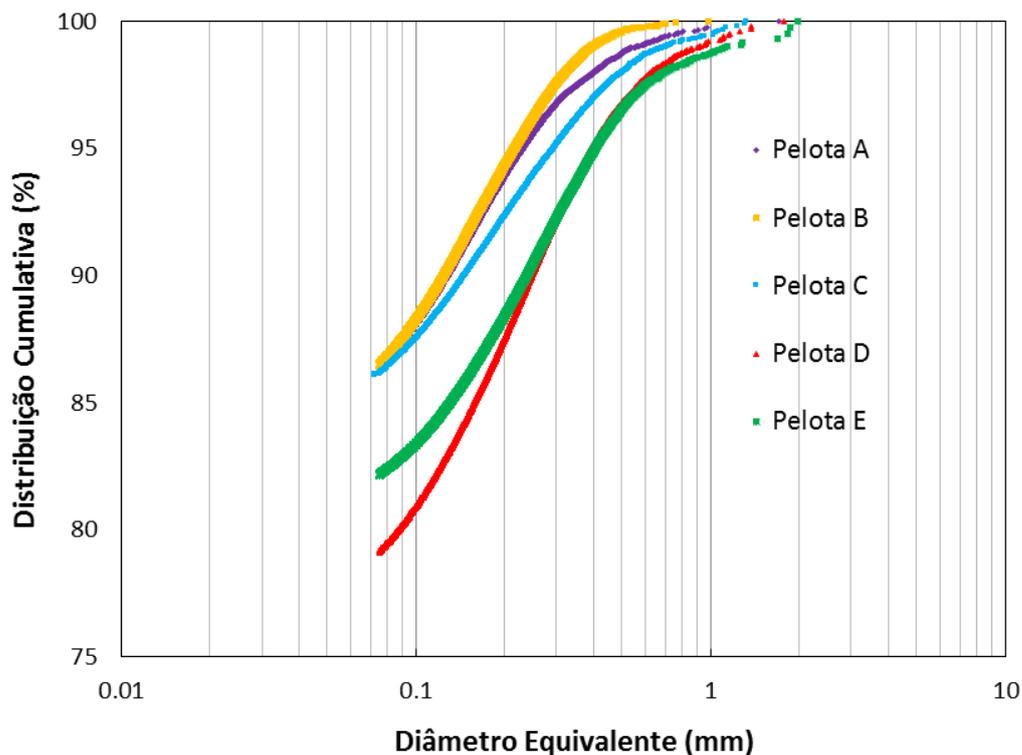


Figura V.6 – Distribuição do tamanho de poros pelo volume cumulativo dos cinco diferentes tipos de pelotas.

A técnica de determinação da porosidade pela Densidade Hidrostática foi a que gerou resultados que mais se aproximaram do resultado do ensaio considerado como referência neste

trabalho (como já citado: Picnometria a Hélio com Microtomografia Computadorizada de Raios-X). Além dos resultados não terem se mostrado muito discrepantes como quando comparados a outras técnicas, são utilizadas 20 pelotas por teste, diminuindo o efeito da variabilidade, visto que os outros ensaios utilizam números muito menores de pelotas.

De uma maneira geral, pode-se observar que nos resultados dos ensaios realizados para medir a porosidade, as pelotas A, B e C apresentam quantidade e tamanho de poros menores que as pelotas D e E. Além do mais, as pelotas A e C apresentam mais homogeneidade na distribuição dos poros ao longo da amostra.

## **V.6 Acabamento Superficial**

O acabamento superficial foi analisado com base em inspeção visual do lote de cada amostra, com objetivo de avaliar possíveis defeitos superficiais, porosidade das bordas e imagens das micro e macroestruturas nas extremidades das pelotas.

A Figura V.7 mostra que, apesar de alguns macroporos, todas as fases microestruturais da pelota C aparecem bem distribuídas em todas as regiões da borda, o que pode resultar em boa resistência física do material na extremidade. Essas afirmações confirmam as observações de porosidade classificadas por região, conforme ilustrado na Tabela V.6. Já a Figura V.8 apresenta imagens da borda da pelota D, que mostram irregularidades na superfície e alguns macroporos, que podem acarretar em menor resistência mecânica.

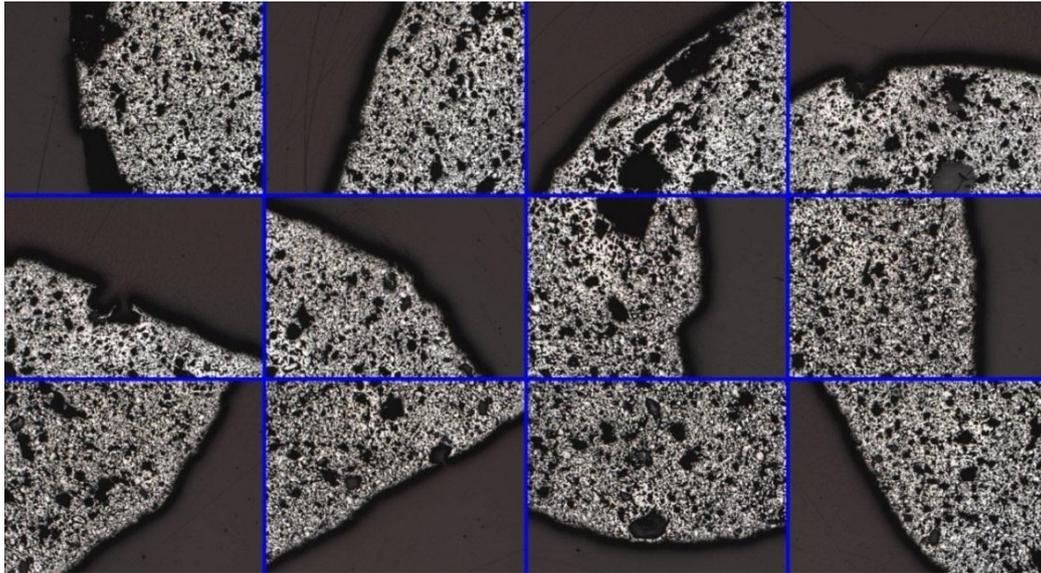


Figura V.7 – Imagens da parte externa das pelotas mostrando o acabamento superficial da amostra C

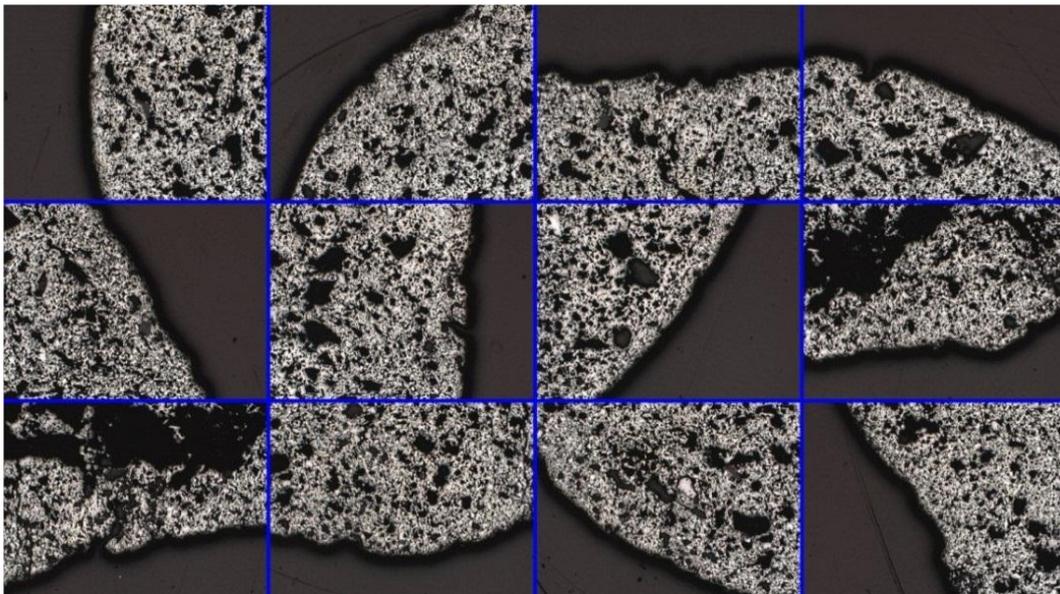


Figura V.8 – Imagens da parte externa das pelotas mostrando irregularidades no acabamento superficial da amostra D

As Figuras V.9 e V.10 apresentam pelotas selecionadas, aleatoriamente, para avaliação do acabamento superficial das amostras A e E, respectivamente. A Figura V.9 mostra que, em geral, havia bom acabamento superficial e arredondamento das pelotas da amostra A. Apenas uma pelota apresentou trinca de resiliência. Já a Figura V.10 mostra que a amostra E apresenta algumas trincas de resiliência e baixo grau de deformação nas pelotas. Estas trincas, aliadas à concentração

de porosidade e ocorrência de magnetita podem ocasionar uma baixa resistência física do material.



Figura V.9 – Imagens de macroestrutura de pelotas A, selecionadas, mostrando aspectos superficiais



Figura V.10 – Imagens de macroestrutura de pelotas E, selecionadas, mostrando aspectos superficiais

## V.7 Análise Granulométrica

Resultados do ensaio de análise granulométrica são mostrados na Figura V.11 e na Tabela V.7, as quais indicam que as Pelotas C e E apresentam distribuições granulométricas mais grosseiras, enquanto que a Pelota D apresenta a distribuição granulométrica mais fina.

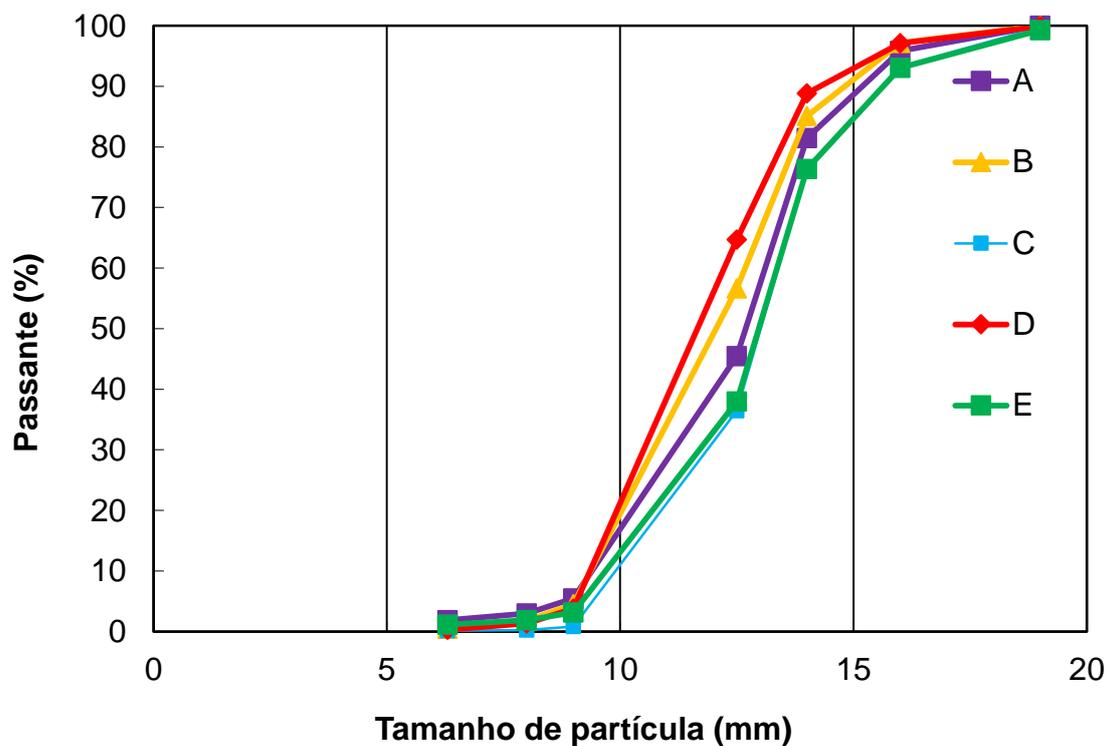


Figura V.11 – Distribuição Granulométrica das Pelotas A, B, C, D e E.

Tabela V.7 – Distribuição granulométrica das pelotas

Pelota	A	B	C	D	E
Tamanho (mm)	Retido (%)				
19,0	0,00	0,00	0,24	0,12	0,71
16,0	4,16	2,81	6,52	2,80	6,24
14,0	14,39	12,08	16,94	8,25	16,70
12,5	36,00	28,49	39,87	24,11	38,38
9,0	39,95	52,12	35,62	60,96	34,84

8,0	2,50	2,73	0,54	2,41	1,23
6,3	1,10	1,29	0,10	1,03	0,77
< 6,3	1,89	0,48	0,17	0,32	1,13

A Tabela V.8 apresenta a relação granulométrica entre a quantidade de pelotas retidas em 16 x 12,5 mm e 12,5 x 9 mm, onde as pelotas C e E apresentam as maiores relações de proporções de pelotas na faixa maior pela quantidade de pelotas na faixa menor. Segundo Tavares (2009), quanto menor a granulometria de materiais frágeis, como pelotas, maior a sua energia específica de fratura. Dessa forma, levando em consideração apenas a distribuição granulométrica, as pelotas B e D tenderiam a ser mais resistentes mecanicamente.

Tabela V.8 – Relação granulométrica das porcentagens retidas nas faixas 16 x 12,5 mm e 12,5 x 9 mm

	A	B	C	D	E
16 x 12,5 mm (%)	50,39	40,57	56,81	32,36	55,08
12,5 x 9 mm (%)	39,95	52,12	35,62	60,96	34,84
16x12,5 mm/12,5x9 mm	1,3	0,8	1,6	0,5	1,6

## V.8 Caracterização Física baseada na ISO

Os resultados de caracterização física, padronizados pela ISO, são: Determinação da resistência à compressão (ISO 4700) e Determinação dos índices de tamboramento e abrasão (ISO 3271). Os resultados da Tabela V.9 são provenientes das amostras dos 5 tipos diferentes de pelotas queimadas de minério de ferro de redução direta, alvo deste estudo e se encontram sintetizados.

Pode-se observar que as pelotas analisadas apresentam diferenças consideráveis nos valores dos resultados dos ensaios ISO. Os valores dos ensaios de Compressão Maior (pelotas com faixas de 16 x 12,5 mm), Compressão Menor (pelotas com faixas de 12,5 x 9 mm), Tamboramento e Abrasão indicam essas diferenças na caracterização física, onde a pelota com maior resistência à compressão, teoricamente, se degrada menos e a menos resistente se degrada mais. Também se observa uma relação diretamente proporcional entre a compressão e o

tamboramento, sugerindo que o mesmo tipo de pelota que apresenta alta resistência à abrasão também apresenta alta resistência à fratura. Cabe destacar que o ensaio de tamboramento é resultado da ação de vários mecanismos de fragmentação em conjunto, por isso sua relação com o ensaio de compressão. Como esses mecanismos não conseguem ser individualmente descritos pelo ensaio de tamboramento, não há como realizar o modelamento e a previsão deste, impossibilitando extrapolar seu comportamento para diferentes energias, impedindo o cálculo do efeito de escala.

As diferenças entre as pelotas podem ser notáveis do ponto de vista comercial, influenciando no contrato da pelotizadora com o cliente, dependendo da qualidade (analisada apenas pelos ensaios ISO) das pelotas. Dessa forma, segundo os ensaios da ISO, as pelotas A, B, C, D e E podem ser classificadas em ordem decrescente de resistência mecânica e, provavelmente, possuírem valores comerciais também nessa mesma ordem decrescente.

Tabela V.9 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização mecânica (Compressão, Tamboramento e Abrasão) da ISO das pelotas A, B, C, D e E (Dados entre parênteses representam o Desvio Padrão dos resultados)

	A	B	C	D	E
Compressão 16 x 12,5 mm (kgf)	357 (107)	326 (126)	322 (118)	300 (124)	260 (85)
<200 kgf (%)	17	20	16	21	45
<150 kgf (%)	10	13	6	13	21
Compressão 12,5 x 9 mm (kgf)	300 (154)	306 (143)	299 (130)	288 (125)	239 (118)
<200 kgf (%)	34	22	36	39	62
<150 kgf (%)	18	12	18	25	44
Tamboramento	93,8	93,4	93,6	93,2	92,2
Abrasão	5,5	5,7	5,7	5,9	6,6

Observa-se que a resistência à compressão das pelotas obedece a mesma tendência observada por Meyer (1980), onde as pelotas com menor porosidade (Tabela V.5) apresentam maiores resistências. Se levar em consideração a medição da porosidade por análise de imagens, a pelota B é uma exceção à essa tendência. Provavelmente se deve ao fato que, como os ensaios de mineralogia e análise de imagens não foram realizados no LTM, todas as amostras foram enviadas concomitantemente ao laboratório responsável por estas análises. Sendo assim, como a pelota B foi a primeira a chegar no LTM, sofreu maior tempo de envelhecimento, podendo ter

ocorrido a fragilização da mesma. Dessa forma, o laboratório responsável pela realização do ensaio reportou que a pelota B sofreu um certo desprendimento de material durante o lixamento, o que pode ter influenciado a análise de porosidade por análise de imagens. Porém, como a microtomografia e a densidade hidrostática não são técnicas destrutivas e não há evidências que sejam influenciadas por um possível envelhecimento das partículas, seus resultados apresentam a pelota B como pouco porosa e com pequenos tamanhos de poros. Esses resultados condizem com o apresentado pela resistência à compressão, indicando que a pelota B possui boa resistência à degradação, confirmando os resultados dos testes ISO.

A mineralogia também corrobora com os resultados da ISO, visto que pelas diferentes condições inferidas de sinterização e tamanhos dos grãos das amostras (Figuras V.1 a V.3), esperava-se comportamento distinto das partículas em relação a resistência mecânica. A exceção se dá pela amostra B, que apresentou valores elevados de resistência à compressão, tamboramento e abrasão, enquanto que as análises mineralógicas indicavam o contrário. A hipótese plausível para explicar este fato é a possibilidade de o laboratório responsável pela análise mineralógica das pelotas ter realizado o ensaio de compressão individual das pelotas novamente. Tendo feito isso, provavelmente, a média de compressão da amostra será mais baixa que média dos ensaios realizados na pelotizadora ou no LTM, visto que quando foram realizados os ensaios de caracterização, as amostras ainda não tinham sofrido envelhecimento. Como a pelota B foi a primeira a chegar no LTM, mesmo bem acondicionada pode ter sido fragilizada por envelhecimento (Fonseca, 2004; Martins, 2013), diminuindo a média de resistência à compressão de todo o lote da amostra. Sendo assim, há chances de ter sido escolhida uma pelota com a média de compressão baixa por ter sido mal sinterizada, e não por estar envelhecida. No entanto, as fases mineralógicas não são influenciadas pelo envelhecimento, então, se acredita na hipótese de que uma pelota mal queimada tenha sido escolhida ao acaso, por possuir a resistência à compressão igual a média do lote envelhecido. Dessa forma, a pelota não seria representativa, não podendo se afirmar que a amostra B esteja mal queimada.

Os ensaios de tamboramento e abrasão também tem relação com o acabamento superficial, visto que as Figuras V.7 a V.10 ilustram tendência de menor resistência mecânica das pelotas D e E, sendo confirmadas nos ensaios da ISO. Dessa forma, é possível afirmar que os resultados do ensaio de compressão possuem ótima correlação com os ensaios de porosidade, mineralogia e acabamento superficial.

Observa-se, também na Tabela V.9, que a pelota E, além de possuir os menores valores absolutos de resistência à compressão, também apresenta maiores quantidades de pelotas com

resistência à compressão menor que 150 e 200 kgf, tanto na faixa menor, quanto na maior. Por outro lado, é a amostra com o menor desvio-padrão, também em relação as duas faixas. Ainda em relação a Tabela V.9, pode-se afirmar que as pelotas B e C tem praticamente as mesmas propriedades, sendo a pelota C com melhores índices de abrasão e tamboramento, além de um menor desvio padrão e a pelota B com valores um pouco superiores de resistência à compressão. Ademais, na faixa menor a pelota B possui menor quantidade de pelotas com resistência à compressão abaixo de 150 e 200 kgf, enquanto que na faixa maior a pelota C que possui tais características.

Além disso, observa-se na Tabela V.9 que, como esperado, pelotas nas faixas maiores possuem resistência à compressão mais elevada, necessitando de cargas absolutas maiores para se fraturar. Porém, não significa que sejam mais resistentes, visto que, em geral a resistência à fratura de materiais frágeis, se dada em MPa, diminui com o aumento do tamanho da partícula.

#### **V.9 Distribuições de energias de fratura de pelotas por compressão**

A análise granulométrica (Tabela V.7) indica que, para as amostras estudadas, aproximadamente 90% das pelotas se encontram retidas entre 16 e 9 milímetros. Nos testes de compressão propostos pela ISO, devem ser ensaiadas as faixas de 16 a 12,5 mm e de 12,5 a 9 mm. Entretanto, a fim de fornecer subsídios para a previsão da degradação durante o manuseio, é importante cobrir a maior parcela do material. Assim, os testes de compressão propostos pelo LTM compreendem as faixas de 19 a 16, 16 a 14, 14 a 12,5 e 12,5 a 9 milímetros. Além de aumentar o intervalo de tamanhos, que passa a abranger quase 95% das pelotas dos lotes das pelotas estudadas, o ensaio de compressão do LTM também diminui a amplitude do intervalo entre as faixas, fazendo uma análise mais detalhada. Isso ainda permite analisar em detalhe a influência do tamanho de pelota na resistência de pelotas à fratura.

A Figura V.12 apresenta os resultados da média da força de resistência à compressão individual (kgf) das pelotas pelo tamanho representativo destas para as amostras C e D. Observa-se que a amostra D possui algumas réplicas em algumas faixas e a variabilidade dos resultados não é significativa. Além disso, nota-se que há uma leve tendência ao aumento das forças com o tamanho das pelotas até a faixa de tamanhos de 15 mm e, depois desse tamanho as forças tendem a diminuir. No entanto, sabe-se que partículas menores são mais resistentes, por possuírem menor quantidade de defeitos. Dessa forma, para melhor analisar a resposta de pelotas aos esforços durante o manuseio, tanto no impacto, como na compressão, sugere-se trabalhar com energia

aplicada e não a força, como já mencionado na seção IV.12. Por conseguinte, pode ser ilustrado nas Figuras V.13 e V.14, para as mesmas pelotas C e D, respectivamente.

A partir dos resultados dos ensaios de compressão individual de pelotas, realizados no LTM (seção IV.12), foi possível determinar a distribuição de energias de fratura para compressão nas faixas granulométricas de interesse, bem como seus desvios padrão e truncamentos superiores. As Figuras V.13 e V.14 apresentam as distribuições de energias de fratura de compressão das Pelotas C e D, respectivamente, bem como sua curva ajustada na distribuição Log-Normal Truncada. A energia específica de fratura é a energia a qual metade da população da amostra em questão necessitou para se fraturar volumetricamente. Observa-se que tanto para a amostra C, como para a amostra D, quanto maior o tamanho das pelotas, menor a sua energia específica de fratura. Ademais, é possível afirmar que a pelota C, além de apresentar uma distribuição mais bem-comportada, possui energia de fratura de compressão mais elevada que a pelota D.

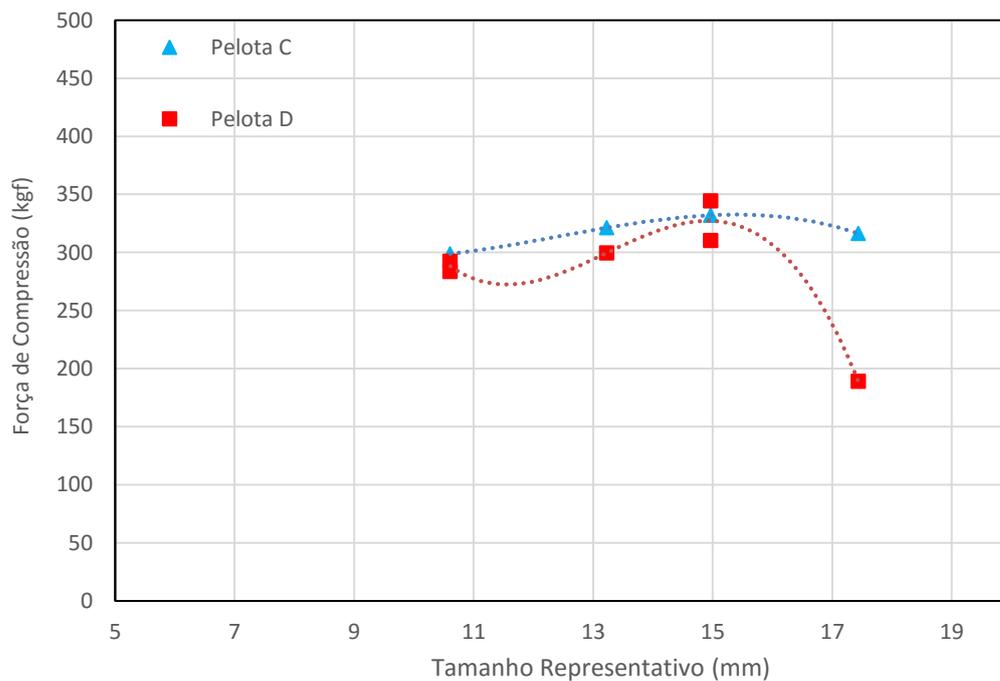


Figura V.12 – Comparação da variação da força de resistência média à compressão em relação ao tamanho das pelotas C e D

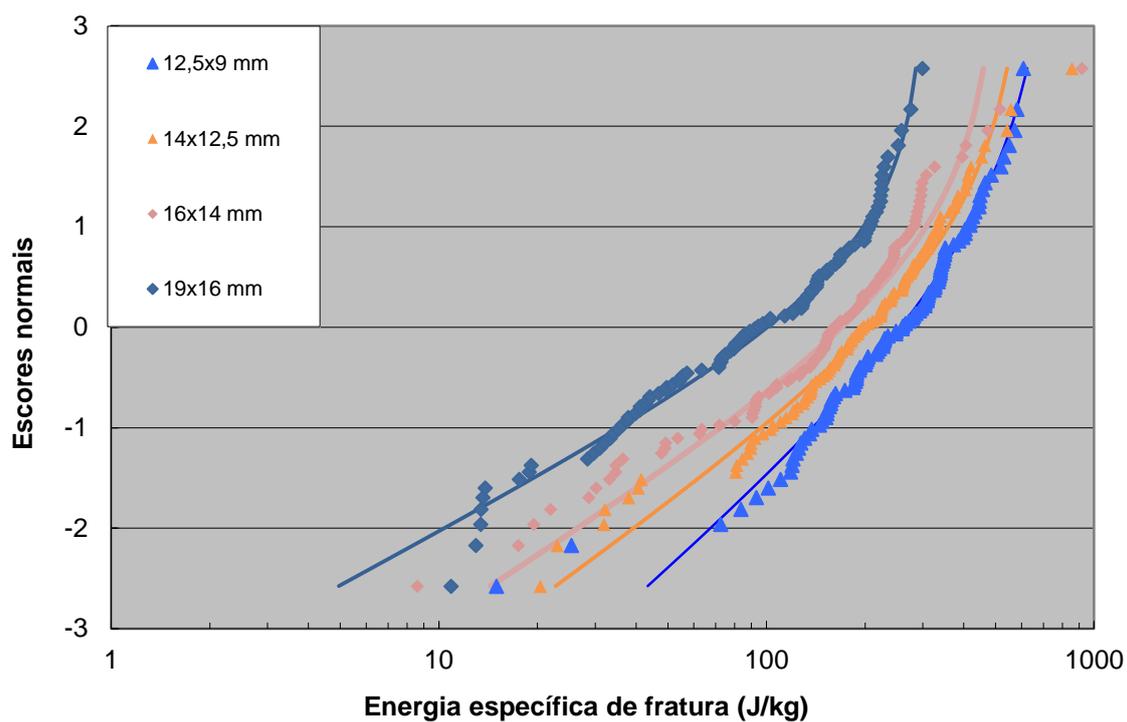


Figura V.13 – Distribuição das energias de específicas de fratura por compressão da pelota C nos tamanhos 19x16, 16x14, 14x12,5, 12,5x9 e 9x8 mm, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas são seus ajustes à distribuição Log-Normal Truncada

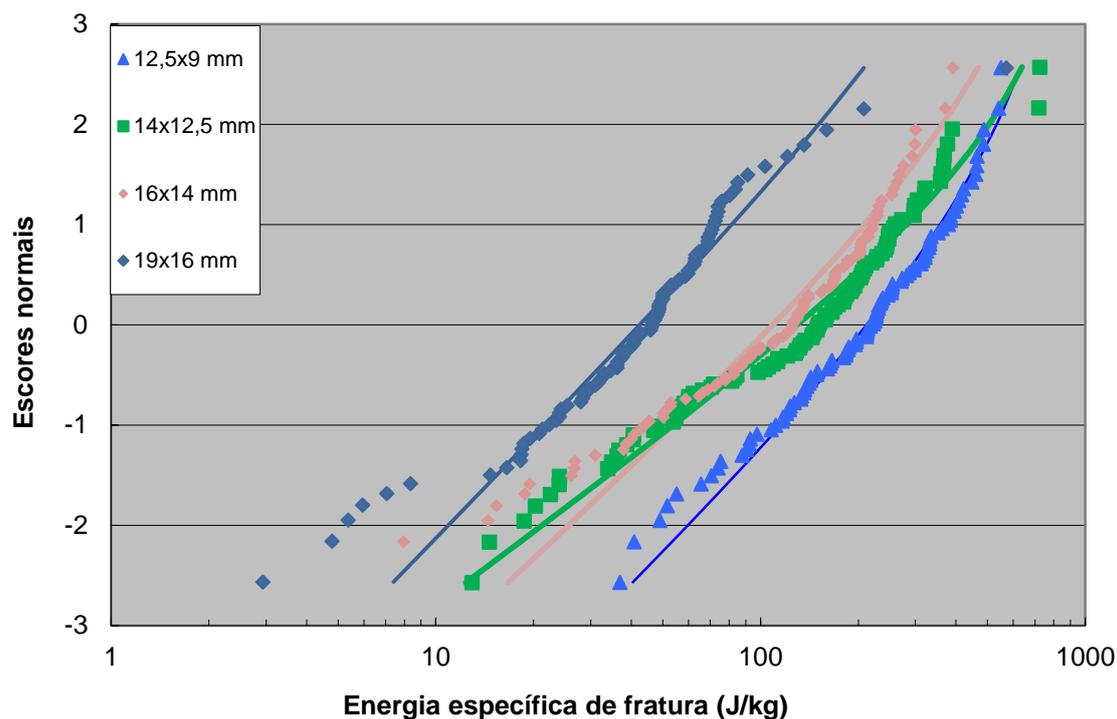


Figura V.14 – Distribuição das energias de específicas de fratura por compressão da pelota D nos tamanhos 19x16, 16x14, 14x12,5, 12,5x9 e 9x8 mm, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas são seus ajustes à distribuição Log-Normal Truncada

Com o objetivo de realizar a modelagem das energias de fratura, utiliza-se o ensaio de compressão individual de partículas. Diferentemente da ISO (seção IV.11), que adota apenas o valor médio da força de compressão, em kgf, das pelotas ensaiadas (60 no ensaio ISO), utiliza-se a energia (J), obtida pela área abaixo da curva Força (N) x Deslocamento (mm) de cada pelota (100 pelotas no ensaio LTM), como ilustrado na Figura V.15. Em seguida, divide-se o valor encontrado da energia pela massa da pelota analisada e se obtém a energia específica (J/kg) de fratura de compressão para cada pelota.

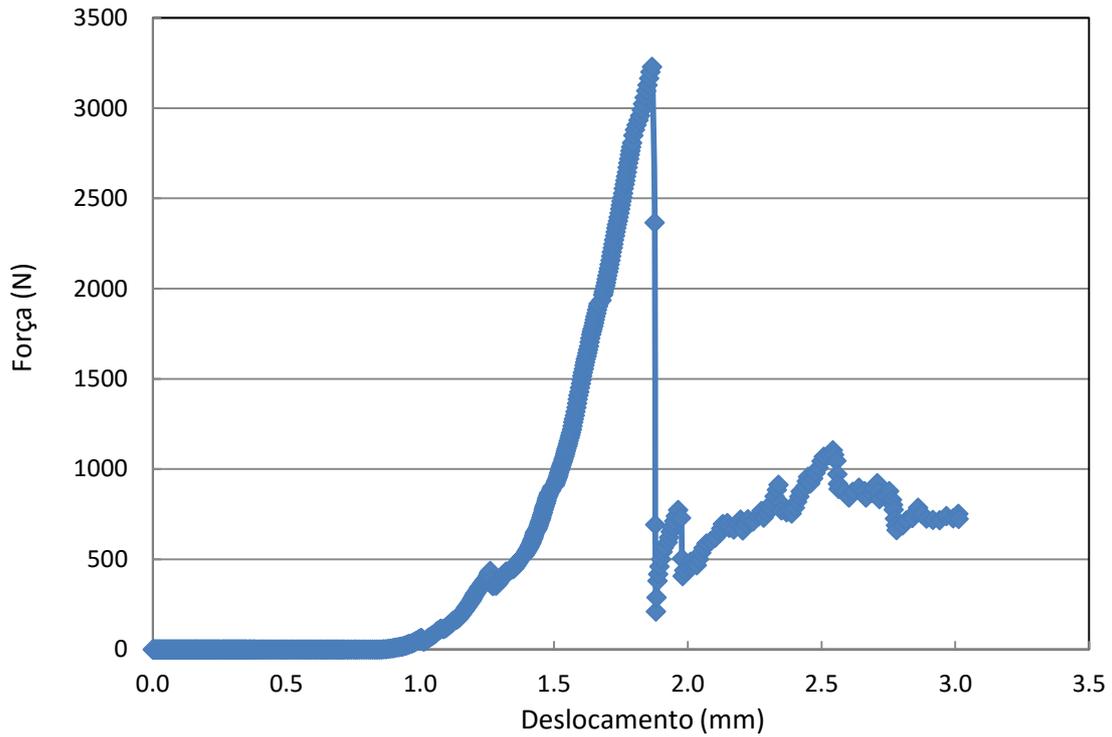


Figura V.15 – Gráfico de Força x Deslocamento de uma pelota da amostra C para a obtenção da Energia (J)

Os valores da Energia Específica de Fratura de Compressão de cada pelota são, em seguida, classificados em ordem crescente e esse *ranking* é normalizado, sendo transformado em escores normais, referentes à distribuição gaussiana. Dessa forma, o valor de energia de fratura de cada pelota ensaiada representa um ponto no gráfico de Escores Normais versus Energia Específica de Fratura, como pode ser observado nas Figuras V.13 e V.14.

A partir das curvas ajustadas para cada tamanho, se determinou o desvio padrão ( $\sigma$ ), energia específica de fratura mediana ( $E_{50}$ ) e truncamento superior ( $E_{max}$ ) da distribuição, cujas equações estão descritas na seção III.13 e os valores dos parâmetros calculados são apresentados na Tabela V.10, também para as mesmas pelotas C e D.

Tabela V.10 – Valores da Energia de Fratura ( $E_{50}$ ), Desvio-Padrão ( $\sigma$ ) e Truncamento ( $E_{m\acute{a}x}$ ) das distribuições em função do tamanho das Pelotas C e D

Tamanho Médio (mm)	E50 (J/kg)	E máx (J/kg)	$\sigma$ (J/kg)	Pelota
10,6	382,24	778,3	0,82	C
13,2	308,11	627,3	1,00	C
15,0	252,57	514,2	1,10	C
17,4	149,91	305,2	1,32	C
10,6	303,44	1000	0,80	D
13,2	148,75	1000	0,96	D
15,0	141,68	1000	0,75	D
17,4	44,28	1000	0,69	D

Nota-se que, ao contrário do carregamento absoluto (Figura V.12), a energia específica mediana de fratura por compressão varia inversamente ao tamanho das pelotas. A figura ainda mostra que os ajustes das distribuições deram mais peso às pelotas com menores resistências, às vezes sacrificando o ajuste das mais resistentes. Isso se fez necessário para se aproximar da realidade da degradação durante o manuseio e transporte, pois as pelotas com menor resistência são as que efetivamente quebram e o objetivo do presente trabalho é prever, com a maior precisão possível, a quebra das mesmas. Além disso, com vistas a atingir uma melhor qualidade de ajuste e facilidade na posterior modelagem, foi usado truncamento em um valor fixo ( $E_{m\acute{a}x}$  igual a 1000) para as pelotas A, B e D, enquanto que houve variação do valor do truncamento ( $E_{m\acute{a}x}$  em função do valor de  $E_{50}$ ) para as pelotas C e E.

A partir das energias obtidas para cada faixa de tamanhos ensaiada, se estabeleceu um modelo empírico, capaz de prever as energias específicas de fratura de compressão de cada pelota extrapolando os tamanhos ensaiados, como pode ser observado na Figura V.16 para as Pelotas C e D. Da mesma forma, para os desvios-padrão e truncamento a partir dos dados de energia de fratura de compressão de cada faixa granulométrica, como pode ser observado nas Figuras V.17 e V.18 para as pelotas C e D.

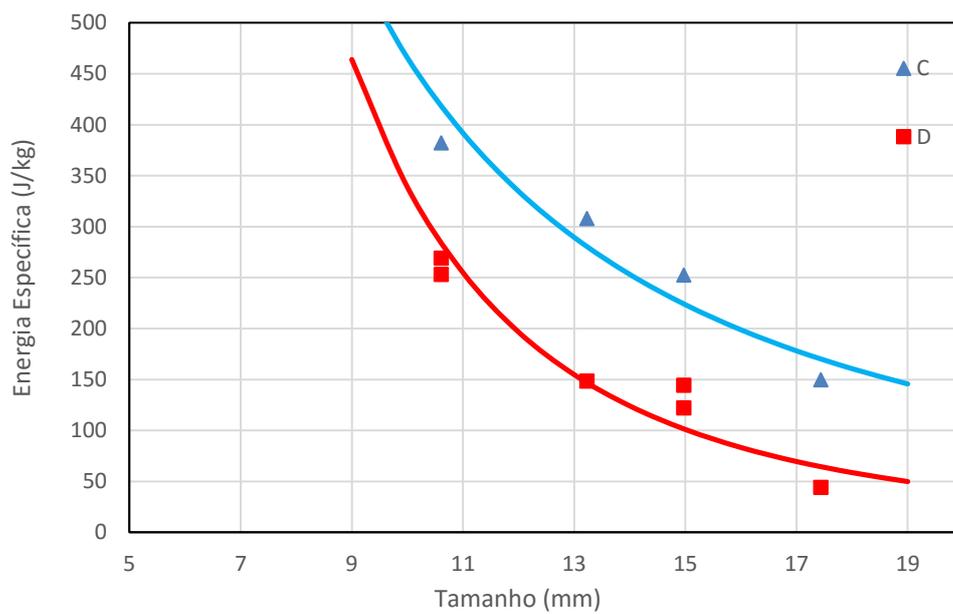


Figura V.16 – Energia mediana específica de fratura pelo tamanho das Pelotas C e D, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas são seus modelos

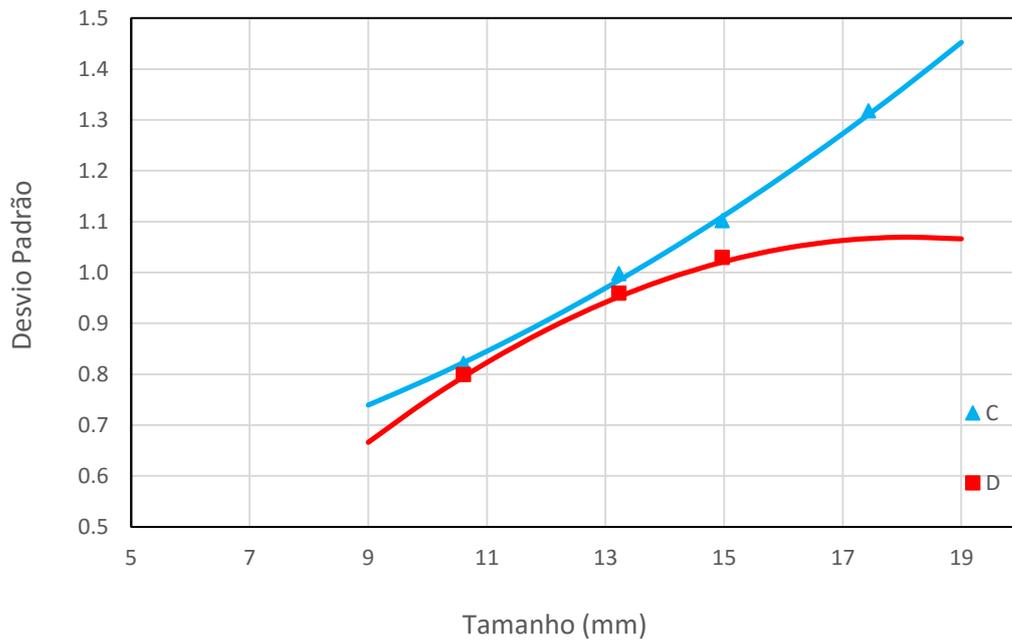


Figura V.17 – Variação do desvio-padrão com o tamanho para as pelotas C e D, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas são seus modelos

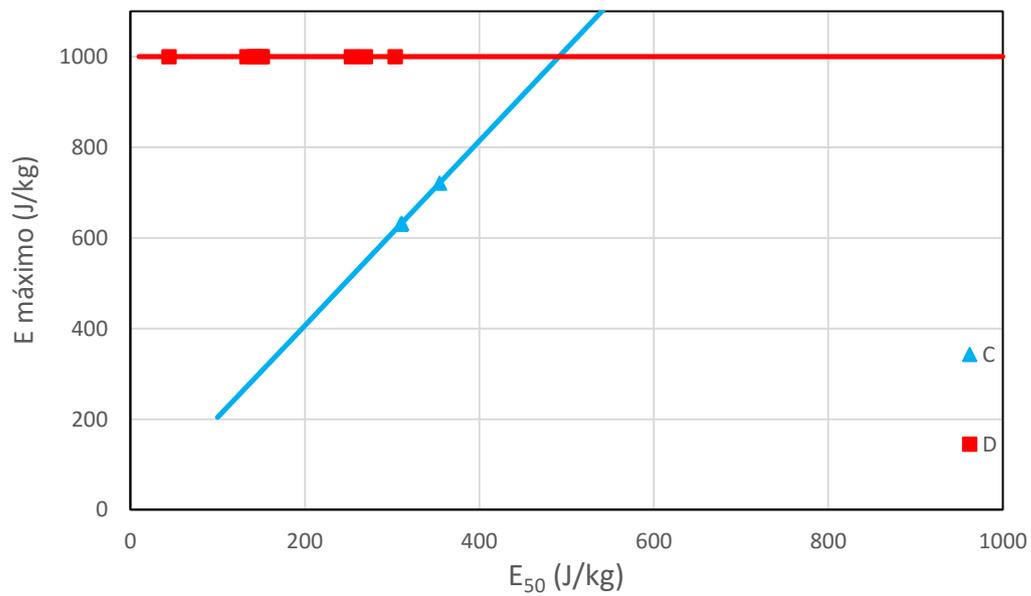


Figura V.18 – Variação dos parâmetros E<sub>50</sub> e E<sub>max</sub> para as Pelotas C e D

## V.10 Probabilidades de Quebra de pelotas por Impacto Simples

Como já mencionado, o principal objetivo do trabalho é reproduzir, com o máximo de realismo, as condições que causam a degradação mecânica de pelotas. Para isso, deve-se caracterizar adequadamente os mecanismos de quebra. Como há diferenças nos mecanismos de fratura entre carregamento lento (compressão) e choques (impactos) que ocorrem no manuseio de particulados (Tavares, 2007), Silveira (2012) decidiu caracterizar as pelotas através de impactos pela Energia de Fratura na CCI, pelos ensaios de Impactos Repetidos, que também se utiliza o mecanismo da CCI e pelos ensaios no JKRBT (impactos simples). Porém, os eventos que ocorrem durante o manuseio de pelotas são predominantemente por impacto simples, enquanto que os impactos oriundos da CCI são impactos duplos. Como, ao longo do presente trabalho, foram caracterizados e estudados 5 diferentes tipos de pelotas, foi perceptível a diferença, em relação à suscetibilidade à degradação das pelotas, para os dois tipos de impacto (simples e duplo). Essa diferença não é constante, variando para as amostras de pelotas. Como o trabalho de Silveira (2012) só contava com uma amostra de pelota, não foi possível observar a diferença de suscetibilidade à degradação por impactos duplos e simples. A Figura V.20 ilustra essas diferenças para a amostra de pelota C.

A partir dos parâmetros da distribuição Log-Normal Truncada ( $E_{50}$ ,  $E_{máx}$  e  $\sigma$ ), exemplificados para as Pelotas C e D, na Tabela V.10 (seção V.9), são construídas as curvas de distribuição de energia específica de fratura acumulada. Dessa forma, é possível adicionar os resultados de probabilidade de fratura do primeiro impacto a fim de se comparar a suscetibilidade à degradação dos ensaios de carregamento e impacto. Percebe-se que essa suscetibilidade não é constante, sendo algumas pelotas mais resistentes aos ensaios de compressão lenta que aos ensaios de impacto, enquanto outras possuem comportamento contrário. Além disso, a intensidade da variação também pode mudar com o tamanho da pelota. Como o ensaio de compressão é normatizado e realizado de forma praticamente automatizada, minimizando a probabilidade de erros do operador, a distribuição de energia de fratura, atribuída por este ensaio será considerada constante (mesmo desvio-padrão) para o impacto, enquanto os outros parâmetros ( $E_{50}$  e  $E_{máx}$ ) serão multiplicados por um fator, com objetivo de deslocar a curva para a direita ou para esquerda, dependendo da suscetibilidade de cada pelota ao impacto e à compressão.

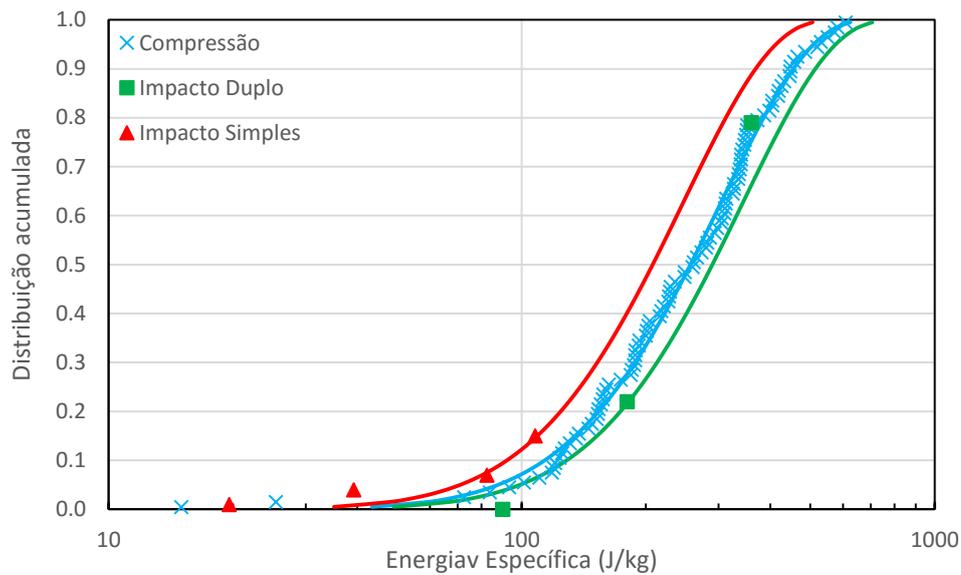


Figura V.20 – Comparação das energias específicas de fratura de compressão, impacto duplo e impacto simples para as pelotas da amostra C, na faixa de 12,5 x 9,0 mm de diâmetro, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas são os ajustes do modelo

Nesta seção serão apresentados apenas os resultados de probabilidade de quebra referentes aos impactos simples, oriundos dos ensaios de Autofratura, pois, como é possível perceber na Figura V.21, há grandes diferenças nas probabilidades de quebra entre os ensaios de Autofratura e JKRBT. Apesar de só se analisar a parte inferior da curva no ensaio de autofratura, este mede a energia de impacto pela altura de queda, donde se acredita que há uma confiabilidade maior nos dados do que no ensaio do JKRBT, onde a energia é medida por um rotor que projeta a pelota em uma bigorna. Sendo assim, a probabilidade de haver ricochete da pelota nas bigornas e/ou no rotor do JKRBT é grande, fazendo com que a energia de impacto que a partícula é submetida esteja sendo, consideravelmente, subestimada, sendo, na realidade, maior que a esperada (calculada).

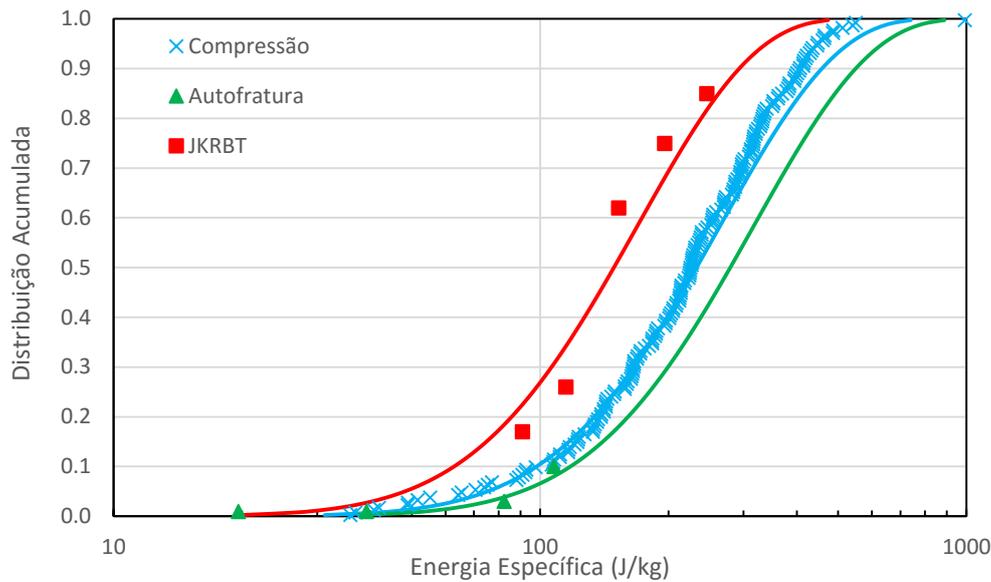


Figura V.21 – Comparação das energias específicas de fratura dos ensaios de Compressão, Autofratura (impacto simples) e JKRBT (impacto simples) para a Pelota D, na faixa de 12,5x9 milímetros, onde os símbolos são dados experimentais e as linhas são os ajustes do modelo

Com as energias obtidas em cada faixa de tamanhos ensaiada, posteriormente ajustadas nas curvas de distribuição das energias, se estabeleceu um modelo empírico, capaz de prever as energias específicas de fratura de impactos simples de cada pelota, extrapolando os tamanhos ensaiados, como pode ser observado nas Figuras V.22 e V.23 para as Pelotas C e E. Observa-se que, para a Pelota C, foram obtidos dois modelos de energia de fratura: um para pelotas menores e outro para maiores que 12,5 mm. Foi necessário devido a diferença de resistência mecânica das pelotas de diferentes faixas, quando submetidas a impactos simples. Como já mencionado, o desvio padrão ( $\sigma$ ) foi presumido como o mesmo da distribuição das energias de fratura da compressão (seção V.9), enquanto os parâmetros  $E_{m\acute{a}x}$  e  $E_{50}$  são os mesmos encontrados na distribuição da compressão, porém multiplicados pelo mesmo fator de deslocamento da curva de impactos simples. Dessa forma, para as pelotas que tinham o valor do  $E_{m\acute{a}x}$  atrelado ao valor do  $E_{50}$ , a proporção continua a mesma e, as pelotas que tinham o valor do  $E_{m\acute{a}x}$  constante, são multiplicadas por um fator, como pode ser observado nas Figuras V.24 para as pelotas C e E.

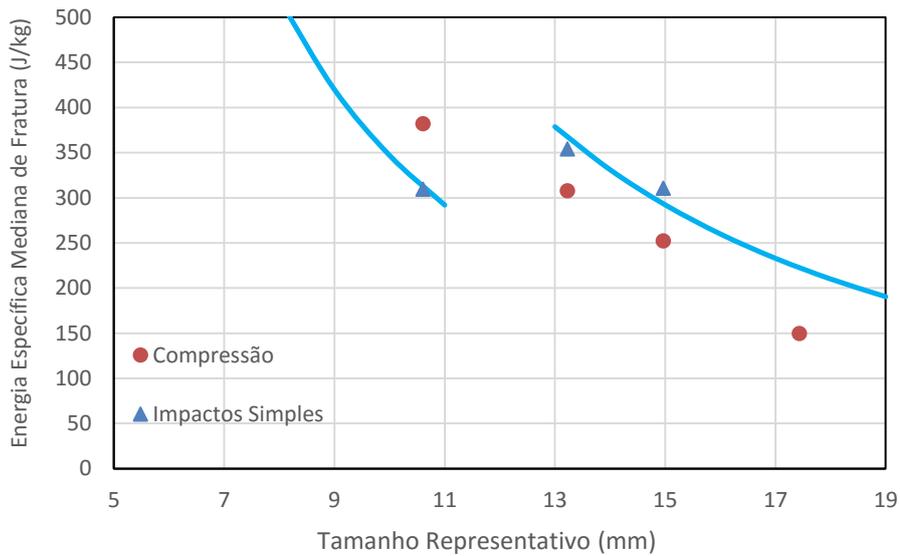


Figura V.22 – Comparação das energias de fratura de compressão e de impactos simples para a Pelota C, onde os símbolos são dados experimentais e as linhas são os ajustes do modelo

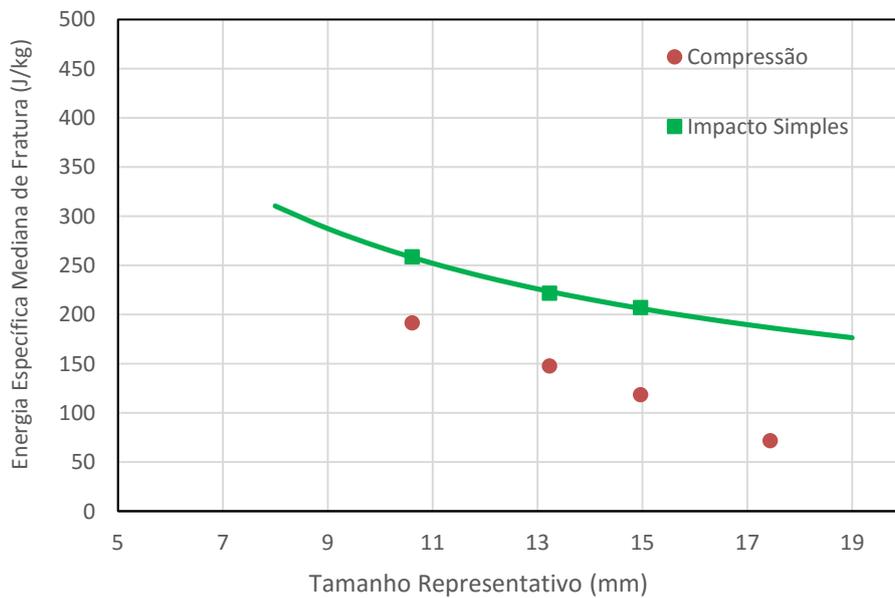


Figura V.23 – Comparação das energias de fratura de compressão e de impactos simples para a pelota E, onde símbolos são dados experimentais e linhas são os ajustes do modelo

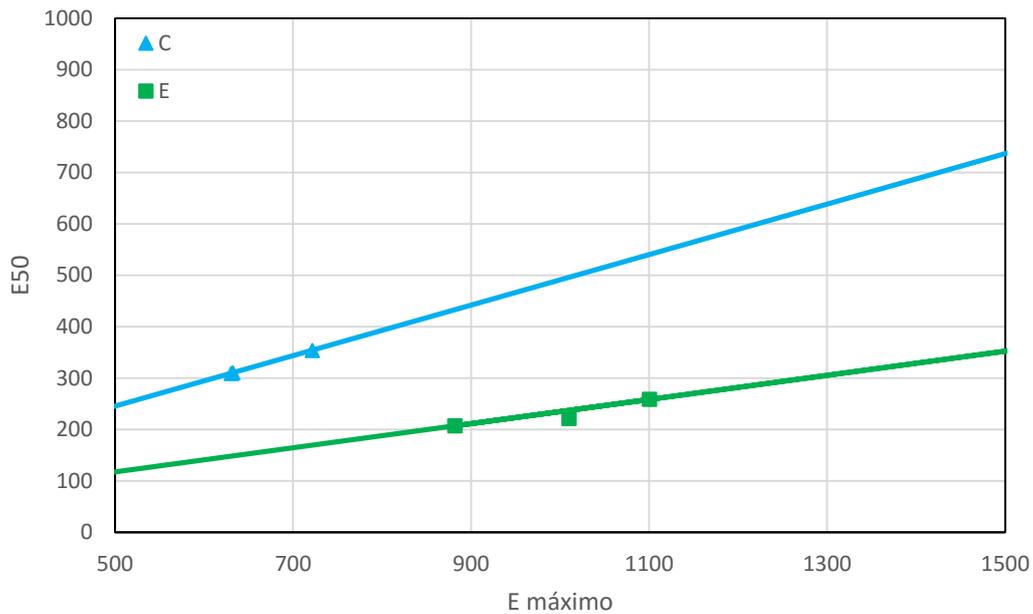


Figura V.24 – Relação entre os parâmetros E50 e Emax para as pelotas C e E, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas os ajustes do modelo

Resumidamente, para se determinar a probabilidade de fratura por impacto simples de cada pelota deve-se utilizar os sub-modelos de Energia Específica de Fratura ( $E_{50}$ ), Desvio-padrão ( $\sigma$ ) e do Truncamento ( $E_{m\acute{a}x}$ ). Estes são descritos pelas Equações V.1, V.2 e V.3.

A energia específica mediana de fratura pode ser descrita:

$$E_{50}(dp) = C_{pelota} * \left(\frac{dp_0}{dp}\right)^d \quad (V.1)$$

sendo  $E_{50}$  a Energia de Fratura Específica em função do tamanho da partícula, medido em J/kg,  $C_{pelota}$  a constante de cada amostra de pelota (essa constante é igual a energia de fratura da pelota de 10 mm), também medida em J/kg,  $dp_0$  igual a 10 milímetros,  $dp$  o tamanho da pelota, em milímetros e  $d$  uma constante de cada pelota. Os valores das constantes das pelotas se encontram na Tabela V.11 e a Figura V.25 ilustra o comportamento das diferentes energias das pelotas em relação ao tamanho das mesmas.

Tabela V.11 – Valores das constantes de cada pelota para o E<sub>50</sub>

Pelota	C <sub>pelota</sub> [J/kg]	d	Intervalo
A	252	2,734	8-19 mm
B	255	2,567	8-19 mm
C	347	1,811	8-12,5 mm
C	609	1,811	12,5-19 mm
D	433	2,821	8-19 mm
E	268	0,653	8-19 mm

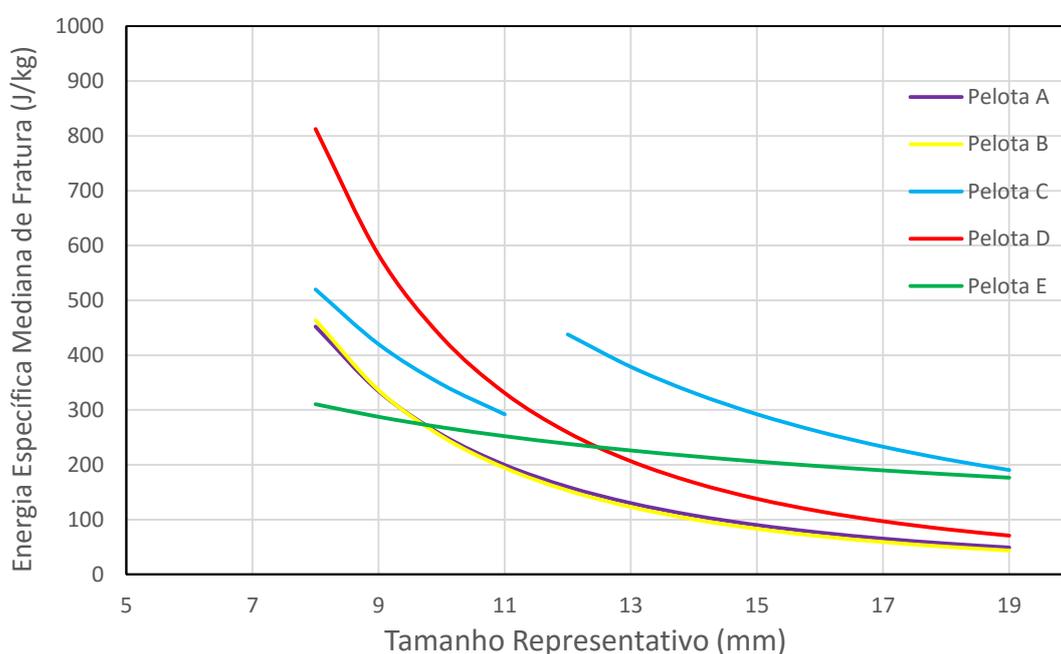


Figura V.25 – Comparação da variação das energias específicas de fratura das pelotas A, B, C, D e E em relação aos seu tamanhos para impacto simples

O desvio-padrão ( $\sigma$ ) pode ser modelado por uma equação polinomial de segundo grau:

$$\sigma(dp) = a_1 * dp^2 + a_2 * dp + a_3 \quad (V.2)$$

sendo  $\sigma(dp)$  o desvio padrão em função do tamanho da partícula e  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  são as constantes de cada pelota para satisfazer o polinômio da equação de cada uma delas. Os valores das constantes

para cada uma das amostras se encontram na Tabela V.12, enquanto a comparação dos desvios se encontra na Figura V.26.

Tabela V.12 – Valores das constantes de cada pelota para o polinômio da equação do  $\sigma$

Pelota	$a_1$	$a_2$	$a_3$
A	-0,0021	0,1004	-0,0651
B	0	-0,028	1,062
C	0,0023	0,0069	0,491
D	-0,0048	0,1744	-0,5146
E	0,0109	-0,2685	2,5513

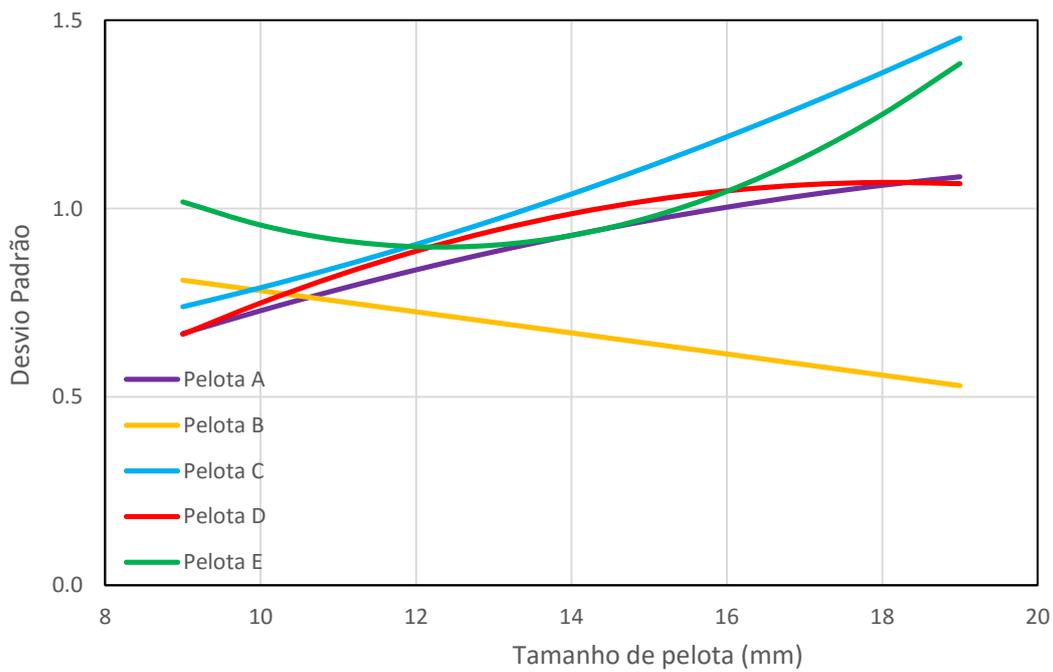


Figura V.26 – Comparação da variação do desvio-padrão ( $\sigma$ ) das diferentes pelotas em relação ao tamanho das mesmas

O parâmetro do truncamento ( $E_{\text{máx}}$ ) é dado por uma equação de reta:

$$E_{m\acute{a}x}(E_{50}) = b_1 * E_{50} + b_2 \quad (V.3)$$

sendo  $E_{m\acute{a}x}(E_{50})$  o truncamento em função da energia mediana específica de fratura da partícula e  $b_1$  e  $b_2$  são as constantes de cada pelota para satisfazer a equação de reta de cada uma delas. Os valores das constantes de cada amostra se encontram na Tabela V.13.

Tabela V.13 – Valores das constantes de cada pelota para o polinômio da equação do  $E_{m\acute{a}x}$  (Equação V.3)

Pelota	$b_1$	$b_2$
A	0	630
B	0	580
C	2,036	0
D	0	1285
E	4,252	0

### V.11 Acúmulo de dano nas pelotas

Para se modelar a quebra volumétrica das pelotas, além da energia de fratura, desvio-padrão e truncamento, é necessário calcular o acúmulo de dano que a pelota sofre em cada impacto, para cada faixa granulométrica. Esse acúmulo de dano é medido pelo parâmetro  $\gamma$  (gama), segundo o modelo proposto por Tavares e King (2002).

O ajuste do gama ( $\gamma$ ) foi realizado baseado nas distribuições de energia de fratura e nas proporções de pelotas quebradas por impacto, resultantes dos ensaios de impactos repetidos (simples e duplos). As Figuras V.27 e V.28 apresentam resultados dos ensaios (símbolos) e previsões (curvas), provenientes do ajuste do valor do  $\gamma$  para os impactos simples e duplo, respectivamente, da pelota D.

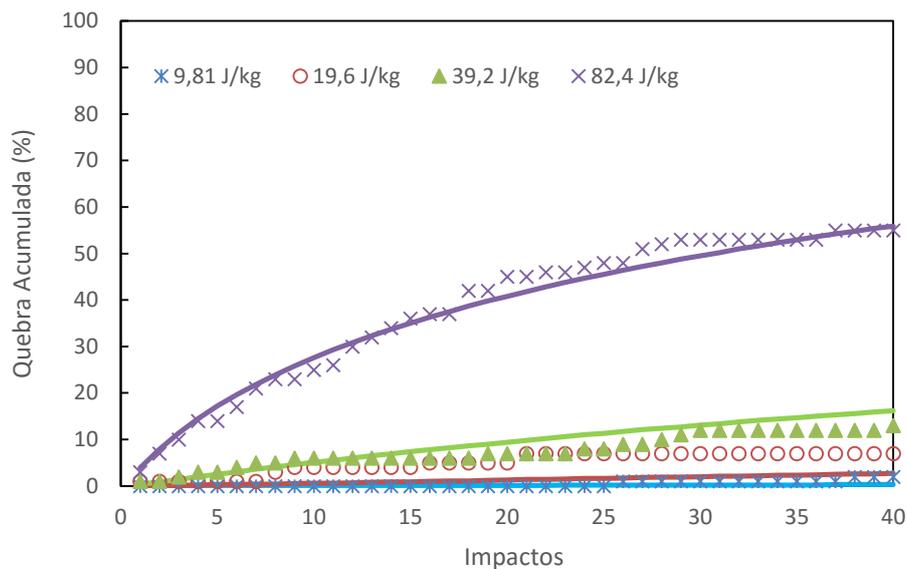


Figura V.27 – Comparação da porcentagem quebrada de pelotas no ensaio de impactos repetidos com impactos simples para diferentes energias, para a a Pelota D, na faixa de 12,5 x 9 mm, com um valor de gama igual a 7,5. Os símbolos são dados experimentais e as linhas são os ajustes do modelo.

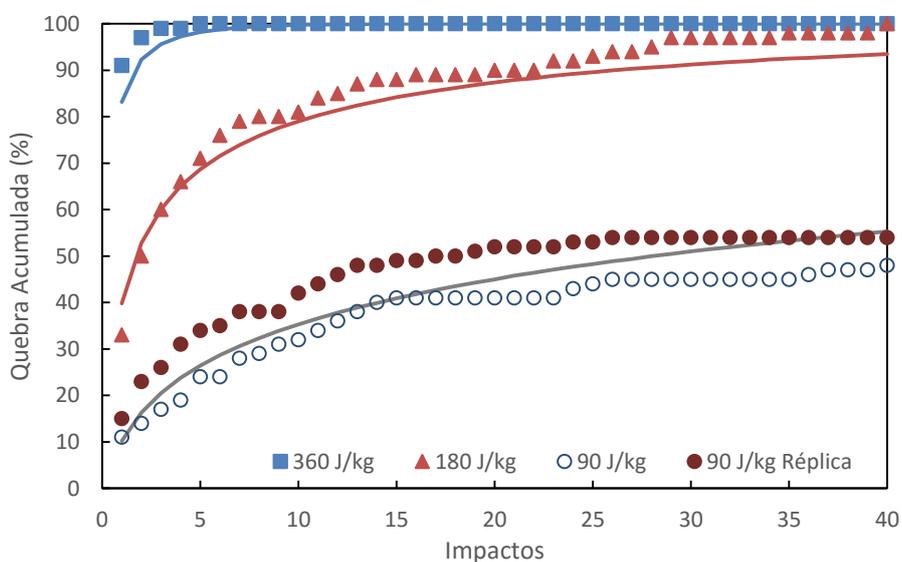


Figura V.28 – Comparação da porcentagem quebrada de pelotas no ensaio de impactos repetidos com impactos duplos para diferentes energias, para a a Pelota D, na faixa de 12,5 x 9 mm, com um valor de gama igual a 11,4. Os símbolos são dados experimentais e as linhas são os ajustes do modelo.

Assim como a energia de fratura, o  $\gamma$  também varia para cada tipo de pelota e em cada faixa granulométrica, e, ao contrário do que sugeriu Tavares (2009), ele também varia pelo tipo de impacto (simples ou duplo). As Figuras V.29 e V.30 ilustram a diferença dos valores de  $\gamma$  para os diferentes tamanhos das pelotas C e E nos impactos duplo e simples. Em geral, pode-se afirmar que o valor de  $\gamma$  é menor no impacto simples do que no duplo, ou seja, a pelota tende a acumular mais Dano no impacto simples.

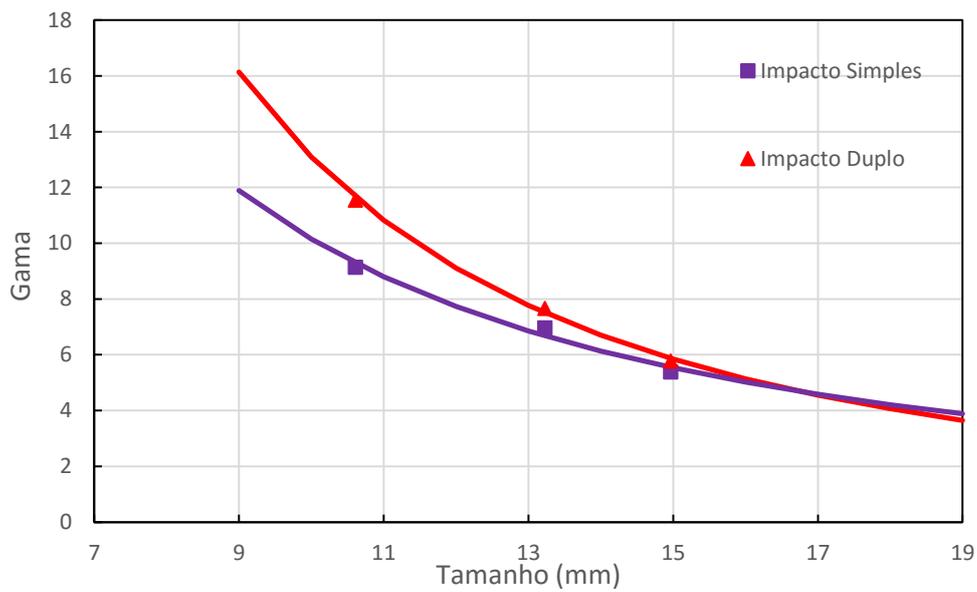


Figura V.29 – Comparação do valor de Gama ( $\gamma$ ) para impactos simples e duplos da Pelota C, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas são os ajustes do modelo

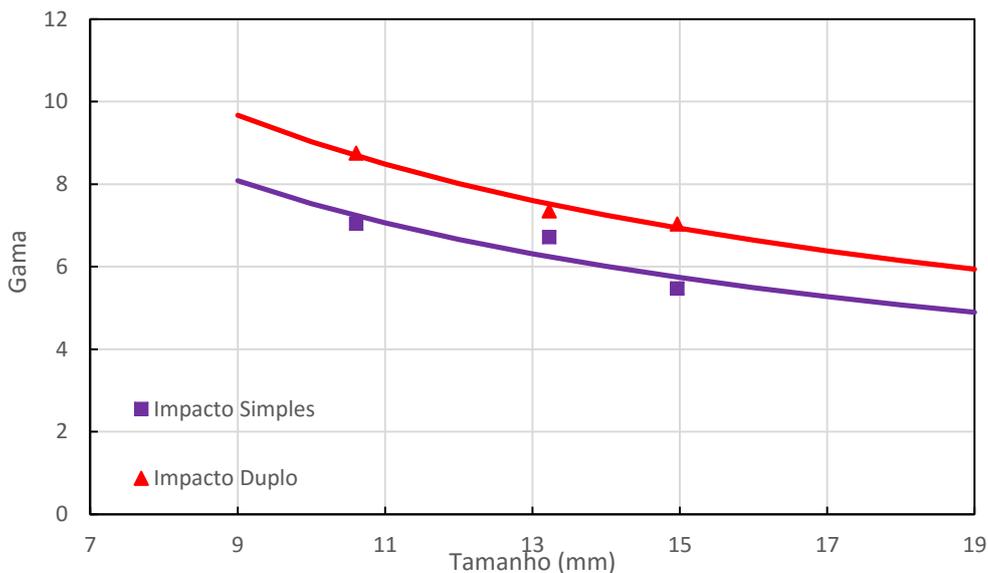


Figura V.30 – Comparação do valor de Gama ( $\gamma$ ) para impacto simples e duplo da Pelota E, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas são os ajustes do modelo

Com os valores de gama ( $\gamma$ ) obtidos, para cada faixa de tamanhos ensaiada, foi proposto um modelo empírico, capaz de prever o acúmulo do dano, para impactos simples, de cada pelota, extrapolando os tamanhos ensaiados, como pode ser observado na Figura S para as Pelotas A, B, C, D e E. A equação do modelo (Equação V.4) do  $\gamma$  é dada por:

$$\gamma(dp) = P * \left(\frac{dp_0}{dp}\right)^q \quad (V.4)$$

sendo  $\gamma$ , adimensional, o valor do acúmulo de dano da partícula,  $P$  a constante de cada pelota (essa constante é igual ao dano da pelota de 10 mm), também sem dimensão,  $dp_0$  igual a 10 milímetros,  $dp$  o tamanho da pelota, em milímetros e  $q$  uma constante referente a cada pelota, também adimensional. Os valores das constantes das pelotas se encontram na Tabela V.14, enquanto a Figura V.31 ilustra a variação dos valores de  $\gamma$  em função do tamanho das pelotas.

Tabela V.14 – Valores das constantes de cada pelota para a equação do gama ( $\gamma$ ) para impacto simples

Pelota	$P$	$q$
A	13,0	0,502
B	8,16	1,337

C	10,15	1,497
D	7,65	0,474
E	7,53	0,671

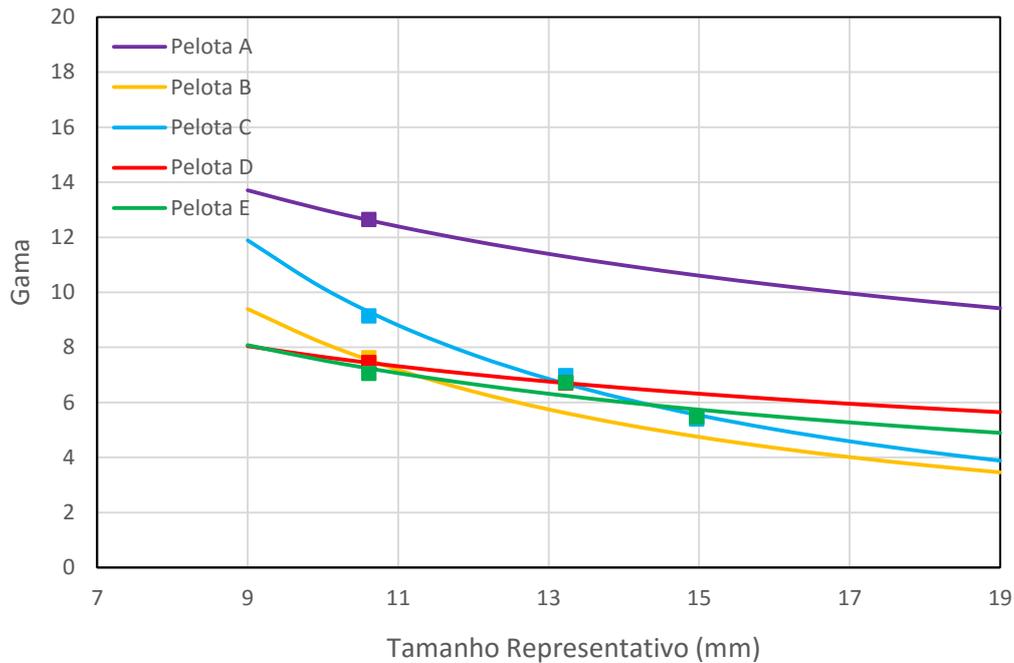


Figura V.31 – Comparação dos valores de gama ( $\gamma$ ) para impacto simples em função do tamanho, para as pelotas A, B, C, D e E, sendo os símbolos os dados experimentais e as linhas os ajustes dos modelos de cada pelota

## V.12 Função Quebra das pelotas

A Figura V.30 apresenta a distribuição granulométrica, proveniente dos ensaios de DWT (seção IV.8) e autofratura (seção IV.12), da amostra E, na faixa de 12,5 x 9,0 mm, submetida a diversas energias de impacto. Nota-se que a Figura V.32 ilustra a relação da energia de impacto com a energia de fratura da pelota, onde a maior energia de impacto aplicada resulta na menor granulometria dos fragmentos.

Observou-se que o padrão de fragmentação das pelotas não variava muito, podendo se considerar o mesmo padrão para todas as amostras. Sendo assim, a Figura V.33 apresenta os

resultados normalizados da modelagem das distribuições granulométricas das pelotas A, B, C, D e E, mostrando o bom ajuste do modelo da função beta incompleta aos dados experimentais. Entretanto, observou-se que há uma variação dos parâmetros da função em função do tamanho das pelotas.

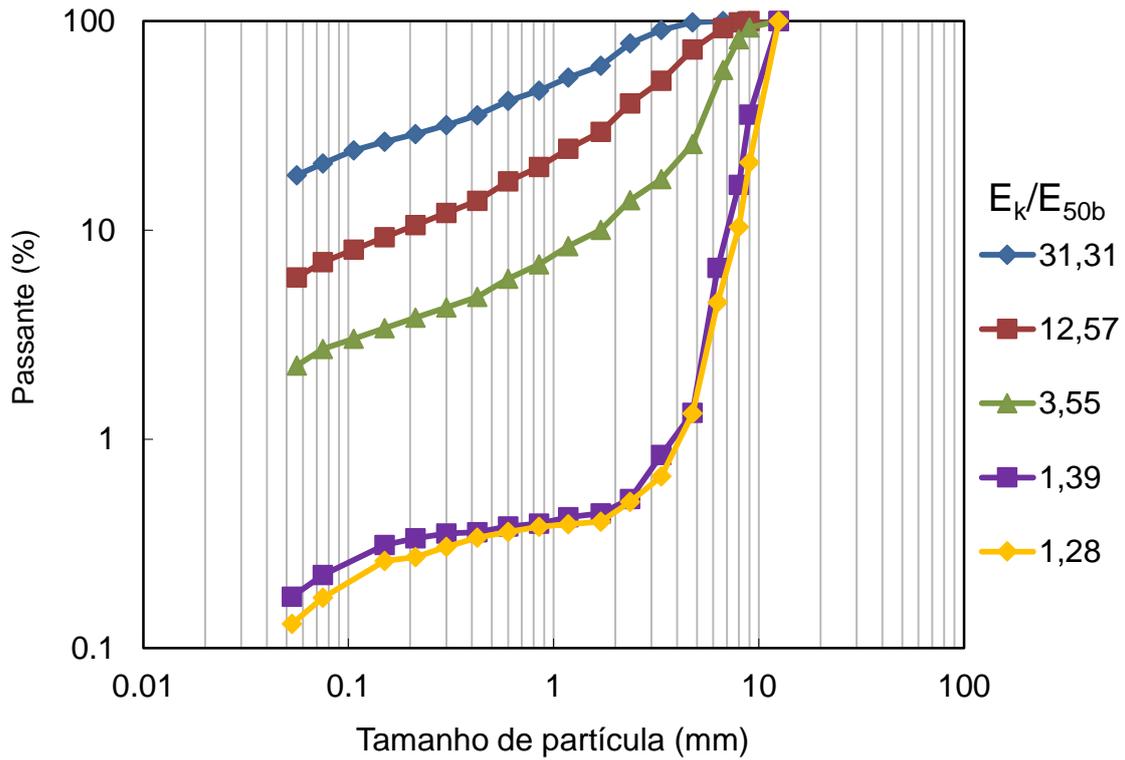


Figura V.32 – Resultados experimentais das análises granulométricas da pelota E, na faixa de 12,5 x 9,0 mm, submetidas a energias de impacto em função da energia de fratura das partículas que efetivamente quebraram ( $E/E_{50b}$ )

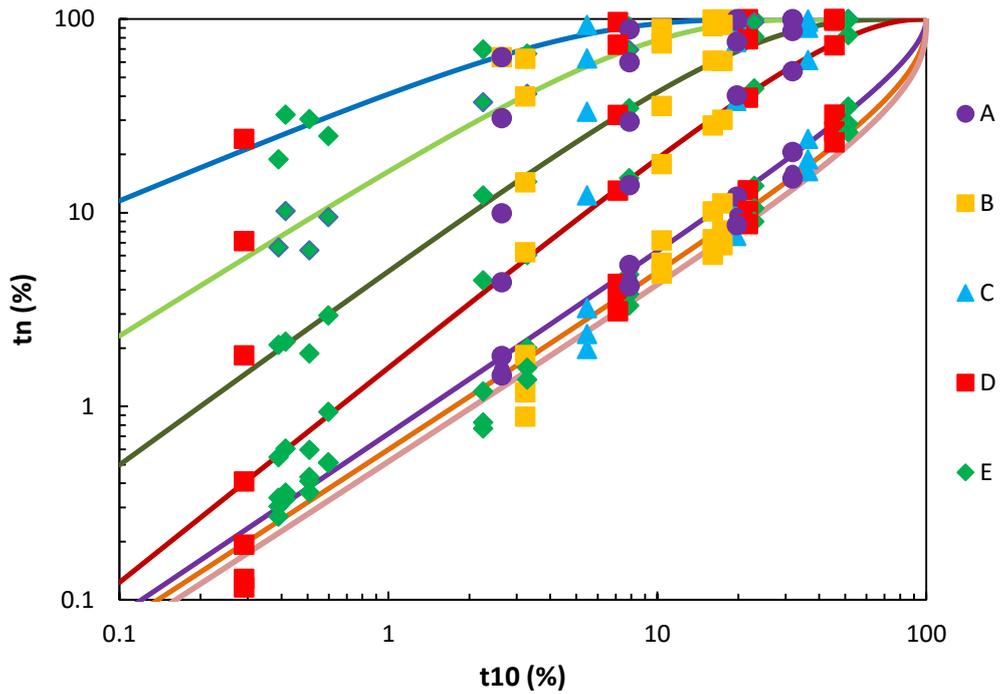


Figura V.33 – Relação entre  $t_{10}$  e  $t_{nS}$  para as amostras A, B, C, D e E, onde os símbolos são dados experimentais e as linhas são ajustes do modelo

A Figura V.34 ilustra os dados normalizados para os dados de abrasão, apresentando os ajustes da função quebra da abrasão para pelotas, também em relação a função beta incompleta. A Tabela V.15 apresenta um resumo dos parâmetros da função beta incompleta definidos para as pelotas.

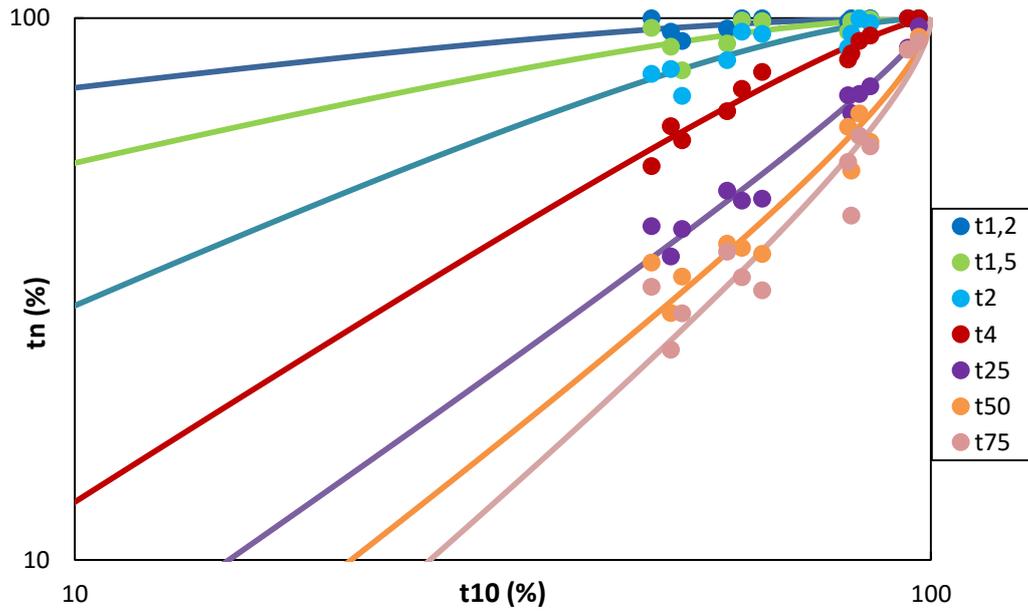


Figura V.34 – Relação entre  $t_{10}$  e  $t_n$ s da abrasão, para as amostras A, B, C, D e E, onde os símbolos são dados experimentais e as linhas são ajustes do modelo

Tabela V.15 – Parâmetros da função distribuição de quebra de pelotas e abrasão de pelotas para as amostras A, B, C, D e E

n	Fragmentação superficial		Fragmentação volumétrica					
	Abrasão		12,5 x 9,0 mm		14,0 x 12,5 mm		16,0 x 14,0 mm	
	$\alpha_n$	$\beta_n$	$\alpha_n$	$\beta_n$	$\alpha_n$	$\beta_n$	$\alpha_n$	$\beta_n$
1,2	0,21	2,07	0,58	19,84	0,27	18,61	0,28	40,00
1,5	0,38	1,83	0,87	12,59	0,51	8,49	0,48	10,67
2	0,71	1,79	1,01	5,21	0,76	4,76	0,84	6,49
4	1,02	1,36	1,11	2,47	1,04	2,15	1,08	2,57

25	1,09	0,77	0,93	0,52	0,96	0,55	0,95	0,53
50	1,19	0,64	0,90	0,36	0,92	0,37	0,91	0,35
75	1,32	0,61	0,90	0,31	0,91	0,31	0,90	0,28

---

Nesse ponto é relevante avaliar a relação entre a energia de impacto e a fragmentação resultante. A Figura V.35 resume os resultados dos ensaios de fragmentação para as pelotas, mostrando que não há grandes variações na fragmentação das amostras A, B, C, D e E, bem como nos seus tamanhos. A Tabela V.16 apresenta os valores dos parâmetros  $A$ ,  $b'$  e  $E_0$  para a função quebra volumétrica das pelotas, a qual se propõe descrever por meio da Equação V.5:

$$t_{10} = A \left( 1 - e^{-b' \left( \frac{E}{E_{50b}} - E_0 \right)} \right) \quad (\text{V.5})$$

sendo  $t_{10}$  a porcentagem de material gerado na quebra que é menor que o tamanho equivalente a 10% do tamanho original da partícula,  $A$  e  $b'$  funções do minério ajustáveis,  $E$  a energia de impacto a que as pelotas são submetidas,  $E_{50b}$  a mediana da distribuição da energia de fratura das pelotas que efetivamente quebraram naquele impacto e  $E_0$  um parâmetro de ajuste do modelo.

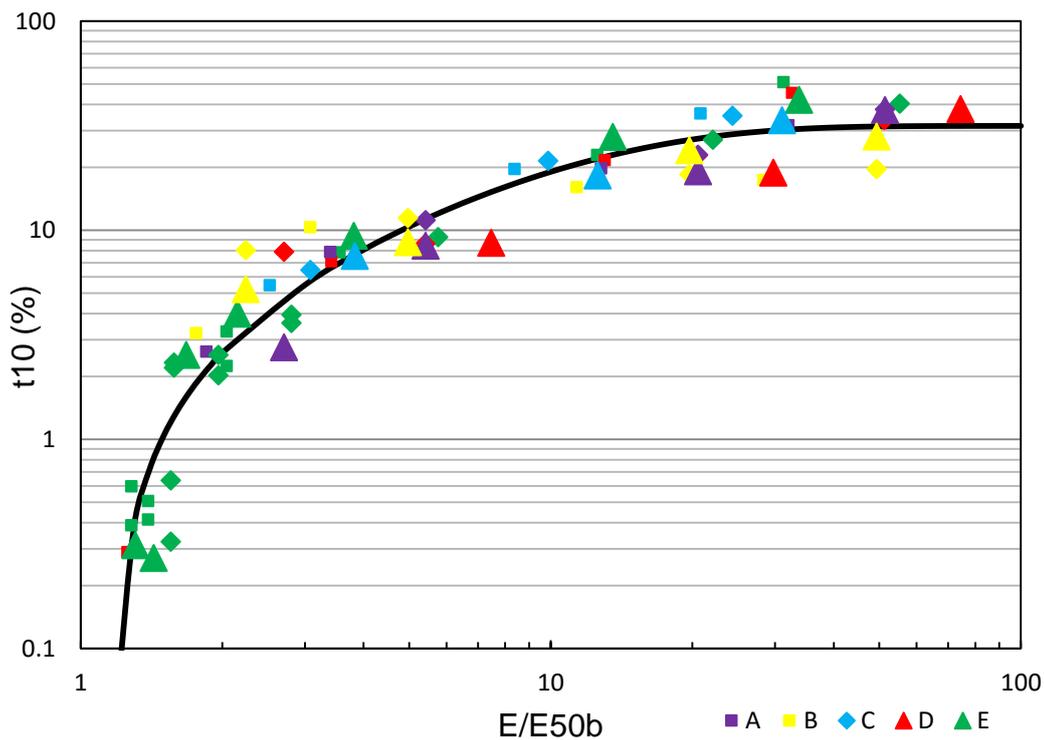


Figura V.35 – Modelagem da relação entre o  $t_{10}$  da fragmentação volumétrica e a energia de impacto para as pelotas A, B, C, D e E, onde os símbolos são os dados experimentais, enquanto que a linha é o ajuste do modelo (Equação V.5)

Tabela V.16 – Parâmetros do modelo da função quebra volumétrica de pelotas

A (%)	$b'$ (-)	$E_0$ (-)
31,6	0,105	1,182

### V.13 Fragmentação superficial

Por definição, partículas são consideradas quebradas volumetricamente quando perdem mais de 10% de sua massa original. Dessa forma, partículas que sofrem perdas mássicas menores sofrem fratura superficial, também chamadas de abrasão ou lascamento. Assim como a energia de fratura, a suscetibilidade à perda de massa por abrasão é dependente do tamanho da partícula, da energia de impacto e é diferente para as cinco amostras. A Figura V.36 apresenta os resultados

comparativos da perda mássica acumulada de quatro das cinco pelotas estudadas para o ensaio de autofratura (seção IV.8) a 4 metros de altura (aproximadamente 39,6 J/kg. A Figura V.37 apresenta a perda mássica percentual por impacto de 19,6 J/kg (2 metros de altura de queda). Nota-se que há uma maior perda mássica nos cinco primeiros impactos, porém, posteriormente, se estabilizam. É evidente que há diferenças nas suscetibilidades da perda mássica por impactos de baixa magnitude para cada tipo de pelota. De acordo com o ensaio de abrasão da ISO (Tabela V.8), as pelotas D e E apresentariam maior suscetibilidade à abrasão, enquanto as pelotas A, B e C apresentariam maior resistência à abrasão. No entanto, não é o que se pode observar nos resultados dos ensaios de autofratura (Figuras V.36 V.37).

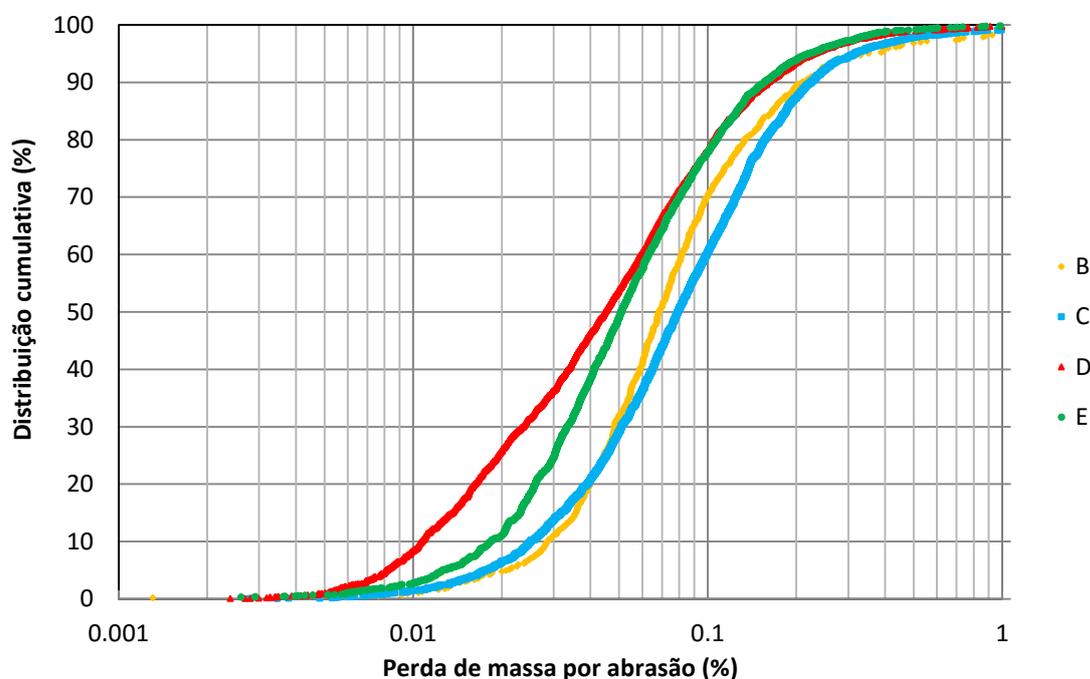


Figura V.36 – Distribuição dos dados experimentais da abrasão percentual acumulada das pelotas B, C, D e E, por impactos de altura de queda de 4 metros

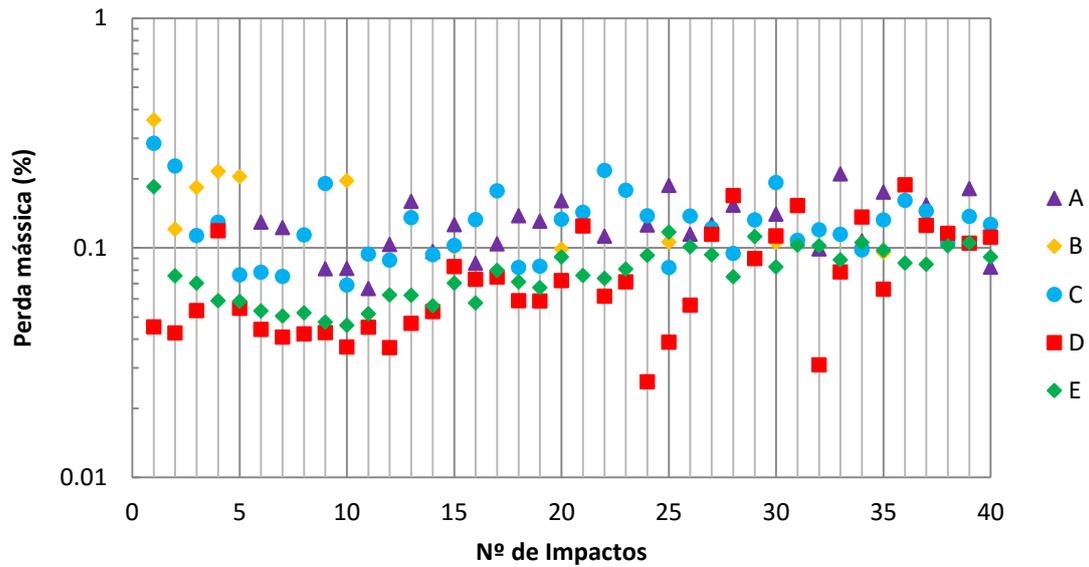


Figura V.37 – Dados experimentais da perda mássica percentual das pelotas A, B, C, D e E, por impactos de altura de queda de 2 metros

Com o objetivo de mostrar o comportamento da abrasão e a sua variação com a energia de impacto, são apresentadas as Figuras V.38 e V.39. Estas apresentam os resultados do ensaio de autofratura, com diferentes alturas de queda, para a pelota C e D, respectivamente. Pode ser observado que o percentual de perda mássica não aumenta de forma linear com o aumento da energia de impacto. Também é observado que, para os cinco primeiros impactos, não há muita diferença na perda mássica em função com a energia de impacto, sendo mais evidente depois do quinto impacto.

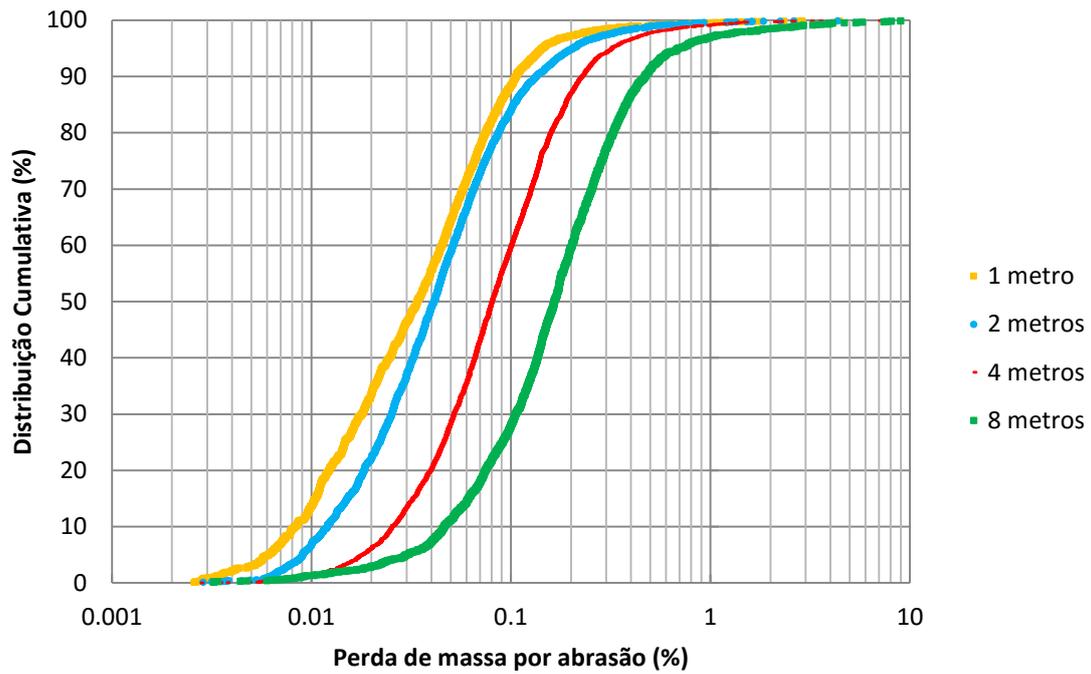


Figura V.38 – Distribuição dos dados experimentais da perda mássica percentual acumulada da pelota C, por impactos de diferentes energias (alturas)

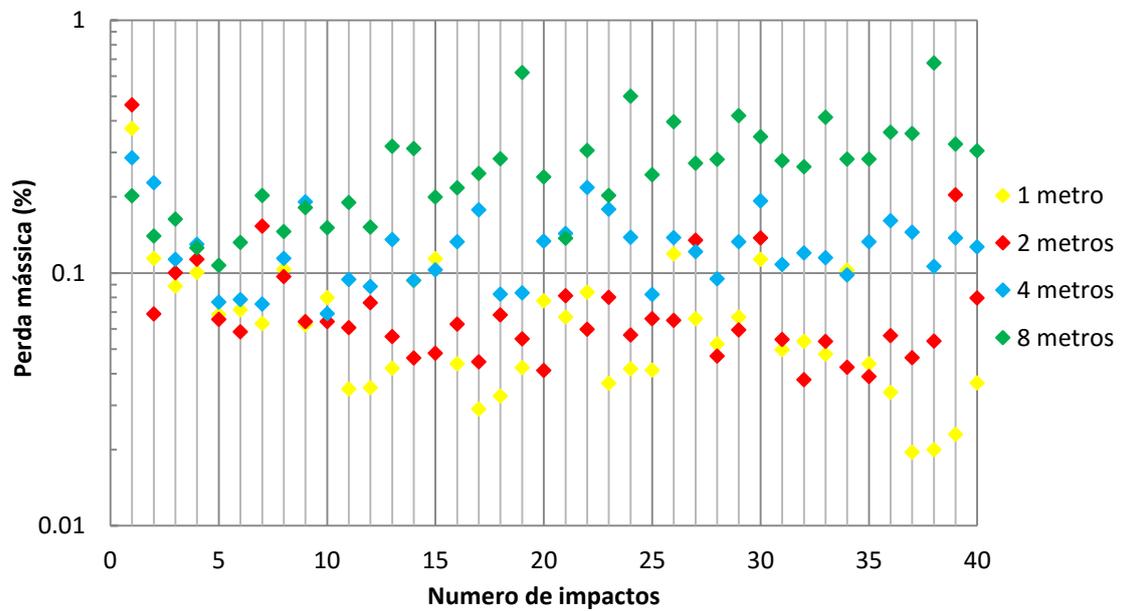


Figura V.39 – Dados experimentais da perda mássica percentual da pelota D, por impactos de diferentes alturas

A Figura V.40 apresenta os resultados do ensaio de autofratura de 8 metros (82,4 J/kg), para a pelota E, com o objetivo de mostrar a variação da perda mássica com o tamanho da partícula. Nota-se que há menor perda mássica percentual, por impacto, nas pelotas da faixa de 12,5 x 9,0 milímetros. Entretanto, não há variação significativa entre as pelotas das faixas de 14,0 x 12,5 e de 16,0 x 14,0 milímetros. Dessa forma, modelou-se um fator para o tamanho da pelota, onde se igualou as perdas mássicas para partículas maiores que a faixa de 12,5 x 9,0 milímetros.

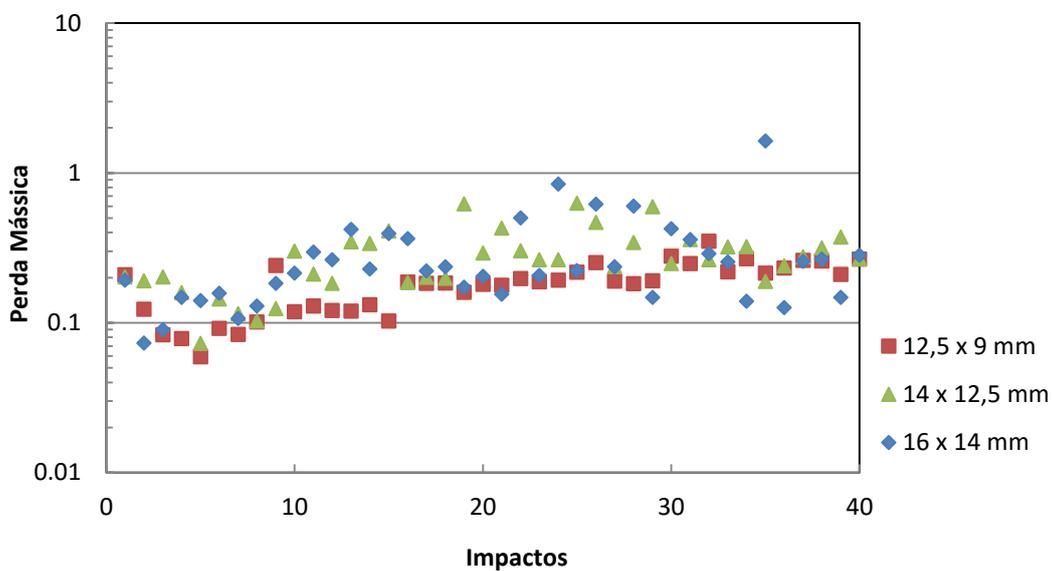


Figura V.40 – Resultados experimentais da perda mássica percentual por impacto da pelota E, submetida a impactos de 8,4 metros em diferentes tamanhos

A Figura V.41 apresenta os dados de perda mássica por impacto, por diferentes energias, das diferentes pelotas. Os dados são provenientes dos ensaios de autofratura, realizados em diferentes alturas (energias de impacto) e no ensaio de tamboramento LTM (seção IV.4). Já a Figura V.42 apresenta os mesmos dados, porém para diferentes tamanhos da pelota E. Esses dados foram ajustados a uma expressão tipo potência para cada pelota, resultando na Equação V.6:

$$Taxa\ de\ abras\tilde{a}o = (C_{abras\tilde{a}o} E_k^{d_{abras\tilde{a}o}}) f_{tamanho} \quad (V.6)$$

onde  $C_{\text{abrasão}}$  e  $d_{\text{abrasão}}$  são constantes de cada pelota,  $f_{\text{tamanho}}$  é o fator relativo ao tamanho da pelota e  $E_k$  a energia específica de impacto, em J/kg. Houve um número limitado de experimentos com tamanhos diferentes de pelotas para outras amostras. Sendo assim, há menor confiabilidade na estimativa do fator de tamanho na equação. Entretanto, tendo em vista a coerência dos dados, esse modelo é considerado satisfatório.

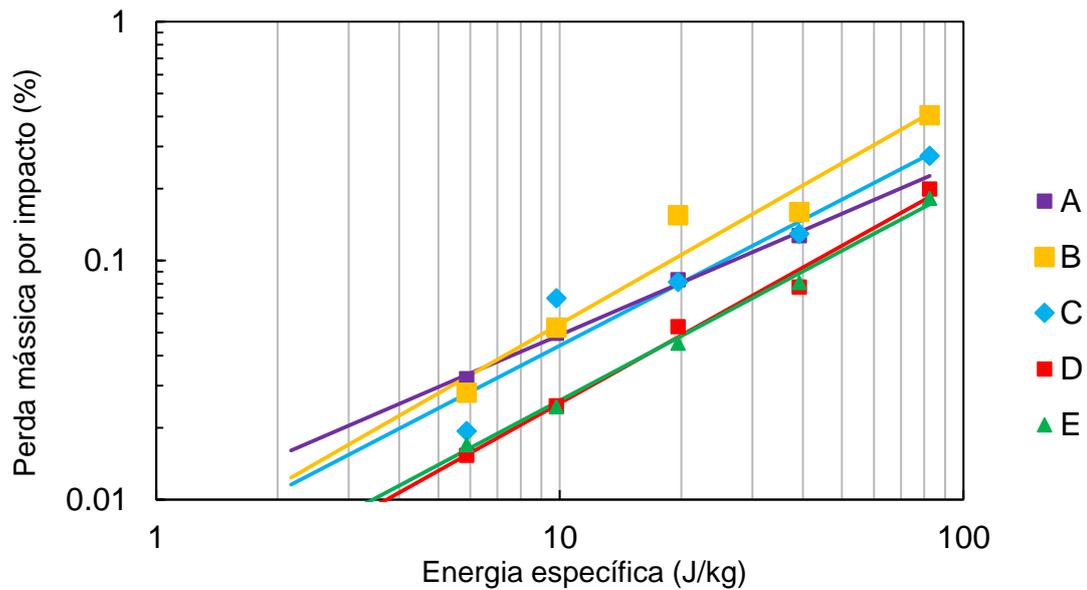


Figura V.41 – Comparação da perda mássica por impacto, em função da energia específica de impacto para as pelotas A, B, C, D e E, na faixa de 12,5 x 9,0 mm, onde os símbolos são dados experimentais e as linhas são ajustes ao do modelo

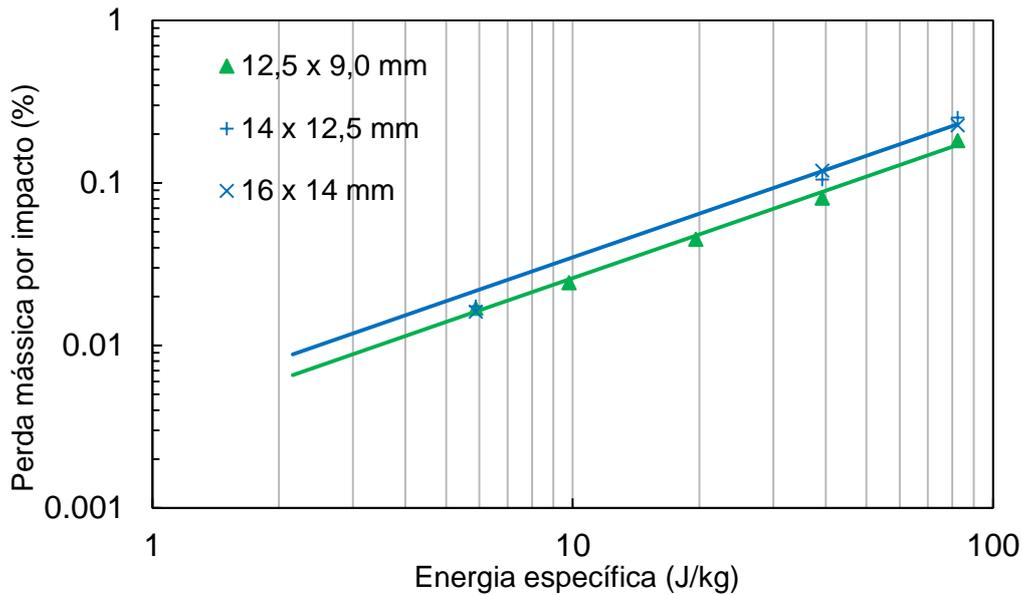


Figura V.42 – Comparação da perda mássica por impacto, em função da energia específica de impacto para a pelota E, nas faixas de 12,5 x 9,0 mm, 14 x 12,5 mm e 16 x 14 mm, onde os símbolos são dados experimentais e as linhas são oriundas do modelo

Uma observação em relação ao modelo é que ele permite identificar uma transição suave entre o mecanismo da fragmentação superficial e volumétrica. A partir do aumento da energia de impacto, a abrasão aumenta até o ponto de saturação, que são 10% de perda mássica, passando a sofrer fratura volumétrica. Outra observação é em relação a falta de correlação com os resultados do ensaio de abrasão da ISO (Figura V.43). A Tabela V.9 mostra a evidência da menor suscetibilidade à abrasão das pelotas D e E em relação as pelotas B e C. A Figura V.44 evidencia uma boa correlação com o resultado do ensaio de microdureza na borda das pelotas (Seção V.3), onde as pelotas B e C apresentaram menores durezas superficiais que as demais pelotas, enquanto que as pelotas D e E apresentaram os maiores valores de dureza nas bordas.

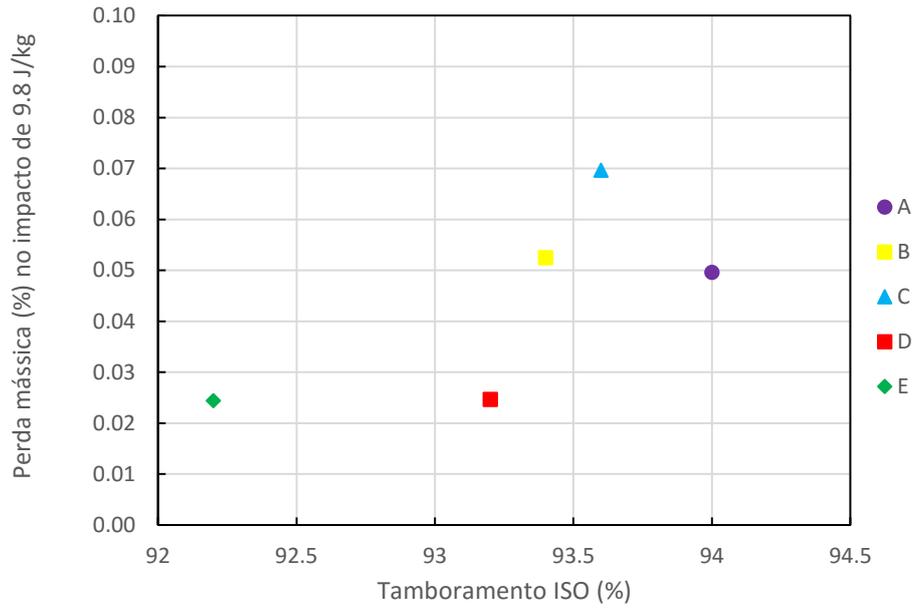


Figura V.43 – Comparação dos resultados dos ensaios de tamboramento da ISO com os resultados de perda mássica, provenientes do ensaio de Autofratura com sucessivas quedas de 1 metro para as pelotas A, B, C, D e E

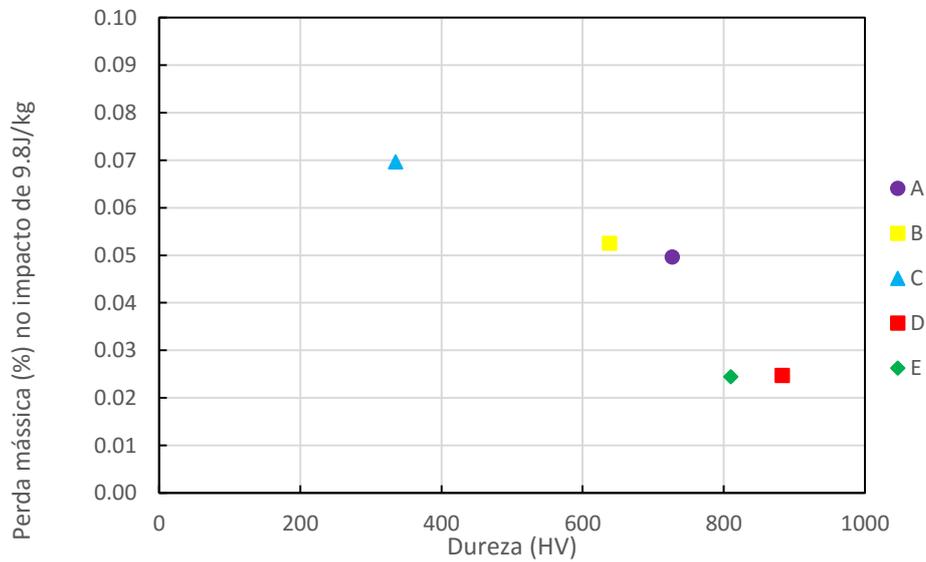


Figura V.44 – Comparação dos resultados dos ensaios de microdureza com os resultados de perda mássica, provenientes do ensaio de Autofratura com sucessivas quedas de 1 metro para as pelotas A, B, C, D e E

## V.14 Validação do Modelo de degradação para pelotas individuais

Com o objetivo de validar os sub-modelos calibrados e ajustados para pelotas, foram realizadas simulações de ensaios de queda individual de pelotas em placa de aço, prevendo sua suscetibilidade à fratura e abrasão em impactos sucessivos de diversas energias. A Figura V.45 apresenta a comparação da proporção de pelotas, da amostra E, quebradas quando submetidas a impactos simples de diferentes energias. Observa-se que o modelo teve uma excelente aderência na previsibilidade da quebra a baixas energias. Acredita-se que o motivo de ter subestimado a quantidade quebrada, no ensaio de queda de 11 metros (impactos de 107,9 J/kg), foi o ricochete das partículas. Como o coeficiente de restituição da pelota, quando impactada no aço é de 0,39 (Tavares *et al.*, 2012), após sofrer o impacto, referente a queda de 11 metros de altura do ensaio, a pelota quica, atingindo uma altura de aproximadamente 4,3 metros e impactando novamente. O impacto secundário é de menor magnitude, visto que é referente a uma menor altura e, provavelmente ocorre no piso do laboratório. Dessa forma, como observado na Figura V.35, o modelo tem ótima aderência aos primeiros impactos, enquanto que, à medida que se tem mais impactos, há acúmulo do dano devido aos impactos primários e secundários, fazendo com que a quebra fique subestimada.

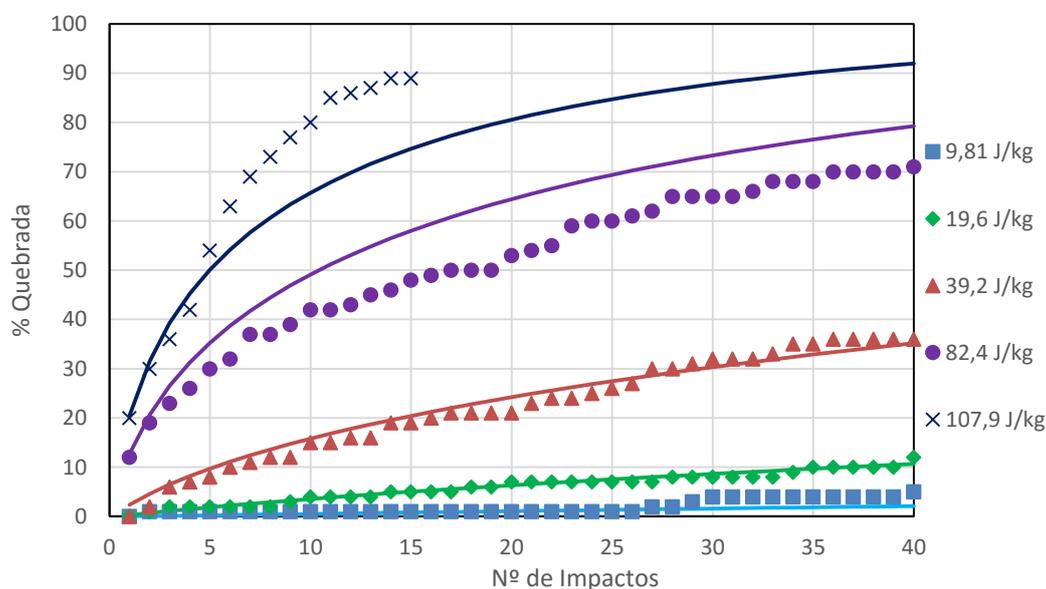


Figura V.45 – Variação da proporção de pelotas quebradas nos impactos sucessivos de diferentes energias para a pelota E, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas os dados simulados

A Figura V.46 apresenta as análises granulométricas dos ensaios de fragmentação DWT (seção IV.17) e de Autofratura (seção IV.15), relativos a diferentes energias de impacto, nas pelotas da amostra E, na faixa de 12,5 x 9,0 milímetros, bem como a previsão do modelo para essas análises. Nota-se boa aderência do modelo em relação aos dados experimentais, principalmente nos impactos de menor magnitude. Além disso, o modelo conseguiu prever o formato da curva, discriminando os mecanismos de abrasão e fratura com precisão. Tal fato qualifica o modelo para a previsão da degradação mecânica das pelotas, visto que foi possível prever o comportamento das mesmas quando submetidas a diversas energias, sem retrocálculo.

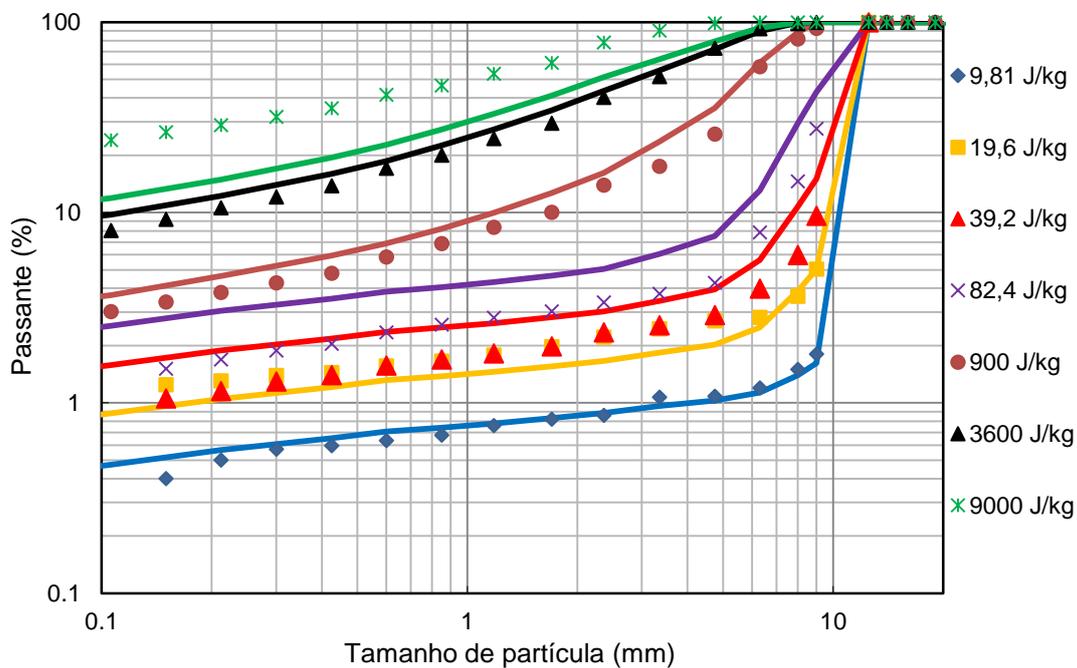


Figura V.46 – Comparação das análises granulométricas das pelotas da amostra E, na faixa de 12,5 x 9,0 milímetros, após sucessivos impactos de diversas energias, onde os símbolos apresentam os dados experimentais e as linhas os simulados

Após as sucessivas quedas de 1, 2, 4 e 8,4 metros, realizadas nos ensaios de Autofratura (seção IV.15), se reconstituiu a massa total das pelotas da amostra E após os ensaios, em cada altura. Foram separados os fragmentos relativos à abrasão, à fratura e os resistentes (íntegros) ao final dos 40 impactos. A fim de avaliar a aderência do modelo, o ensaio foi simulado e a proporção

(porcentagem) da perda mássica por abrasão em relação à energia aplicada foi calculada. A Figura V.47 apresenta as diferenças entre os pontos experimentais e os simulados após os 40 impactos realizados no ensaio de Autofratura para a amostra E. Observa-se que o modelo teve excelente aderência na previsão do percentual de perda mássica por abrasão para as diferentes alturas, com exceção do ensaio de 2 metros (energia de impacto de 19,6 J/kg). Acredita-se na possibilidade de ter ocorrido algum erro experimental, visto que a metodologia de ensaio (seção IV.15) não é tão simples. Ademais, o modelo tem a capacidade de extrapolar tanto a contribuição de energias ainda não ensaiadas, como a contribuição de cada impacto. Ainda na Figura V.47, é possível perceber que a perda mássica acumulada da abrasão da curva de 1 impacto é bem diferente da curva referente a 40 impactos. Impactos de baixíssimas magnitudes como 2 ou 3 J/kg não causam abrasão para um único impacto, enquanto que em 40 impactos sucessivos sim. O modelo, além de conseguir prever a altura máxima de queda (energia máxima) que uma pelota pode ser submetida para não haver quebra volumétrica da mesma em um impacto, discrimina, também para sucessivas quedas, as alturas máximas indicadas. Dessa forma, num chute de transferência, durante o manuseio das pelotas do tipo E, deve-se calcular a altura máxima para não haver fratura volumétrica. Visto que se caracteriza como quebra volumétrica perdas mássicas superiores a 10%, o modelo mostra (Figura V.47) que, para um impacto, a energia máxima, por choque, que a pelota suporta, sem nenhuma fratura volumétrica é de aproximadamente 15 J/kg, enquanto que para quarenta impactos é de aproximadamente 10 J/kg. É evidente que 40 impactos é um número arbitrário e elevado, porém, o objetivo é mostrar que se pode calcular a energia máxima para quantos impactos forem necessários, de acordo com a necessidade de cada circuito de manuseio. Essa diferença entre as energias é motivada pelo acúmulo de dano que as pelotas sofrem a cada impacto, fazendo com que se fraturem volumetricamente com uma energia de impacto mais baixa, quando submetidas a impactos sucessivos.

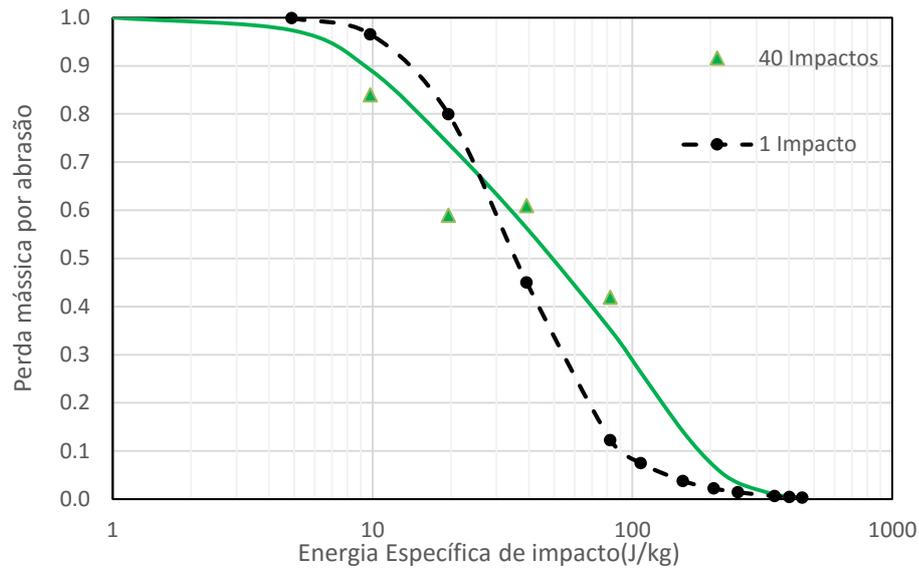


Figura V.47 – Cálculo da perda mássica por abrasão acumulada em função da energia específica de impacto para a pelota E, a partir dos dados do ensaio individual de queda e das simulações do mesmo, onde os símbolos são pontos experimentais e as linhas os simulados do material menor que 6,3 mm

A Figura V.48 apresenta os resultados dos cálculos das perdas mássicas acumuladas, a partir das simulações de 40 impactos individuais, das 5 diferentes pelotas previamente caracterizadas e modeladas. Vale destacar que o modelo consegue discriminar bem as diferentes pelotas, sendo potencialmente usado como uma ferramenta de tomada de decisão de possíveis modificações de circuitos de manuseio ou escolha do tipo de pelota para determinados clientes. O modelo é capaz de discriminar, por exemplo, a proporção de finos gerados por fratura superficial e fratura volumétrica para cada energia aplicada por tipo de pelota. Dessa forma, cada pelota poderá responder de maneira distinta à degradação de cada circuito de manuseio, sendo possível avaliar a melhor pelota para cada circuito.

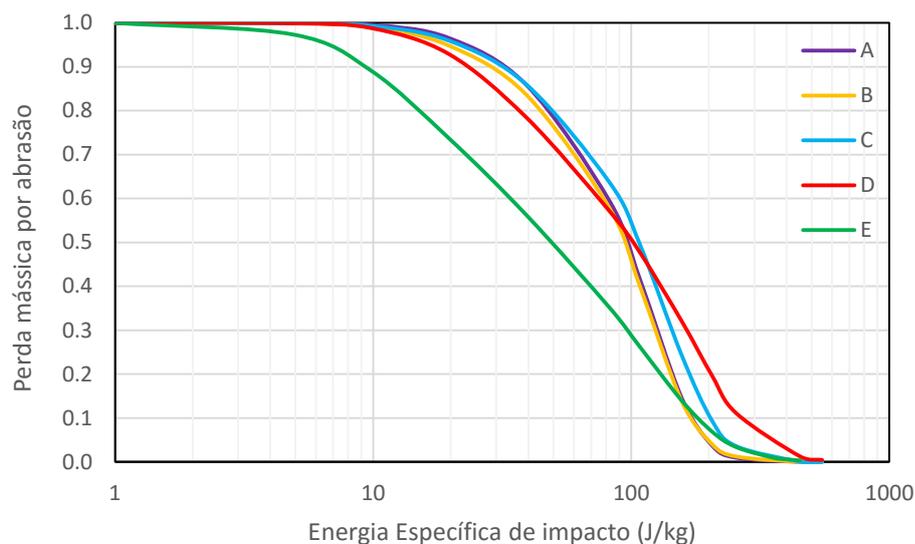


Figura V.48 – Cálculo da perda mássica por abrasão acumulada em função da energia específica de impacto, a partir das simulações do ensaio de queda individual das pelotas A, B, C, D e E, do material menor que 6,3 mm

## V.15 Caracterização dos Cacos

Nesta etapa do trabalho foram adotadas as mesmas metodologias de caracterização de fragmentação para cacos que as adotadas para pelotas, exceto pela compressão individual de cacos.

### V.15.1 Acúmulo do dano nos cacos

Assim como feito para o caso das pelotas, também foram realizados ensaios de fratura por impactos repetidos (seção IV.16) com os cacos. Apesar de se ter mostrado a diferença entre o acúmulo de dano nas pelotas por impacto simples e duplo, acredita-se que os cacos se comportam como materiais particulados quaisquer, ou seja, como partículas de minérios, e não como pelotas (materiais manufaturados). Tavares (2009) observa que, para minérios, não há diferenças significativas na suscetibilidade ao acúmulo de dano para impactos duplos ou simples. Dessa forma, a Figura V.49 apresenta os resultados dos impactos repetidos (impactos duplos), realizados em cacos da amostra A, na faixa de 12,5 x 9,0 milímetros, bem como seus ajustes para o valor de gama ( $\gamma$ ) constante e igual a 5. O valor de gama ( $\gamma$ ) que melhor ajustou tais curvas foi,

aproximadamente, constante. Sendo assim, optou-se por manter o valor de gama ( $\gamma$ ) constante para todos os cacos.

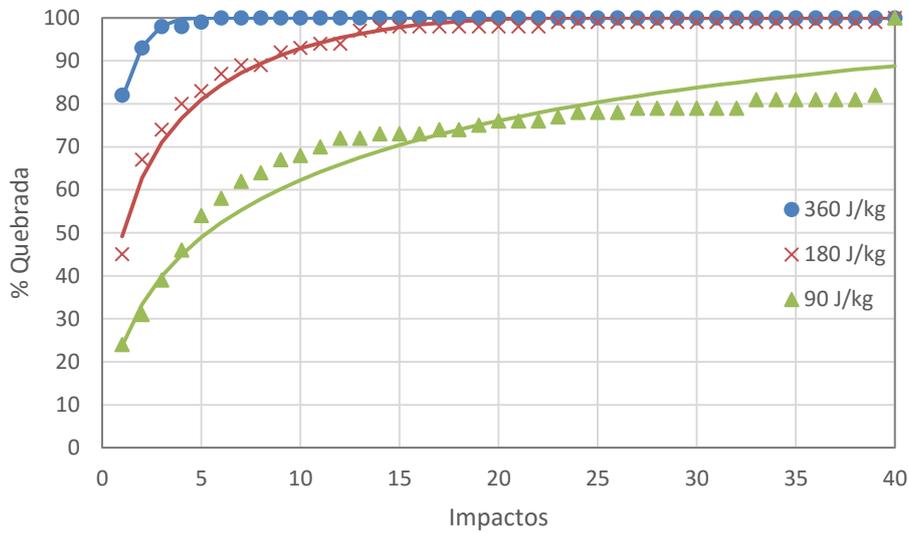


Figura V.49 – Resultados dos ensaios de fratura por impactos repetidos dos cacos da amostra A, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas são as curvas ajustadas de acordo com o valor de gama ( $\gamma$ ) igual a 5

### V.15.2 Modelagem das energias de fratura dos cacos

Tendo em vista a limitada disponibilidade de resultados de medidas de energias de fratura de cacos, utilizou-se os resultados de probabilidade de fratura do primeiro impacto dos ensaios de impactos repetidos (impactos duplos, Figura V.49). Adicionalmente, foi realizada uma verificação da energia de fratura obtida pelo primeiro impacto dos ensaios de impactos repetidos com a distribuição de energia de fratura da CCI (também impactos duplos), onde observou-se boa correlação (Figura V.50). Então, mais uma vez presumindo que cacos se comportem como minérios, não é possível afirmar que haja diferenças significativas na suscetibilidade à fratura por impactos duplos e simples.

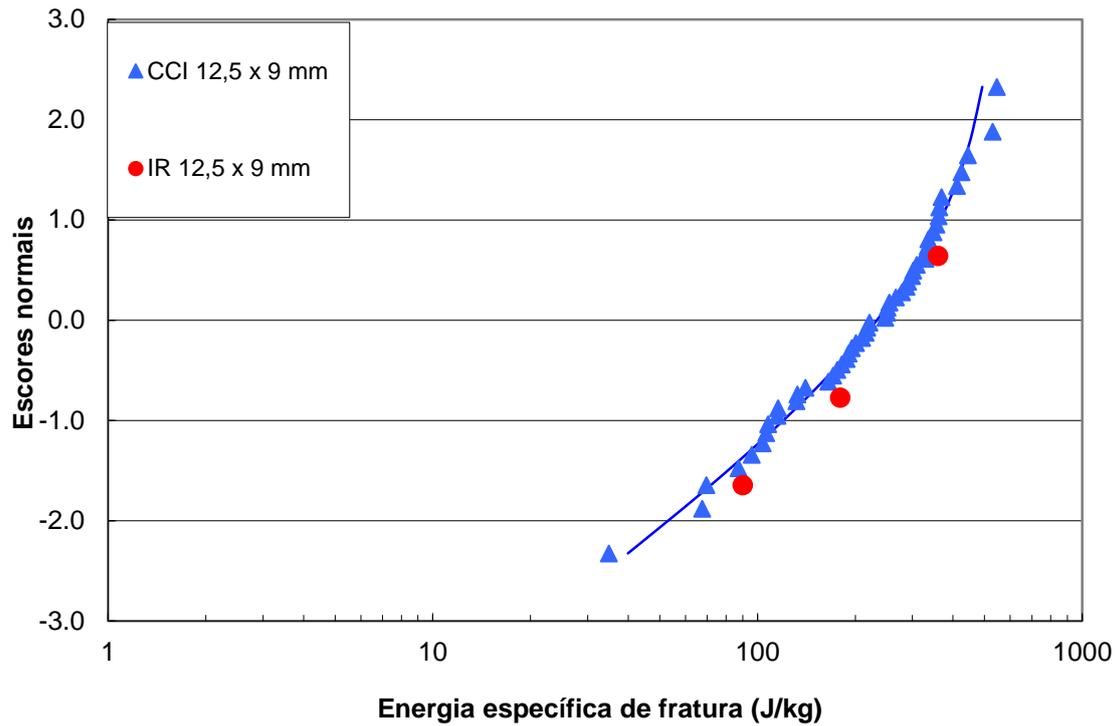


Figura V.50 – Comparação da distribuição de energia de fratura pela CCI com a probabilidade de fratura do primeiro impacto do ensaio de impactos repetidos, para os cacos da amostra D, na faixa de 12,5 x 9 mm

Analogamente às pelotas, modelou-se a energia de fratura dos cacos em função do tamanho. Assim como com as pelotas, se utilizou a distribuição log-normal, porém, para cacos, não houve truncamento. Dessa forma, a Equação V.7 apresenta os valores para cada amostra de cacos. A variação da energia específica de fratura mediana de cacos com o tamanho de partícula é dada por:

$$E_{50}(dp) = C_{cacos} * \left(\frac{dp_0}{dp}\right)^{0,515} \quad (V.7)$$

sendo  $E_{50}$  a Energia de Fratura Específica Mediana em função do tamanho da partícula, medido em J/kg,  $C_{cacos}$  a constante de cada amostra (essa constante é igual a energia de fratura do caco de 10 mm), também medida em J/kg,  $dp_0$  igual a 10 milímetros,  $dp$  o tamanho do caco, em milímetros.

A Figura V.51 apresenta o resultado das energias de fratura dos cacos das cinco amostras. Vale destacar que, pelas distribuições calculadas, o valor da variância da distribuição de energias de fratura se mantém constante para toda a faixa de tamanhos de cacos de todas as amostras, sendo o contrário do observado por Silveira (2012). Então, durante a modelagem, foi utilizado um desvio-padrão ( $\sigma$ ) constante em 0,90 para os cacos de todas as amostras.

A Figura V.52 mostra a comparação das energias de fratura das pelotas e cacos da pelota B, em função do tamanho das partículas. Nota-se que as pelotas, além de possuírem energias mais altas, apresentam maior efeito de tamanho que os cacos, que têm comportamento geral parecido com minérios.

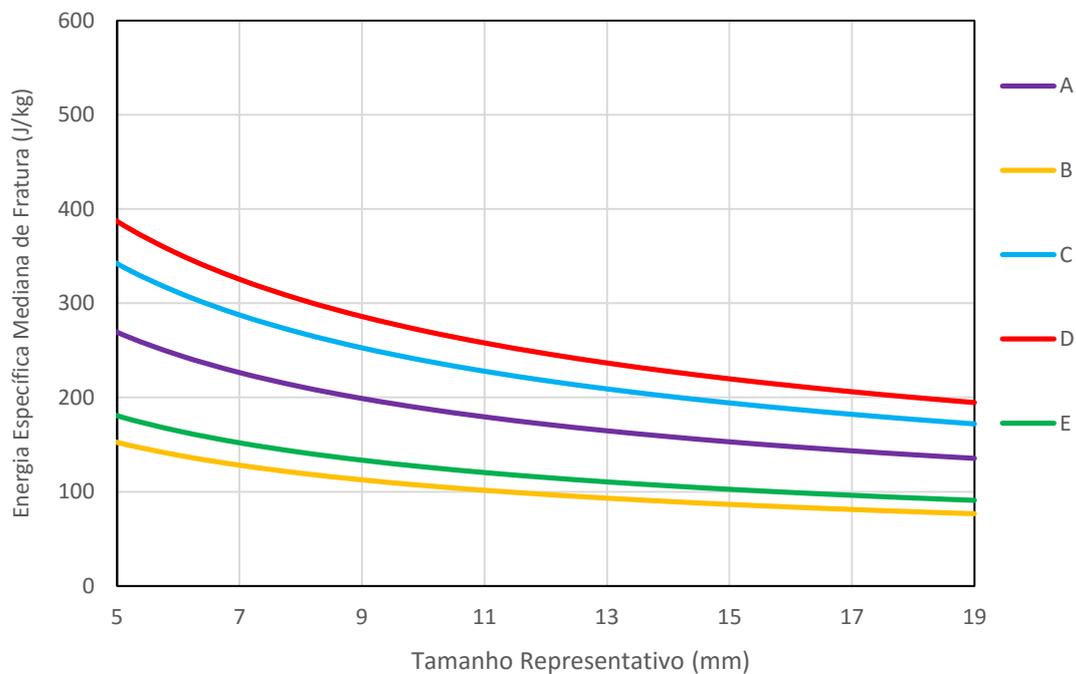


Figura V.51 – Comparação das energias de fratura dos cacos modeladas, das amostras A, B, C, D e E, em função do tamanho das partículas

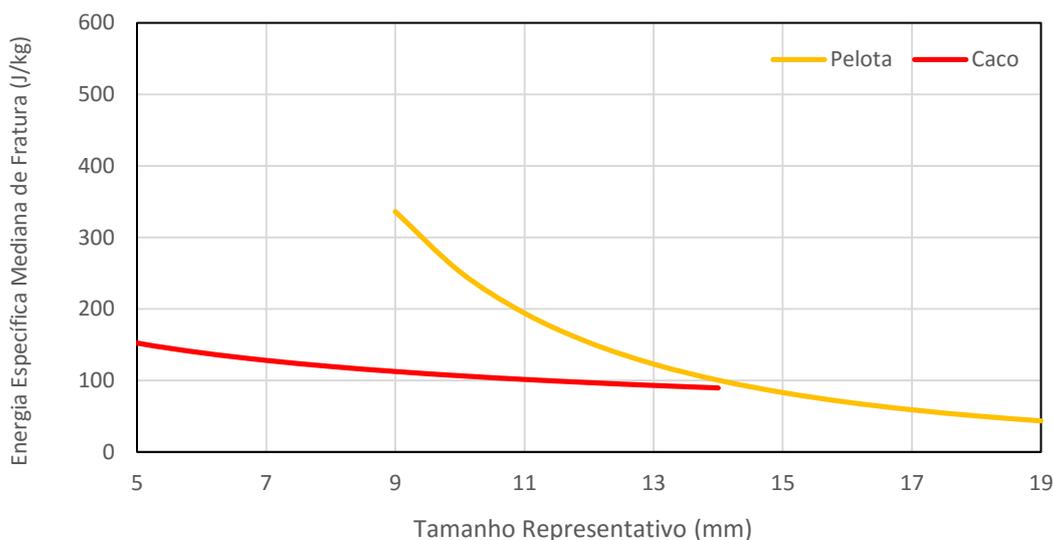


Figura V.52 – Comparação das energias de fratura de pelotas e cacos, da amostra B, em função do tamanho das partículas

### V.15.3 Modelagem da fragmentação volumétrica dos cacos

Silveira (2012) apresentou evidências da diferença de resistência à fragmentação de cacos e pelotas bem formadas. Dessa forma, se faz necessário modelar os mecanismos de quebra em separado para cacos e pelotas. De forma análoga ao realizado para pelotas (seção V.12), através da metodologia dos ensaios de fragmentação (seção IV.17), foi possível estimar os parâmetros da modelagem da quebra dos cacos ( $A$  e  $b'$ ). Diferentemente das pelotas, nos cacos, não se modificou a Equação IV.12. As distribuições granulométricas, provenientes dos ensaios de fragmentação (Figura V.53) são modeladas e normalizadas. Na Figura V.54 pode se observar bom ajuste da função beta incompleta aos dados experimentais. Vale ressaltar que assim como as pelotas, os cacos também quebram de maneira parecida, não sendo necessário ajustes para as diferentes amostras. Porém, ao contrário das pelotas, os cacos quebram de maneira equivalente para todos os tamanhos, sendo utilizada apenas uma função quebra na modelagem para todos os tamanhos, sendo apresentada na Tabela V.17.

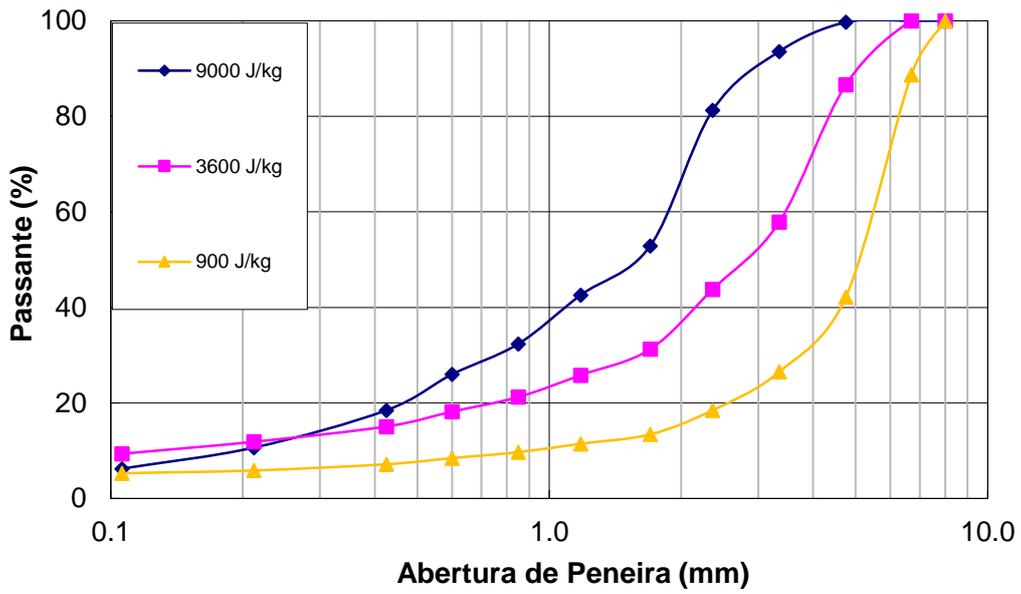


Figura V.53 – Resultado típico das análises granulométricas do ensaio de DWT, realizado nos cacos da amostra A, na faixa de 9,0 x 8,0 milímetros

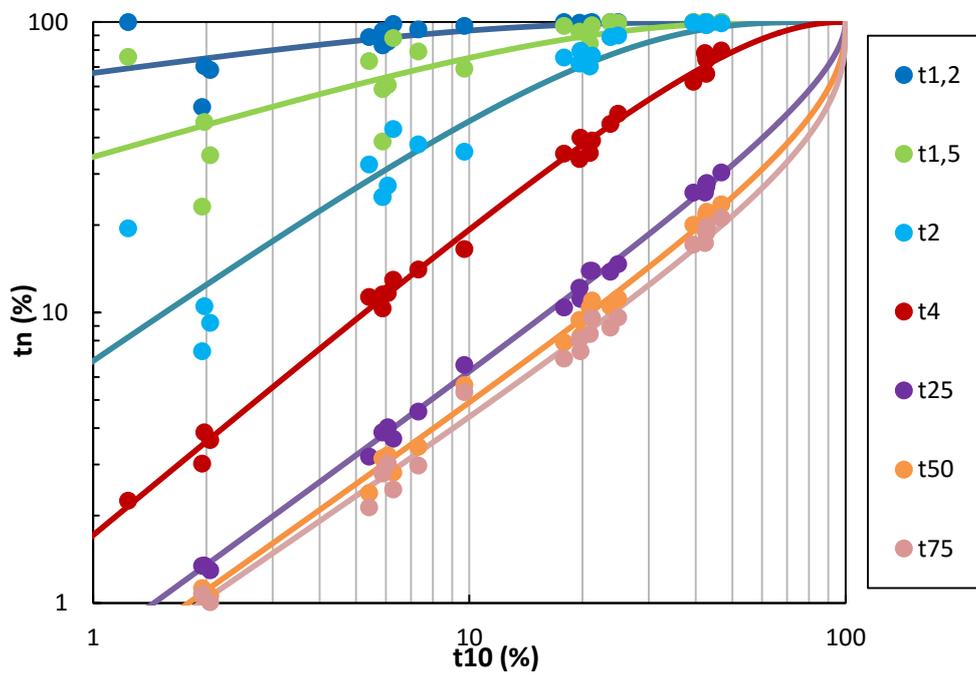


Figura V.54 – Relação entre  $t_{10}$  e  $t_n$ s para os cacos das amostras A, B, C, D e E, onde os símbolos são os dados experimentais e as linhas os resultados dos ajustes modelados

Tabela V.17 – Parâmetros da função distribuição de quebra de cacos para as amostras das pelotas A, B, C, D e E

n	$\alpha n$	$\beta n$
1,2	0,18	7,97
1,5	0,38	4,87
2	0,90	4,96
4	1,08	2,38
25	0,94	0,52
50	0,91	0,37
75	0,88	0,30

A Figura V.55 resume os resultados dos ensaios de fragmentação para os cacos, mostrando que não há grandes variações na fragmentação das amostras A, B, C, D e E, bem como nos seus tamanhos. A Tabela V.18 apresenta os valores dos parâmetros A e b' para a função quebra volumétrica dos cacos.

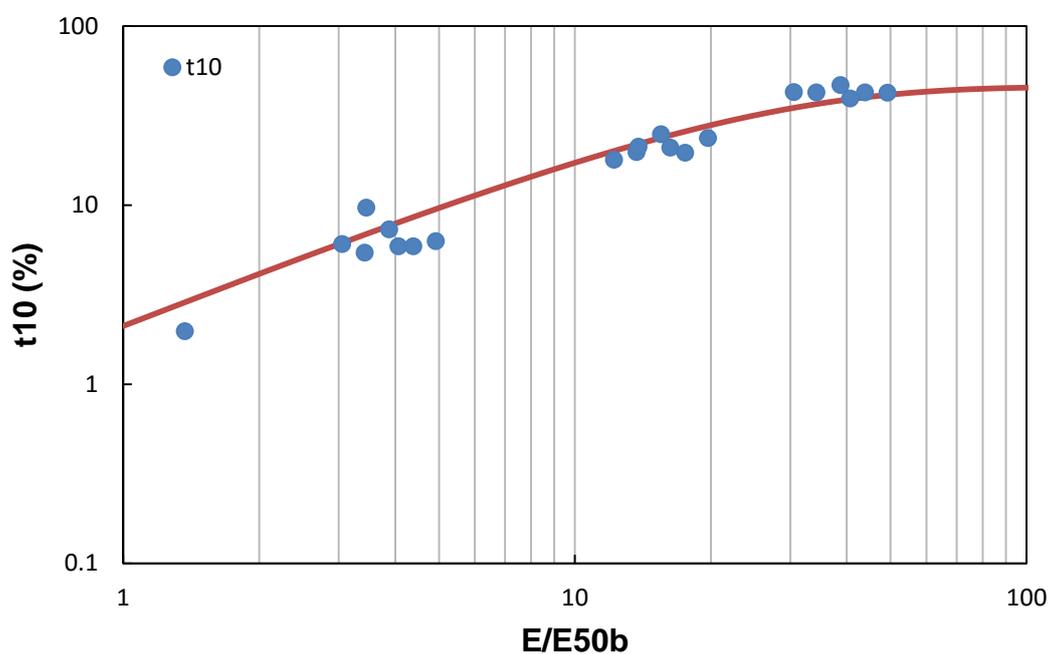


Figura V.55 – Modelagem da quebra dos cacos das amostras A, B, C, D e E, onde os símbolos são os dados calculados dos experimentos e as linhas os resultados dos ajustes modelados

Tabela V.18 – Parâmetros do modelo da função quebra volumétrica de cacos da Equação IV.12

A (%)	b'
45,740	0,047

#### V.15.4 Fragmentação Superficial de cacos

Da mesma forma que para pelotas, o modelo de abrasão de cacos se baseia na hipótese de que a resistência da partícula varia com o seu tamanho e a energia de impacto a qual é submetida. Os ensaios de autofratura foram conduzidos para os cacos, com objetivo de se encontrar uma relação entre a perda mássica por abrasão de pelotas e de cacos, tendo a mesma equação como base, adicionando apenas o fator do caco, oriundo de cada amostra. As Figuras V.56 e V.57 mostram que os cacos são mais suscetíveis a abrasão que as pelotas. Essa diferença pode ser motivada pela forma das partículas, visto que as pelotas apresentam menor área superficial e formato mais regular.

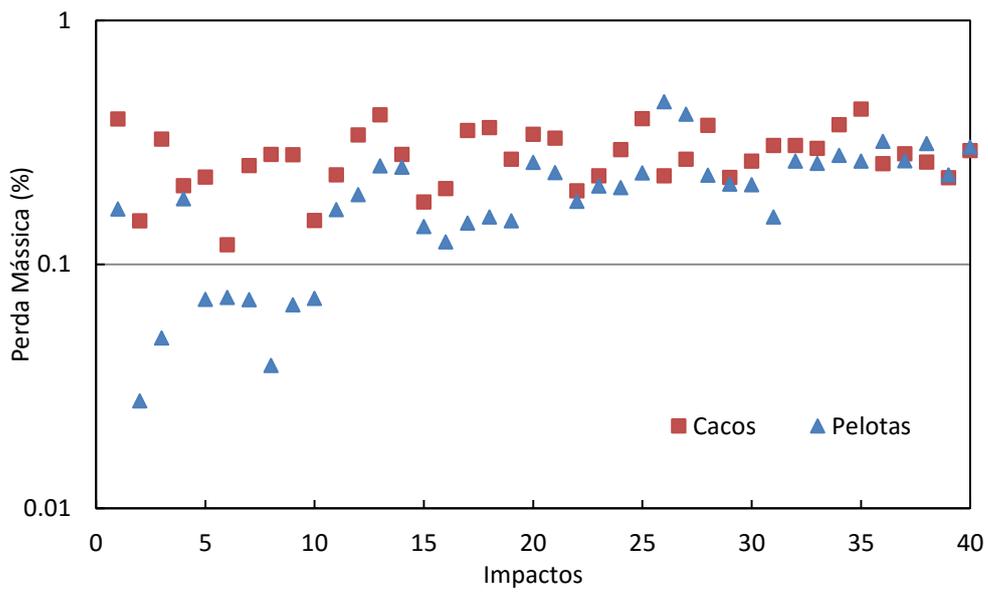


Figura V.56 – Resultados experimentais da perda mássica percentual por impacto dos cacos e pelotas da amostra D, submetida a impactos de 8,4 metros (82,4 J/kg)

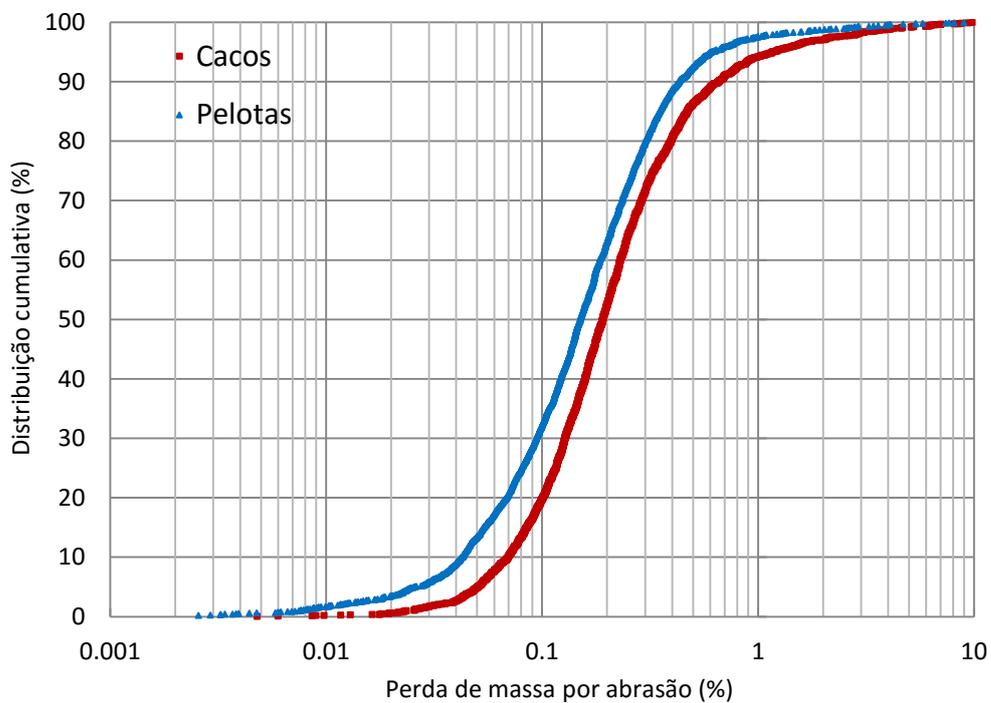


Figura V.57 – Comparação da distribuição dos dados experimentais da abrasão percentual acumulada de pelotas e cacos, da amostra C por impactos de altura de queda de 8,4 metros (82,4 J/kg)

A Figura V.58 apresenta os dados de perda mássica por impacto, por diferentes energias, dos diferentes cacos, para a faixa granulométrica de 12,5 x 9,0 milímetros. Os dados são provenientes dos ensaios de autofratura, realizados em diferentes alturas (energias) e do ensaio de tamboramento LTM (seção IV.10). Analogamente às pelotas, esses dados foram ajustados a uma equação do tipo potência (Equação V.8) para cada amostra:

$$\text{Taxa de abrasão} = (C_{\text{abrasão}} E_k^{d_{\text{abrasão}}}) f_{\text{tamanho}} f_{\text{cacos}} \quad (\text{V.8})$$

onde  $C_{\text{abrasão}}$  e  $d_{\text{abrasão}}$  são constantes de cada pelota,  $f_{\text{tamanho}}$  é o fator relativo ao tamanho da partícula,  $f_{\text{cacos}}$  é o fator relativo aos cacos de cada amostra e  $E_k$  a energia específica de impacto, em J/kg. Houve um número limitado de experimentos com cacos, de maneira que há menor confiabilidade na estimativa do fator de cacos na equação. Entretanto, tendo em vista a coerência dos dados, esse modelo é considerado satisfatório.

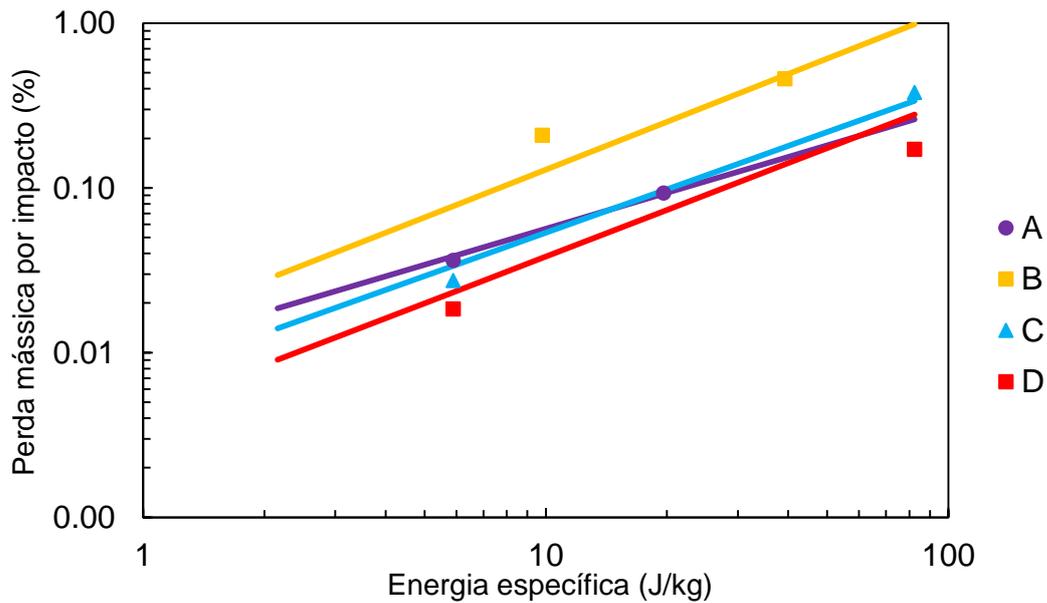


Figura V.58 – Comparação da perda mássica por impacto, em função da energia específica de impacto para os cacos das amostras A, B, C, D, na faixa de 12,5 x 9,0 mm, onde os símbolos são dados experimentais e as linhas são oriundas do modelo

## V.16 Ensaio de transferência

Diferentemente da validação do modelo de degradação para pelotas individuais (seção V.14), o ensaio de transferência visa validar o modelo para cacos e pelotas de maneira conjunta, emulando uma operação de manuseio e transporte das pelotas.

### V.16.1 Resultados Experimentais

Com o objetivo de reproduzir os tipos de impactos ocorridos durante o manuseio e transporte das pelotas, foi realizado o ensaio de simulação de manuseio, como descrito na seção IV.19. A partir deste experimento foi possível avaliar como as distribuições de tamanho, bem como as populações de cacos e pelotas, variam a cada impacto aplicado. Como esperado, as diferentes amostras tiveram desempenhos distintos quanto à suscetibilidade aos impactos.

A Figura V.59 ilustra os resultados experimentais típicos do ensaio, para a amostra E, que demonstram a ocorrência de degradação significativa do material como resultado dos impactos sucessivos. As distribuições granulométricas apresentadas na Figura V.59 ainda indicam a geração de uma proporção significativa de finos oriundos da abrasão das pelotas.

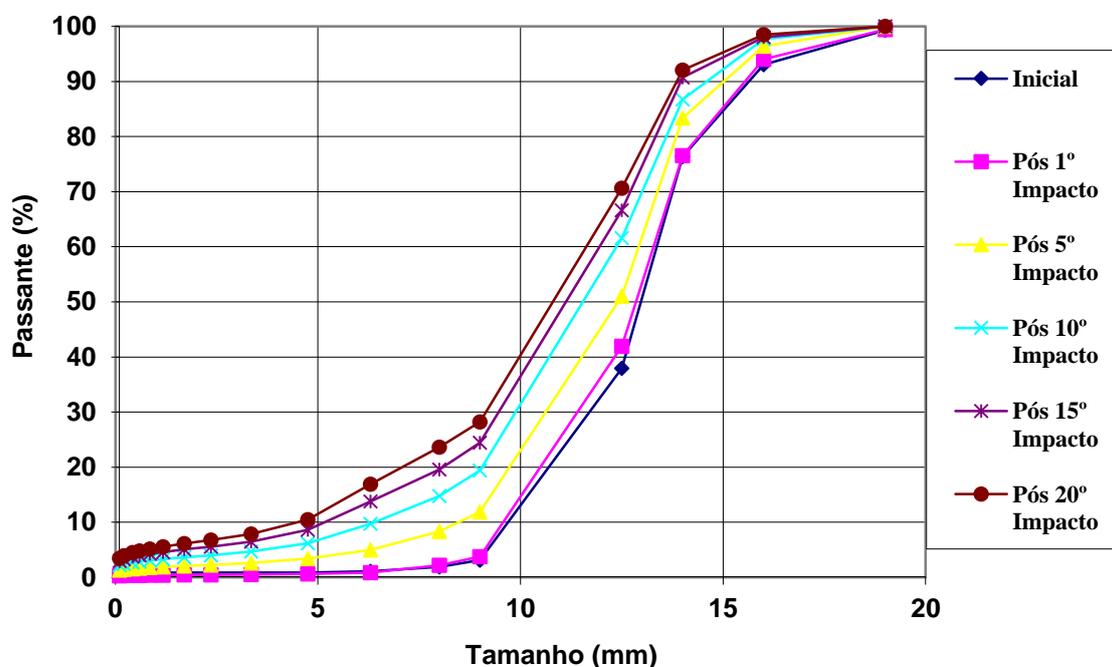


Figura V.59 – Curvas de distribuição granulométrica de todo material para diferentes ciclos de impacto a partir de dados experimentais do ensaio de transferência para a pelota E

A Figura V.60 mostra o efeito do número de impactos na redução da proporção de pelotas contidas nas faixas grossas e o aumento relativo da proporção de cacos, também para a amostra E, sobretudo na faixa de tamanhos finas, com a sucessão dos impactos. Vale destacar que a faixa de 12,5 x 9 mm tem um aumento na sua proporção, sendo significativo o aumento da proporção de cacos. Além disso, percebe-se a acentuada queda da proporção das faixas acima de 14 milímetros, indicando maior fragilidade aos impactos.

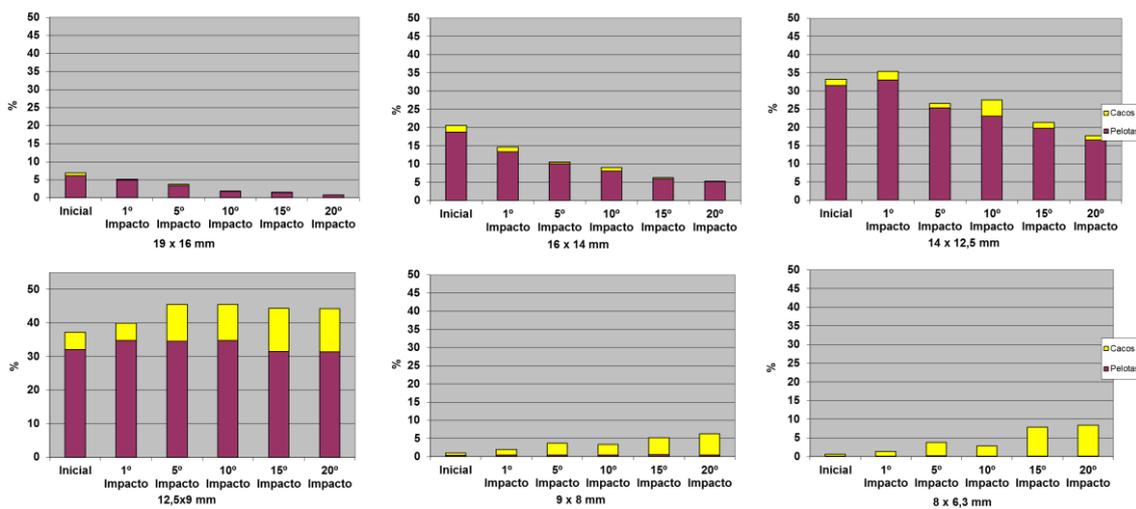


Figura V.60 – Evolução da proporção de pelotas e cacos por faixas de tamanhos a partir de dados experimentais do ensaio de transferência da amostra E

A Figura V.61 mostra a variação da proporção total de pelotas íntegras por impacto, também para a amostra E. Por mais que a separação de cacos e pelotas seja subjetiva, é possível perceber que há variação da quantidade quebrada por impacto, inclusive apresentando tendência de quebra mais agressiva nos primeiros impactos.

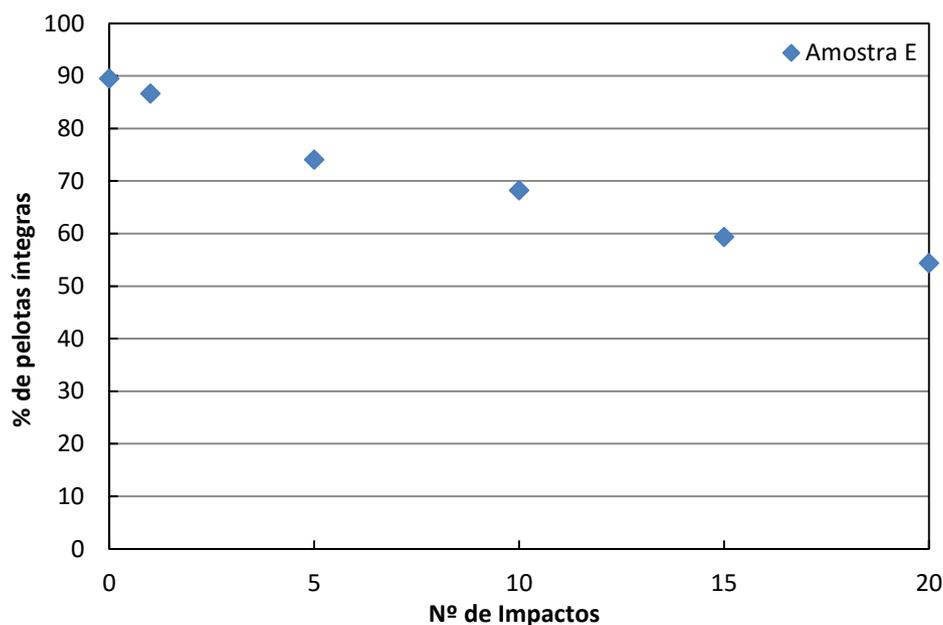


Figura V.61 – Evolução da proporção de pelotas íntegras por impacto, a partir de dados experimentais do ensaio de transferência para a pelota E

Com o objetivo de comparar as cinco diferentes amostras, sem a subjetividade da separação de cacos, apresenta-se, na Figura V.62, os dados experimentais da porcentagem de partículas menores que 6,3 milímetros, geradas pelos sucessivos impactos do ensaio de simulação de manuseio. Independente do operador, partículas com tamanhos abaixo de 6,3 milímetros não são consideradas mais pelotas, e sim cacos. Analogamente, a Figura V.63 apresenta os dados experimentais da porcentagem de partículas, menores que 0,6 milímetros, também geradas pelos sucessivos impactos nas 5 diferentes amostras.

Observa-se que os resultados de resistência mecânica, provenientes dos ensaios ISO (Tabela V.9), não apresentam relação com os resultados experimentais das Figuras V.62 e V.63. Além do resultado ser baseado na média de resistência de somente duas faixas granulométricas e não identificar a diferença de suscetibilidade entre compressão e impacto das diversas pelotas, os ensaios ISO não mensuram o acúmulo do dano sofrido pelas partículas, que é uma variável importante na degradação. Em relação aos ensaios de tamboramento e abrasão, estes também não se relacionam com os resultados do ensaio de simulação de manuseio, como pode ser observado nas Figuras V.64 e V.65. A partícula B, cujo resultado nos ensaios de abrasão e tamboramento (Tabela V.9) se classificou entre os mais altos, dentre as analisadas, se configurou como a pelota que mais gera finos por abrasão (geração de material menor que 0,6 milímetros). Paralelamente,

a partícula A, que obteve os melhores índices de abrasão e tamboramento (Tabela V.9), foi a terceira pelota (num total de 5) que mais gerou finos por abrasão (Figura V.63).

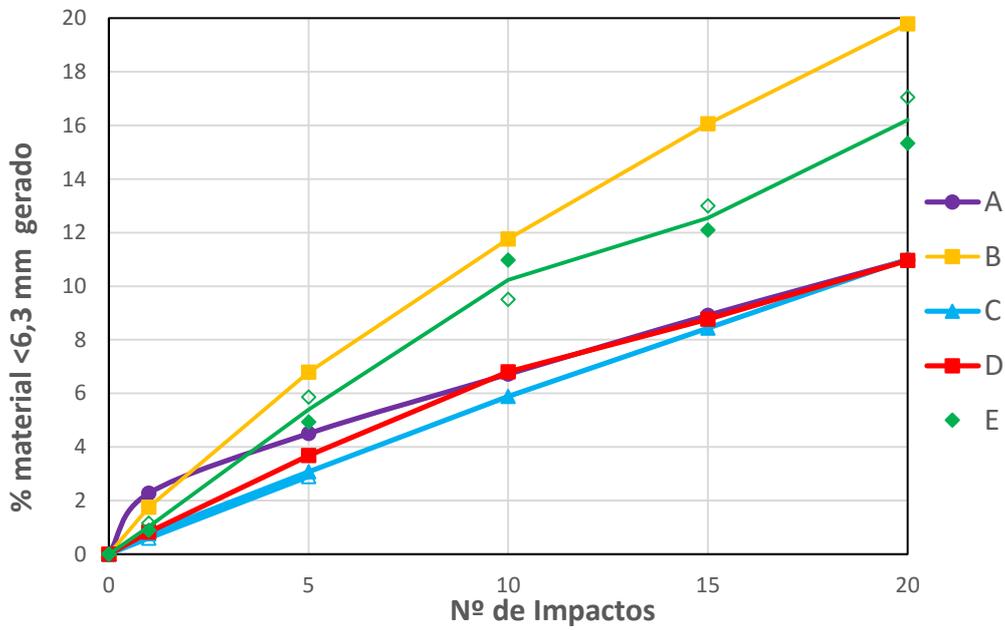


Figura V.62 – Comparação dos dados experimentais do percentual de material menor que 6,3 milímetros, gerado por impacto, das pelotas A, B, C, D e E, no ensaio de transferência (simulação de manuseio)

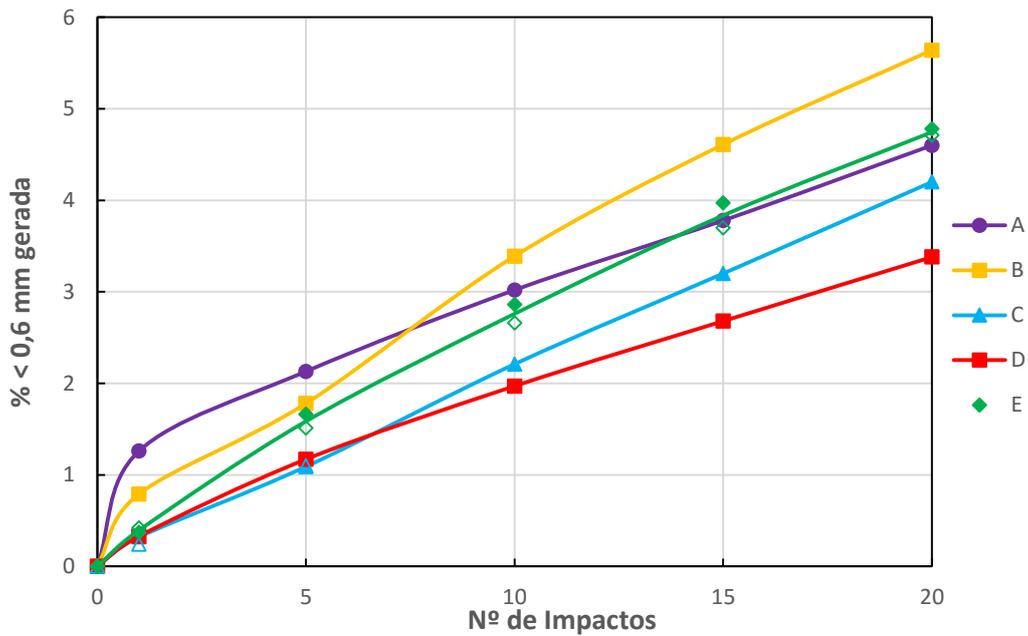


Figura V.63 – Comparação dos dados experimentais do percentual de material menor que 0,6 milímetros, gerado por impacto, das pelotas A, B, C, D e E, no ensaio de transferência (simulação de manuseio)

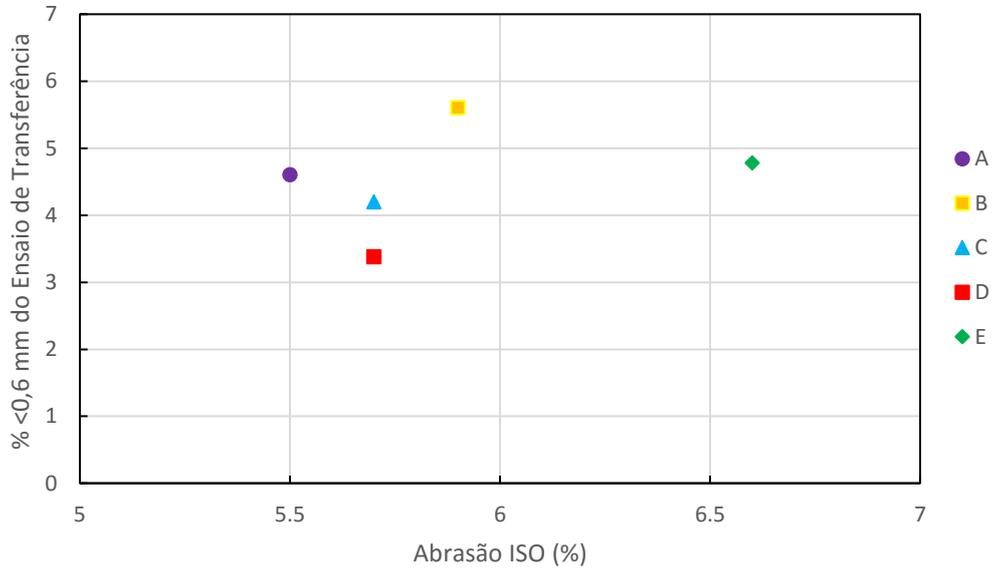


Figura V.64 – Comparação dos dados experimentais do percentual de material menor que 0,6 milímetros, gerado por 10 impactos, das pelotas A, B, C, D e E, no ensaio de transferência (simulação de manuseio), com os valores das mesmas pelotas no ensaio de Abrasão proposto pela ISO

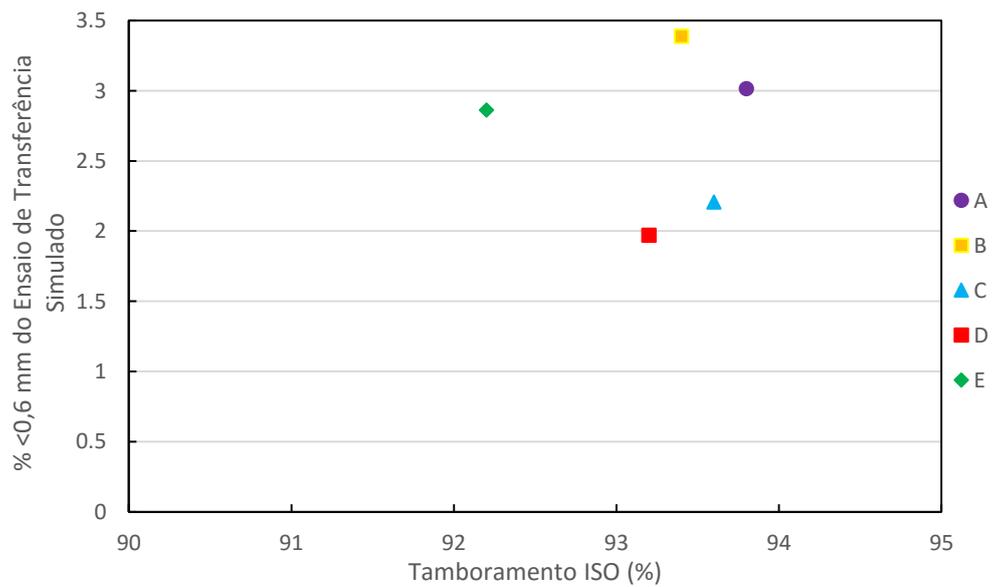


Figura V.65 – Comparação dos dados experimentais do percentual de material menor que 0,6 milímetros, gerado por 10 impactos, das pelotas A, B, C, D e E, no ensaio de transferência (simulação de manuseio), com os valores das mesmas pelotas no ensaio de Tamobramento proposto pela ISO

### V.16.2 Validação do Modelo

Com o objetivo de verificar a aderência do modelo de cacos e pelotas, simulou-se os ensaios de transferência (simulação de manuseio) realizados no LTM.

As energias de impacto a que as amostras foram submetidas no ensaio físico foram obtidas por simulação, através do Método dos Elementos Discretos, utilizando o *software* comercial EDEM. Esse *software* é muito utilizado para analisar e simular o movimento de materiais granulares em processos industriais, como chutes de correia por exemplo. Para a calibração dos parâmetros de contato e propriedades físicas das pelotas, necessários para tornar a simulação realista, utilizou-se os dados calibrados de Tavares *et al.* (2012), como módulo de cisalhamento, coeficiente de atrito estático e de rolamento, além do coeficiente de restituição da pelota com o aço e com ela mesma.

Os resultados da simulação são apresentados nas Figuras V.66 a V.69. A Figura V.66 mostra que o modelo foi capaz de prever, com elevada precisão, as distribuições granulométricas dos impactos sucessivos para a Pelota C. A aderência foi ainda maior nas faixas extremas dessas distribuições (acima de 12 mm e abaixo de 1 mm). Por outro lado, a Figura V.67 mostra que o modelo não teve tanta precisão na previsão das distribuições granulométricas para a pelota B, superestimando as quebras nos impactos sucessivos. Talvez isso se deva ao fato da pelota B ter sido caracterizada basicamente com impactos duplos, tendo poucos dados de caracterização por impactos simples. Como já mencionado, esta amostra é relativamente antiga, o que inviabilizaria a aplicação da nova metodologia de caracterização, devido ao possível envelhecimento das pelotas (Fonseca, 2003).

As Figuras V.68 e V.69 mostram a variação da proporção total de pelotas íntegras por impacto, para a amostra A, sendo a Figura V.68 a variação medida (experimental) e a Figura V.69 a variação simulada. Por mais subjetiva que seja a separação de cacos e pelotas, é possível observar que a variação da quantidade quebrada por impacto se mantém muito parecida para todas as faixas, em todos os impactos, nas versões experimentais e simuladas. Dessa forma, vale destacar a capacidade do modelo em prever a proporção de cacos e pelotas com o número de

quedas, sendo extremamente importante para produtoras de pelotas avaliarem as etapas mais agressivas dos circuitos de manuseio, podendo tomar medidas para minimizar a degradação das pelotas.

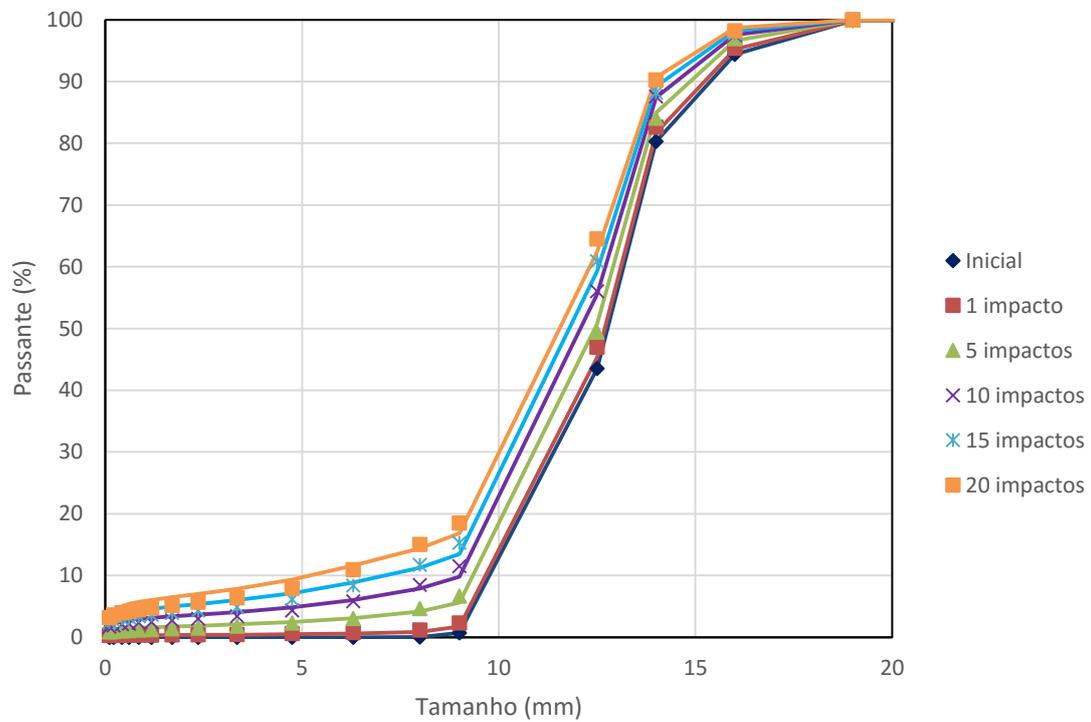


Figura V.66 – Comparação entre distribuições granulométricas simuladas (linhas) e dados experimentais (pontos), resultantes do ensaio de transferência da amostra C

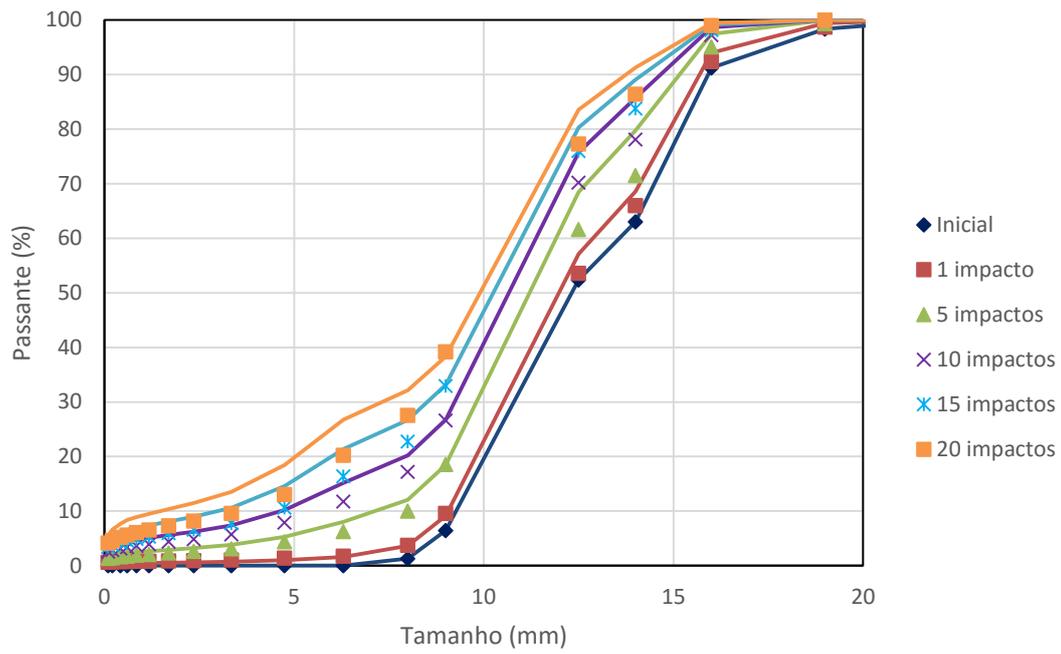


Figura V.67 – Comparação entre distribuições granulométricas simuladas (linhas) e dados experimentais (pontos), resultantes do ensaio de transferência da amostra B

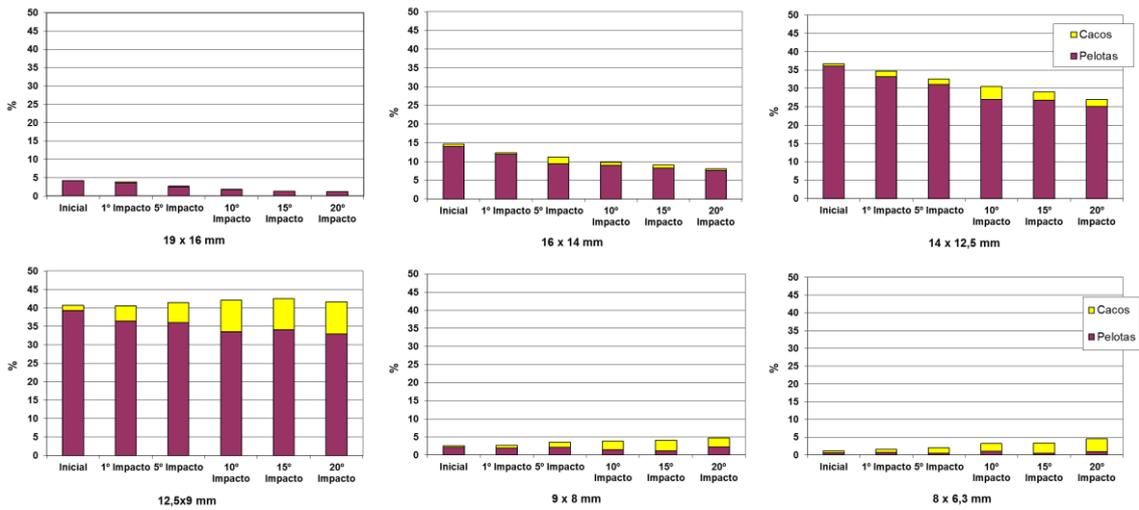


Figura V.68 – Evolução da proporção de pelotas e cacos por faixas de tamanhos a partir de dados experimentais do ensaio de simulação de manuseio da amostra A

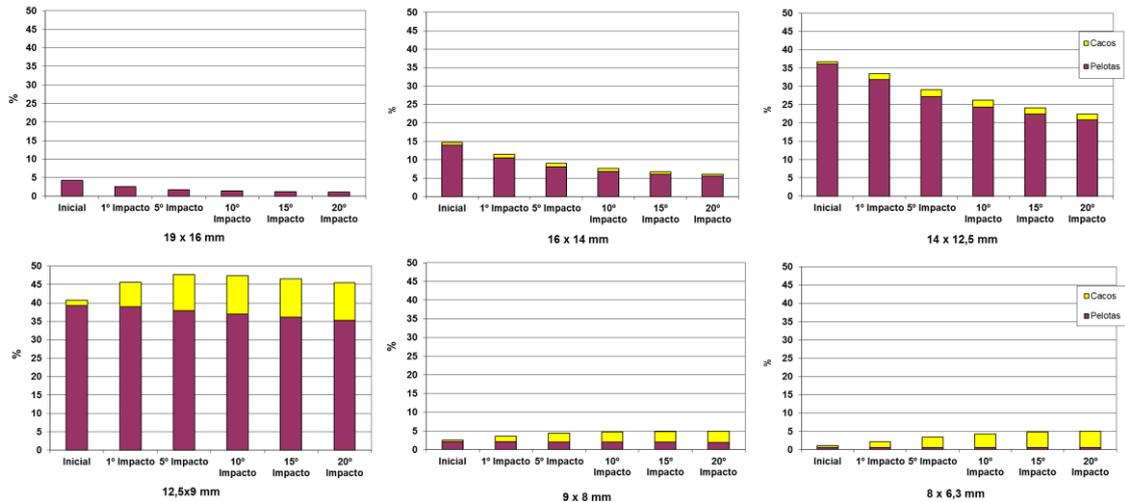


Figura V.69 – Evolução da proporção de pelotas e cacos por faixas de tamanhos a partir de dados simulados do ensaio de simulação de manuseio da amostra A

A fim de testar o modelo em diferentes condições, realizou-se o ensaio de transferência (seção IV.19) modificado para a amostra C, o qual compreendeu em intercalar as alturas das quedas a cada cinco impactos. Dessa forma, nos primeiros cinco impactos, a altura das quedas, as

quais os 10 kg da amostra foram submetidos, foi de 8,4 metros (padrão do ensaio). Em seguida, para os cinco impactos seguintes (6° ao 10° impacto), a altura queda foi de 4 metros. Posteriormente, para os outros cinco impactos (11° ao 15°), voltou a ser a altura padrão (8,4 metros), e, nos últimos cinco impactos (16° ao 20°), quedas de 4 metros novamente. Os resultados comparativos dos ensaios (ensaio de transferência e ensaio de transferência modificado) e das simulações são apresentados nas Figuras V.70 a V.72. A Figura V.70 mostra que o modelo apresenta ótima aderência às distribuições granulométricas dos impactos sucessivos de diferentes energias para a Pelota C. A aderência foi ainda maior nas faixas mais finas dessas distribuições (abaixo de 5 mm).

A Figura V.71 apresenta a comparação, dos experimentos e simulações, da proporção de fragmentos menores que 6,3 milímetros, em função dos sucessivos impactos, para cada ensaio. Observa-se que os lotes de pelotas continham inicialmente as mesmas quantidades e, com a sucessão de impactos de mesma energia se mantiveram com as mesmas quantidades, como esperado. A partir da mudança de energia de impacto entre os ensaios há grande variação na geração de fragmentos nessas classes. Vale destacar que o modelo teve ótima aderência às mudanças de energias nos ensaios, prevendo de forma precisa o seu comportamento. É importante destacar que não houve necessidade de se fazer retrocálculo para ajustar os resultados dos ensaios. Os resultados apresentados são oriundos dos ajustes prévios e simulados para as energias que as pelotas são submetidas.

A Figura V.72 demonstra o efeito do número de impactos na redução da proporção de pelotas, comparando os valores experimentais e simulados para os dois ensaios. É evidente que, apesar da subjetividade da análise, o modelo consegue prever o “amortecimento” (geração menor de cacos), relativo aos choques de menor energia. Apesar do lote de pelotas do ensaio de transferência modificado conter maior quantidade de fragmentos (antes do primeiro impacto), o modelo consegue prever o momento em que os dois lotes, referentes aos diferentes ensaios, passam a ter a mesma quantidade de pelotas bem formadas e até fazer extrapolações. Analogamente, o modelo consegue prever quando haverá a inversão da quantidade de fragmentos entre os ensaios. Isso torna o modelo uma ferramenta poderosa, visto que é possível uma usina pelletizadora avaliar qual das suas pelotas é mais indicada a diferentes tipos de circuitos de manuseios, podendo otimizar sua produção.

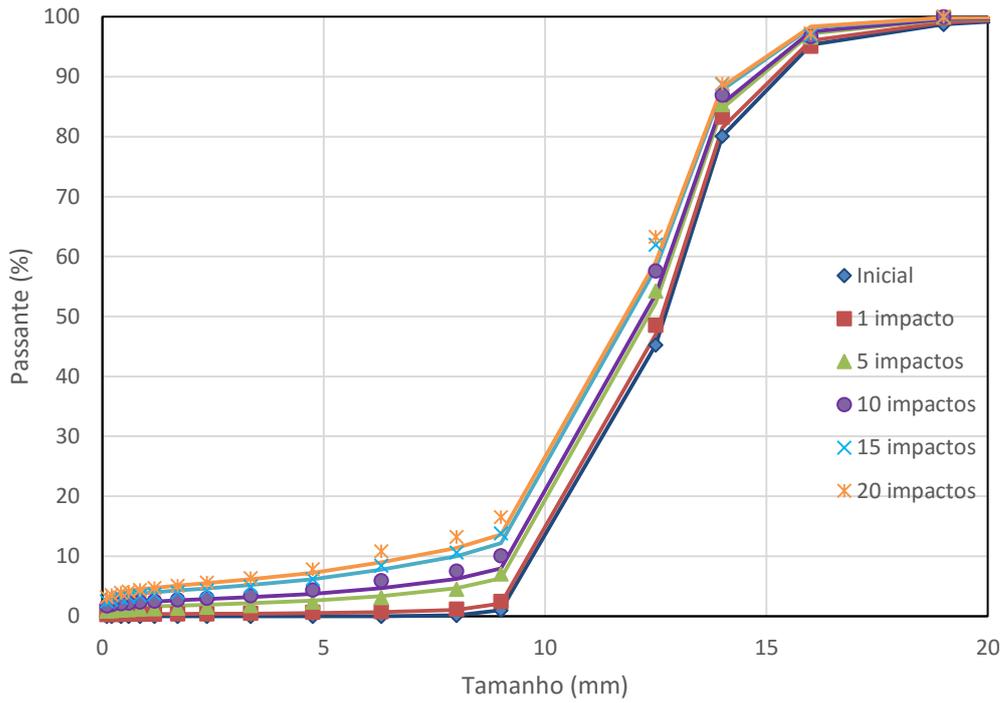


Figura V.70 – Comparação entre distribuições granulométricas simuladas (linhas) e dados experimentais (pontos), resultantes do ensaio de transferência modificado da amostra C

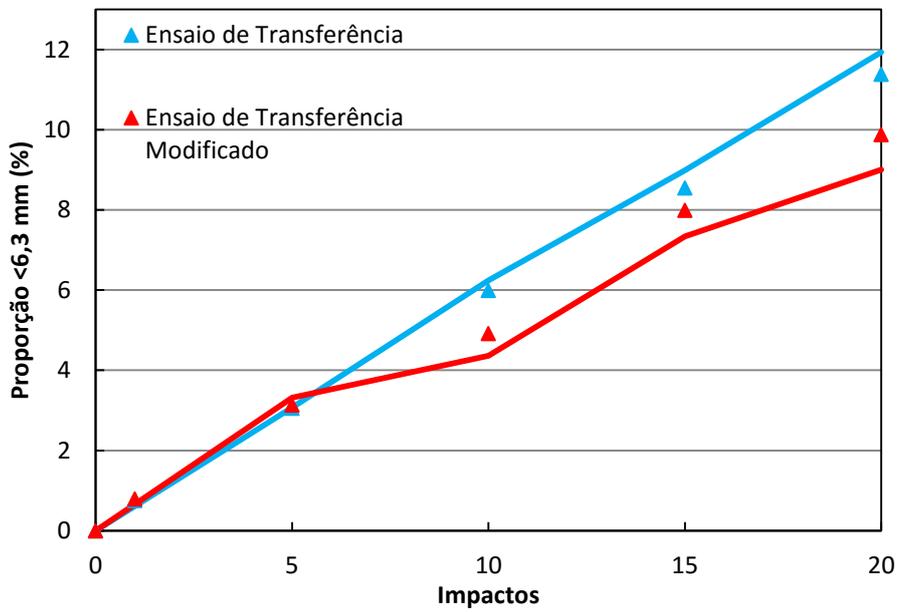


Figura V.71 – Comparação entre as proporções de partículas menores que 6,3 mm simuladas (linhas) e dados experimentais (pontos), resultante do ensaio de transferência e ensaio de transferência modificado para a amostra C

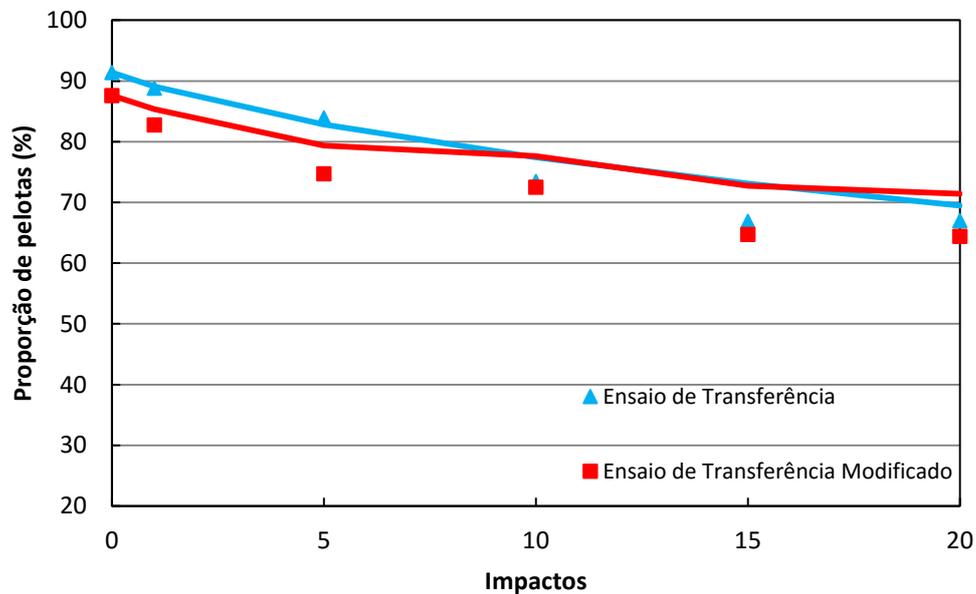


Figura V.72 – Comparação entre distribuições granulométricas simuladas (linhas) e dados experimentais (pontos), resultantes do ensaio de transferência modificado da amostra C

Com o objetivo de avaliar a capacidade do modelo de discriminar as 5 diferentes amostras, apresenta-se (Figura V.73) uma comparação consolidada da queda da proporção de pelotas íntegras a partir dos impactos sucessivos, no ensaio de transferência (seção IV.19). Tanto os dados medidos, quanto os calculados sugerem quedas vertiginosas na proporção de pelotas íntegras ao longo dos 20 impactos. Vale destacar que os dados simulados obtiveram boa correspondência com os medidos. A Figura V.74 apresenta a comparação da proporção de partículas menores que 12,5 milímetros, geradas ao longo dos sucessivos impactos do ensaio de transferência, para as cinco amostras estudadas. Observa-se que, mesmo subestimando ou superestimando as quantidades, os dados simulados são bem próximos dos medidos para as pelotas e diferentes entre elas. Dessa forma, pode se considerar que o modelo consegue discriminar as diferenças entre as pelotas. A Figura V.75 corrobora tal afirmação, visto que também é possível fazer as mesmas observações para a proporção de partículas menores que 6,3 e 0,6 milímetros, geradas pelos

sucessivos impactos do ensaio nas diferentes pelotas. Analogamente, a Figura V.76 apresenta evidências da relação dos dados experimentais com a previsão do modelo, o que não ocorre com os ensaios ISO (Figuras V.64 e V.65).

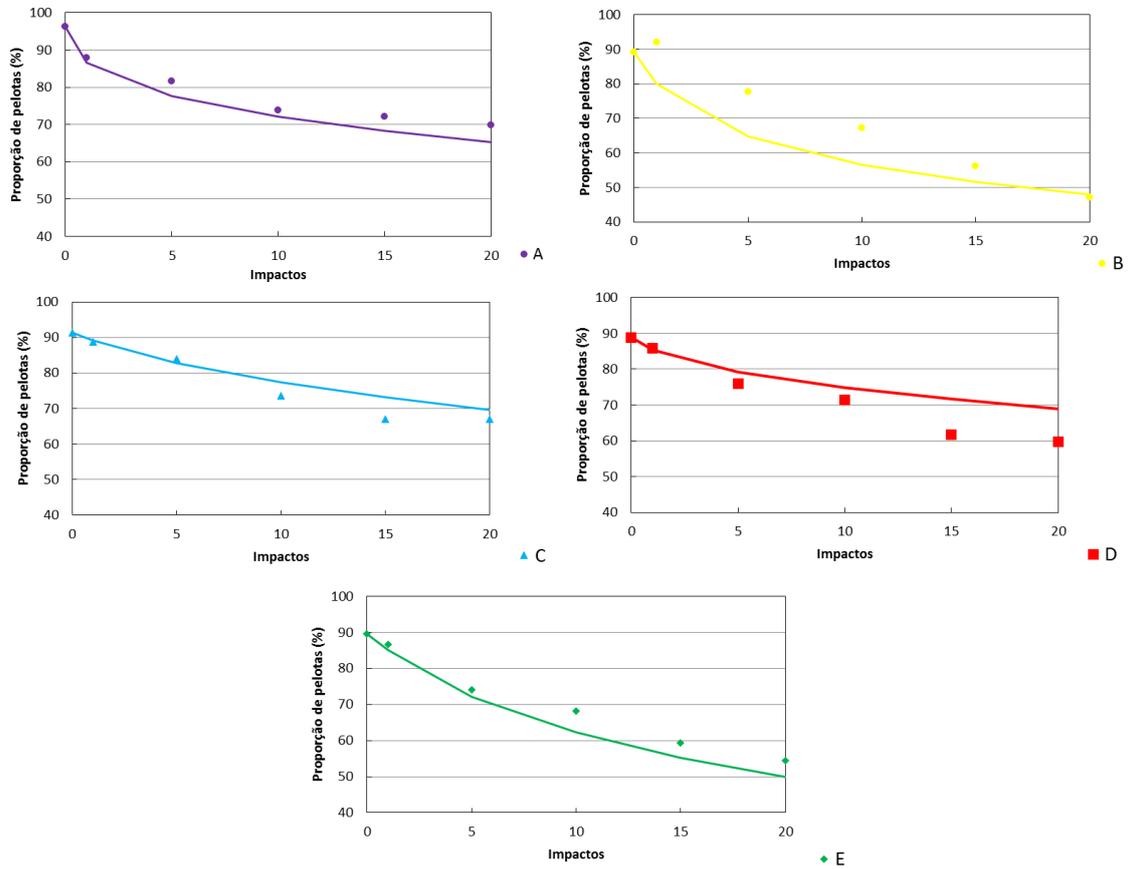


Figura V.73 – Variação da proporção de pelotas com o número de impactos no ensaio de transferência, para as amostras A, B, C, D e E, sendo símbolos os dados experimentais e linhas os dados simulados

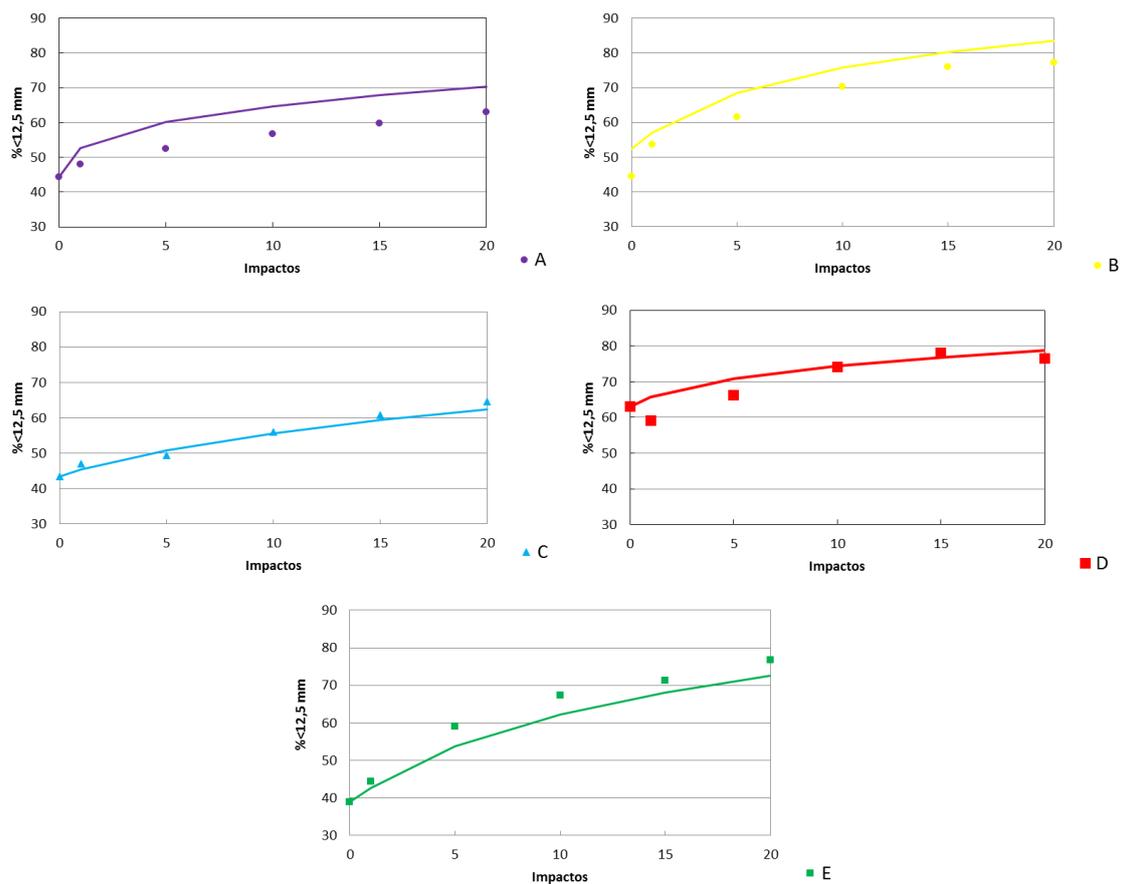


Figura V.74 – Variação da proporção (%) de pelotas menores que 12,5 mm, com o número de impactos no ensaio de transferência, para as amostras A, B, C, D e E, sendo símbolos os dados experimentais e linhas os dados simulados

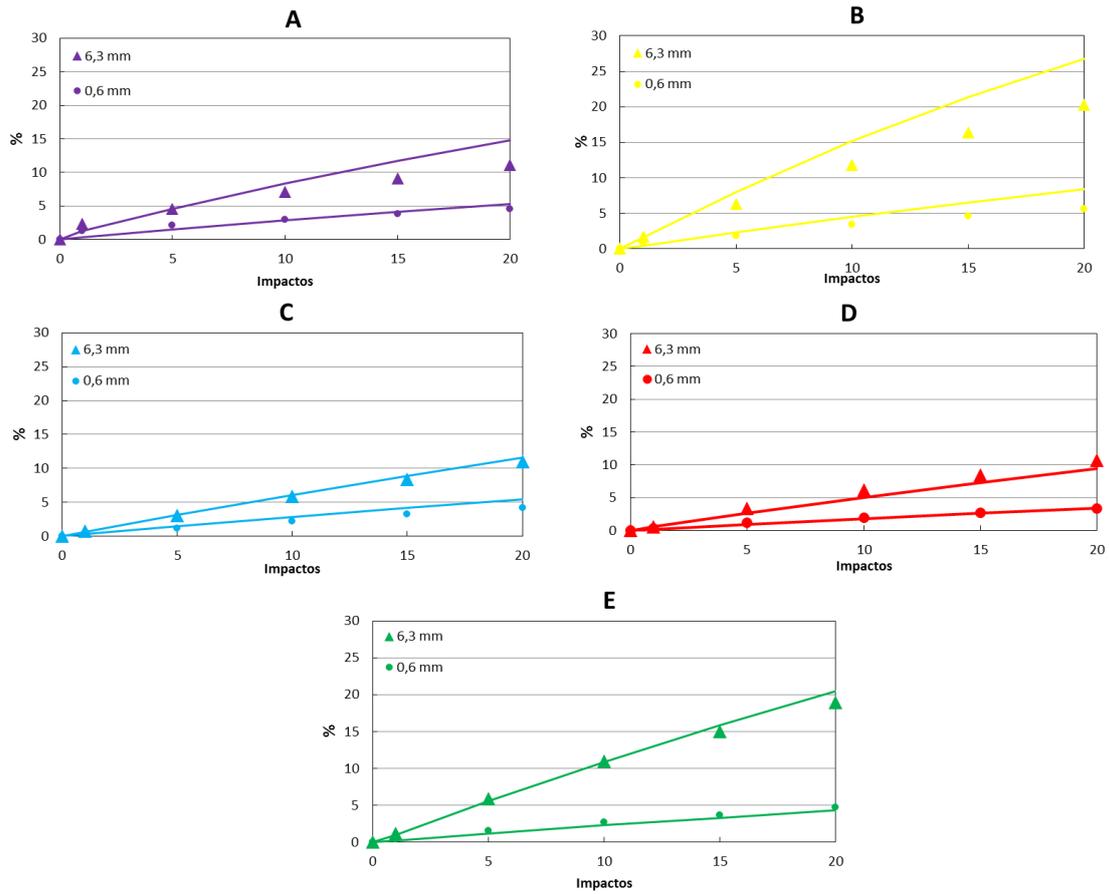


Figura V.75 – Variação da proporção (%) de pelotas menores que 6,3 e 0,6 mm, com o número de impactos no ensaio de transferência em laboratório, para as amostras A, B, C, D e E, sendo símbolos os dados experimentais e linhas os dados simulados

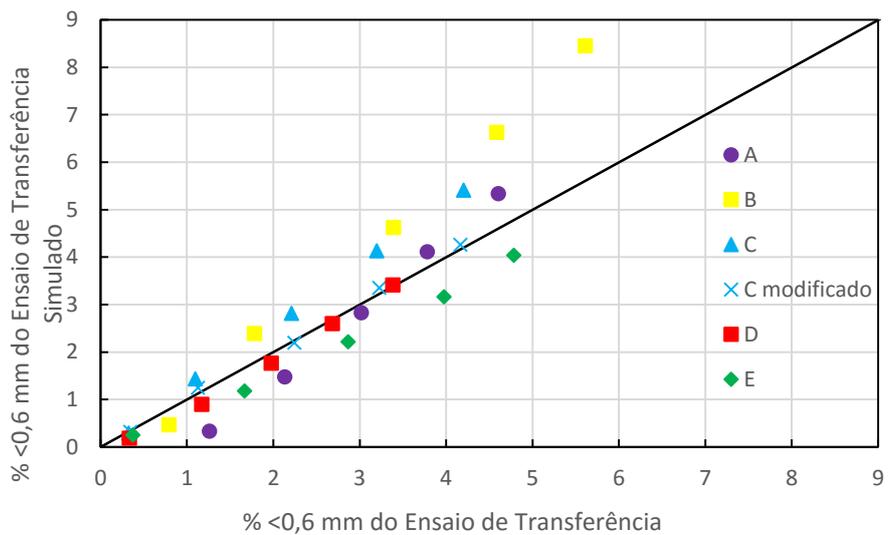


Figura V.76 – Comparação dos dados experimentais do percentual de material menor que 0,6 milímetros, das pelotas A, B, C, D, e E, gerado nos impactos 1, 5, 10, 15 e 20, do ensaio de transferência (simulação de manuseio), e da pelota C no ensaio de transferência modificado, com os valores das mesmas pelotas no ensaio de transferência simulado

## VI. CONCLUSÕES

Primeiramente, pôde-se concluir, durante os ensaios de caracterização, que as análises mineralógicas das pelotas possuem ótima relação com o resultado do ensaio de compressão ISO. Exceção foi a amostra B, a qual apresentou indícios de envelhecimento que comprometeram a análises mineralógica e estrutural.

Meyer (1980), propõe que a resistência física das pelotas é influenciada pela quantidade de vazios (poros) das mesmas. A partir dos ensaios de medida de porosidade, se conclui que essa proposição é válida, tanto em relação a quantidade como em relação ao tamanho dos poros para resistência à compressão (ISO 4700). Entretanto, não obteve correlação com os resultados para a suscetibilidade aos impactos simples, bem como com a previsão do modelo para a degradação.

Em seguida, conclui-se que a caracterização das pelotas ocupa posição central na modelagem e simulação das mesmas. Apesar de excessivamente laboriosa, a metodologia de caracterização proposta no presente trabalho se mostrou bem eficaz. Acredita-se que seja possível simplificá-la, condensando e ajustando a fim de uma possível aplicação na rotina das indústrias, visto que muitos testes podem ser suprimidos, ou presumidos como constantes para todas as pelotas. Além disso, há possibilidade de se adaptar ou criar novos equipamentos que possibilitem a obtenção dos parâmetros necessários para o modelo que sejam de mais fácil / rápida execução.

Também foi possível concluir que a metodologia de ensaios proposta pela ISO não contribuiu para a calibração e validação do modelo, se mostrando, sozinha, ineficaz na previsão da degradação de pelotas queimadas de minério de ferro. Os resultados dos testes de caracterização de resistência mecânica (Tabela V.9), como tamboramento, abrasão e compressão individual de pelotas, não obtiveram relação com a degradação observada nos ensaios de transferência realizados em laboratório (Figuras V.62 a V.65).

Ainda em relação à caracterização, a diferença de aspecto e comportamento mecânico entre cacos e pelotas, como observada por Silveira (2012), foi determinante para a necessidade de uma metodologia de caracterização distinta destes. Vale ressaltar que cacos possuem comportamentos típicos de minérios, enquanto pelotas se comportam como materiais manufaturados, apresentando diferentes respostas aos ensaios, como pôde ser evidenciado em todo trabalho.

Também se conclui que, contrariando o que havia sido previamente observado para minérios (Tavares, 2009), há diferença de comportamento da pelota de acordo com o modo de impacto. Sendo assim, a suscetibilidade à fratura das pelotas depende do tipo de carregamento.

Então, se determinou a variação do parâmetro gama ( $\gamma$ ) como dependente do tamanho da partícula e do tipo de impacto, onde os impactos simples necessitaram de menores valores de gama para serem bem ajustados.

Foi proposto o uso dos mesmos parâmetros na função quebra para todas as pelotas, variando apenas a quebra por faixas de tamanho. Dessa forma, acredita-se que as pelotas se fragmentam da mesma maneira. Além disso, também foi proposta uma nova equação que representa a relação entre  $t_{10}$  e a energia de impacto para pelotas, com a qual são melhor representados os impactos de baixa magnitude. Ainda em relação a fragmentação volumétrica, foi proposto um mesmo padrão de fragmentação para cacos, sendo a mesma função para todas as amostras e tamanhos, ou seja, não variando nem com o tamanho nem com a amostra.

Em relação a fratura superficial (abrasão), foi proposta uma nova equação, que depende da energia de impacto, bem como do tamanho da pelota. Ainda se propôs a mesma equação da abrasão de pelotas para cacos, também dependente da energia de impacto e do tamanho da partícula, onde é modificado apenas um fator dependente de cada tipo de amostra.

A equação da energia de fratura foi modificada do modelo original de Tavares e Carvalho (2008), onde foi calibrada para a suscetibilidade a impactos simples e simplificada pela redução de um parâmetro. Em relação ao desvio-padrão ( $\sigma$ ), este passou a ser modelado, deixando de ser constante, variando para cada faixa de tamanhos.

O modelo mostrou capacidade em prever, com bastante confiança, a geração dos fragmentos em cada etapa de um circuito de manuseio, com diferentes quedas, para diferentes amostras de pelotas. Foi possível concluir que, dentre as amostras analisadas, a Pelota D apresentou os melhores resultados em relação a geração de finos (quantidade gerada de material menor que 6,3 mm e 0,6 mm) para o ensaio de transferência realizado (20 impactos de, aproximadamente, 82,4 J/kg). No entanto, essa pelota, de acordo com os resultados dos ensaios padronizados pela ISO, não apresentava elevada resistência mecânica. Já a Pelota B, que apresentava elevada resistência à degradação (segundo os ensaios ISO), teve o pior desempenho dentre as pelotas analisadas, nos ensaios de manuseio em laboratório. Além disso, é possível avaliar a tendência da resistência das pelotas com os sucessivos impactos. A Pelota A apresentou, comparativamente com as outras pelotas, elevada geração de material fino nos primeiros impactos. Ainda de forma comparativa, diminuiu a taxa de geração de finos com a sucessão dos impactos, apresentando praticamente a mesma quantidade de material menor que 6,3 mm que a Pelota D após o 20º impacto. Sendo assim, o modelo evidencia que a Pelota A não é a mais

indicada para circuitos de manuseio menores (com poucas quedas), mas para circuitos maiores (com maior quantidade de quedas).

Dessa forma, o modelo mostra potencial de se tornar uma ferramenta indispensável para tomadas de decisão sobre modificações de circuitos de manuseio, manutenção de fornos e otimização de usinas pelletizadoras, a fim de se obter a melhor pelota para cada cliente.

## **VII. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Devido a dificuldade de se caracterizar a suscetibilidade à fratura das pelotas aos impactos simples com elevadas energias, sugere-se realizar ensaios com maiores amplitudes energéticas. Além disso, também seria interessante aumentar a faixa de tamanhos estudada, a fim de melhor analisar o comportamento dos diferentes tamanhos de pelotas aos impactos simples.

Outra sugestão, é a de implantar um mecanismo de avaliação do efeito do envelhecimento no modelo, visto que, caso aplicado, pode ser uma variável importante.

Tendo em vista o grande potencial de uso, este pode ser aplicado a análise da influência da composição mineralógica, composição química e aspectos metalúrgicos nas propriedades fragmentivas das pelotas.

Também pode-se explorar a aplicação de técnicas de micro ou nanotomografia para se avaliar a propagação de trincas e aumento de vazios nas pelotas. É possível estudar a forma de quebra das diferentes pelotas, analisando sua forma ao tipo de impacto sofrido, ao tipo de pelota ou à quantidade de trincas e vazios previamente observados.

## VIII. REFERÊNCIAS

BARRIOS, G. K. P., 2010, Estudo da quebra de leitos de partículas aplicado à modelagem generalizada da cominuição. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro.

BOECHAT, F. O., 2013, Simulação da degradação mecânica de pelotas de minério de ferro em forno de redução direta usando o método dos elementos discretos. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro.

COSTA, R. V. P. 2008. Otimização da resistência à compressão de pelotas de minério de ferro para redução direta pela aplicação de projeto robusto. Dissertação de Mestrado, REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

CUNHA, E. R., Modelagem mecanicista de britadores de impacto de eixo vertical. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE, Rio de Janeiro.

DWARAPUDI, S., DEVI, T. U., MOHAN RAO, S., RANJAN, M., 2008, Influence of pellet size on quality and microstructure of iron ore pellets , ISIJ International, v. 48, nº 6, 768-776.

EVERTSSON, C. M., BEARMAN, R.A., 1997, Investigation of interparticle breakage as applied to cone crushing. Minerals Engineering, 10. 199-214.

FAGERBERG, F., SANDBERG, N., 1973, Degradation of lump ores in transport, Proc. of 2nd Int. Symp. On Transportation and Handling of Minerals, Rotterdam, Netherlands, v. 2, 128-156.

FELDDKAMP, L. A., DAVIS, L. C., KRESS, J. W., Pratical cone beam algorithm, J Opt Soc Am A, vol. 1, 1984, p. 612-619.

FIGUEIRA, R. M., CASTRO, L. F. A., TAVARES, R. P., 1985, *Princípios Básicos e Processos de Fabricação do Gusa ao Aço Líquido*, Belo Horizonte: Escola de Engenharia - UFMG.

FONSECA, C. F.; FERREIRA, H. O.; OTAVIANO, M. M.; PERIN, V., 2009, *Influência da dosagem de carvão na qualidade das pelotas queimadas*. 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto - MG.

FONSECA, M. C., 2004, "Influência da distribuição granulométrica do pellet feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta". Dissertação de Mestrado. REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

FONSECA, V.O., 2003, *Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO*. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT da Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais.

FORTES, F.F., PEREIRA, C.A., 2012, *Manuseio, estocagem e qualidade do minério de ferro*, *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 117-122, abr.-jun..

FORTES, F. F.; FIGUEIREDO, A. C., 2006, *A interferência de atividades logísticas na qualidade do produto: um estudo de caso em uma empresa do setor de mineração*. In: XXVI ENEGEP. Fortaleza. Anais. Fortaleza: CUBO.

FUERSTENAU, M. C., HAN, K. N., 2003, *Principles of mineral processing*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME).

GARIGLIO, E., KLEIN, M., 1996, *Pelotização de Minérios de Ferro*, CIA Vale do Rio Doce, Brasil.

GEET, M. V., SWENNEN, R., WEVERS, M., *Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocuss X-ray computerised tomography*. *Sedimentary Geology*, vol. 132, 2000, pp. 25-36.

GOODWIN, P. J., RAMOS, C. M., 1985, Design of belt conveyors in bulk terminal applications, *Bulk Solids Handling* 5 (6), 1061-1066.

GOODWIN, P.J., RAMOS, C. M., 1987, Degradation of sized coal at transfer points, *Bulk Solids Handling* 7 (4), 517-534.

ISO 3271, 2009, Pelotas de minério de ferro como insumo para alto-forno e redução direta - Determinação dos índices de tamboramento e abrasão.

ISO 4700, 2010, Pelotas de minério de ferro como insumo para alto-forno e redução direta - Determinação da resistência à compressão.

ISO 4701, 2009, Minérios de ferro e pré-reduzidos - Determinação da distribuição granulométrica por peneiramento.

KING, R. P., 2001, Modeling and simulation of mineral processing systems, Butterworth-Heinemann.

LOPES, F. S., 2004, Estudo do fenômeno de colagem das pelotas Samarco durante o processo de redução direta. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT da Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais.

MARTINS, M., 2013, Análise da degradação intempérica de pelotas de minério de ferro, Projeto de Graduação. Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro.

MEYER, K., 1980, Pelletizing of Iron Ores, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Germany.

MONTEIRO, A. M., BRAGA, A.P., CARVALHO, B.P.R., Modelagem neural de um processo de produção de pelotas de minério de ferro. ABM, 2003.

MOURA, M. J., FIGUEIREDO, M. M., Aplicação das técnicas de picnometria de gás e de porosimetria de mercúrio à caracterização da madeira de *E. Globulus*. *Silva Lusitana* 10.2 (2002): 207-216.

NAPIER-MUNN, T.J., MORRELL, S., MORRISON, R.D., KOJOVIC, T., 1996, Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization, University of Queensland, Brisbane.

NORGATE, T.E., TOMPSITT, D.F., BATTERHAM, R.J., 1986, Computer simulation of the degradation of lump ores during transportation and handling, 2nd Int. Conf. of Bulk Material Storage, Handling and Transportation, Wollongong, Australia, pp.89-93.

NUNES, S. F., 2007, Influência da carga circulante do pelotamento na qualidade física das pelotas cruas e queimadas da Samarco Mineração. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT da Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais.

OOSHIMA, T., KURIHARA, J., HAYASE, K., SATOO, Y., 1981, Minimization of degradation of sintered ore during transportation, 3rd International Symposium on Agglomeration, Nuremberg, Germany, 1112 - 1124.

PENA, E. Q., 2011, Operações de Pelotização, In: Curso de Especialização em Sistemas Mínero-Metalúrgicos, Valer/Vale/Fundação Gorceix, Ouro Preto, Minas Gerais.

PEREIRA, J. G., 2012. Avaliação da utilização de diferentes materiais para diminuição da tendência de colagem de pelotas durante o processo de redução direta. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SÁ, K. G., COSTA, G. M., VIEIRA, C. B., 2004, Efeito da composição mineralógica na resistência à compressão de pelotas de minério de ferro, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.1, n.2, p. 18-22.

SAHOO, R. K., WEEDON, D. M., ROACH, D., 2002, Experimental study of several factors effecting Gladstone Port Authority's lump degradation, Bulk Solids Handling, v. 22, 356-361.

SAHOO, R. K., WEEDON, D. M., ROACH, D., 2003, Effect of different types of impact surface on coal degradation, 4th Int. Conf. for Conveying and Handling of Particle Solids, May 26-31, Budapest, Hungary, v. 1, 8.45-8.50.

SAHOO, R., 2007, Degradation characteristics of steel making materials during handling, Powder Technology, v. 176, 77-87.

SAHOO, R., ROACH, D., 2003, Degradation modeling of Central Queensland weathered coal, 12th Int. Conf. on Coal Science, Cairns, Australia, 1-10.

SAHOO, R., ROACH, D., 2005, Quantification of lump coal breakage during handling operation at the Gladstone port, Chemical Engineering and Processing, v. 44, 797-804.

SCHÖNERT, K. 1972. Role of fracture physics in understanding comminution phenomena. Trans. SME/AIME. 252. 21-26.

SILVA, A. M., 2006, Caracterização do processo de degradação de uma fibra de poliamida utilizada como meio filtrante na indústria mineral. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT da Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais.

SILVA, M. C. C., 2007, Relações entre microestrutura, composição, resistência à ruptura e mobilidade de clínquer de Cimento Portland, Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SILVEIRA, M. A. C. W., 2012, Modelagem da degradação de pelotas de minério de ferro durante o manuseio e transporte, Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SINFERBASE, 2014, Relatório Sinferbase/USGS/DNPM, Anual Consolidado de 2013, Sindicato Nacional da Indústria da Extração de Ferro e Metais básicos, Brasil. Acessado em 20 de novembro de 2015, <http://sinferbase.com.br/relatorios.php>.

SHI, F., KOJOVIC, T., LARBI-BRAM, S., MANLAPIG, E., 2009, Development of a rapid particle breakage characterization device - The JKRBT. *Minerals Engineering*, 22, 602-612.

TAVARES, L. M. M., 1997, Microscale investigation of particle breakage applied to the study of thermal and mechanical predamage. Tese de doutorado, University of Utah, EUA.

TAVARES, L. M., 2003, Caracterização tecnológica de amostras de minério de cobre de Salobo usando a Célula de Carga de Impacto COPPE, Relatório de Projeto PEMM4535, Fundação COPPETEC, 22 p.

TAVARES, L. M., 2004, Optimum routes in particle breakage by impact, *Powder Technology*, v. 142, 81-91.

TAVARES, L. M., 2007, Breakage of particles: Quasi-Static. In: SALMAN, A.D., GHADIRI, M. and HOUNSLOW, M.J. (eds.), *Handbook of Powder Technology: Particle Breakage*, 1 ed. Amsterdam: Elsevier B.V, v. 12. pp. 3-68.

TAVARES, L. M., 2009, Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation, *Powder Technology*, v.190, 327-339.

TAVARES, L. M., 2011, Previsão da degradação de pelotas de minério de ferro durante o manuseio e transporte. Relatório Final de Projeto PEMM12178, Fundação COPPETEC, 148 p.

TAVARES, L. M., CARVALHO, R. M., 2007, Impact work index prediction from continuum damage modeling of particle fracture, *Minerals Engineering* 20, 1368-1375.

TAVARES, L. M., CARVALHO, R. M., 2008, Modeling iron ore degradation during handling, 3rd International Meeting on Iron making and 2nd International Symposium on Iron Ore, September 22-26, São Luis City -Maranhão State - Brazil.

TAVARES, L. M., CARVALHO, R. M., 2009, Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills, *Minerals Engineering* 22, 650–659.

TAVARES, L. M., CARVALHO, R. M., 2011, Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics, *International Journal of Mineral Processing*, v. 101, p. 21-27.

TAVARES, L. M., CARVALHO, R. M., PEREIRA, H. C., OTAVIANO, M. M., BIANCHI, M. R., PEREIRA, B. C. E., 2015, Degradação mecânica de pelotas de minério de ferro durante o manuseio e transporte. Parte 1: Modelo matemático e simulador. 70º Congresso Anual ABM, 17-19 de agosto, Rio de Janeiro - RJ - Brasil.

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

TAVARES, L. M., KING, R. P., 2002, Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics, *Powder Technology*, v.123, n.2–3, 138–146.

TAVARES, L. M., LIMA, A. S., 2006, Célula de carga de impacto na caracterização de materiais para a cominuição. Parte 2: Fratura de partículas, *Revista da Escola de Minas de Ouro Preto*, v. 59(2), p. 165-172.

TEO, C. S., WATERS, A. G., NICOL, S. K., 1990, Quantification of the breakage lump materials during handling operation, *International Journal of Mineral Processing*, v. 30, 159–184.

TEO, C. S., WATERS, A. G., 1988, The effect of drop height and particle size on the extent of degradation of agglomerates, *CHEMECA'88, Australian Bicentennial Int. Conf. for the Process Industries*, Sydney, 665–670.

VINCE, A., MAHONEY, M., WATERS, A. G., 1987. An evaluation of the factors affecting the degradation of Mt. Newman lump ore, internal report.

WAGNER, D. T., ROUCO, H. V., GOMES, O. F. M., PACIORNIK, S., VIEIRA, M. B., 2009, Caracterização de pelotas de minério de ferro por microscopia digital e análise de imagens, *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, v.5, n.4, p. 215-218.

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

WRIGHT, J.K., 1976. The effect of firing conditions on the Strength of Hematite compacts. *Powder Technology*, v. 14, p. 103-113.

XIMENES, R. G., 2013, Simulação da degradação mecânica de pelotas de minério de ferro durante o manuseio, Projeto de Graduação. Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro.

ZADOR, A. T. Technology and economy of blending and mixing. *Bulk solids*. Vol. 11, n<sup>a</sup> 1. p. 193-208. Canada, 1991

## IX. ANEXO

A partir das análises macroscópicas e microscópicas das pelotas foi realizada uma caracterização detalhada de cada pelota.

### Pelota A

De acordo com as Figuras IX.1 e IX.2 a pelota A não apresenta macroporos e possui excelente distribuição da porosidade.

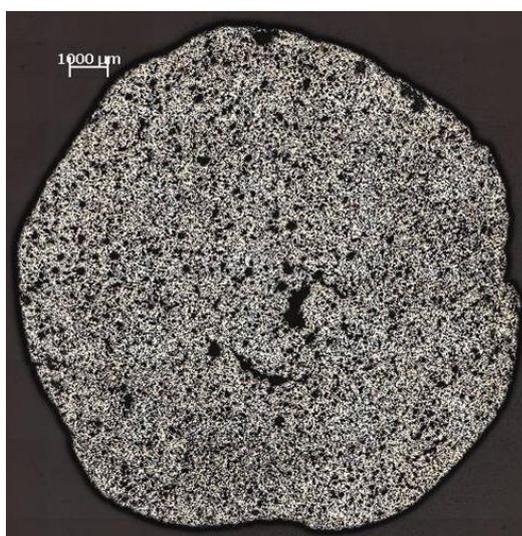


Figura IX.1 – Imagem da macroestrutura da pelota A



Figura IX.2 - Imagem da macroestrutura de corte longitudinal na amostra A. Magnificação de 50x

Uma faixa de imagens gerando um mosaico foi coletada, possibilitando a percepção de pouca concentração de poros na região central e ausência de magnetita, conforme pode ser observado na Figura IX.3.

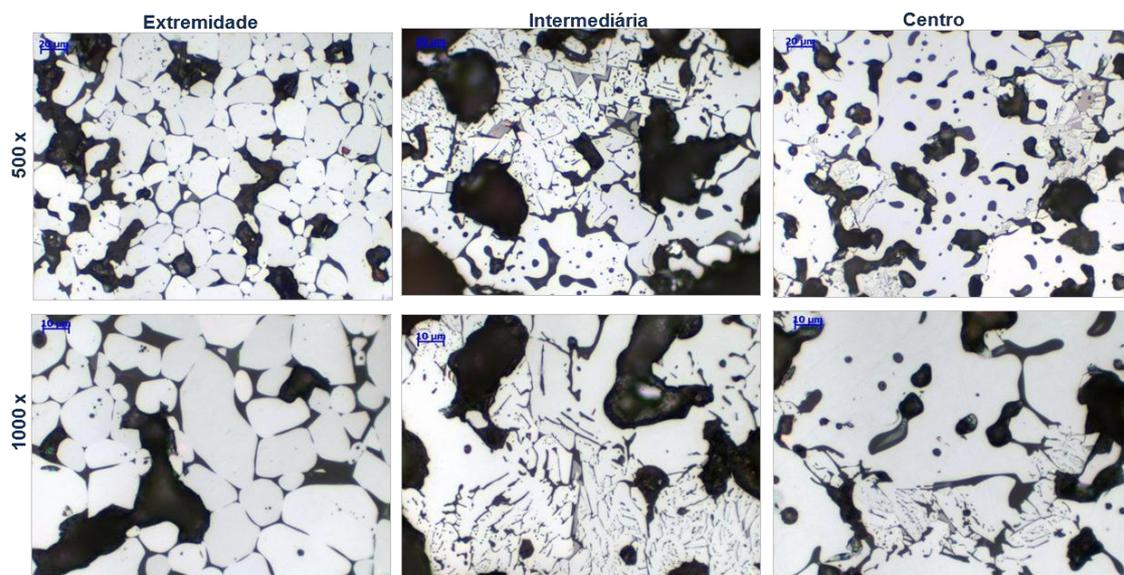


Figura IX.3 – Imagens da microestrutura da pelota A nas magnificações de 500x e 1000x, nas regiões de extremidade, intermediária e centro da pelota

A Tabela IX.1 mostra o percentual de fases microestruturais presentes na pelota A, classificadas por região avaliada e o valor médio de cada fase.

Tabela IX.1 – Percentual das fases microestruturais na pelota A

	Poros	Hematita	Magnetita	Silicatos	Ferritos
Extremidade	40,71	56,43	0,07	2,67	0,12
Intermediária	38,11	58,55	0,51	2,71	0,05
Centro	41,03	55,24	0,39	3,19	0,05
<b>Média</b>	<b>39,95</b>	<b>56,74</b>	<b>0,32</b>	<b>2,86</b>	<b>0,07</b>

Na região intermediária da pelota houve reoxidação da magnetita, mostrando que esta fase foi formada dentro da pelota, porém, devido às condições operacionais favoráveis, houve a reoxidação.

Imagens da superfície da pelota, Figura IX.4, mostram irregularidades nas bordas após embutida para avaliação macroscópica.

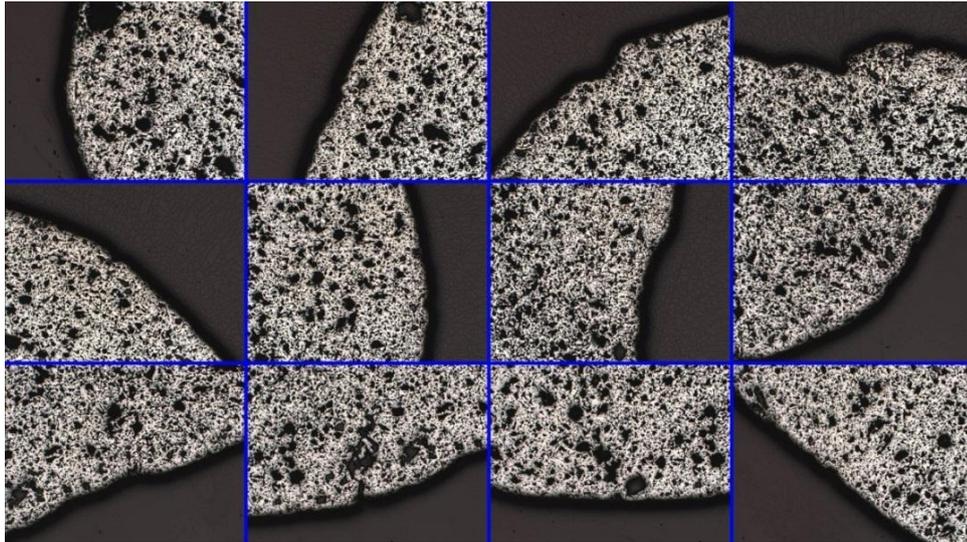


Figura IX.4 – Imagens da parte externa das pelotas mostrando o acabamento superficial da amostra A

Imagens selecionadas de pelotas da amostra A, Figura IX.5, mostram que, em geral, havia bom acabamento superficial e arredondamento das pelotas. Apenas uma pelota, dentre as selecionadas, apresentou trinca de resiliência.



Figura IX.5 – Imagens de macroestrutura da pelota A mostrando aspectos superficiais

#### Pelota B

A amostra B apresentou região central muito frágil durante a preparação metalográfica e partes da região central e intermediária da pelota soltaram-se durante a preparação para análise em microscópio. A Figura IX.6 apresenta a macroestrutura da Pelota B.

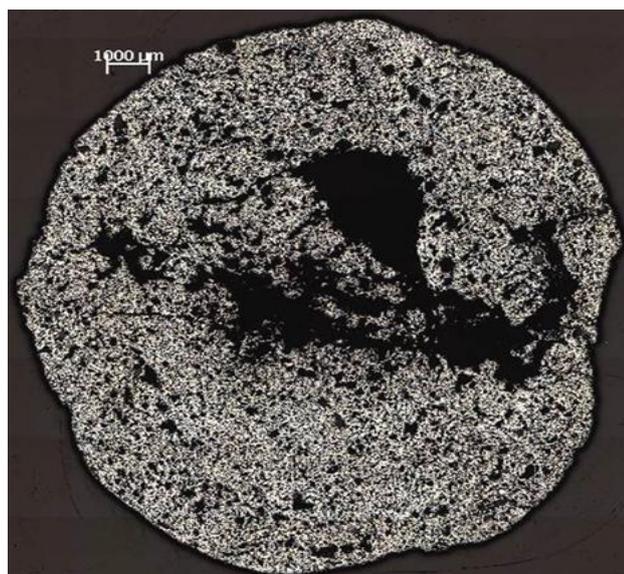


Figura IX.6 – Imagem da macroestrutura da pelota B

A Figura IX.7 ilustra um mosaico de uma faixa que atravessa a região central da pelota B. A amostra apresenta trincas interligando poros, o que pode ter afetado a resistência física do material.

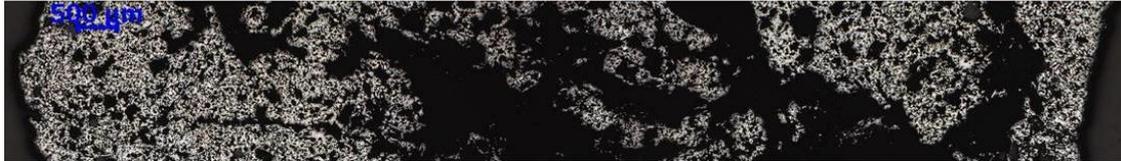


Figura IX.7 – Imagem da macroestrutura de corte longitudinal na amostra B. Magnificação de 50x

As imagens da Figura IX.8 revelam a microestrutura do material com magnificações de 500x e 1000x. As imagens foram coletadas em regiões onde havia falhas, causadas na etapa de preparação das amostras, devido à fragilidade do material. A região central e partes da região intermediária da pelota apresentaram magnetita. Na região intermediária ocorreu reoxidação da magnetita. O material apresenta boas reações de sinterização com crescimento e arredondamento dos grãos de ferro e formação de silicatos nos contornos de grão.

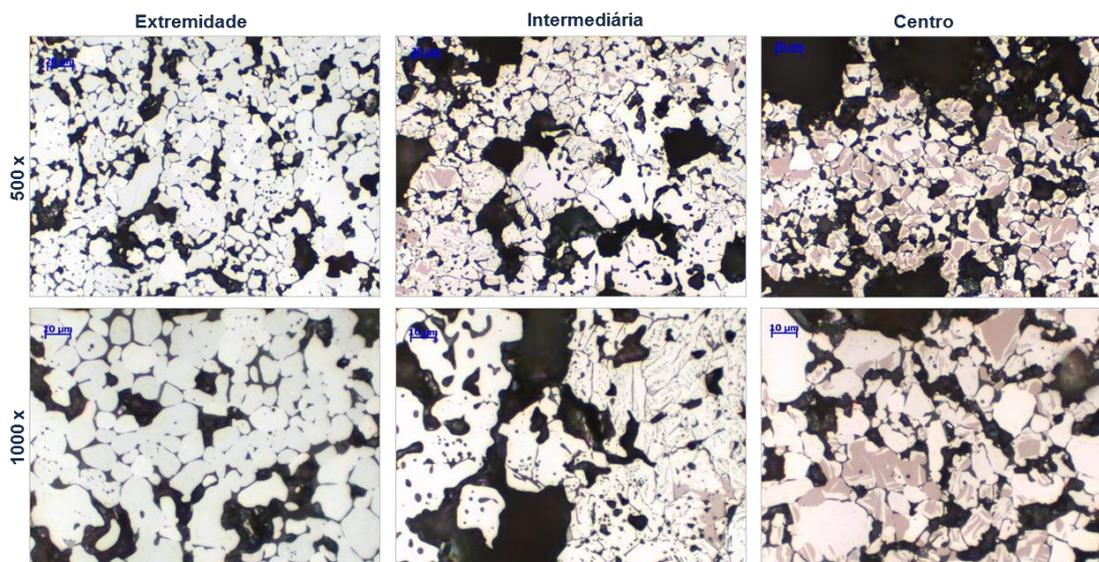


Figura IX.8 – Imagens da microestrutura da pelota B nas magnificações de 500x e 1000x, nas regiões: extremidade, intermediária e centro da pelota

A Tabela IX.2 mostra o percentual de fases microestruturais presentes na pelota B, classificadas por região avaliada, e o valor médio de cada fase.

Tabela IX.2 – Percentual das fases microestruturais na pelota B

	Poros	Hematita	Magnetita	Silicatos	Ferritos
Extremidade	44,44	53,6	0,32	1,1	0,04
Intermediária	57,21	35,78	6,11	0,87	0,01
Centro	72,17	18,53	8,11	0,87	0
<b>Média</b>	<b>57,94</b>	<b>35,97</b>	<b>4,85</b>	<b>0,95</b>	<b>0,02</b>

Avaliando a tabela, que apresenta o percentual de fases por região da pelota, observa-se elevada porosidade na região central e intermediária. Essa porosidade pode afetar a resistência física do material.

A Figura IX.9 mostra o acabamento superficial da pelota. Irregularidades observadas na superfície da pelota podem interferir em sua resistência à abrasão e, conseqüentemente, no índice de degradação do material avaliado.

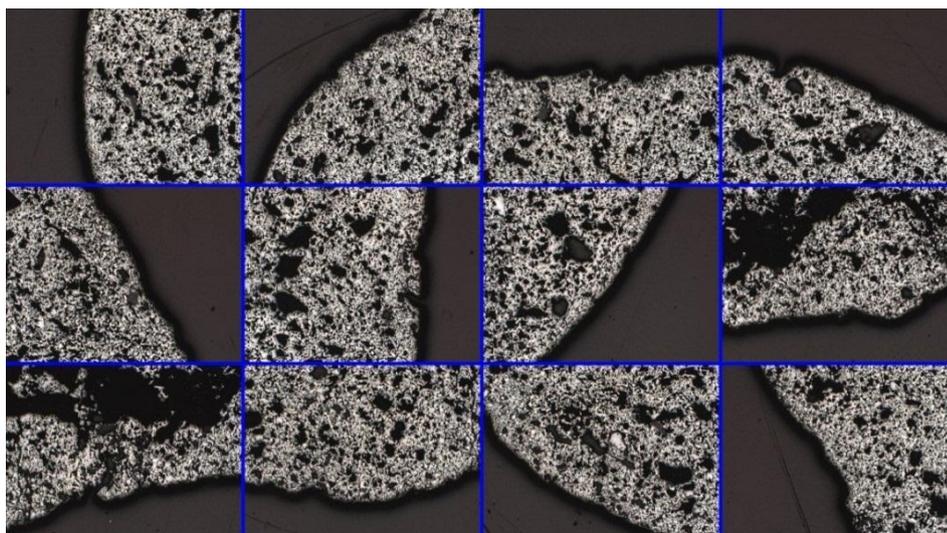


Figura IX.9 – Imagens da parte externa das pelotas mostrando o acabamento superficial da amostra B

A Figura IX.10 ilustra pelotas selecionadas, aleatoriamente, para avaliação do acabamento superficial. Poucas trincas foram identificadas, porém algumas pelotas apresentaram deformações.

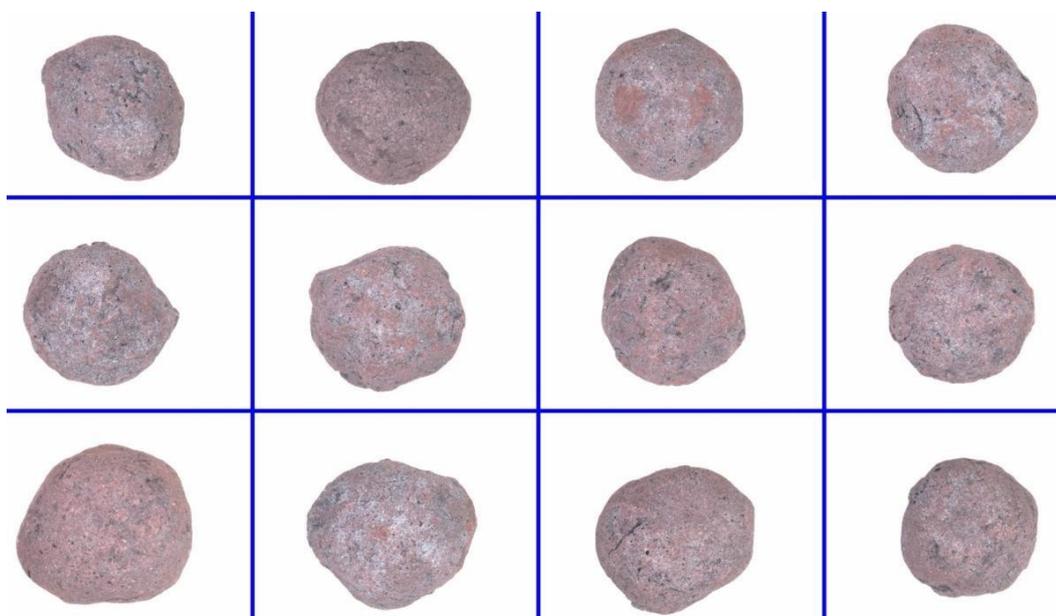


Figura IX.10 – Imagens de macroestrutura da pelota A mostrando aspectos superficiais

## Pelota C

A amostra C é pouco porosa, com alguns macroporos e sem formação de magnetita perceptível macroscopicamente. Alguns macroporos foram identificados na amostra e são, provavelmente, provenientes de insumos grosseiros, conforme pode-se observar nas Figuras IX.11 e IX.12.

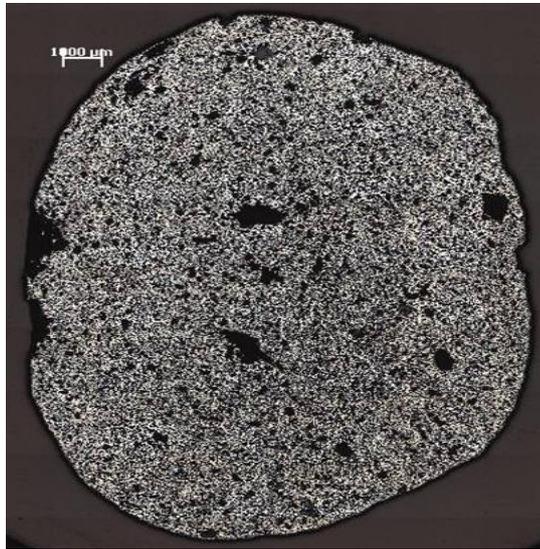


Figura IX.11 – Imagem da macroestrutura da pelota C

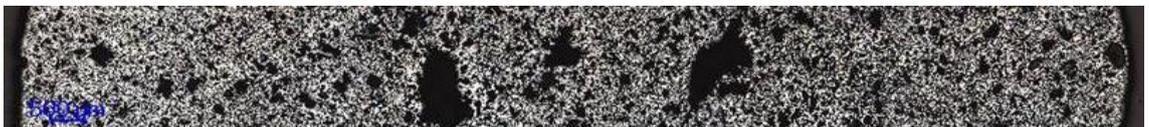


Figura IX.12 - Imagem da macroestrutura de corte longitudinal na amostra C. Magnificação de 50x

A microestrutura revela boas reações de sinterização, satisfatório crescimento de grão, ausência de magnetita e muitos silicatos. Essa microestrutura indica boa resistência física do material avaliado devido a excelentes condições de queima da pelota, conforme se observa na Figura IX.13.

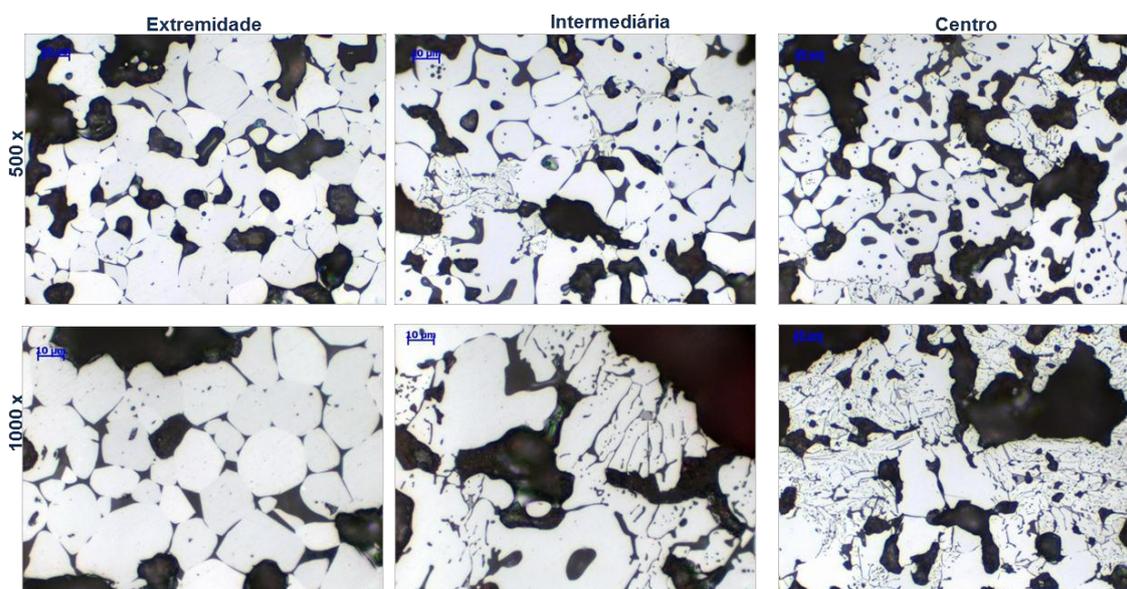


Figura IX.13 – Imagens da microestrutura da pelota C nas magnificações de 500x e 1000x, nas regiões de extremidade, intermediária e centro da pelota

A Tabela IX.3 apresenta o percentual de fases microestruturais presentes na pelota C, classificadas por região avaliada, e o valor médio de cada fase.

Tabela IX.3 – Percentual das fases microestruturais na pelota C

	Poros	Hematita	Magnetita	Silicatos	Ferritos
Extremidade	42,92	54,79	0,17	1,97	0,06
Intermediária	41,17	56,13	0,51	1,85	0,05
Centro	43,65	52,71	1,08	2,44	0,11
<b>Média</b>	<b>42,58</b>	<b>54,54</b>	<b>0,59</b>	<b>2,09</b>	<b>0,07</b>

Todas as fases microestruturais aparecem bem distribuídas em todas as regiões da pelota, o que pode resultar em boa resistência física do material, conforme pode ser observado na Figura IX.14.

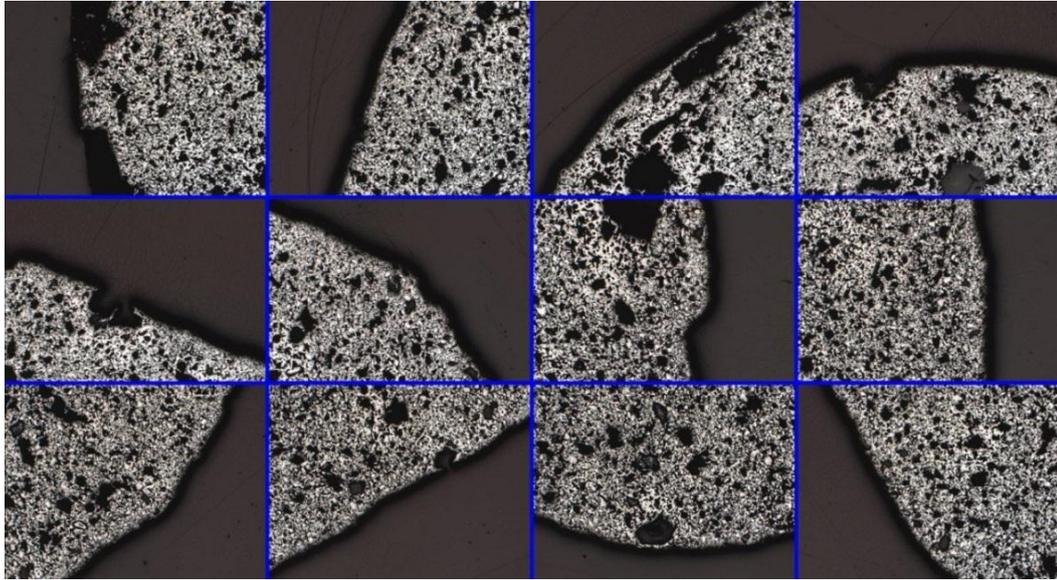


Figura IX.14 – Imagens da parte externa das pelotas mostrando o acabamento superficial da amostra C

A Figura IX.15 ilustra pelotas selecionadas, aleatoriamente, para avaliação do acabamento superficial. Uma certa quantidade de pelotas apresenta algumas irregularidades, além disso, trincas de resiliência foram identificadas.



Figura IX.15 – Imagens de macroestrutura da pelota C mostrando aspectos superficiais

#### Pelota D

As Figuras IX.16 e IX.17 indicam que a amostra D apresenta poucas trincas finas e pouca porosidade perceptível macroscopicamente.

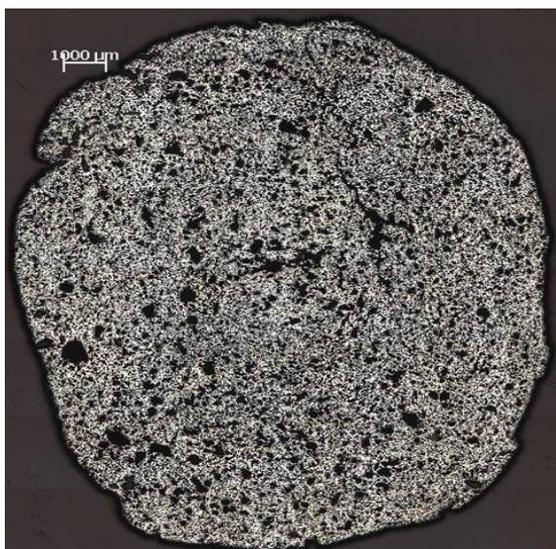


Figura IX.16 – Imagem da macroestrutura da pelota D



Figura IX.17 – Imagem da macroestrutura de corte longitudinal na amostra D.  
Magnificação de 50x

Existe leve tendência de concentração de poros no centro da pelota e alguns macroporos foram identificados. A microestrutura, apresentada na Figura IX.18, revela elevada microporosidade.

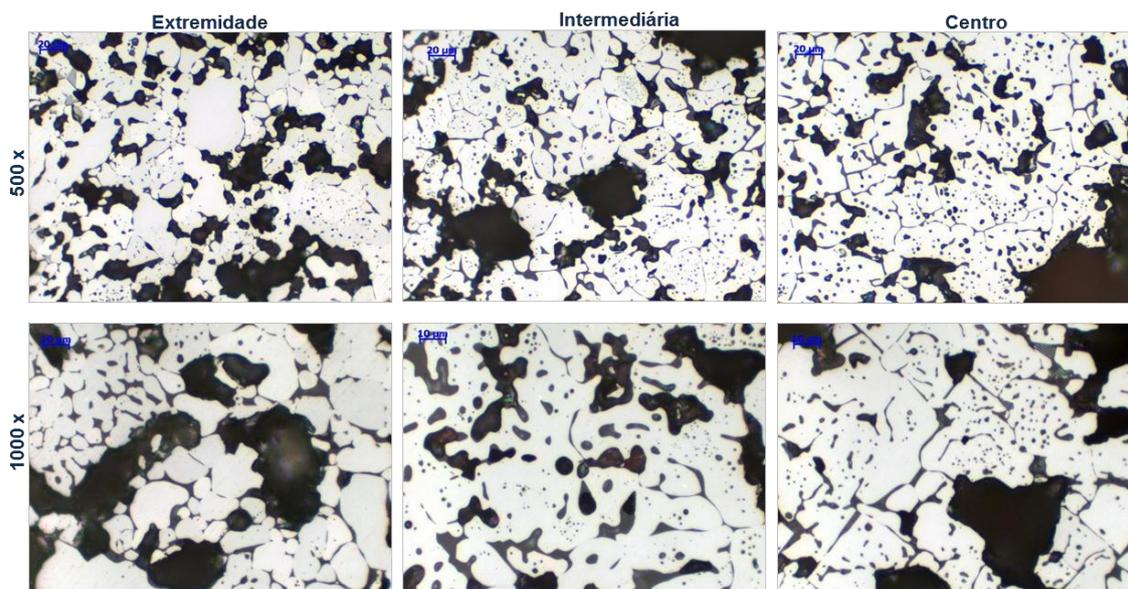


Figura IX.18 – Imagens da microestrutura da pelota D nas magnificações de 500x e 1000x, nas regiões de extremidade, intermediária e centro da pelota

A Tabela IX.4 apresenta o percentual de fases microestruturais presentes na pelota D, classificadas por região avaliada, e o valor médio de cada fase. O maior percentual de poros foi detectado na região de extremidade. Isto se deve à presença de macroporos provenientes de insumos identificados nesta região.

Tabela IX.4 – Percentual das fases microestruturais na pelota D

	Poros	Hematita	Magnetita	Silicatos	Ferritos
Extremidade	44,67	50,16	0,68	4,47	0,13
Intermediária	42,69	57,38	0,17	1,14	0,02
Centro	43,13	57,81	0,13	1,20	0,01
<b>Média</b>	<b>43,50</b>	<b>55,12</b>	<b>0,33</b>	<b>2,27</b>	<b>0,05</b>

A Figura IX.19 apresenta imagens da borda da pelota embutida, que mostram irregularidades na superfície. Estas podem acarretar em menor resistência mecânica, porém, o acabamento superficial do lote separado para avaliação macroestrutural revela bom estado.

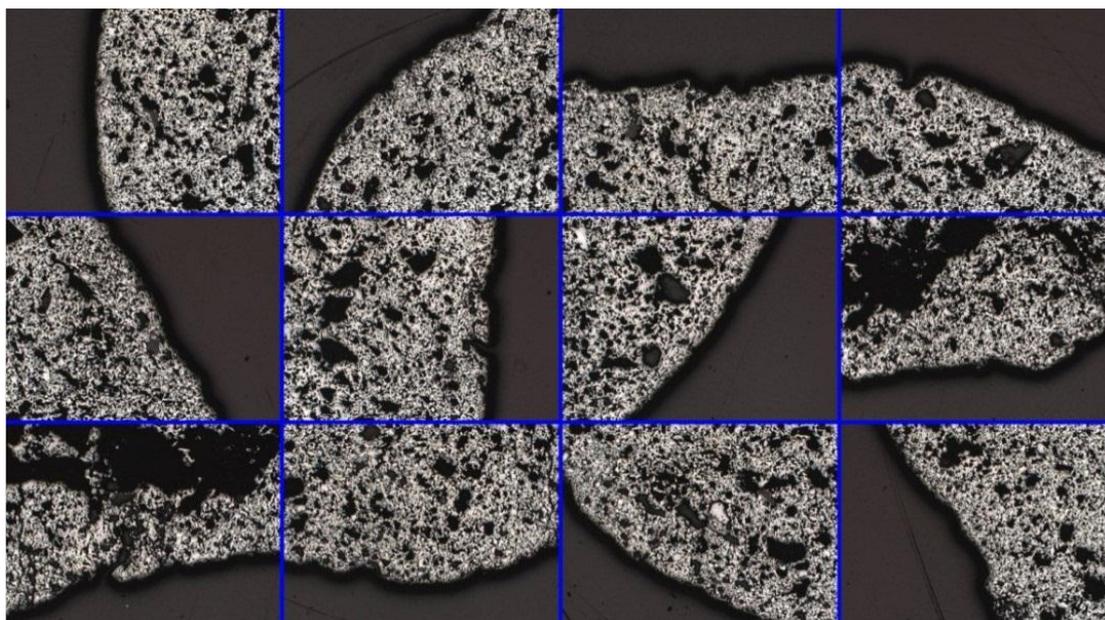


Figura IX.19 – Imagens da parte externa das pelotas mostrando o acabamento superficial da amostra D

A Figura IX.20 ilustra pelotas selecionadas, aleatoriamente, para avaliação do acabamento superficial que apresenta bom estado.

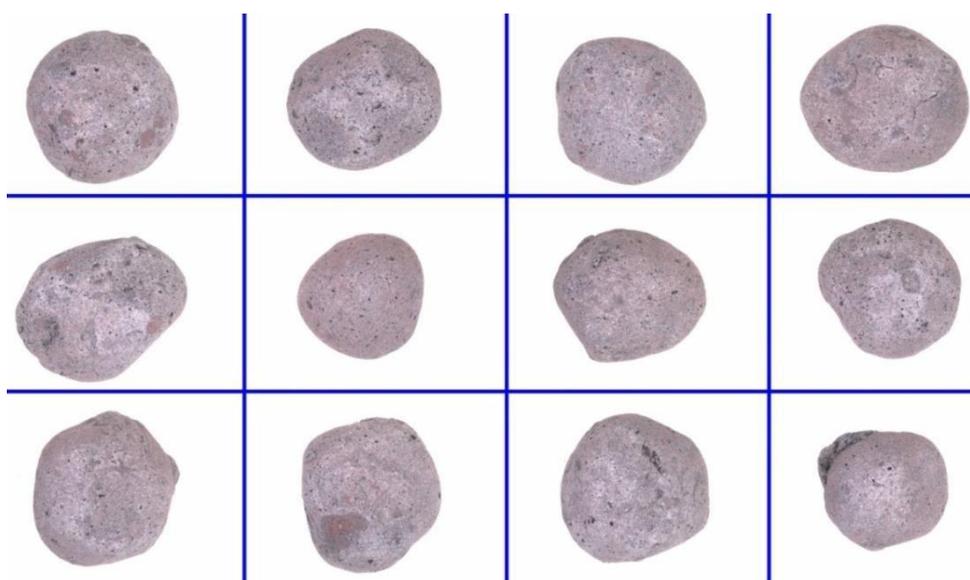


Figura IX.20 – Imagens de macroestrutura da pelota D mostrando aspectos superficiais

## Pelota E

As Figuras IX.21 e IX.22 indicam que a amostra E apresenta concentração de porosidade e magnetita na região central da pelota.

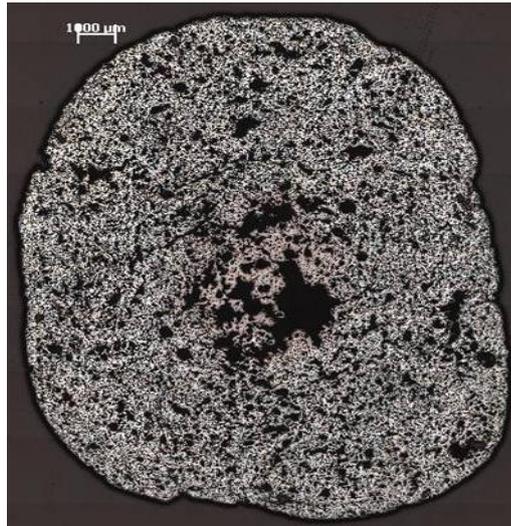


Figura IX.21 – Imagem da macroestrutura da pelota E



Figura IX.22 – Imagem da macroestrutura de corte longitudinal na amostra E.  
Magnificação de 50x

A Figura IX.23 indica que a porosidade do material é bem concentrada na região central, onde também é identificada magnetita. Na região intermediária existe reoxidação da magnetita. A ocorrência de magnetita e porosidade na região central podem acarretar em baixa resistência à compressão da pelota.

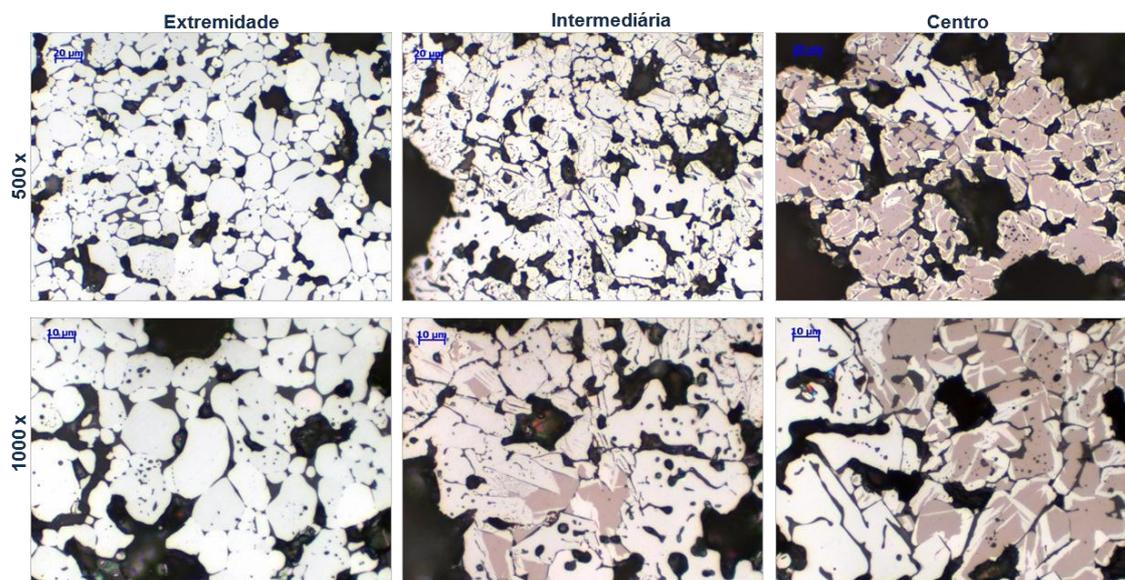


Figura IX.23 – Imagens da microestrutura da pelota E nas magnificações de 500x e 1000x, nas regiões de extremidade, intermediária e centro da pelota

A Tabela IX.5 apresenta o percentual de fases microestruturais presentes na pelota E, classificadas por região avaliada, e o valor médio de cada fase. Destaca-se a concentração de magnetita e poros no centro da pelota.

Tabela IX.5 – Percentual das fases microestruturais na pelota E

	Poros	Hematita	Magnetita	Silicatos	Ferritos
Extremidade	45,06	51,97	0,65	2,24	0,08
Intermediária	49,94	35,12	12,16	2,62	0,13
Centro	53,93	8,68	32,30	4,44	0,62
<b>Média</b>	<b>49,64</b>	<b>31,92</b>	<b>15,04</b>	<b>3,10</b>	<b>0,28</b>

A Figura IX.24 apresenta imagens da borda da pelota embutida, que mostram irregularidades na superfície que podem acarretar em menor resistência.

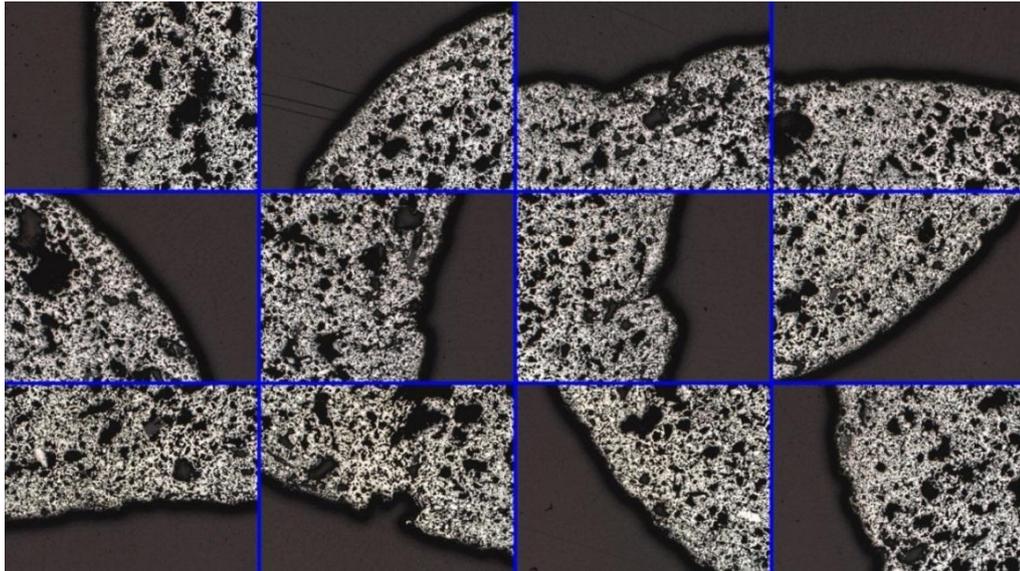


Figura IX.24 – Imagens da parte externa das pelotas mostrando o acabamento superficial da amostra E

A Figura IX.25 ilustra pelotas selecionadas, aleatoriamente, para avaliação do acabamento superficial. Este apresenta algumas trincas de resiliência e baixo grau de deformação nas pelotas. Estas trincas, aliadas à concentração, porosidade e ocorrência de magnetita podem relacionar-se ocasionando uma baixa resistência física do material.



Figura IX.25 – Imagens de macroestrutura da pelota E mostrando aspectos superficiais